

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JEAN CARLO DA CUNHA

**SISTEMA AUTOMÁTICO PARA REGULAÇÃO DE TENSÃO EM REDES DE
BAIXA TENSÃO**

JOINVILLE / SC

2012

JEAN CARLO DA CUNHA

**SISTEMA AUTOMÁTICO PARA REGULAÇÃO DE TENSÃO EM REDES DE
BAIXA TENSÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado para o cumprimento da ementa do curso Engenharia Elétrica da Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas – CCT.

Orientador: Marcello Mezaroba, Dr.

Co-orientador: Alessandro Luis Batschauer

JOINVILLE / SC

2012

JEAN CARLO DA CUNHA

por

**SISTEMA AUTOMÁTICO PARA REGULAÇÃO DE TENSÃO EM REDES DE
BAIXA TENSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia Elétrica/ Centro de Ciências Tecnológicas/ UDESC, Engenheiro Eletrecista, área de concentração em Automação e Sistemas.

Banca Examinadora

Orientador:

Dr. Marcello Mezaroba
UDESC/CCT (presidente/orientador)

Co-orientador:

Dr. Alessandro Luiz Batschauer
UDESC/CCT (coorientador)

Membro:

Dr. Fabiano Ferreira Andrade
UDESC/CCT

Membro:

Me. Rafael Luís Klein
UDESC/CCT

Joinville, (05/12/2012)

AGRADECIMENTOS

À minha família pelo amor, pela paciência, pela compreensão, por minha formação e pelo incentivo durante a realização de toda a graduação.

Ao Prof. Dr. Marcello Mezaroba pelo incentivo, pela acessibilidade, pela instrução e pelo conhecimento transmitido, o qual tornou possível a conclusão deste trabalho.

Aos mestrandos do nPEE (Núcleo de Processamento de Energia Elétrica) pelo conhecimento compartilhado.

Aos bolsistas do nPEE, pelas atividades realizadas.

Aos professores membros do nPEE e aos demais professores que compõe o Programa de Graduação em Engenharia Elétrica pelo conhecimento compartilhado.

À Universidade do Estado de Santa Catarina, especialmente ao Centro de Ciências Tecnológicas e ao Departamento de Engenharia Elétrica pela infra-estrutura concedida.

Aos amigos e familiares que, de uma forma ou de outra, contribuíram na realização deste trabalho.

RESUMO

DA CUNHA, Jean Carlo da Cunha. **Sistema Automático para Regulação de Tensão em Redes de Baixa Tensão**. TCC (Graduação em Engenharia Elétrica – Área: Automação de Sistemas) – Universidade do Estado de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica, Joinville, 2012.

O projeto propõe o desenvolvimento de um sistema automático de regulação de tensão para instalações em redes de baixa tensão. O sistema proposto deverá manter a magnitude da tensão de atendimento, por intermédio do controle da injeção de potência reativa no ponto de conexão.

O projeto utiliza a estrutura de um inversor trifásico de tensão a quatro fios, conectado em derivação com a rede de baixa tensão. O inversor é controlado em corrente, drenando duas parcelas de corrente, a primeira em fase com a tensão do ponto de conexão, responsável por controlar a tensão do barramento CC utilizando-se de potência ativa. A segunda parcela, em quadratura com a tensão do ponto de conexão, é responsável por regular o módulo dessa tensão no ponto de conexão utilizando-se de potência reativa.

Foram obtidos resultados de regulação com um conversor de 4,5 kVA, onde o mesmo foi capaz de regular a tensão no PAC(Ponto de acoplamento de carga) em 0,7 segundos. Não permitindo registros de tensão não adequada de atendimento.

Palavras-chave: Qualidade de Energia. Regulação de Tensão. Conversores Estáticos de Energia.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - (a) - Circuito básico de um compensador estático. (b) - Característica $V \times I$.	20
Figura 2 - (a) Compensador estático avançado (STATCOM) baseado em um inversor de tensão; (b) Característica de operação $V \times I$.	21
Figura 3 - Regulador de tensão.	23
Figura 4 - Diagrama unifilar do regulador de tensão acoplado na rede.	25
Figura 5 - Inversor compondo a estrutura do regulador de tensão.	26
Figura 6 - Equivalente monofásico para o inversor com ponto médio.	26
Figura 7 - Representação monofásica do sistema.	32
Figura 8 - Impedância equivalente vista pelo regulador de tensão.	33
Figura 9 - Circuito considerado para o projeto do filtro de saída.	33
Figura 10 - Diagrama de bode do filtro de saída.	35
Figura 11 - Impedância equivalente vista pelo regulador de tensão.	35
Figura 12 - Circuito considerado sem a fonte de corrente.	36
Figura 13 - Variação da frequência de ressonância em função da indutância de rede.	37
Figura 14 - Gráfico de bode utilizando impedância LCL.	38
Figura 15 - Estrutura geral do conversor.	41
Figura 16 - Estrutura geral de controle.	43
Figura 17 - Estrutura da malha de corrente.	44
Figura 18 - Circuito referente a planta de corrente.	45
Figura 19 - Representação da potência ativa de entrada do conversor considerada no modelo.	46
Figura 20 - Circuito equivalente ao barramento CC e as perdas no conversor.	47
Figura 21 - Representação da entrada de corrente contínua no conversor.	49
Figura 22 - Planta equivalente de tensão diferencial.	49
Figura 23 - Circuito equivalente ao modelo de tensão do PAC.	50
Figura 24 - Circuito para calcular a tensão do PAC devido à tensão da rede.	51
Figura 25 - Circuito considerado para calcular a tensão no PAC devido a corrente do conversor.	51
Figura 26 - Circuito considerado para cálculo de VPAC devido a corrente na carga.	52

Figura 27 - Diagrama de blocos da planta de tensão no PAC.	53
Figura 28 - Circuito simulado para o modelo físico da planta VPAC.	54
Figura 29 - Circuito simulado para o modelo matemático da planta VPAC.	54
Figura 30 - VPAC do modelo físico, VPAC do modelo matemático, corrente injetada no modelo físico, corrente injetada no modelo matemático. (100 V/div, 10 A/div, 10 ms/div).	56
Figura 31 - Representação do conversor RMS para VDC.	57
Figura 32 - Comparação do sinal da onda triangular com o sinal de baixa frequência.	58
Figura 33 - Sensor de tensão.	58
Figura 34 - Diagrama de blocos da malha de corrente.	61
Figura 35 - FTMA da malha de corrente, não compensada, compensada e compensador.	63
Figura 36 - Estrutura física do controlador de corrente.	64
Figura 37 - Malha de tensão total do barramento CC.	65
Figura 38 - FTMA da malha de tensão total, não compensada, compensada e compensador.	67
Figura 39 - Malha de tensão diferencial do Barramento CC.	68
Figura 40 - FTMA da malha de tensão diferencial, não compensada, compensada e compensador.	69
Figura 41 - Malha de tensão no PAC.	71
Figura 42 - FTMA da malha de tensão no PAC, não compensada, compensada e compensador.	72
Figura 43 - Diagrama unifilar da estrutura simulada.	76
Figura 44 - Estrutura da carga simulada.	76
Figura 45 - Tensão no PAC com carga nominal e sem compensação (50 V/div, 5 ms/div).	78
Figura 46 - Tensão no PAC com carga desequilibrada e sem compensação (50 V/div, 5 ms/div).	79
Figura 47 - Estrutura de potência do conversor simulada.	80
Figura 48 - Estrutura da rede de distribuição e estrutura de geração de referências simulada.	81
Figura 49 - Estrutura de cargas simulada.	82
Figura 50 - Estrutura do controle de corrente com o modulador PWM simulada.	83
Figura 51 - Estrutura dos controladores de tensão do barramento CC simulada.	84
Figura 52 - Estrutura do controle de tensão no PAC simulada.	85
Figura 53 - Tensões no PAC e correntes no conversor utilizando a carga nominal e com compensação de tensão (50 V/div, 5 A/div, 5 ms/div).	86

Figura 54 - Tensões no PAC e corrente no conversor com carga desequilibrada e com compensação de tensão (50 V/div, 5 A/div, 5 ms/div).....	87
Figura 55 - Tensões no PAC e correntes no conversor na transição da carga nominal para a carga desequilibrada (100 V/div, 20 A/div, 60 ms/div).....	89
Figura 56 - Tensões eficazes no PAC na transição da carga nominal para desequilibrada (10 V/div, 60 ms/div).	90
Figura 57 - Tensão total e diferencial do barramento CC (5 V/div, 200 ms/div).	91
Figura 58 - Tensão no PAC na transição da carga nominal para desequilibrada (100 V/div, 100 ms/div).	92
Figura 59 - Tensões eficazes no PAC na transição da carga nominal para a carga desequilibrada. (5 V/div, 100 ms/div).	92
Figura 60 - Tensões barramento CC no momento da transição de carga nominal para a carga desequilibrada (200 V/div, 100 ms/div).	93
Figura 61 - Protótipo implementado.....	96
Figura 62 - Inversor compondo a estrutura do regulador de tensão.	97
Figura 63 - Unidade de potência utilizada.	97
Figura 64 - <i>Driver</i> SKHI 20opa utilizado em cada braço do conversor.	98
Figura 65 - Esquemático parcial da placa de comando do conversor.....	99
Figura 66 - Placa de comando do conversor.....	99
Figura 67 - Esquema parcial da placa de controle de tensão no PAC.	100
Figura 68 - Placa de controle de tensão no PAC.	100
Figura 69 - Placa de sensores de corrente.....	101
Figura 70 - Módulo digital utilizado para geração de referências.	102
Figura 71 - Esquemático parcial da fonte auxiliar de alimentação.	102
Figura 72 - Fonte de alimentação auxiliar.	103
Figura 73 - Estrutura implementada.	103
Figura 74 - Estrutura de carga implementada.	104
Figura 75 - Estimativas das impedâncias equivalentes da rede.	105
Figura 76 - Tensões no PAC sem a carga principal e sem compensação (50 V/div, 5 ms/div).....	106
Figura 77 - Corrente na rede sem a carga principal e sem compensação (1 A/div, 5 ms/div).	106
Figura 78 - Tensões no PAC com a carga principal e sem compensação (50 V/div, 5 ms/div).	107
Figura 79 - Correntes na rede com a carga principal e sem compensação (10 A/div, 5 ms/div).	108

Figura 80 - Tensões no PAC sem a carga principal e com compensação de tensão (50 V/div, 5 ms/div).	108
Figura 81 - Correntes na rede sem a carga principal e com compensação de tensão (5 A/div, 5 ms/div).	109
Figura 82 - Correntes no conversor sem a carga principal e com compensação de tensão (5 A/div, 5 ms/div). .	110
Figura 83 - Tensões no PAC com a carga principal e com compensação de tensão (50 V/div, 5 ms/div).	111
Figura 84 - Correntes na rede com a carga principal e com compensação de tensão (5 A/div, 5 ms/div).	111
Figura 85 - Correntes no conversor com a carga principal e com compensação de tensão (5 A/div, 5 ms/div)..	112
Figura 86 - Tensão no PAC, corrente na rede e corrente no conversor relativas a fase A, durante a desconexão da carga principal (50 V/div, 15 A/div, 50 ms/div).	116
Figura 87 - Tensão no PAC, corrente na rede e corrente no conversor relativas a fase B, durante a desconexão da carga principal (50 V/div, 15 A/div, 50 ms/div).	117
Figura 88 - Tensão no PAC, corrente na rede e corrente no conversor relativas a fase C, durante a desconexão da carga principal.(50 V/div, 15 A/div, 50 ms/div).	118
Figura 89 - Tensões eficazes no PAC durante a desconexão da carga principal (10 V/div, 50 ms/div).	119
Figura 90 - Tensões no barramento CC durante a desconexão da carga principal (100 V/div, 100 ms/div).	120
Figura 91 - Tensão no PAC, corrente na rede e corrente no conversor relativas a fase A, durante a conexão da carga principal (50 V/div, 15 A/div, 100 ms/div).	122
Figura 92 - Tensão no PAC, corrente na rede e corrente no conversor relativas a fase B, durante a conexão da carga principal (50 V/div, 15 A/div, 100 ms/div).	123
Figura 93 - Tensão no PAC, corrente na rede e corrente no conversor relativas a fase C, durante a conexão da carga principal (50 V/div, 15 A/div, 100 ms/div).	124
Figura 94 - Tensões eficazes no PAC durante a conexão da carga principal (10 V/div, 100 ms/div).	125
Figura 95 - Tensão no barramento CC durante a conexão da carga principal (100 V/div, 100 ms/div).	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1 kV (220 V/127 V).	16
Tabela 2 - Classificação das variações de tensão de curta duração.	18
Tabela 3 - Parâmetros de projeto	31
Tabela 4 - Parâmetros utilizados para validação do modelo da plana de VPAC.	55
Tabela 5 - Parâmetros do conversor para o projeto dos controladores.	60
Tabela 6 - Parâmetros fundamentais utilizados na simulação.	77
Tabela 7 - Cargas simuladas.	78
Tabela 8 - Tensões no PAC sem compensação de reativo.	79
Tabela 9 - Balanço de potência do sistema sem a carga principal e sem compensação de tensão.	113
Tabela 10 - Balanço de potência do sistema com a carga principal e sem compensação de tensão.	113
Tabela 11 - Balanço de potência do sistema sem a carga principal e com compensação de tensão.	114
Tabela 12 - Balanço de potência do sistema com a carga principal e com compensação de tensão.	114

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
EE	Energia Elétrica
FACTS	<i>Flexible AC Transmission Systems</i>
FTMA	Função de Transferência de Malha Aberta
GTO	<i>Gate Turn-Off Thyristor</i>
IGBT	<i>Isolated Gate Bipolar Transistor</i>
MC	Malha de Corrente
MME	Ministério de Minas de Energia
MVD	Malha de VD
MVPAV	Malha da VPAC
MVT	Malha de Tensão Total no Barramento CC
PAC	Ponto de Acoplamento de Carga
PRODIST	Programa de Distribuição
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
RMS	<i>Root Mean Square</i>
SSC	<i>Static Synchronous Series Compensator</i>
SSPC	<i>Static Synchronous Parallel Compensator</i>
STATCOM	<i>Static Compensator</i>
SVC	<i>Static Voltage Controller</i>
SVG	<i>Static VAR Generator</i>
TA	Tensão de Atendimento
TL	Tensão de Leitura
TR	Tensão de Referência
VD	Tensão Diferencial no Barramento CC
VPAC	Tensão no PAC
VT	Tensão Total no Barramento CC

LISTA DE SÍMBOLOS

C_b	Capacitância de um dos dois barramentos CC do conversor
C_{b+}	Capacitância do barramento CC positivo do conversor
C_{b-}	Capacitância do barramento CC negativo do conversor
C_f	Capacitância do filtro do conversor
d	Razão cíclica
f_{res}	Frequência de ressonância do filtro LC
f_{res_LCL}	Frequência de ressonância do filtro LCL
f_s	Frequência de comutação
i_c	Corrente do conversor no lado da rede
I_{eq}	Corrente equivalente
i_f	Corrente do conversor no lado do conversor
i_{Lf}	Corrente do conversor no lado do conversor
i_{rd}	Corrente na rede
L_f	Indutância do filtro do conversor
L_{rd}	Indutância série da rede
ma	Índice de modulação
P_o	Potência de saída do conversor
r_{rd}	Resistência série da rede
S	Interruptor
T_S	Período de comutação
V_B	Tensão total do barramento CC
v_c	Tensão no conversor, antes do filtro
v_{cf}	Tensão no capacitor que compõe o filtro do conversor
v_{des}	Tensão de desequilíbrio
v_L	Tensão no indutor que compõe o filtro do conversor
v_{L_med}	Tensão média no indutor
v_{rd}	Tensão da rede
V_{rd_pk}	Tensão de pico da rede
v_{PAC}	Tensão no PAC
ω_{rd}	Frequência da rede
Z_{rd}	Impedância série da rede

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	15
2 ESTRUTURA DE POTÊNCIA	24
2.1 DIAGRAMA GERAL DA ESTRUTURA DE POTÊNCIA	24
2.2 PROJETO DOS DISPOSITIVOS DE POTÊNCIA.....	25
2.3 PROJETO DO FILTRO DE ALTA FREQUÊNCIA.....	32
2.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	38
3 MODELAGEM E CONTROLE	39
3.1 ESTRATÉGIA DE COMPENSAÇÃO DA TENSÃO NO PAC.....	39
3.2 MODELAGEM.....	44
3.2.1 Modelo da Planta de Corrente.....	45
3.2.2 Modelo da Planta de Tensão Total do Barramento CC	46
3.2.3 Modelo da Planta de Tensão Diferencial do Barramento CC	48
3.2.4 Modelo da Planta de Tensão do PAC.....	49
3.2.5 Validação da Planta de Tensão do PAC	53
3.2.6 Modelo do Conversor de tensão RMS para Tensão Contínua	56
3.2.7 Modelo do Modulador PWM.....	57
3.2.8 Modelo dos Sensores de Tensão.....	58
3.2.9 Modelo do Sensor de Corrente	59
3.3 PROJETO DOS CONTROLADORES	59
3.3.1 Projeto do Controlador de Corrente.....	60
3.3.2 Projeto do Controlador de Tensão Total de Barramento	64
3.3.3 Projeto do Controlador da Tensão Diferencial do Barramento	67
3.3.4 Projeto do Controlador de Tensão no PAC.....	70
4 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.....	75
4.1 ESTRUTURA SIMULADA.....	75
4.1.1 Especificação de queda de tensão no PAC.....	77
4.2 SIMULAÇÃO NUMÉRIA DO COMPENSAOR DE TENSÃO	80
4.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	93
5 IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	95

5.1 CIRCUITOS ELETRÔNICOS IMPLEMENTADOS.....	95
5.1.1 Unidade de Potência	96
5.1.2 Drivers	98
5.1.3 Comando do Conversor.....	98
5.1.4 Controle de Tensão no PAC.....	99
5.1.5 Sensores de Corrente	100
5.1.6 Módulo Digital.....	101
5.1.7 Fonte de Auxiliar.....	102
5.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS	103
5.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO.....	126
6 CONCLUSÕES GERAIS	128
BIBLIOGRAFIA	130
ANEXO A – FLUXOGRAMA DO PROCESSO DE MEDIÇÃO DE TENSÃO POR RECLAMAÇÃO DO CONSUMIDOR.....	132
APÊNDICE A – FLUXO DE POTÊNCIA ENTRE BARRAS E EFEITO DA INJEÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA	133

1 INTRODUÇÃO

Há um crescente consumo de energia elétrica que acompanha o desenvolvimento econômico do país, para tal crescimento houve a necessidade de organização e regulamentação do setor elétrico brasileiro, pois a energia elétrica tornou-se um insumo básico (1). O processo para regulamentar tal setor iniciou-se com o código das águas, que dispôs sobre a competência da união para a concessão dos aproveitamentos hidrelétricos e dos serviços de transmissão, transformação e distribuição de energia elétrica (1), tal processo evoluiu para criação de órgãos especificamente referentes à energia elétrica. Um desses órgãos é a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), trata-se de uma autarquia sob regime especial, vinculada ao MME (Ministério de Minas e Energia) e tem a finalidade de regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica. A ANEEL foi criada pela Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996 (1).

O PRODIST (Procedimentos de Distribuição) resume um conjunto de documentos elaborados pela ANEEL que normalizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. Tal documento estabelece os requisitos técnicos e responsabilidades dos agentes para acesso, planejamento da expansão, operação, medição e qualidade da energia nos sistemas de distribuição. Para a elaboração dos módulos técnicos do PRODIST foram consideradas as normas legais e regulamentares pertinentes, devidamente consolidadas, que dispõem sobre os direitos e obrigações dos agentes setoriais e consumidores com relação aos sistemas de distribuição. Sua primeira versão entrou em vigor 31/12/2008 e hoje está em sua quarta revisão. O módulo 8 do PRODIST estabelece procedimentos relativos a qualidade do “produto” energia elétrica, definindo parâmetros para o estabelecimento de valores limites para os indicadores de QEE (Qualidade de Energia Elétrica), inclusive valores de referência de tensão em regime permanente e perturbações na forma de onda de tensão. O módulo 8 trata também da qualidade da energia elétrica, porém com foco no serviço de fornecimento de energia prestado pelos agentes. Nele são estabelecidos os procedimentos relativos aos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento (1).

Fazendo uma análise do PRODIST (módulo 8) verifica-se algumas obrigações referentes ao atendimento do consumidor final de EE (energia elétrica). Ao ser detectado um nível de tensão inadequado no ponto de conexão do contratante (consumidor), o contratado (concessionária de energia) terá um prazo máximo para solucionar o problema. Caso não haja a adequação da tensão no prazo estipulado descritos no PRODIST (módulo 8) o contratante deverá ser ressarcido pelo contratado conforme os indicadores também descritos no PRODIST.

A regulação de tensão em regime permanente exigida no ponto de conexão varia conforme o nível de tensão contratado, para níveis acima de 1kV e abaixo de 69kV a tensão adequada está entre 5% acima e 7% abaixo da contratada. Em sistemas com tensão nominal de 380 V/220 V ou 220 V/127 V a faixa de fornecimento adequado no ponto de conexão é em torno de 5% acima à 8.7% abaixo da tensão contratada, que neste caso é a própria tensão nominal de operação do sistema. Para cada tensão de referência contratada, as leituras de tensão são classificadas em: adequadas, precárias ou críticas, dependendo do afastamento da leitura em relação à tensão de referência, sintetizado na Tabela 1 no caso em que a tensão contratada é igual ou inferior a 1 kV (220/127)V (Tensões de fase).

Tabela 1 - Pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1 kV (220 V/127 V).

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(201 \leq TL \leq 231) / (116 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(189 \leq TL < 201 \text{ ou } 231 < TL \leq 233) /$ $(109 \leq TL < 116 \text{ ou } 133 < TL \leq 140)$
Crítica	$(TL < 189 \text{ ou } TL > 233) / (TL < 109 \text{ ou } TL > 140)$

Fonte: (1)

Ao ser detectado uma classificação de tensão em regime permanente no ponto de conexão que não seja adequada, o contratado deverá resolver o problema em 90 dias após detectado o problema no caso de tensão precária, e em 15 dias após detectado o problema no caso de tensão crítica. Caso não haja solução do problema no prazo estipulado o contratado é penalizado e o contratante é ressarcido de acordo com o tempo que a tensão manteve-se irregular. Para que a qualidade de tensão em regime permanente seja classificada como precária basta que 3% das 1008 leituras de tensão eficaz válidas estejam na faixa precária de tensão de atendimento, para que tal tensão seja classificada como crítica basta que 0.5% das 1008 leituras de tensão eficaz válidas estejam na faixa crítica de tensão de atendimento.

O conjunto de leitura para gerar os indicadores de qualidade de energia deverá compreender registros de 1008 leituras válidas da tensão eficaz obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos cada, porém alguns transitórios ocorridos dentro desse intervalo são classificados como leituras não válidas e fazem com que o esse intervalo seja excluído. Os registros expurgados são devidos às interrupções de energia elétrica e as variações momentâneas de tensão (elevação ou afundamento). (Uma interrupção é caracterizada por ter o valor eficaz de tensão inferior a 0,1pu independente da sua duração, um afundamento momentâneo é caracterizado por ter o valor eficaz de tensão entre 0,1pu e 0,9pu com duração superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos. E uma elevação momentânea é caracterizada por ter o valor eficaz de tensão superior a 1,1pu com duração superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos.). Como são necessárias 1008 leituras para gerar o indicador de qualidade, as leituras expurgadas são substituídas por igual número de leituras válidas e consecutivas, sendo assim os 1008 registros poderão demorar mais que uma semana.

Quanto ao critério de cálculo do valor eficaz da tensão o PRODIST descreve que “*os valores eficazes devem ser calculados a partir das amostras coletadas em janelas sucessivas. Cada janela compreenderá uma sequência de doze ciclos (0,2 segundos) a quinze ciclos (0,25 segundos)*”, onde são realizadas um mínimo de 16 amostras por ciclo. Assim a partir do cálculo da tensão eficaz das 2400 à 3000 janelas, os dados são analisados já verificando sua validade e por fim o cálculo da tensão eficaz da janela de 10 minutos é feito através da integralização dessas 2400 até 3000 janelas menores (2).

Atualmente não há padrões de desempenho atribuídos pelo PRODIST para variações de tensão de curta duração, porém afundamentos ou elevações com duração maior que 3 segundos estarão sujeitas a registros de tensão não adequada, assim como as que não são classificadas como apenas variações. Na Tabela 2 ilustra a classificação das variações de tensão de curta duração.

O foco deste trabalho está na qualidade de energia em termos da magnitude da tensão em regime permanente disponível em pontos de conexão de uma rede de distribuição.

Soluções definitivas para problemas na rede muitas vezes requerem um tempo para a análise da região onde há o problema de regulação de tensão, estudo de uma solução definitiva, aquisição e instalação do equipamento idealizado. Tal processo pode requerer maior tempo que o exigido pelo PRODIST, assim surge a necessidade de um dispositivo de uso temporário capaz de corrigir o problema de regulação de tensão imediatamente, até que uma solução definitiva seja implementada, evitando assim, penalização da distribuidora. As características do dispositivo devem viabilizar seu uso nessa aplicação, sendo elas: baixo

volume facilitando seu transporte, regulação de tensão com baixo tempo de resposta impedindo registros de tensão inadequada, fácil instalação poupando tempo da distribuidora e com baixa injeção de componentes harmônicos, para que o equipamento exclusivamente melhore a qualidade de energia na região onde estará inserido.

Tabela 2 - Classificação das variações de tensão de curta duração.

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação a tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 pu
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 pu
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 pu
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 pu
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 pu e inferior a 0,9 pu
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 pu

Fonte: (1)

Para permitir a fácil instalação deseja-se que o conversor possa ser inserido em qualquer ponto na linha de distribuição de baixa tensão. Assim tal dispositivo poderá ser implementado exatamente num ponto de conexão de carga que esteja com tensão inadequada até que uma solução definitiva seja estudada e implementada. Tal solução temporária permitirá um prazo de adequação maior para distribuidora que após solucionar o problema de determinada região poderá implementar o mesmo dispositivo em uma nova região com tensão inadequada.

Nas subestações dos sistemas de distribuição é comum o uso de transformadores com taps para regulação de tensão, porém tais equipamentos normalmente são empregados como soluções definitivas, apresentam baixo tempo de resposta diante de variações momentâneas de tensão, em torno de 3 a 10 minutos. Abrangendo o estudo para sistemas de transmissão

percebe-se uma variabilidade maior de técnicas de processamento de energia que já foram empregadas. Ao analisar tais técnicas pode-se adapta-las para os sistemas de distribuição, onde a impedância da linha (curta) normalmente é inferior comparada às linhas de transmissão (médias/longas).

Nas linhas de transmissão a inserção de reatores, capacitores série ou shunt (3) (4), assim como mudança automática de taps dos transformadores e inserção de transformadores defasadores (5) são soluções mais comumente empregadas. Porém tais soluções envolvem a definição do tamanho do elemento em estudo, sua localização, estabilidade da linha, estudos do perfil da carga, algoritmos de controle, análise de custos, etc. Desta forma elas são empregadas como soluções definitivas para regulação de tensão, cujo objetivo é de aumentar a capacidade de transmissão de potência, estabilidade da linha, etc. Além disso, tais dispositivos não apresentam boa continuidade de compensação (com exceção do transformador defasador), são volumosos, podem causar sub harmônicos na rede (com exceção do transformador defasador), apresentam um tempo de atuação relativamente grandes e portanto, devido a estes complicadores não atendem aos requisitos propostos neste trabalho para a solução do problema de regulação (6).

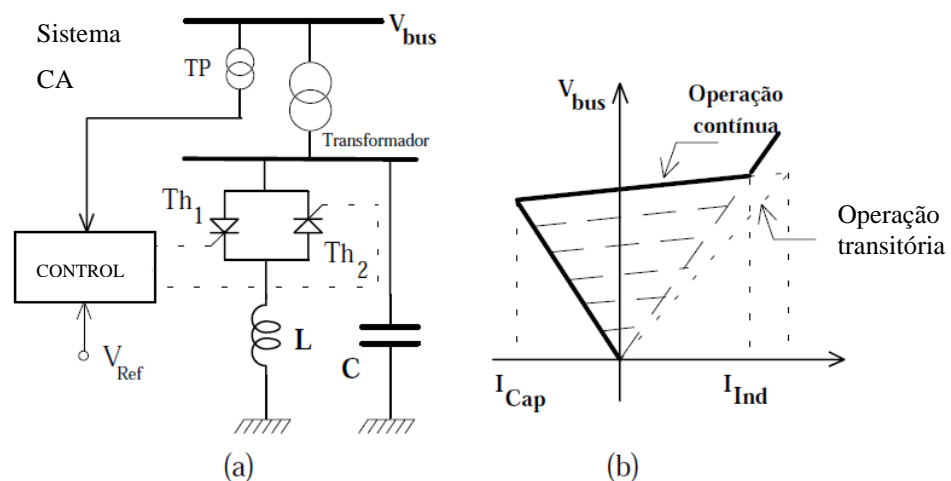
A evolução dos semicondutores de potência (tiristores, GTO e IGBT), juntamente com as topologias através deles implementadas, permitiu submetê-los a altas correntes e tensões expandindo suas aplicações aos sistemas de potência. *Juntamente com o aumento na demanda de energia elétrica, as restrições financeiras e ambientais na construção de novas unidades de geração e de linhas de transmissão tornou-se necessário um controle direto do fluxo de potência em determinadas linhas do sistema* (6). Assim criou-se o conceito de “*Flexible AC Transmission Systems*” (FACTS) em 1988 por Hingorani (7) cujo objetivo é através de uma soma de potências (ativas e reativas), com qualquer amplitude e fase, da linha com o sistema FACTS permitir alta flexibilidade na transmissão de potência (7), podendo aumentar a estabilidade da linha, permitir acréscimo na capacidade de transmissão de potência sem a necessidade de outra linha, também é possível uma redução de perdas por transmissão. Há várias topologias utilizadas para possibilitar uma transmissão de potência flexível, Watanabe (6) cita algumas delas.

Há muitos trabalhos envolvendo FACTS (8), procurando por um equipamento que permita fácil instalação e baixo volume, dentre as topologias viáveis seleciona-se aquela que apresenta melhor benefício, utilizando o mínimo de recursos necessários e que apresente uma tecnologia viável. Considerando que a magnitude da tensão é intimamente relacionada com a potência reativa presente no sistema (9) pode-se restringir o estudo de FACTS para sistemas

em derivação na linha, onde não é necessário abrir a linha para inserção do conversor. E também restringir a análise em topologias focadas na troca de potência reativa apenas, para que o sistema tenha principal interação com a magnitude da tensão do ponto de conexão.

Watanabe (6) faz o estudo e alguns sistemas FACTS e sua características. Apresentando um compensador estático de reativos, que quando tem a função de controlar a tensão é chamado de SVC (“*Static Voltage Controller*”), como apresentado na Figura 1. O SVC funciona baseado em uma indutância variável, gerada em função do ângulo de disparo dos tiristores e a impedância equivalente que é dada pela associação de ambas as impedâncias, capacitiva e indutiva, onde o capacitor representa a maior capacidade de potência reativa deste sistema. Tal solução apresenta boa continuidade na compensação e boa robustez devido aos componentes de potência empregados (tiristores), entretanto apresenta grande volume devido aos elementos passivos, insere harmônicos na rede devido a característica de comutação dos interruptores e conforme apresentado na Figura 1 (b), Possui grande dependência da capacidade de compensação com relação a tensão da rede, ou seja, para uma linha com tensão muito abaixo da nominal a capacidade de compensação também ficará muito abaixo da nominal.

Figura 1 - (a) - Circuito básico de um compensador estático. (b) - Característica $V \times I$.

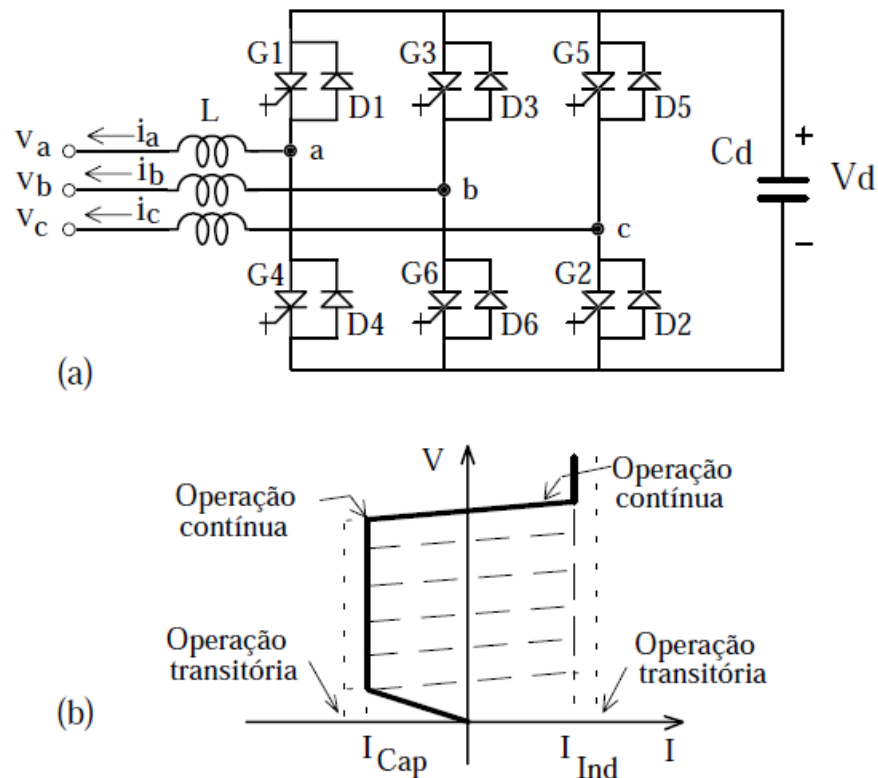


Fonte: (6)

Outra estrutura em derivação é o STATCOM (Compensador estático) (10) (11) (12), que faz uso de um inversor de tensão (*VSI*), sendo ele composto por chaves GTO ou IGBT, indutores de saída para reduzir picos de corrente e um barramento CC. A estrutura em questão é apresentada na Figura 2. As chaves são comutadas em alta frequência, acima de 1KHz, permitindo uma rápida ação de controle. Apresenta baixo conteúdo harmônico devido a presença do filtro em sua saída, baixo volume e como pode ser verificado em sua

característica $V \times I$, Figura 2(b), em contraste com o SVC a magnitude da corrente de compensação é mantida mesmo sob baixos valores da tensão do sistema CA (6).

Figura 2 - (a) Compensador estático avançado (STATCOM) baseado em um inversor de tensão; (b) Característica de operação $V \times I$.



Fonte: (6)

Há topologias muito semelhantes com o STATCOM, porém a elas são dados outra nomenclatura, Rao (13) faz uma comparação entre um “*Static Synchronous Series Compensator*” (SSSC) e o SVC, após a comparação o autor sugere um novo esquema de conversor chamado “*Static Synchronous Parallel Compensator*” (SSPC), que se trata de um inversor de tensão com filtro de saída e conectado em derivação com a linha. O mesmo gera uma corrente puramente capacitiva ou indutiva, de acordo com a amplitude da tensão da própria linha, ou seja, semelhante às topologias dos STATCOM. Na comparação o autor destaca algumas vantagens do SSSC, principalmente nos casos em que a tensão da linha apresenta grande queda, pois um SSSC é capaz de corrigir tal problema facilmente, já o SVC não consegue operar com quedas demasiadas. Porém ao submeter ambos os sistemas a baixas reatâncias, especificamente em linhas de distribuição, o SSSC pode não ter todo seu potencial sendo usado, e nesse caso torna-se viável o emprego de um SVC ou SSPC. Como o SVC apresenta significativa limitação de compensação para grandes quedas de tensão, tal problema

é resolvido com a implementação do SSPC, concluindo uma solução mais adequada para regulação de tensão em sistemas de distribuição.

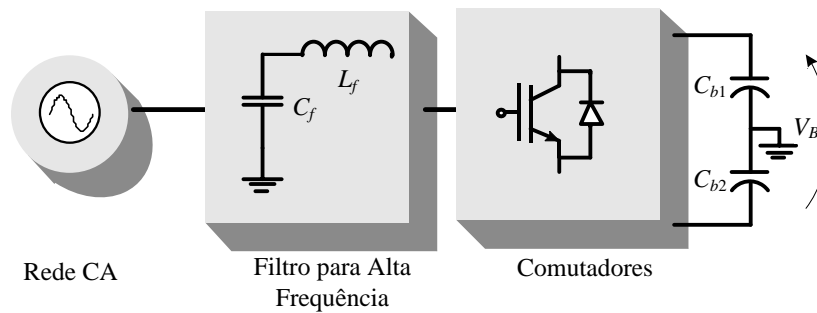
Ainda com características de topologia semelhantes ao SSPC foi desenvolvido o chamado “Static VAR Generator” (SVG) em 1991 (10). Baseado em GTOs usa inversores de tensão conectados através de transformadores complexos, com uma potência de 80MVA foi aplicado com fim de estabilizar o sistema de transmissão, havendo um incremento na capacidade de transmissão da linha. A não utilização de filtro de saída foi compensada pelo uso dos transformadores defasadores, e justificada pela condição de eliminar riscos de ressonância do sistema. A resposta do sistema foi em torno de 3 ciclos, os tiristores permitem boa robustez, porém apresenta um volume considerável por conta dos próprios transformadores

Assim como em soluções já mencionadas a compensação de reativos é usual em sistemas de potência para melhorar a capacidade de transmissão de potência ativa entre barras e a estabilidade de uma região do sistema (seja de transmissão, geração ou distribuição), as mesmas topologias dos compensadores de potência podem ser utilizadas para o fim de regulação de tensão já que a potência reativa tem alta correlação com a magnitude da tensão do sistema, em regime permanente.

Neste trabalho de conclusão de curso será projetado e implementado um sistema automático de regulação de tensão cuja estrutura básica trata-se de um inversor de tensão trifásico a quatro fios utilizando interruptores do tipo IGBT. Será conectado em derivação com a rede de distribuição por intermédio de um filtro passivo do tipo LC (indutor e capacitor). Para controlar a tensão da linha o conversor emulará uma carga variável, hora capacitiva hora indutiva, dependendo da magnitude da tensão de atendimento. Utilizará um filtro de saída evitando injeção de harmônicos de alta frequência na rede.

Pretende-se realizar a compensação em um curto período de tempo (inferior a 0,25 segundos) e manter a tensão de regime permanente entre $0,93TR$ (Tensão de Referência) e $1,05TR$, não permitindo registros de tensão não adequada no ponto de conexão e também, corrigindo variações momentâneas de tensão. Desta forma prolongando o prazo da distribuidora para a detecção do problema de regulação, avaliação e implementação de uma solução permanente. O compensador permite baixo volume, mobilidade e liberdade na localização do conversor ao longo linha da distribuição em questão. Depois de implementada uma solução definitiva na região deficiente o compensador poderá ser realocado para outra região que esteja com fornecimento de tensão inadequada. O conversor é mostrada na Figura

Figura 3 - Regulador de tensão.



Fonte: produção do próprio autor

No capítulo 2 a estrutura de potência do conversor será detalhada, abrangendo trazendo a topologia do conversor utilizado, as especificações do mesmo. A capacitância do barramento CC do conversor é projetada. O filtro de alta frequência será analisado e projetado nesse capítulo.

No capítulo 3 é especificado as variáveis a serem controladas, obtido o modelamento das plantas do circuito de potência, e com base nos modelos os controladores do sistema são projetados.

No capítulo 4 traz a simulação numérica do conversor e do sistema de potência onde o equipamento é inserido. Os resultados são comparados com a norma da ANEEL (1).

No capítulo 5 a implementação prática do conversor poderá ser acompanhada, apresentando os resultados com um conversor de 4,5kVA. Os resultados são comparados com a simulação e com a norma vigente da ANEEL (1).

O trabalho é concluído com uma análise dos controladores projetados, da eficácia do sistema, dificuldades encontradas e sugestões para trabalhos futuros.

2 ESTRUTURA DE POTÊNCIA

Este capítulo destina-se a apresentar a estrutura de potência do regulador de tensão. O diagrama geral da estrutura do conversor é apresentado no início do capítulo, onde será comentado sobre a estrutura de potência do sistema. O dimensionamento do conversor adotado já foi apresentado em um trabalho anterior (14). Será abordado o projeto dos componentes passivos do conversor, sendo compostos pelo capacitor do barramento e pelo filtro de saída. O regulador de tensão é composto por uma estrutura trifásica com ponto médio, capaz de trabalhar com potência de até 4500VA e com tensão de 220 V fase-fase. O filtro do conversor, necessário para atenuar os harmônicos referentes à frequência de comutação do conversor, será projetado e terá seu comportamento analisado no domínio da frequência, através de diagramas de Bode.

2.1 DIAGRAMA GERAL DA ESTRUTURA DE POTÊNCIA

O conversor é conectado em derivação e diretamente na rede, injetando corrente com característica capacitiva ou indutiva, regulando a tensão no ponto onde está conectado. O filtro de alta frequência é localizado entre o conversor e a rede evitando, assim, a circulação de correntes de alta frequência entre o conversor e a rede. O barramento CC funciona como elemento de armazenamento temporário de energia. O diagrama unifilar do regulador de tensão conectado a rede é apresentado na Figura 4.

A impedância da rede (Z_{rd}), mostrada da Figura 4 é dada por:

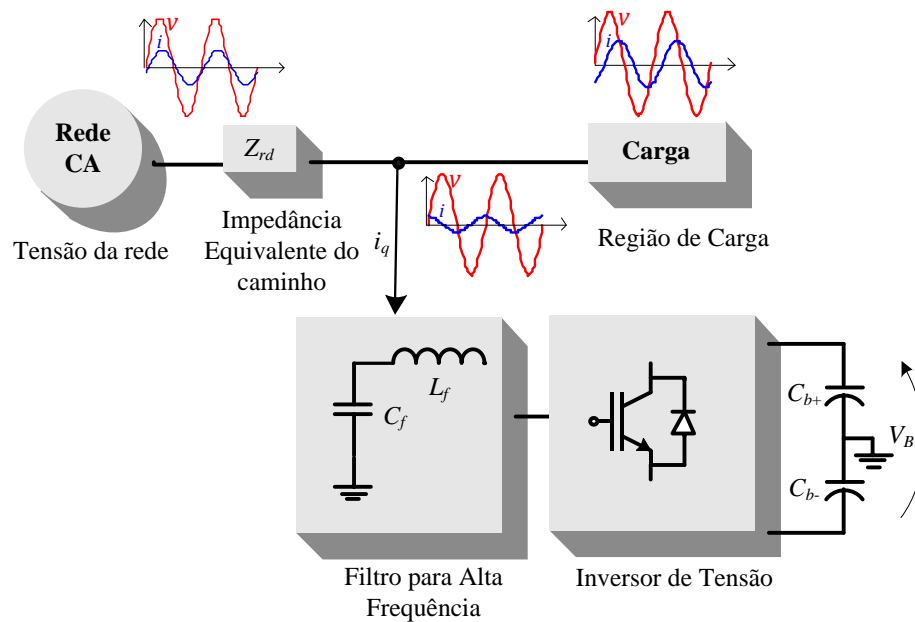
$$Z_{rd} = r_{rd} + s \cdot L_{rd} \quad (1)$$

Onde:

R_{rd} = Resistência da rede.

L_{rd} = Indutância da rede.

Figura 4 - Diagrama unifilar do regulador de tensão acoplado na rede.

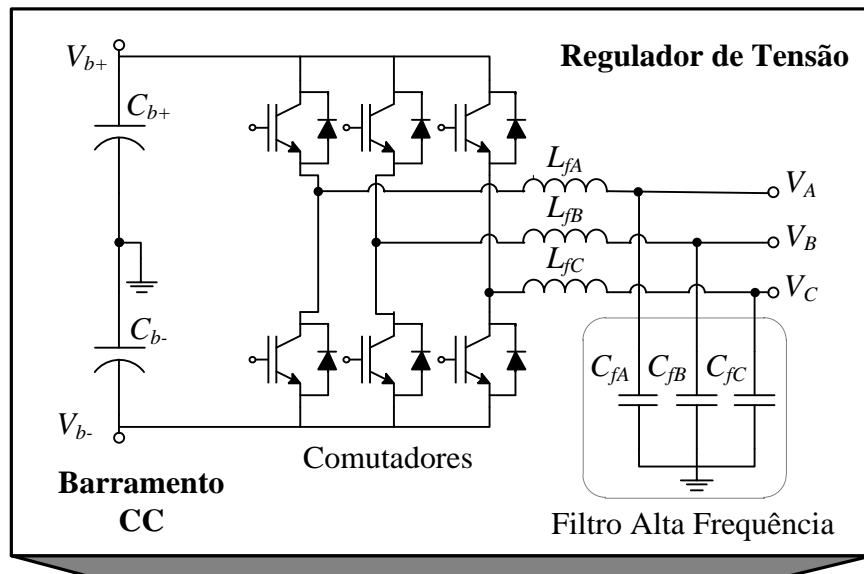


Fonte: produção do próprio autor

2.2 PROJETO DOS DISPOSITIVOS DE POTÊNCIA

A estrutura utilizada para o regulador de tensão é um inversor trifásico a quatro fios que possui um barramento com ponto central. Esta estrutura além de permitir um controle contínuo da corrente de saída também permite o controle da tensão total de barramento e o controle de desequilíbrio de tensão do barramento CC, viabilizando a operação do conversor para diversos tipos de cargas, como cargas desequilibradas por exemplo. A estrutura do conversor é apresentada na Figura 5.

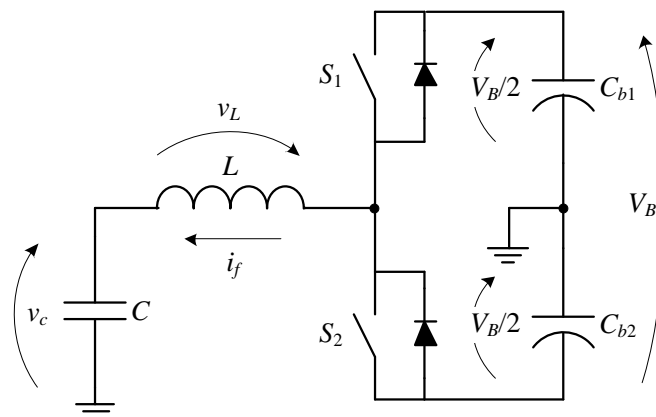
Figura 5 - Inversor composto a estrutura do regulador de tensão.



Fonte: adaptado de (15)

Devido à conexão do neutro como ponto central do barramento é possível e conveniente uma análise do circuito considerando somente uma única fase, conforme a Figura 6, e posteriormente expandir os resultados para a estrutura trifásica.

Figura 6 - Equivalente monofásico para o inversor com ponto médio.



Fonte: adaptado de (15)

Para calcular a função no tempo que determina a razão cíclica $d(t)$ tensão média no indutor será calculada, devendo ser nula em um período de comutação (T_s). Como a frequência de comutação é muito superior à frequência da rede, assim a corrente média de um período de comutação é igual à corrente média do período de comutação anterior (ou posterior), assim, de acordo com a equação que relaciona a tensão e corrente no indutor

(equação (10)), não havendo variação de corrente implica que a tensão nesse componente será nula.

Para primeira etapa, cuja duração é de $T_S \cdot d(t)$, onde S_1 está fechada e S_2 está aberta, a tensão no indutor é dada por:

$$v_L(t) = \frac{V_B}{2} - v_c(t) \quad (2)$$

Onde V_B é a tensão total do barramento. Para segunda etapa, cuja duração é de $T_S \cdot [1 - d(t)]$, onde S_1 está aberta e S_2 fechada, a tensão no indutor é dada por:

$$v_L(t) = \frac{-V_B}{2} - v_c(t) \quad (3)$$

Considerando que a tensão no capacitor de filtro ($v_c(t)$) será a mesma tensão do ponto de conexão do conversor, dada pela equação (4), apesar de tal tensão variar com o tempo, para o cálculo do valor médio da tensão no indutor (v_{L_med}) $v_c(t)$ será considerada constante, pois a frequência de comutação é muito superior a frequência da rede.

$$v_c(t) = v_{rd}(t) = V_{rdpk} \text{sen}(\omega_{rd}t) \quad (4)$$

A tensão média do indutor é dada por:

$$v_{L_med} = \frac{1}{T_S} \left[\int_0^{T_S d(t)} \left(\frac{V_B}{2} - v_c(t) \right) dt + \int_{T_S d(t)}^{T_S} \left(\frac{-V_B}{2} - v_c(t) \right) dt \right] \quad (5)$$

Resolvendo a equação (5) com as considerações já mencionadas obtêm-se:

$$v_{L_med}(t) = \frac{V_B}{2} (2d(t) - 1) - v_c(t) \quad (6)$$

Como a tensão média no indutor para um período de comutação é igual à zero, a razão cíclica é dada por:

$$d(t) = \frac{1}{2} + \frac{v_c(t)}{V_B} \quad (7)$$

Substituindo (4) em (7) e definido o índice de modulação como sendo:

$$ma = \frac{V_{rdpk}}{V_B} \quad (8)$$

Obtém-se $d(t)$ como sendo:

$$d(t) = \frac{1}{2} + ma \text{sen}(\omega_{rd}t) \quad (9)$$

As equações a seguir tem o objetivo de estipular uma indutância mínima para determinada ondulação de corrente em alta frequência.

A equação que descreve a corrente do indutor é:

$$i_{Lf}(t) = \frac{1}{L} \cdot \int_0^t v_L(t) dt + i_L(0) \quad (10)$$

A ondulação de corrente será calculada como sendo a variação de corrente em um intervalo de tempo, que neste caso será o tempo da primeira etapa de operação ($T_S \cdot d(t)$):

$$\Delta i_{Lf} = i_{Lf}(T_S \cdot d(t)) - i_{Lf}(0) \quad (11)$$

Vale lembrar que $d(t)$ é considerado como constante neste período de tempo. Assim, pode-se reescrever a equação (10) utilizando a tensão $v_L(t)$ como descrito na equação (2), (tratando da primeira etapa), a fim de posteriormente calcular a variação de corrente descrita na equação (11):

$$i_{Lf}(t) = \frac{1}{L} \cdot \int_0^t \frac{V_B}{2} - v_c(t) dt + i_{Lf}(0) \quad (12)$$

Substituindo a equação (4) na equação (12):

$$i_{Lf}(t) = \frac{1}{L} \cdot \int_0^t \frac{V_B}{2} - V_{rd_{pk}} \cdot \sin(\omega_{rd} t) dt + i_{Lf}(0) \quad (13)$$

Resolvendo a integral acima se obtêm:

$$i_{Lf}(t) = \frac{1}{L} \cdot \left[\frac{V_B}{2} - V_{rd_{pk}} \cdot \sin(\omega_{rd} \cdot t) \right] \cdot t + i_{Lf}(0) \quad (14)$$

Agora, com a corrente do indutor na primeira etapa, equação (14), pode-se encontrar a variação de corrente descrita pela equação (11):

$$\begin{aligned} \Delta i_{Lf} &= \frac{1}{L} \cdot \left[\frac{V_B}{2} - V_{rd_{pk}} \cdot \sin(\omega_{rd} \cdot t) \right] \cdot T_S \cdot d(t) + i_{Lf}(0) + \\ &- \frac{1}{L} \cdot \left[\frac{V_B}{2} - V_{rd_{pk}} \cdot \sin(\omega_{rd} \cdot t) \right] \cdot 0 - i_{Lf}(0) \end{aligned} \quad (15)$$

Substituindo a equação da razão cíclica, equação (9), e simplificando a equação acima se obtêm:

$$\Delta i_{Lf} = \frac{T_S}{L} \left(\frac{V_B}{4} - V_{rd_{pk}} m a (\sin(\omega_{rd} \cdot t))^2 \right) \quad (16)$$

A equação acima nos mostra que a condição de máxima indutância acontece quando $\omega_{rd} \cdot t$ é igual à zero ou π radianos. Desta forma, a indutância mínima necessária para o inversor é:

$$L \geq \frac{V_B}{4 \cdot \Delta i_{Lf} \cdot f_S} \quad (17)$$

Com o objetivo de se calcular a ondulação de tensão nos capacitores do barramento em função da capacitância C_b , pode-se calcular a corrente que circula no capacitor e utilizar a equação que relaciona corrente e tensão no capacitor:

$$v_c(t) = \frac{1}{C} \cdot \int_0^t i_c(t) dt + V_c(0) \quad (18)$$

Uma vez que o conversor se comportará como uma fonte de corrente, cujo objetivo é de injetar somente corrente em quadratura com a tensão no ponto onde o mesmo estará conectado e sendo que a potência ativa drenada será apenas para suprir as perdas do conversor, a corrente no indutor será descrita como sendo puramente reativa e composta somente pela frequência fundamental, como representado na equação abaixo:

$$i_L(t) = I_{rd_pk} \cdot \sin(\omega_{rd} \cdot t \pm \pi/2) \quad (19)$$

Que pode ser reescrita como sendo:

$$i_L(t) = I_{rd_pk} \cdot \pm \cos(\omega_{rd} \cdot t) \quad (20)$$

Como há interesse na ondulação de tensão do capacitor cuja frequência é da ordem da frequência da rede, será utilizado o conceito de valores médios quase instantâneos, onde a frequência de chaveamento é muito superior à frequência da rede.

A corrente média em um período de comutação drenada pelo capacitor C_{b1} é dada por:

$$\langle i_c \rangle = \frac{1}{T_S} \cdot \int_0^{T_S \cdot d(t)} -i_{Lf}(t) dt \quad (21)$$

Resolvendo a integral acima considerando $i_L(t)$ constante e substituindo a equação (20) na solução se obtêm a corrente no capacitor dada por:

$$\langle i_{C_{b1}} \rangle = -I_{rd_pk} \cdot \pm \cos(\omega_{rd} \cdot t) \cdot d(t) \quad (22)$$

Substituindo $d(t)$ pela equação (9) se obtêm:

$$\langle i_{C_{b1}} \rangle = [-I_{rd_pk} \cdot \pm \cos(\omega_{rd} \cdot t)] \cdot \left[\frac{1}{2} + ma \cdot \sin(\omega_{rd} \cdot t) \right] \quad (23)$$

Rearranjando a equação acima é obtido:

$$\langle i_{C_{b1}} \rangle = \frac{I_{rd_pk} \cdot \mp \cos(\omega_{rd} \cdot t)}{2} + \frac{I_{rd_pk} \cdot \mp ma \cdot \sin(2 \cdot \omega_{rd} \cdot t)}{2} \quad (24)$$

Agora, utilizando a equação (18) é pode-se obter a equação que descreve a tensão em função do tempo no capacitor C_{b1} :

$$v_{C_{b1}}(t) = \frac{1}{C_{b1}} \cdot \int_0^t \left[\frac{I_{rd_{pk}} \cdot \mp \cos(\omega_{rd} \cdot t)}{2} + \frac{I_{rd_{pk}} \cdot \mp ma \cdot \sin(2 \cdot \omega_{rd} \cdot t)}{2} \right] dt + V_{C_{b1}}(0) \quad (25)$$

Resolvendo a integral acima se chega à equação da tensão no capacitor C_{b1} , conforme descrito abaixo:

$$v_{C_{b1}}(t) = \frac{1}{C_{b1} \cdot \omega_{rd}} \cdot \left[\begin{array}{c} \mp \frac{I_{rd_{pk}} \cdot \sin(\omega_{rd} \cdot t)}{2} \\ \pm \frac{I_{rd_{pk}} \cdot ma \cdot \cos(2 \cdot \omega_{rd} \cdot t)}{4} \\ \mp \frac{I_{rd_{pk}} \cdot ma}{4} \end{array} \right] + V_{C_{b1}}(0) \quad (26)$$

De modo análogo a expressão da tensão da tensão no capacitor C_{b2} é dada por:

$$v_{C_{b2}}(t) = \frac{1}{C_{b2} \cdot \omega_{rd}} \cdot \left[\begin{array}{c} \pm \frac{I_{rd_{pk}} \cdot \sin(\omega_{rd} \cdot t)}{2} \\ \pm \frac{I_{rd_{pk}} \cdot ma \cdot \cos(2 \cdot \omega_{rd} \cdot t)}{4} \\ \mp \frac{I_{rd_{pk}} \cdot ma}{4} \end{array} \right] + V_{C_{b2}}(0) \quad (27)$$

A fim de calcular a tensão diferencial e total do barramento, será idealizado que:

$$\begin{cases} C_b = C_{b1} = C_{b2} \\ V_{C_b}(0) = V_{C_{b1}}(0) = V_{C_{b2}}(0) \end{cases} \quad (28)$$

A tensão diferencial é dada pela subtração das tensões individuais nos capacitores:

$$v_{c_d}(t) = v_{C_{b1}}(t) - v_{C_{b2}}(t) \quad (29)$$

Resultando em:

$$v_{c_d}(t) = \frac{1}{C_b \cdot \omega_{rd}} \cdot \left[\mp I_{rd_{pk}} \cdot \sin(\omega_{rd} \cdot t) \right] \quad (30)$$

A tensão total do barramento é dada pela soma das tensões individuais nos capacitores:

$$v_{c_T}(t) = v_{C_{b1}}(t) + v_{C_{b2}}(t) \quad (31)$$

Resultando em:

$$v_{c_T}(t) = \frac{1}{C_b \cdot \omega_{rd}} \cdot \left[\begin{array}{c} \pm \frac{I_{rd_{pk}} \cdot ma \cdot \cos(2 \cdot \omega_{rd} \cdot t)}{2} \\ \mp \frac{I_{rd_{pk}} \cdot ma}{2} \end{array} \right] + 2 \cdot V_{C_b}(0) \quad (32)$$

A ondulação de tensão é calculada considerando a máxima variação na tensão total do barramento, sendo ela, dada por:

$$\Delta V_{c_T} = \frac{I_{rdpk} \cdot ma}{2 \cdot C_b \cdot \omega_{rd}} \quad (33)$$

Substituindo o índice de modulação, equação (8), a ondulação de tensão poderá ser expressa por:

$$\Delta V_{c_T} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_{rdef} \cdot \sqrt{2} \cdot V_{rdef}}{2 \cdot C_b \cdot \omega_{rd}} \quad (34)$$

E por fim em termos da potência por fase do conversor:

$$\Delta V_{c_T} = \frac{S_{o_{1\phi}}}{C_b \cdot \omega_{rd} \cdot V_B} \quad (35)$$

A equação acima representa a ondulação de tensão no barramento supondo uma dependência de potência de apenas uma fase. Considerando que há três fases interagindo com o barramento a ondulação deverá ser menor, porém para simplificação dos cálculos a capacitância mínima do barramento do conversor será considerada como sendo:

$$C_b \geq \frac{S_{o_{3\phi}}/3}{\Delta V_{c_T} \cdot \omega_{rd} \cdot V_B} \quad (36)$$

Para a implementação do protótipo foi escolhido o módulo de potência trifásico da de 4,5 kVA contendo os semicondutores do tipo IGBT, modelo IRG4F50WD do fabricante IR (*International Rectifier*), adequadamente dispostos em um dissipador de calor, para constituir o protótipo do regulador de tensão. O projeto desta estrutura foi realizado em um trabalho anterior (16).

A Tabela 3 traz os parâmetros de projeto para determinação dos indutores e capacitores que compõe o regulador de tensão. Permitindo o cálculo da indutância mínima do filtro, e da capacitância mínima do barramento.

Tabela 3 - Parâmetros de projeto

Potência de saída	$P_o = 4500 \text{ VA}$
Tensão do barramento CC	$V_B = 600 \text{ V}$
Tensão eficaz de fase da rede	$v_{rd_ef} = 127 \text{ V}$
Ondulação de corrente máxima	$\Delta i_{L\%} = 17 \%$
Ondulação de tensão máxima no barramento CC	$\Delta V_{B\%} = 3 \%$
Frequência de comutação	$f_s = 50 \text{ kHz}$
Frequência da rede	$f_{rd} = 60 \text{ Hz}$
Banda Passante	$B_w \geq 600 \text{ Hz}$

Fonte: produção do próprio autor

Agora substituindo os valores numéricos na equação(17) se obtêm:

$$L_{min} = 1,04 \text{ mH} \quad (37)$$

E substituindo os valores numéricos na equação (36) se obtêm o valor de:

$$C_{b_{min}} = 368 \text{ } \mu\text{F} \quad (38)$$

Devido ao arranjo de capacitores presente no módulo de potência escolhido, a capacitância do barramento CC utilizada é:

$$C_b = 1 \text{ mF} \quad (39)$$

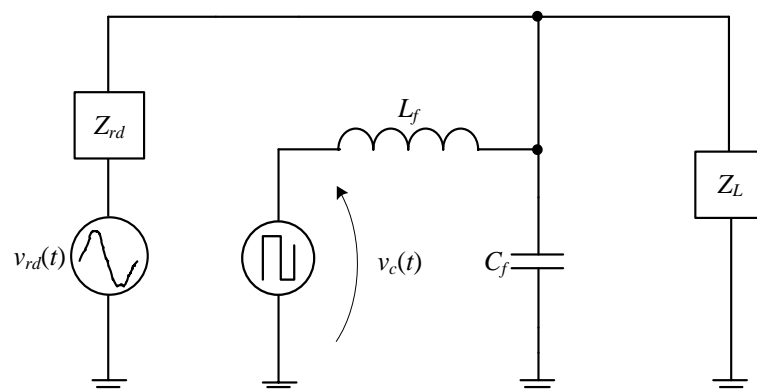
2.3 PROJETO DO FILTRO DE ALTA FREQUÊNCIA

Neste item será abordado o projeto do filtro de alta frequência do conversor.

Os filtros de alta frequência são utilizados para que as componentes de alta frequência, principalmente as componentes da ordem da frequência de comutação, geradas pelo próprio VSI (*Voltage source inverter*) não sejam injetadas na rede onde o equipamento estará inserido. A filtragem é feita criando um caminho de baixa impedância para correntes de alta frequência. Serão utilizados apenas componentes passivos como indutores e capacitores, a não utilização de resistores é justificada pelo problema da dissipação de potência ativa desses elementos. Para o projeto no domínio da frequência será utilizado diagramas de bode.

O circuito monofásico do sistema é apresentado na Figura 7:

Figura 7 - Representação monofásica do sistema.

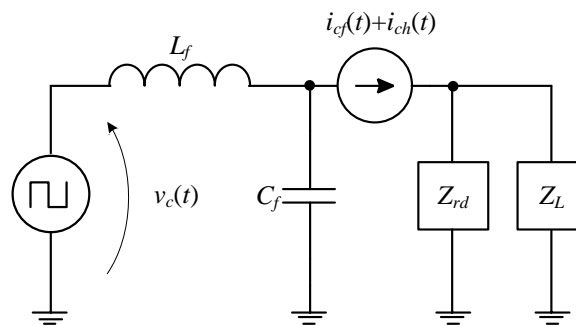


Fonte: produção do próprio autor

A fim de avaliar a influência da tensão do conversor no sistema é utilizado o princípio da superposição, primeiramente a fonte do conversor foi dividida em uma componente

fundamental e outra componente contendo os harmônicos de alta frequência ($v_{cf}(t) + v_{ch}(t)$). A fim de analisar a impedância equivalente vista pela fonte de tensão do conversor, a fonte de tensão da rede foi substituída por um curto circuito. E considerando que o conversor drena uma corrente controlada em sua saída, comportando-se como uma fonte de corrente, uma fonte de corrente foi modelada na saída do regulador de tensão. O circuito pode ser visto na Figura 8.

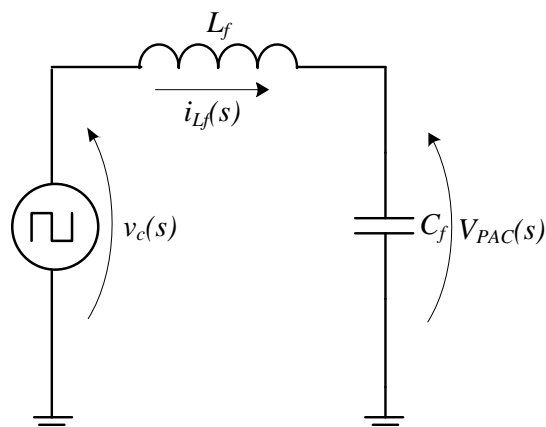
Figura 8 - Impedância equivalente vista pelo regulador de tensão.



Fonte: produção do próprio autor

Agora, a fim de analisar a impedância equivalente vista pela fonte de tensão do conversor, a fonte de corrente foi substituída por um circuito aberto. O circuito utilizado para o projeto do filtro é apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Circuito considerado para o projeto do filtro de saída.



Fonte: produção do próprio autor

A função de transferência que relaciona a tensão de entrada com a tensão de saída do filtro é mostrada abaixo:

$$\frac{v_o(s)}{v_c(s)} = \frac{1}{L_f \cdot C_f} \cdot \frac{1}{s^2 + \frac{1}{L_f \cdot C_f}} \quad (40)$$

Como o denominador é típico de um filtro de uma função de segunda ordem, a frequência de ressonância é dada por:

$$f_{res} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{L_f \cdot C_f}} \quad (41)$$

A frequência de ressonância não deverá estar na região da frequência de chaveamento do conversor e também deve estar afastada da frequência da rede (17), portanto escolheu-se uma frequência de ressonância (f_{res}) de 1890Hz (entre as frequências críticas) para que a frequência de corte do filtro seja próxima de 2,6 kHz.

Como a indutância L_f é escolhida com seu valor mínimo, pode-se definir o valor da capacitância C_f a partir da frequência de ressonância previamente escolhida, através da equação abaixo:

$$C_f = \frac{1}{L_f} \cdot \left(\frac{1}{2\pi \cdot f_{res}} \right)^2 \quad (42)$$

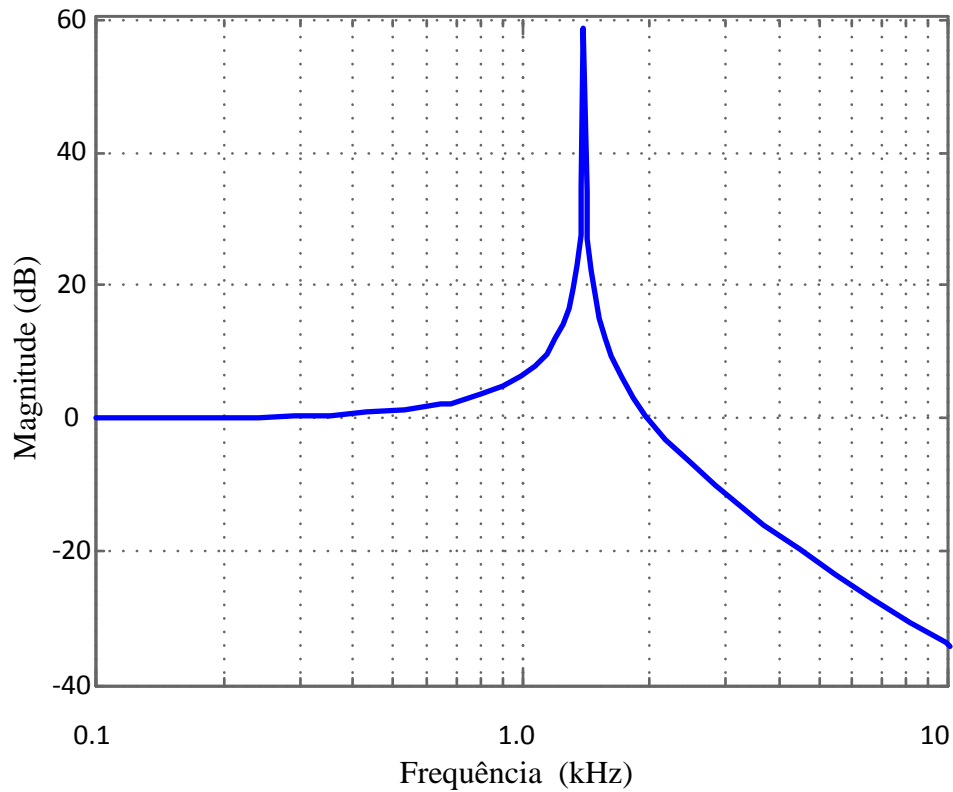
Substituindo os valores numéricos na equação (42) é obtido o valor de capacitância:

$$C_f = 5,5 \mu F \quad (43)$$

Por questão comercial, a capacitância utilizada no filtro será de $4,7\mu F$. O diagrama de Bode do filtro é apresentado na Figura 10.

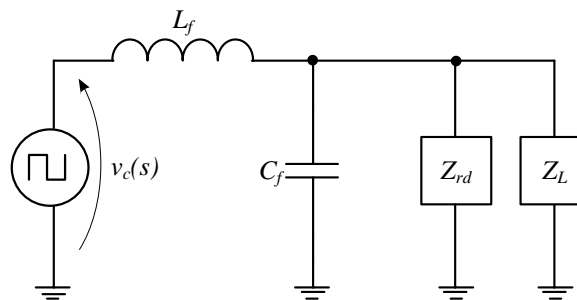
A saída do conversor foi modelada como uma fonte de corrente pois o controle do conversor impõe esse comportamento. Porém é plausível que o controle não opere nas frequências cuja ordem de grandeza é similar a frequência de comutação. Para analisar a influência dessas frequências no sistema a fonte de corrente foi desconsiderada. O circuito resultante (visto pela fonte de tensão) é apresentado na Figura 11, sendo a mesma, composta pela impedância do filtro do conversor, impedância da rede e impedância da carga.

Figura 10 - Diagrama de bode do filtro de saída.



Fonte: produção do próprio autor

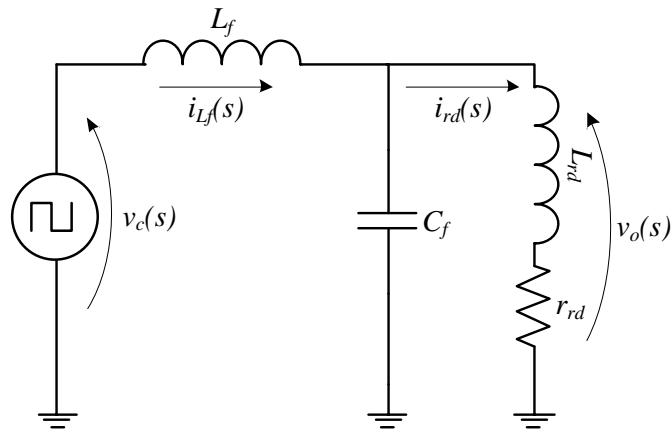
Figura 11 - Impedância equivalente vista pelo regulador de tensão.



Fonte: produção do próprio autor

Considerando que a impedância da linha (Z_{rd}) é muito menor que a impedância da carga (Z_L), a impedância da carga será desconsiderada nesta análise, sendo substituída por um circuito aberto. O circuito utilizado para a análise do filtro é apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Circuito considerado sem a fonte de corrente.



Fonte: produção do próprio autor

Desconsiderando a resistência da rede, a função de transferência do circuito é mostrada abaixo:

$$\frac{i_{rd}(s)}{v_c(s)} = \frac{1}{L_f \cdot L_{rd} \cdot C_f} \cdot \frac{1}{s \cdot \left(s^2 + \frac{L_f + L_{rd}}{L_f \cdot L_{rd} \cdot C_f} \right)} \quad (44)$$

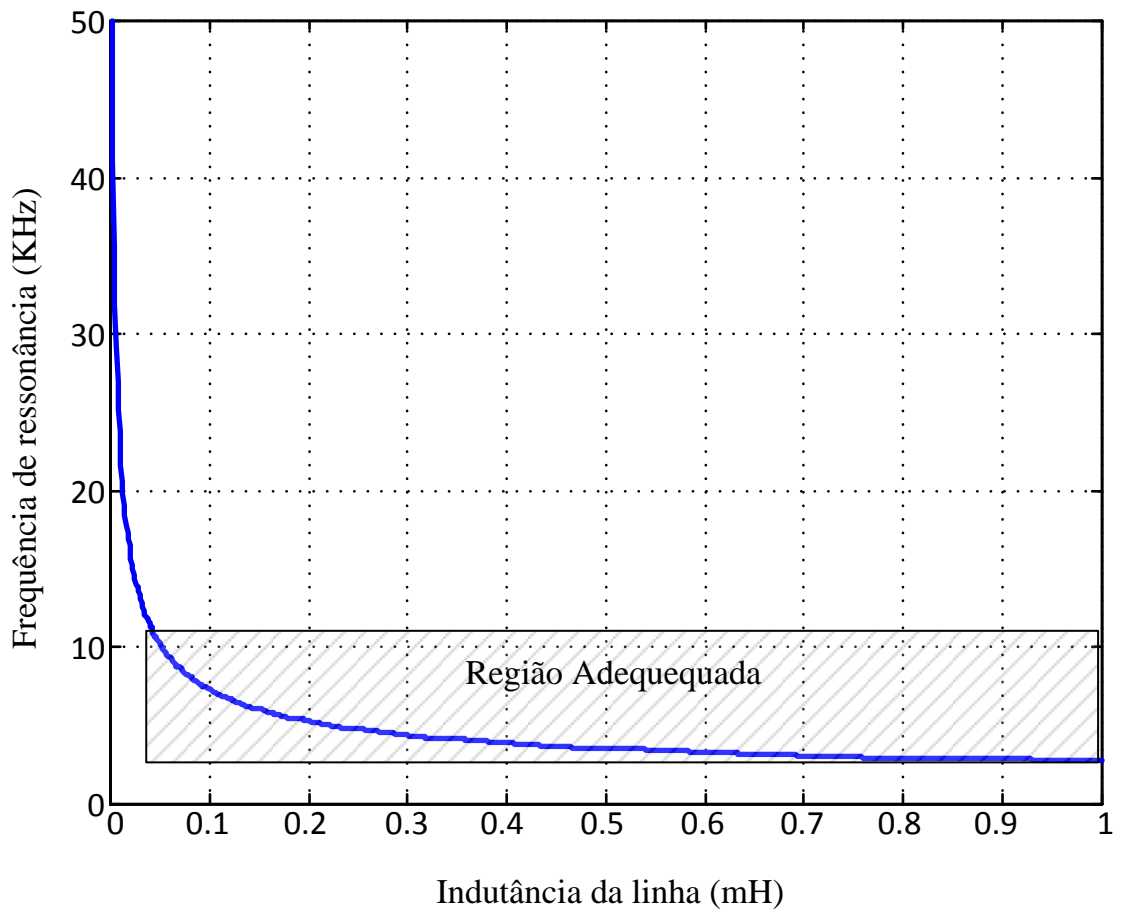
Tal circuito trata-se de um filtro LCL, onde sua frequência de ressonância é dada por:

$$f_{res_{LCL}} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{L_f + L_{rd}}{L_f \cdot L_{rd} \cdot C_f}} \quad (45)$$

A frequência de ressonância deve estar pelo menos entre 10 vezes a frequência da rede e metade da frequência de comutação (18). Mesmo com a possibilidade de o equipamento operar em redes com parâmetros diferentes, a frequência de ressonância do filtro deverá permanecer em uma faixa segura, permitindo um variação de parâmetros da rede.

Para determinar a faixa de indutância que a rede pode possuir, mantendo a frequência de ressonância do filtro dentro de uma faixa que o mesmo continuará desempenhando sua função, a indutância da linha foi variada e através da equação (45) foi obtido as respectivas frequências de ressonância do mesmo. O resultado é apresentado na Figura 13.

Figura 13 - Variação da frequência de ressonância em função da indutância de rede.

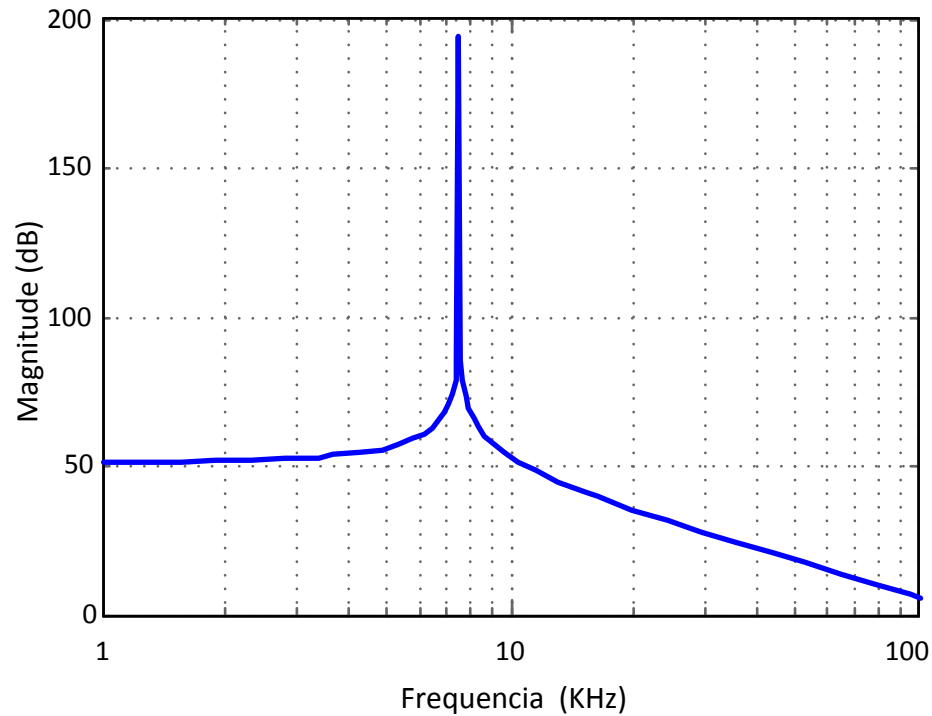


Fonte: produção do próprio autor

Analisando a Figura 13 se pode concluir que a rede deverá ter uma indutância mínima de $50\mu\text{H}$ para que a frequência de ressonância continue dentro dos limites recomendáveis. A indutância máxima é maior que 1mH , tal variação de indutância será considerada como adequada para linhas de distribuição.

O diagrama de bode pode ser conferido na Figura 14:

Figura 14 - Gráfico de bode utilizando impedância LCL.



Fonte: produção do próprio autor

Para a Figura 14 foi utilizado uma indutância de rede de $100\mu\text{H}$. Vale lembrar que para indutâncias muito pequenas a queda de tensão na impedância da linha também será reduzida. O amortecimento deste filtro, ele é efetuado pela própria resistência da linha que foi desconsiderada.

2.4 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Este capítulo mostrou as características de potência do regulador de tensão. Foi demonstrado o procedimento de cálculo dos componentes passivos do conversor, assim como dimensionamento desses componentes.

O filtro do conversor foi inicialmente projetado prevendo a ação de controle de corrente, que será projetada do próximo capítulo. Após o projeto do filtro, foi analisado o comportamento do mesmo para um caso em que o controlador de corrente não é capaz de controlar, por exemplo, correntes com a frequência de comutação, o resultado dessa análise foi uma faixa de indutância da rede para que o conversor opere em uma região segura.

3 MODELAGEM E CONTROLE

Inicialmente o capítulo traz uma descrição geral do funcionamento do compensador de tensão no PAC (Ponto de acoplamento de carga), demonstrando como acontecerá a interação entre o conversor a rede de alimentação para que ocorra a compensação de tensão no PAC. Com base do funcionamento do compensador é enfatizado sobre os módulos de controle necessários na implementação deste equipamento. Toda a estratégia de controle do conversor é explanada, sendo descrito o funcionamento de cada malha de controle e como ocorrem as iterações entre essas. Os modelos matemáticos das plantas presentes no sistema são apresentados, onde exclusivamente o modelo da planta de tensão do PAC é validado através de simulação numérica. Finalizando o capítulo, os controladores são projetados baseados nos modelos das plantas que compõem o sistema. Por fim o capítulo é encerrado como breves conclusões.

3.1 ESTRATÉGIA DE COMPENSAÇÃO DA TENSÃO NO PAC.

Este tópico descreve qualitativamente a forma com que o conversor drena ou injeta potência reativa no PAC, controlando a magnitude da tensão ali presente e fazendo uso da estrutura de potência apresentada no Capítulo 2.

O objetivo principal do conversor é manter a magnitude da tensão do PAC na faixa de fornecimento de energia classificada como adequada, como descrito na Tabela 1. A proposta para haver essa regulação é através da injeção ou absorção de uma potência reativa na barra controlada. De acordo com as equações de fluxo de potência entre duas barras (9) essa regulação de tensão é possível, pois há estreita relação entre o fluxo de potência reativa que circula na linha com a diferença de amplitude das tensões entre as duas barras. Dessa forma, mudanças na potência reativa que circula no conversor provocam mudanças na tensão da barra onde o mesmo está conectado. Apesar de não influenciar na presente análise, mas também concluído a partir das equações de fluxo de potência entre duas barras, a potência ativa que circula na linha possui estreita relação com o ângulo de abertura entre as barras (9).

Para promover circulação de potência reativa, o conversor utiliza-se da injeção de corrente senoidal e em quadratura com a tensão presente no PAC, na frequência fundamental da rede. A saída do conversor terá o comportamento de uma fonte de corrente, havendo a injeção ou consumo de reativo na barra, trazendo como consequência a alteração na tensão do PAC pelos motivos recém-comentados.

Para haver regulação da tensão do PAC, onde o conversor está conectado, este equipamento deve monitorar a magnitude de tensão nesse ponto e drenar a corrente em quadratura, conseqüentemente potência reativa, necessária para que a tensão lida no PAC atinja a um nível adequado de tensão de atendimento.

Além da circulação de reativos, uma pequena quantidade de potência ativa é necessária para suprir as perdas do conversor. As perdas, dissipadas nos semicondutores e resistências parasitas do conversor, geram uma redução da tensão total do barramento CC, sendo necessário um controlador para manter essa tensão com um nível médio adequado.

O controle da tensão total do barramento CC é feito através do monitoramento dessa tensão e conforme ela se afasta de sua referência uma parcela de potência ativa é drenada ou injetada na rede pelo conversor. Para obter a parcela de potência ativa necessária no controle de tensão total do barramento CC o conversor drena uma corrente da rede em fase com a tensão do PAC. Em uma compensação de tensão que exige a potência nominal do conversor é esperado que a parcela de corrente direta seja muito inferior a parcela de corrente em quadratura, e no caso em que não seja feito o processamento de reativos, apenas a componente em fase será drenada no PAC. A corrente resultante drenada pelo conversor será a soma da parcela de corrente em quadratura com a parcela de corrente em fase com a tensão.

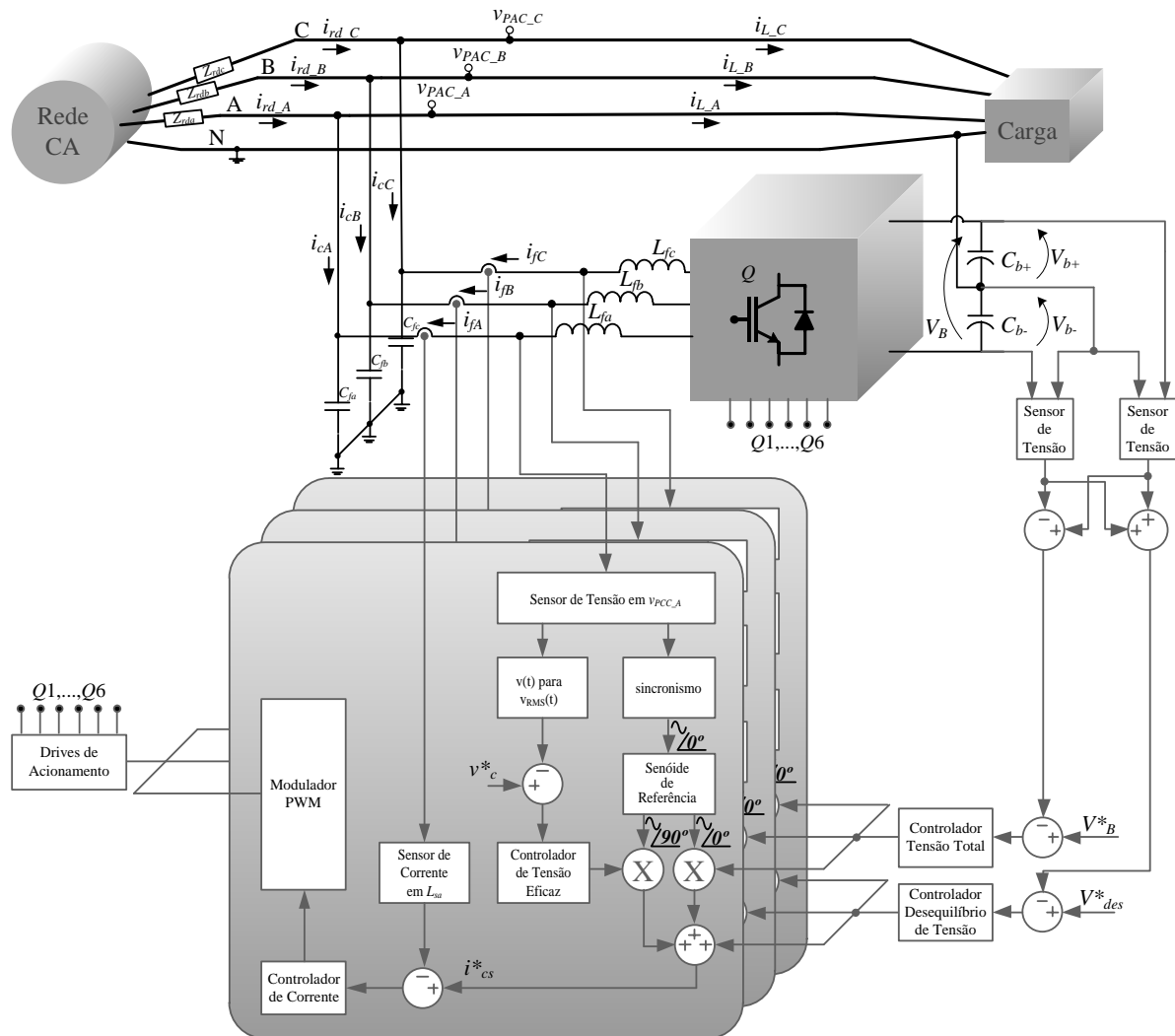
A estrutura do conversor possui um ponto médio nos capacitores do barramento CC, permitindo um desequilíbrio das tensões do PAC e das correntes do conversor, além de permitir circulação de corrente contínua. Porém este nível contínuo pode carregar mais um dos capacitores do barramento CC, causando diferentes tensões entre os barramentos com tensão positiva e o barramento com tensão negativa. O desequilíbrio das tensões do barramento CC possibilita que um dos capacitores assuma a maior parte da tensão total desse barramento, o que pode infligir o limite de tensão do mesmo. Para equilibrar as tensões no barramento CC é necessário um controlador que faça a leitura da tensão de desequilíbrio e permita uma circulação de corrente contínua no conversor, necessária para equilibrar as tensões neste.

A corrente total que circula pelo conversor deve ser uma soma de três parcelas, corrente com fase em quadratura com $VPAC$ (tensão no PAC), corrente com fase direta com $VPAC$ e corrente contínua.

A técnica utilizada para controlar as a corrente das três fases do conversor é através da variação da largura de pulso do comando das chaves (PWM), fazendo com que a frequência de comutação das chaves seja mantida fixa e a ondulação de corrente no indutor seja variável. E como a estrutura permite, o controle de corrente será independente entre fases.

Uma estrutura geral do conversor é mostrada na Figura 15.

Figura 15 - Estrutura geral do conversor.



Fonte: produção do próprio autor

Como o conversor possui quatro grandezas devem ser controladas há um total de quatro malhas de controle, malha de corrente (MC), malha de tensão no PAC (MVPAC),

malha de tensão total do barramento CC (MVT) e malha de tensão de desequilíbrio do barramento CC (MVD). Onde a malha de corrente possui como referência uma soma de três parcelas, providas dos demais controladores, uma parcela senoidal em quadratura em relação a VPAC, uma parcela senoidal com fase direta em relação a VPAC e uma terceira parcela contínua. Tais parcelas provêm respectivamente dos controladores de VPAC, VT e VD.

A seguir o funcionamento de todas as malhas de controle é discutido. A Figura 16 traz o diagrama geral de controle empregado no compensador de tensão.

A MC, apresentada na Figura 17, possui uma referência de corrente a ser seguida chamada de i^*_{cs} , essa é subtraída do sinal oriundo do sensor de corrente, que monitora a corrente no indutor do conversor, gerando um sinal de erro, que é levado ao controlador de corrente. O controlador de corrente produz uma ação de controle que forçará o rastreamento da referência. O sinal de controle é levado ao circuito de modulação *PWM* que definirá os pulsos de comando das chaves. Os pulsos de comando são levados aos *drives* responsáveis pelo acionamento das chaves presentes na estrutura de potência.

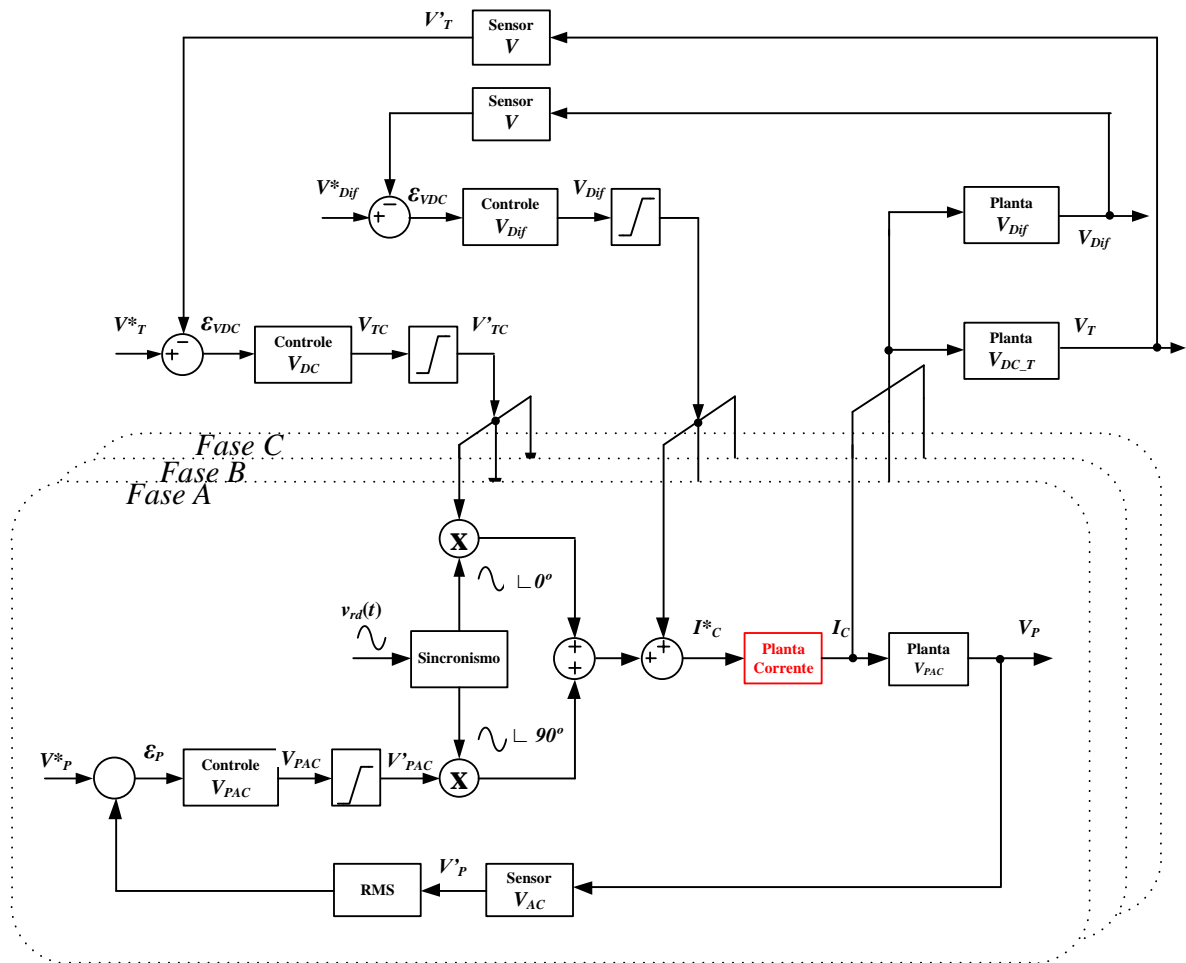
A geração das tensões de referência senoidais para o circuito de controle é feita por um módulo digital (19), que faz a leitura da tensão do PAC (VPAC) e através da passagem por zero da mesma, gera duas referências senoidais, uma em fase com VPAC e outra em quadratura com VPAC, ambas as referências são disponibilizadas aos controladores.

A MVPAC faz a leitura instantânea de VPAC e através de um conversor de tensão instantânea para um nível contínuo, proporcional a tensão *RMS* do sinal lido, obtendo o valor da tensão eficaz do PAC. Após isso, a tensão lida é subtraída da referência de tensão (que deve se encontrar dentro da faixa adequada de tensão de atendimento), o erro é levado a um controlador, que produz a ação de controle necessária para adequar VPAC. O sinal do controlador é multiplicado pela referência em quadratura, produzindo assim a referência de corrente senoidal e com a amplitude determinada pelo controlador e necessária para atingir a regulação de tensão no PAC.

A MVT faz a leitura da tensão total do barramento CC, essa é comparada com uma referência. O erro é levado ao controlador, que produz a ação de controle necessária para manter a tensão total do barramento CC constante. O sinal do controlador é multiplicado pela referência em fase com VPAC, dando origem a referência de corrente direta.

A MVD faz a leitura da tensão de desequilíbrio entre os capacitores e compara com uma referência nula (pois não há necessidade desse desequilíbrio). O erro gerado é lido por um controlador que produz uma ação de controle necessária para eliminar o desequilíbrio de tensão entre os capacitores.

Figura 16 - Estrutura geral de controle.



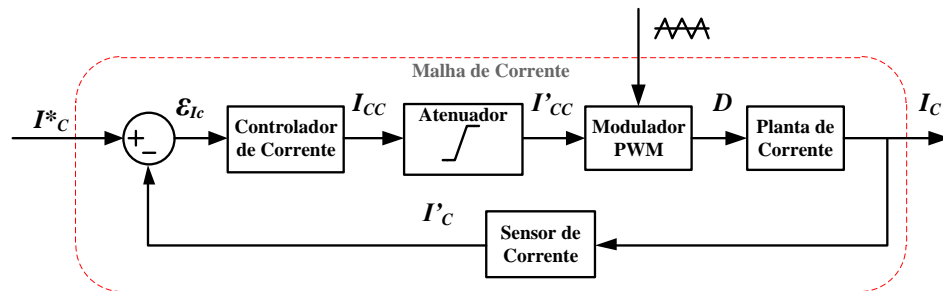
Fonte: produção do próprio autor

A estrutura da malha de corrente é apresentada na Figura 17.

O sinal de referência para MVPAC também é produzido por um módulo digital. Aqui é válido salientar que o objetivo do conversor é manter a magnitude da VPAC na faixa adequada de tensão (de 116 Vrms à 133 Vrms), e uma tensão o mais estável possível, não sendo necessário que a VPAC mantenha-se exatamente no nível nominal de tensão de atendimento. Dessa forma, para evitar perdas desnecessárias no conversor é utilizado somente sua mínima potência necessária para regulação de VPAC. O módulo digital deverá monitorar a magnitude de VPAC e determinar a necessidade ou não da compensação. Nos momentos em que VPAC está adequada o conversor atua apenas nas variações de tensão, sejam elas curtas ou longas, não alterando a tensão nominal do PAC. Nos momentos em que VPAC se

enquadra em um nível precário ou crítico, a referência da MVPAC passa a ser o limiar da tensão adequada, distando o mínimo possível da VPAC

Figura 17 - Estrutura da malha de corrente.



Fonte: produção do próprio autor

A banda passante dessas malhas é definida de acordo com as referências e perturbações sofridas pela grandeza a ser controlada. A banda passante da MC é muito superior às demais malhas, estando na ordem de unidades de quilohertz e é considerada como apenas um ganho para as demais malhas. A MVPAC, MVT e MVD são lentas, com banda passante na ordem de unidades de hertz. No projeto dos controladores a definição da banda passante de cada malha será mais detalhada.

Na sequência é feita a modelagem das plantas necessárias para o projeto dos controladores.

3.2 MODELAGEM

O modelo trata-se de uma representação matemática das plantas que compõem as malhas de controle e descrevem o comportamento da saída de uma determinada planta quando a mesma é submetida a um sinal de entrada conhecida. Para projetar os controladores é necessário o conhecimento matemático da dinâmica das plantas frente a certas entradas, assim a modelagem é essencial para o projeto dos controladores.

Neste tópico são apresentados os modelos de todas as plantas das malhas de controle. Tais plantas serão modeladas no domínio da frequência apesar de que algumas plantas já foram abordadas em trabalhos anteriores (20) (15). Como a planta de tensão do PAC não foi encontrada em outros trabalhos a mesma será modelada e em seguida validada, através de simulações numéricas.

O modelo da planta de corrente, planta de tensão total do barramento CC, planta de tensão diferencial do barramento CC, planta de tensão no PAC são apresentadas respectivamente nos tópicos a seguir.

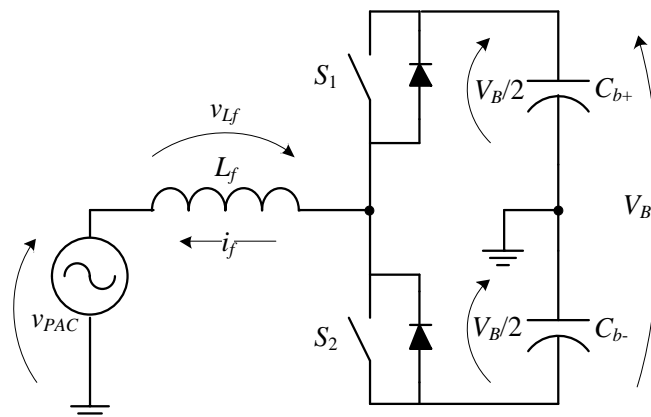
3.2.1 Modelo da Planta de Corrente

O modelo matemático da planta de corrente tem o objetivo de descrever a dinâmica da corrente no indutor (grandeza de saída) para uma variação na razão cíclica do conversor (grandeza de entrada).

A estrutura de potência é um inversor trifásico com ponto médio, permitindo que a análise de corrente do conversor seja para apenas uma fase do circuito, onde o resultado é adotado para as demais fases. A estrutura que representa a planta de corrente é mostrada na Figura 18, sendo composta pelo barramento CC, um braço do conversor, o indutor de saída e uma corrente e tensão no indutor de filtro e na saída do conversor respectivamente, ambas grandezas são independentes das demais fases.

No modelo de corrente o efeito das impedâncias de rede, impedância da carga e o capacitor de filtro são substituídos por uma fonte de tensão, devido ao capacitor de filtro reduzir pequenas variações de tensão neste ponto, chamado de PAC. A impedância da rede apresenta influência neste modelo a medida que sua magnitude se aproxima da impedância do indutor.

Figura 18 - Circuito referente a planta de corrente.



Fonte: adaptado de (20)

Para determinar a corrente de saída em função da razão cíclica das chaves pode-se utilizar do método de valores médios quase instantâneos, o que é permitido para este conversor, uma vez que a frequência de comutação é muito superior a frequência de oscilação da tensão da rede e a componente da corrente de interesse, presente no indutor, tem frequência de mesma ordem que a frequência da tensão da rede. Assim, para obter o modelo da planta,

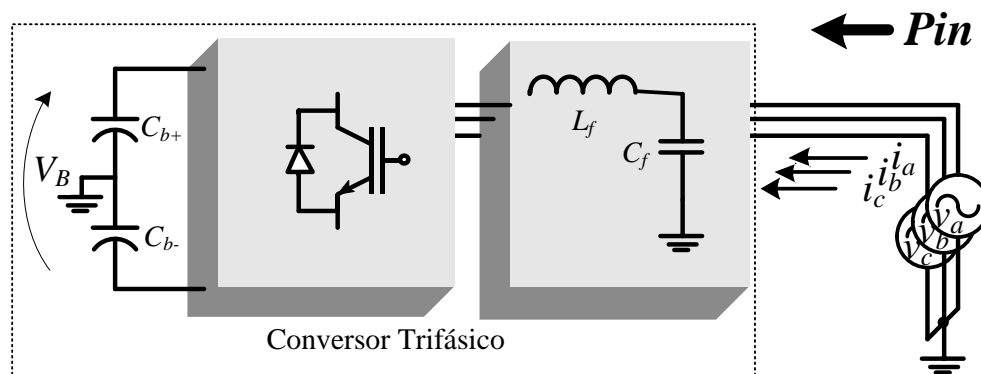
foi utilizada uma análise por superposição, zerando a tensão presente na saída do conversor (V_{PAC}). A função de transferência da planta de corrente é apresentada na equação (46), a mesma desconsidera a parcela de v_{PAC} , pois tal tensão é tratada como perturbação na MC.

$$Gi_f(s) = \frac{i_f(s)}{D(s)} = \frac{V_B}{s \cdot L_f} \quad (46)$$

3.2.2 Modelo da Planta de Tensão Total do Barramento CC

O modelo da planta de tensão total do barramento CC representa matematicamente a dinâmica da tensão total do barramento CC (V_B) para uma variação da amplitude da corrente direta $i_{f,d}$ presente no conversor. O equacionamento é feito através do balanço de potência ativa do conversor, ilustrado na Figura 19, onde é considerado que toda a potência ativa que entra nas três fases do conversor também entra em um circuito equivalente, que representa o barramento e as perdas do conversor. O circuito equivalente é apresentado na Figura 20, sendo composto por uma corrente média equivalente, representando a corrente no barramento CC e usada no cálculo da potência ativa do circuito, uma capacitância equivalente do barramento CC e um resistor equivalente às perdas do conversor, calculado a partir do rendimento do mesmo.

Figura 19 - Representação da potência ativa de entrada do conversor considerada no modelo.

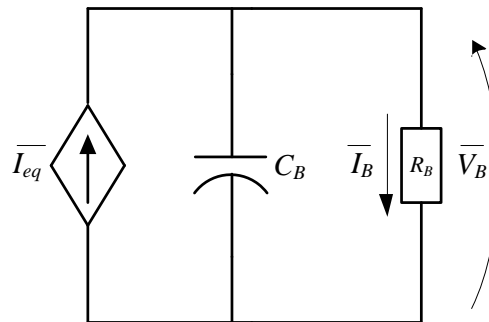


Fonte: produção do próprio autor

Para uma tensão V_B constante no barramento CC, a potência ativa do conversor é dada pela multiplicação da tensão V_B com a corrente média I_{eq} , a potência ativa drenada pelo barramento CC é dada pela equação (47).

$$P_B(s) = V_B \cdot \overline{I_{eq}}(s) \quad (47)$$

Figura 20 - Circuito equivalente ao barramento CC e as perdas no conversor.



Fonte: adaptado de (20)

P_B deverá ser idêntica à potência ativa de entrada do conversor, que é uma soma das potências ativas nas três fases do inversor. Para a modelagem é considerado que há a mesma magnitude das tensões (v_a , v_b e v_c), iguais a v_o , e de correntes diretas (i_a , i_b e i_c), iguais a i_o , dessa forma simplificando os cálculos. A multiplicação da tensão eficaz da saída do conversor com a corrente direta eficaz do mesmo fornece a potência de entrada de uma fase do conversor, a soma das potências das três fases é a potência ativa total na entrada do conversor, como apresentado na equação (48). As correntes e tensões são consideradas puramente senoidais e com frequência da rede.

$$P_{in}(s) = \frac{3}{2} \cdot v_{o_pk} \cdot i_{o_pk}(s) \quad (48)$$

Onde v_{o_pk} é a tensão de pico de v_o e i_{o_pk} é a corrente de pico i_o .

No presente modelo a magnitude da tensão alternada presente na saída do conversor é considerada constante e as variações da amplitude da corrente de entrada são lentas quando comparadas com a oscilação da rede, dessa forma o modelo se aproxima melhor para frequências inferiores as frequências da rede. A igualdade da potência ativa de entrada e de saída é apresentada na equação (49), igualando as equações (47) e (48).

$$V_B \cdot \overline{I_{eq}}(s) = \frac{3}{2} \cdot v_{o_pk} \cdot i_{o_pk}(s) \quad (49)$$

Pequenas variações na corrente do barramento podem ser representadas por uma pequena variação da tensão do barramento sob a impedância equivalente do circuito da Figura 20, obtendo a equação (50).

$$I_{eq}(s) = \frac{v_B(s)}{s \cdot C_o + \frac{1}{R_B}} \quad (50)$$

Como R_B é relativamente alto, a equação (50) é simplificada para a equação (51).

$$I_{eq}(s) = \frac{v_B(s)}{s \cdot C_o} \quad (51)$$

Substituindo a equação (51) na equação (49) têm-se a tensão do barramento em função da corrente de pico direta de entrada do conversor, sendo possível a representação da função de transferência do modelo da planta de tensão total do barramento CC, apresentada na equação (52).

$$G_{Vtt} = \frac{v_B(s)}{i_{c_pk}(s)} = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_{rd_pk}}{V_B} \cdot \frac{1}{s \cdot C_o} \quad (52)$$

3.2.3 Modelo da Planta de Tensão Diferencial do Barramento CC

O modelo matemático da planta de tensão diferencial de barramento deve representar o comportamento da diferença de tensão entre os capacitores C_{b+} e C_{b-} do barramento CC devido a corrente contínua na entrada do conversor. O equacionamento do modelo é feito através de um balanço de corrente, onde as correntes contínuas presentes nas entradas do conversor, Figura 21, são transferidas para o barramento CC, Figura 22.

Ao drenar uma corrente contínua, a mesma circula para os capacitores do barramento CC de acordo com a comutação das chaves, dessa forma pode haver variação na tensão diferencial entre os capacitores do barramento, um circuito equivalente é mostrado na Figura 22, onde apresenta o barramento e as parcelas de corrente contínua comutadas para o barramento de acordo com a razão cíclica das chaves.

Para a modelagem as correntes de entrada (I_a , I_b e I_c) são consideradas iguais à I_o .

Para uma determinada razão cíclica $d(t)$ e nível corrente contínua de entrada é possível obter a equação que relaciona a corrente e tensão nos capacitores C_{b+} e C_{b-} , mostradas nas equações (53) e (54) respectivamente.

$$I_a \cdot d_a(t) + I_b \cdot d_b(t) + I_c \cdot d_c(t) = C_{b+} \cdot \frac{dV_{b+}}{dt} \quad (53)$$

$$I_a \cdot (1 - d_a(t)) + I_b \cdot (1 - d_b(t)) + I_c \cdot (1 - d_c(t)) = C_{b-} \cdot \frac{dV_{b-}}{dt} \quad (54)$$

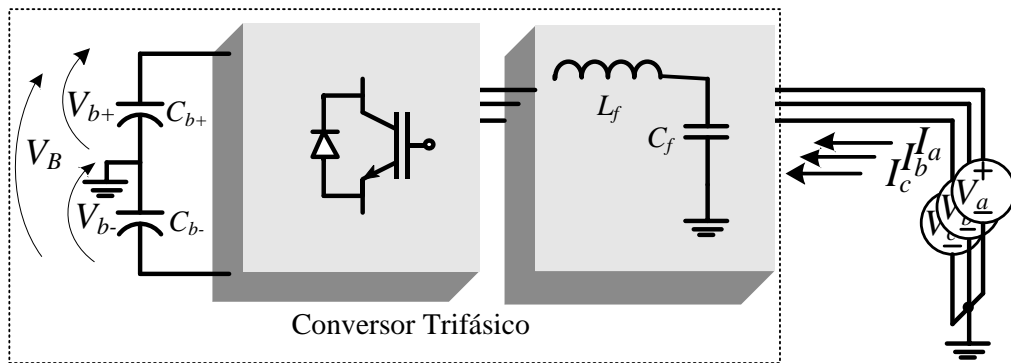
Aplicando a transformada de Laplace e subtraindo a equação (54) da equação (53) é obtida a diferença de tensão entre os capacitores de barramento em função da corrente contínua drenada pelas três fases do conversor, como mostrado na equação (55), observa-se que a tensão diferencial do barramento independe da razão cíclica das chaves. É considerado que os capacitores possuem a mesma capacitância C_b .

$$I_a + I_b + I_c = C_b \cdot s \cdot (V_{b+} - V_{b-}) \quad (55)$$

Considerando que as correntes nas fases são de mesma magnitude e que os capacitores que compõe o barramento possuem o dobro da capacitância equivalente formada pelos mesmos é obtido a função de transferência da planta de tensão diferencial do barramento CC, mostrada na equação (56.)

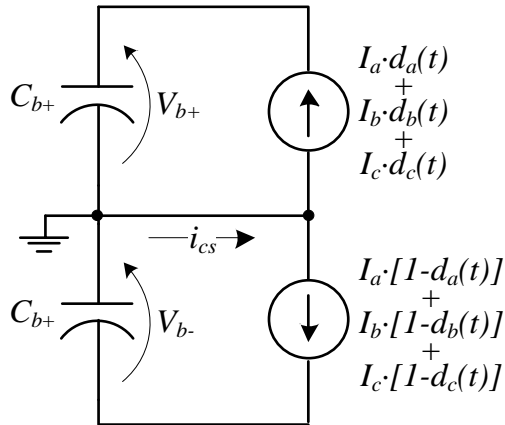
$$G_{vd} = \frac{V_{b+} - V_{b-}}{I_o} = \frac{3}{2 \cdot s \cdot C_B} \quad (56)$$

Figura 21 - Representação da entrada de corrente contínua no conversor.



Fonte: produção do próprio autor

Figura 22 - Planta equivalente de tensão diferencial.



Fonte: adaptado de (20)

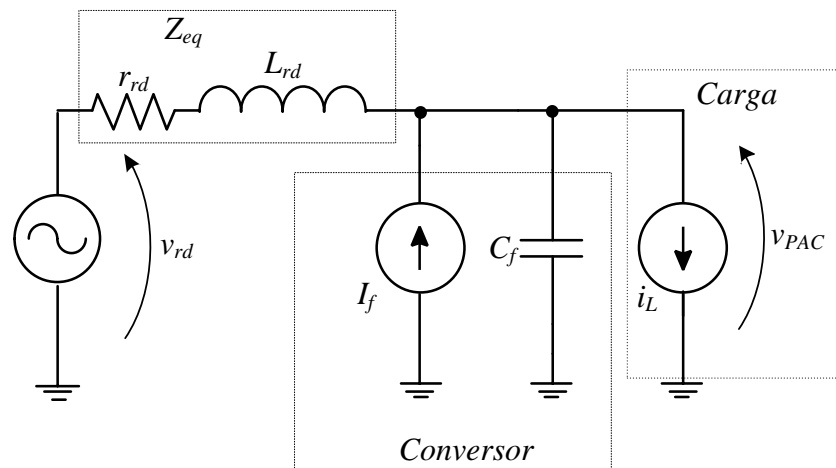
3.2.4 Modelo da Planta de Tensão do PAC

O modelo matemático da planta de tensão de saída deverá representar o comportamento da amplitude da tensão presente no PAC frente a uma variação de corrente em quadratura do conversor. Como a estrutura do conversor apresenta ponto médio e

controladores de corrente e tensão independentes entre fases, a modelagem do mesmo é feita somente para uma fase, sendo válida para as demais.

Devido à frequência da corrente no conversor ser muito menor que sua frequência de comutação a estratégia de modelagem utiliza o conceito de valores médios quase instantâneos, omitindo as correntes de alta frequência nas análises. O monitoramento e o controle da corrente (i_f) no conversor ocorre no lado do conversor, sendo modelado uma fonte de corrente neste ponto. A carga conectada ao PAC também será tratada como uma fonte de corrente. O circuito equivalente à planta de tensão no PAC é apresentado na Figura 23, sendo formada pela tensão da rede e sua impedância equivalente, com o filtro de alta frequência, o conversor e a carga.

Figura 23 - Circuito equivalente ao modelo de tensão do PAC.



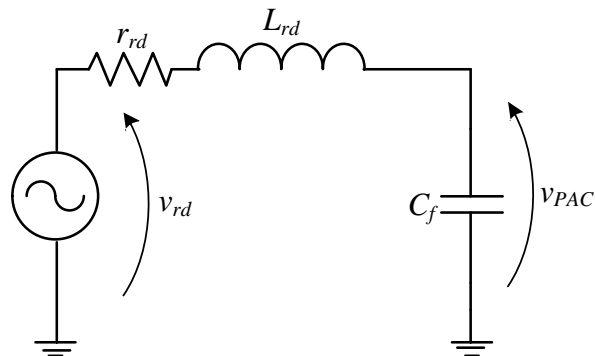
Fonte: produção do próprio autor

Para representar matematicamente o comportamento da tensão no PAC em função das fontes presentes no circuito utilizou-se o princípio da superposição, onde v_{PAC} (tensão no PAC) é composta pela soma de três parcelas, $v_{PAC_{rd}}$, $v_{PAC_{cq}}$ e v_{PAC_L} , cada parcela é devido a uma fonte presente no modelo, respectivamente a fonte de tensão da rede, corrente em quadratura do conversor e corrente da carga. A equação (57) descreve a composição da tensão do PAC.

$$v_{PAC}(s) = v_{PAC_{rd}}(v_{rd}(s)) + v_{PAC_{cq}}(i_{cq}(s)) + v_{PAC_L}(i_L(s)) \quad (57)$$

A parcela de tensão no PAC devido à tensão da rede, $v_{PAC_{rd}}$, é calculada considerando o circuito da Figura 24.

Figura 24 - Circuito para calcular a tensão do PAC devido à tensão da rede.



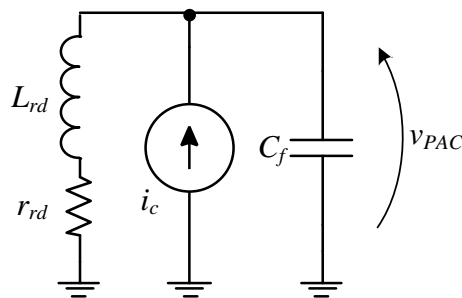
Fonte: produção do próprio autor

A tensão de saída devido a parcela de tensão da rede é dada pela equação (58):

$$v_{PAC_A}(s) = \frac{V_{rd}(s) \cdot \frac{1}{L_{rd} \cdot C_f}}{s^2 + s \frac{r_{rd}}{L_{rd}} + \frac{1}{L_{rd} \cdot C_f}} \quad (58)$$

Para calcular a tensão no PAC em função da corrente do conversor foi utilizado o circuito da Figura 25.

Figura 25 - Circuito considerado para calcular a tensão no PAC devido a corrente do conversor.



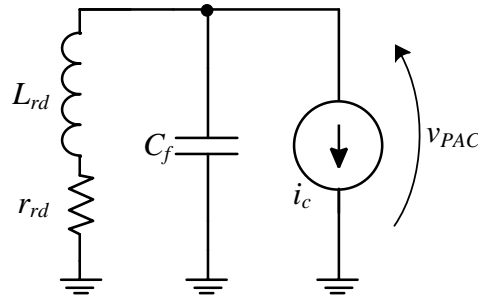
Fonte: produção do próprio autor

A parcela de tensão no PAC em função da corrente do conversor é dada pela equação (59):

$$v_{PAC_B}(s) = \frac{I_{conv}(s) \cdot \frac{1}{C_f} \cdot \left(s + \frac{r_{rd}}{L_{rd} \cdot C_f} \right)}{s^2 + s \frac{r_{rd}}{L_{rd}} + \frac{1}{L_{rd} \cdot C_f}} \quad (59)$$

O circuito que descreve a parcela de tensão de saída devido a corrente da carga encontra-se na Figura 26.

Figura 26 - Circuito considerado para cálculo de VPAC devido a corrente na carga.



Fonte: produção do próprio autor

A parcela da tensão de saída em função da corrente na carga está matematicamente caracterizada na equação (60).

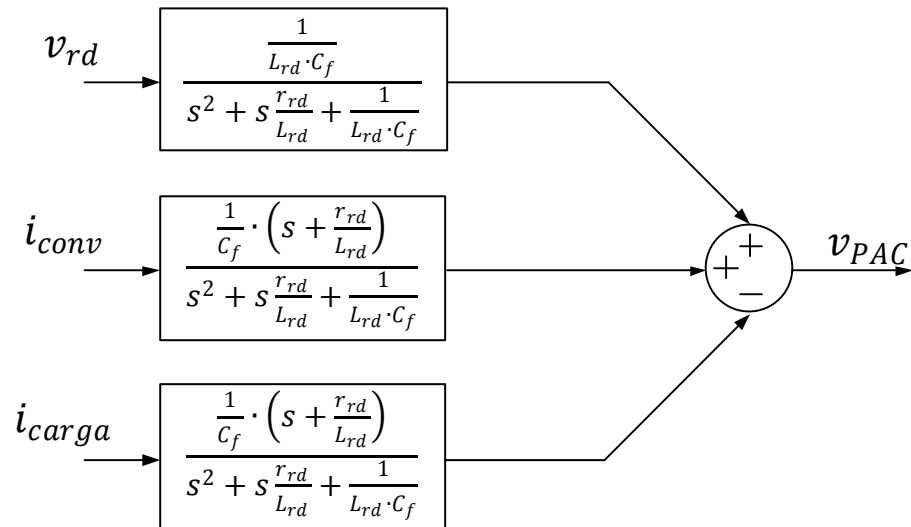
$$v_{PAC_C}(s) = - \frac{I_{carga}(s) \cdot \frac{1}{C_f} \cdot \left(s + \frac{r_{rd}}{L_{rd} \cdot C_f} \right)}{s^2 + s \frac{r_{rd}}{L_{rd}} + \frac{1}{L_{rd} \cdot C_f}} \quad (60)$$

Como a tensão de saída do conversor é a soma das três parcelas anteriormente calculadas, a substituição das equações (58), (59) e (60) na equação (57) representa a tensão no PAC, descrita na equação (61).

$$v_{PAC}(s) = \frac{\begin{cases} +V_{rd}(s) \cdot \frac{1}{L_{rd} \cdot C_f} \\ +I_{conv}(s) \cdot \frac{1}{C_f} \cdot \left(s + \frac{r_{rd}}{L_{rd}} \right) \\ -I_{carga}(s) \cdot \frac{1}{C_f} \cdot \left(s + \frac{r_{rd}}{L_{rd}} \right) \end{cases}}{s^2 + s \frac{r_{rd}}{L_{rd}} + \frac{1}{L_{rd} \cdot C_f}} \quad (61)$$

Para uma melhor visualização da composição da tensão da planta, a Figura 27 apresenta um diagrama de blocos da mesma.

Figura 27 - Diagrama de blocos da planta de tensão no PAC.



Fonte: produção do próprio autor

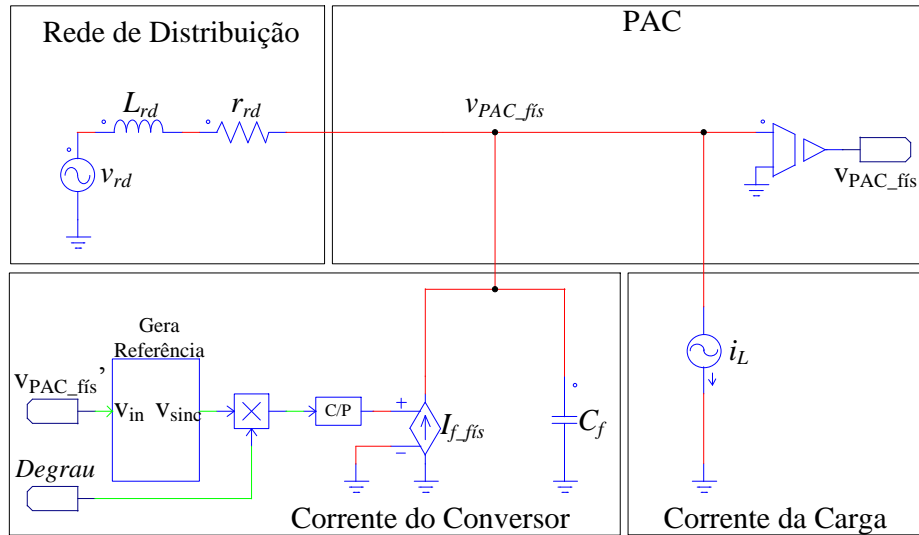
Como o conversor possui controle somente sob a corrente do mesmo, a planta de tensão no PAC, utilizada para o projeto do controlador, é dada somente pela função de transferência que relaciona v_{PAC} com a corrente em quadratura do conversor (i_{cq}). Os demais sinais que compõe v_{PAC} são considerados como perturbação para a malha de controle de v_{PAC} . A função de transferência da planta de tensão é mostrada na equação (62).

$$G_{VPCC}(s) = \frac{v_{PAC}(s)}{i_{cq}(s)} = \frac{\frac{1}{C_f} \cdot \left(s + \frac{r_{rd}}{L_{rd}}\right)}{s^2 + s \frac{r_{rd}}{L_{rd}} + \frac{1}{L_{rd} \cdot C_f}} \quad (62)$$

3.2.5 Validação da Planta de Tensão do PAC

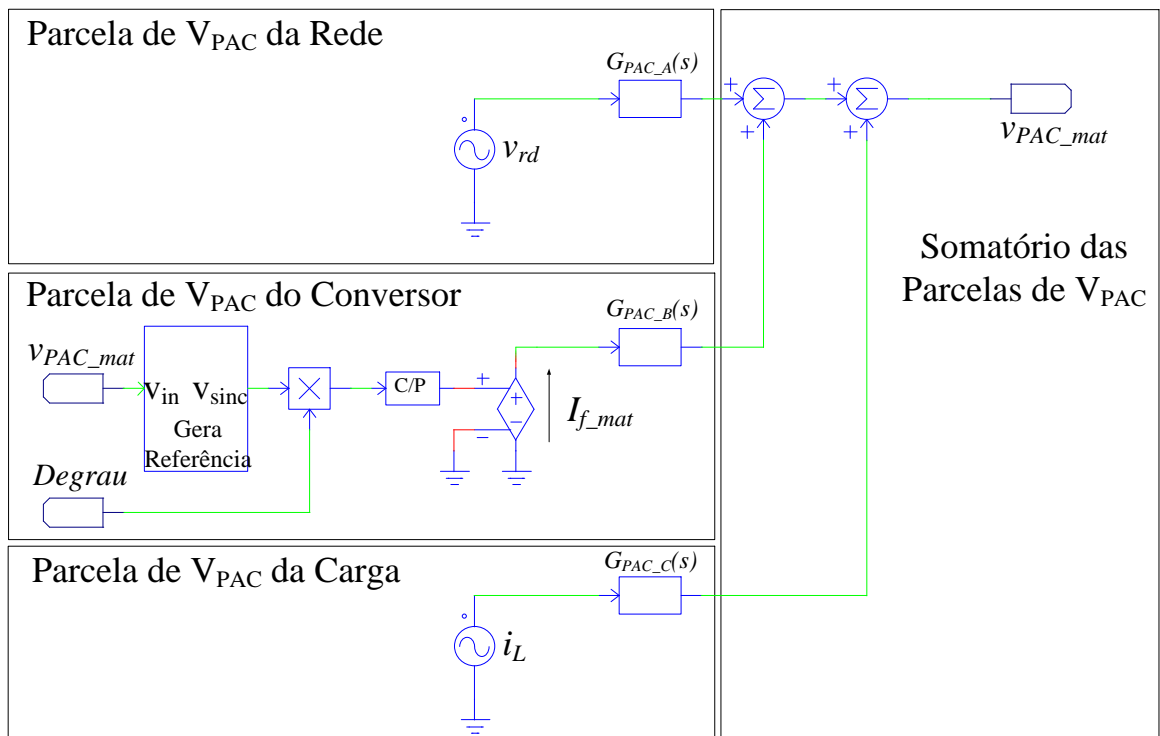
Como a planta de tensão no PAC não foi encontrada em outros trabalhos é necessário uma validação da modelagem matemática da mesma, a fim de verificar a integridade dessa representação matemática. A validação foi feita através de uma simulação numérica utilizando o software PSIM®, onde foi simulado o circuito equivalente apresentado na Figura 23 juntamente com as equações que representam o circuito, aplicando-se as mesmas entradas para ambas representações do modelo, para uma comparação de ambas saídas. O circuito simulado é apresentado na Figura 28, com a simulação do circuito correspondente ao modelo físico da planta, e na Figura 29, com a simulação do circuito correspondente ao modelo matemático da planta.

Figura 28 - Circuito simulado para o modelo físico da planta VPAC.



Fonte: produção do próprio autor

Figura 29 - Circuito simulado para o modelo matemático da planta VPAC.



Fonte: produção do próprio autor

Os parâmetros utilizados para a simulação são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros utilizados para validação do modelo da plana de VPAC.

Corrente na carga	38,8A
Fator de potência da carga (indutiva)	0,8
Corrente em quadratura antes do degrau	0A
Corrente em quadratura após o degrau	12A
Indutância série da linha	$L_{rd} = 2,7mH$
Resistência série da linha	$r_{rd} = 0,3\Omega$
Tensão Nominal da rede	$V_{rd} = 127V_{RMS}$

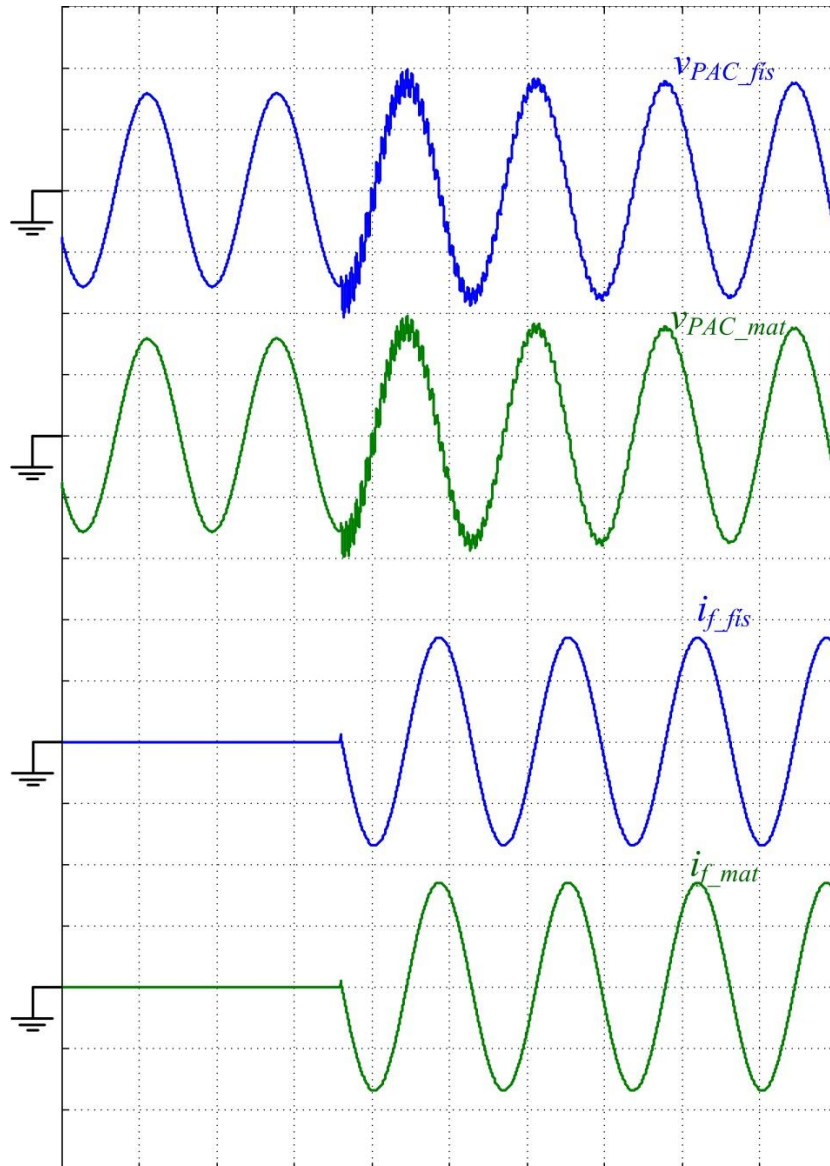
Fonte: produção do próprio autor

A avaliação da representação matemática do modelo deve ter seu comportamento transitório e seu comportamento em regime permanente validados, dessa forma um degrau na corrente do conversor foi aplicado, modificando a amplitude da corrente do conversor instantaneamente, possibilitando a validação para a banda de frequência desejada.

Como resultado da simulação é a comparação das saídas de ambas as representações do modelo, que são idênticas quando o equacionamento é correto. As tensões VPAC das representações são apresentadas na Figura 30.

Como as curvas de saída são idênticas, a representação matemática será considerada válido.

Figura 30 - VPAC do modelo físico, VPAC do modelo matemático, corrente injetada no modelo físico, corrente injetada no modelo matemático. (100 V/div, 10 A/div, 10 ms/div).



Fonte: produção do próprio autor

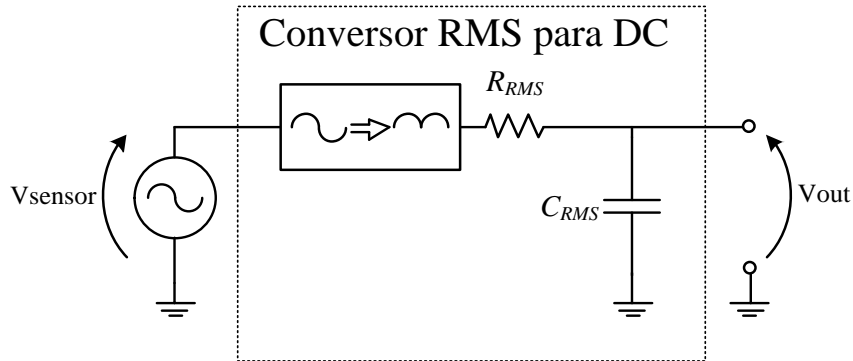
3.2.6 Modelo do Conversor de tensão RMS para Tensão Contínua

A representação matemática do conversor RMS para tensão contínua deve representar o comportamento dinâmico do mesmo ao sofrer variações em seu sinal de entrada. A conversão é feita utilizando o circuito integrado AD736 do fabricante Analog Devices, este componente é usado após o sensor de tensão no PAC e disponibiliza um em sua saída um sinal equivalente a magnitude do sinal de entrada do conversor.

Neste trabalho o conversor RMS para tensão contínua foi utilizado de modo que o circuito faça a média do módulo do sinal de VPAC após o sensor de tensão. Dessa forma o

mesmo apresenta somente um par RC para efetuar a média do módulo do sinal do sensor, a representação do circuito está na Figura 31.

Figura 31 - Representação do conversor RMS para VDC.



Fonte: produção do próprio autor

Considera-se que haverá variações lentas, inferiores a frequência da rede, na amplitude de tensão lida pelo sensor de VPAC. Assim função de transferência do conversor RMS para tensão contínua é devido somente ao circuito RC, sendo apresentada na equação (63).

$$G_{rms}(s) = \frac{1}{s \cdot R_{RMS} \cdot C_{RMS} + 1} \quad (63)$$

3.2.7 Modelo do Modulador PWM

A representação matemática do modulador PWM deve apresentar o comportamento da razão cíclica d ao aplicar um sinal provido do controlador na entrada do mesmo.

O modulador converterá um sinal contínuo em pulsos de comando para as chaves do inversor. O método utilizado para promover tal conversão foi a comparação de um sinal triangular de alta frequência (frequência de comutação) com um sinal de frequência muito inferior a frequência à onda triangular (17), como representado na Figura 32.

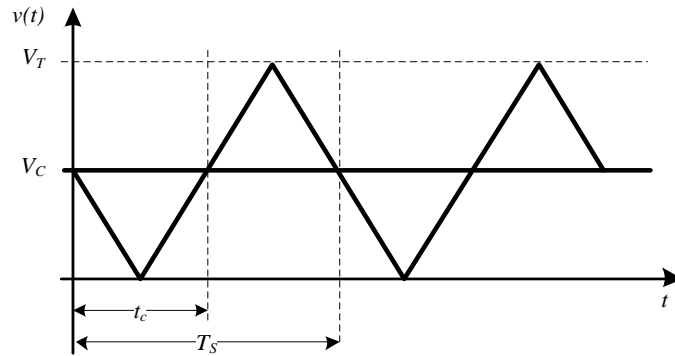
Onde T_S é o período de comutação, t_C é o período em que uma das chaves permanece fechada, V_C é o sinal de baixa frequência e V_T é o valor de pico do sinal triangular, defini-se D como sendo a razão cíclica, estabelecida pela equação (64).

$$D = \frac{t_C}{T_S} \quad (64)$$

Por comparação de triângulos tem-se que a razão cíclica é equivalente a tensão V_C sob a tensão V_P , assim é possível encontrar a função de transferência do modulador, apresentada na equação (65).

$$PWM = \frac{D}{V_C} = \frac{1}{V_P} \quad (65)$$

Figura 32 - Comparação do sinal da onda triangular com o sinal de baixa frequência.

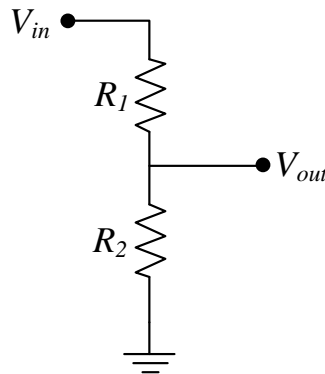


Fonte: (15)

3.2.8 Modelo dos Sensores de Tensão

A estrutura de controle utilizará dois sensores de tensão, (o sensor de tensão de barramento CC e o sensor de tensão do PAC) e ambos farão uso de divisores de tensão resistivos, como apresentado na Figura 33.

Figura 33 - Sensor de tensão.



Fonte: (15)

A representação matemática do comportamento da tensão de saída V_{out} do sensor quando submetido a uma tensão de entrada V_{in} estão representadas logo abaixo, onde a equação (66) apresenta o ganho do sensor de tensão de barramento (total e diferencial) e a equação (67) apresenta o ganho do sensor de tensão no PAC.

$$K_{Vb} = \frac{R_{b1}}{R_{b1} + R_{b2}} \quad (66)$$

$$K_{Vrd} = \frac{R_{rd1}}{R_{rd1} + R_{rd2}} \quad (67)$$

3.2.9 Modelo do Sensor de Corrente

Para medir a corrente será utilizado um sensor de corrente que funciona por efeito Hall. O modelo utilizado é o “CSNT-651”, do fabricante Honeywell, que possui saída em corrente e opera com elevada frequência, produzindo um ganho na corrente de entrada dado por $K_{s_i} = 1:1000$. Como é inserido um resistor na saída do sensor, uma tensão é lida representando a corrente do sensor, assim o ganho do sensor é dado pela equação (68).

$$K_{s_i} = \frac{R_{s_i}}{K_{s_i}} \quad (68)$$

3.3 PROJETO DOS CONTROLADORES

Nesta etapa será apresentado o projeto do controlados de corrente, controlador de tensão total do barramento CC, controlador de tensão diferencial do barramento CC e por fim e controlador de tensão no PAC.

O método utilizado para o projeto de todos os controladores foi a análise da função de transferência das malhas de controle no domínio da frequência. Considerando o controlador como apenas um ganho unitário, o diagrama de bode da função de transferência em malha aberta foi analisado, e para cada uma das malhas, foi projetado um controlador atendendo as especificações de banda passante e estabilidade relativa necessária. Após a especificação e cálculo do controlador. Novamente é traçada a função de transferência de malha aberta considerando o controlador projetado, onde é analisado se a mesma atendeu os requisitos de projeto. A mesma metodologia é adotada para o projeto de todos os controladores.

As malhas de tensão são muito mais lentas que a malha de corrente, dessa forma não haverá interação entre os controladores de tensão com o controlador de corrente. Espera-se que a malha de tensão do PAC não interaja com as malhas que controlam o barramento pois a mesma opera com uma corrente ortogonal à corrente usada no controle do barramento CC. A análise de influência ente os controladores de tensão de barramento foi avaliada em um trabalho anterior (21), havendo pouca iteração ao projetar as frequências de cruzamento dessas malhas devidamente afastadas.

Para o projeto dos controladores são necessários os parâmetros do conversor, que foram ajustados para respeitar limites físicos de hardware, a disponibilidade de recursos e para otimizar o projeto dos controladores. A Tabela 5 apresenta as especificações do conversor considerados no cálculo dos controladores.

Tabela 5 - Parâmetros do conversor para o projeto dos controladores.

Indutância do filtro de saída	$L_f = 1100\mu H$
Capacitância do barramento CC	$C_O = 1mF$
Tensão nominal do barramento CC	$V_O = 600V$
Ganho do sensor de corrente	$K_{s_i} = 0,068$
Ganho do sensor de tensão total	$K_{s_{vt}} = 0,01$
Ganho do sensor de tensão diferencial	$K_{s_{vd}} = 0,01$
Ganho do sensor de tensão de saída	$K_{s_{vs}} = 0,01$
Ganho na saída do controlador de corrente	$K_{at_i} = 0,64$
Ganho na saída do controlador de tensão total	$K_{at_{vt}} = 0,21$
Ganho na saída do controlador de tensão diferencial	$K_{at_{vd}} = 1$
Ganho na saída do controlador de tensão de saída	$K_{at_{vs}} = 0,84$
Ganho do multiplicador de corrente direta	$K_{md} = 0,1$
Ganho do multiplicador de corrente em quadratura	$K_{mq} = 0,8$
Frequência de comutação	$f_s = 50kHz$
Ganho do modulador PWM	$K_{PWM} = 0,09V^{-1}$

Fonte: Produção do próprio autor

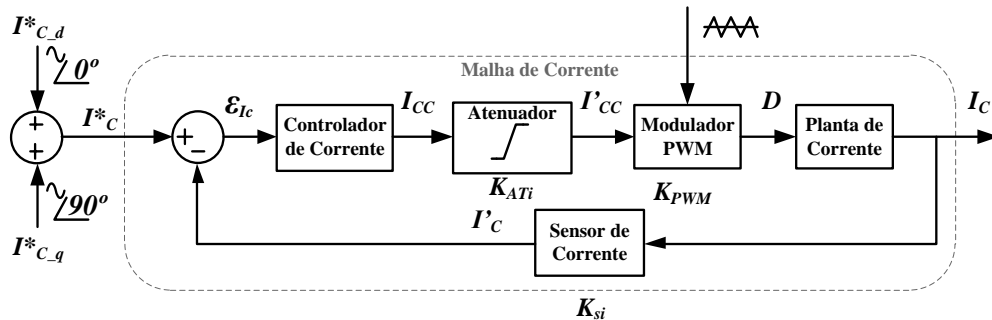
Os requisitos de controle (17) (22) são:

- Margem de fase entre 30° e 150°;
- A inclinação da curva de ganho do sistema em laço aberto na passagem por 0dB deve ser de -20dB/década;
- Erro estático nulo;
- A frequência de cruzamento da curva de ganho para o sistema em laço aberto deve ser em torno de quatro vezes menor do que a frequência de comutação do modulador PWM.

3.3.1 Projeto do Controlador de Corrente

Como já mencionado o controlador de corrente, irá impor uma razão cíclica de forma que o conversor drene a corrente de referência, essa será senoidal e com frequência da rede. Significando que a banda passante dessa malha será superior a tal frequência, sendo capaz de impor corrente na frequência fundamental mesmo com a presença de harmônicos na tensão do PCC. A malha de corrente é apresentada na Figura 34, a mesma possuirá a soma de duas referências, uma em fase com VPAC (I_{C_d}) e outra em quadratura (I_{C_q}).

Figura 34 - Diagrama de blocos da malha de corrente.



Fonte: produção do próprio autor

O controlador de corrente terá sua dinâmica mais rápida que os demais controladores, portando sua banda passante será maior também, mas limitada em torno de um quarto da frequência de comutação (17)

O projeto do controlador é feito utilizando a função de transferência de malha aberta considerando o controlador como um ganho unitário. A representação matemática da FTMA da malha de controle é mostrada na equação (69).

$$FTMA_i(s) = K_{at_i} \cdot K_{PWM} \cdot \frac{V_B}{s \cdot L_f} \cdot K_{s_i} \quad (69)$$

A FTMA não compensada da malha de corrente, equação (69), pode ser visualizada na Figura 35, a mesma apresenta boa margem de fase, porém a frequência de cruzamento está em torno de 350Hz, o que traduz-se em uma dinâmica lenta. Assim é necessário um ganho na planta, porém considerando que o modelo da planta foi simplificado torna-se interessante inserir um integrador na origem a fim de reduzir o erro em regime permanente. Ao inserir um integrador na planta a margem de fase ficaria prejudicada, sendo necessária a inserção de um zero próximo a frequência de cruzamento, dessa forma a margem de fase ficará em torno de 45°. Para que os efeitos de altas frequências sejam reduzidos um polo adicional é inserido em uma frequência entre a frequência de corte e a frequência de comutação, reduzindo efeitos providos de ruídos (principalmente devido ao chaveamento) e reduzindo interferências no controle. Portanto o controlador projetado foi um PI com um polo adicional, com o zero antes do polo.

A função de transferência do controlador de corrente é apresentada na equação (70).

$$Hi_{pi}(s) = Ki_{fpi} \cdot \frac{s + Zi_{pi}}{s \cdot (s + Pi_{pi})} \quad (70)$$

O conversor poderá ser inserido em diferentes redes de distribuição, que apresentam diferentes parâmetros e diferentes impedâncias intrínsecas. Em um modelo mais refinado a planta de corrente sofre influência da impedância da linha, mas mesmo com tais variações de parâmetros da planta de corrente o controlador de corrente deverá ser robusto o suficiente para continuar estável e impondo corrente senoidal no conversor. Para maior robustez, a margem de fase da FTMA do controlador de corrente foi projetada para continuar dentro dos requisitos de projeto durante uma faixa de frequências ao redor da frequência de cruzamento, de modo que pequenas alterações no ganho da planta modificam a frequência de cruzamento, porém a margem de fase continuou garantindo estabilidade relativa à planta.

A frequência de cruzamento foi definida em torno de $f_{i_c} = 11kHz$, promovendo uma grande banda passante, permitindo o controle da corrente frente às perturbações na tensão do PAC. O zero foi inserido em 3,4kHz, promovendo uma margem de fase de aproximadamente 45° nessa frequência e boa margem até a frequência do polo adicional (31,6kHz), suprimindo a necessidade de estabilidade para mudanças de frequência de cruzamento devido a variações da planta de corrente.

Dessa forma a frequência de cruzamento o zero e o polo do controlador são definidos pelas equações (71), (72) e (73) respectivamente.

$$\omega_{i_c} = 2\pi \cdot 11k(\text{rad}/\text{seg}) \quad (71)$$

$$Z_{i_{pi}} = 2\pi \cdot 3,4k(\text{rad}/\text{seg}) \quad (72)$$

$$P_{i_{pi}} = 2\pi \cdot 31,6k(\text{rad}/\text{seg}) \quad (73)$$

Para o cálculo do ganho do controlador pode-se aplicar a operação módulo na FTMA da corrente considerando o controlador $H_{i_{pi}}$ projetado, e considerar que na frequência de cruzamento o módulo da FTMA deverá ser unitário. O ganho $K_{i_{pi}}$ do controlador será dado pela equação (74).

$$K_{i_{pi}} = \frac{L_f}{K_{at_i} \cdot K_{PWM} \cdot V_B \cdot K_{s_i}} \cdot \frac{\omega_{i_c}^2 \cdot \sqrt{\omega_{i_c}^2 + P_{i_{pi}}^2}}{\sqrt{\omega_{i_c}^2 + Z_{i_{pi}}^2}} \quad (74)$$

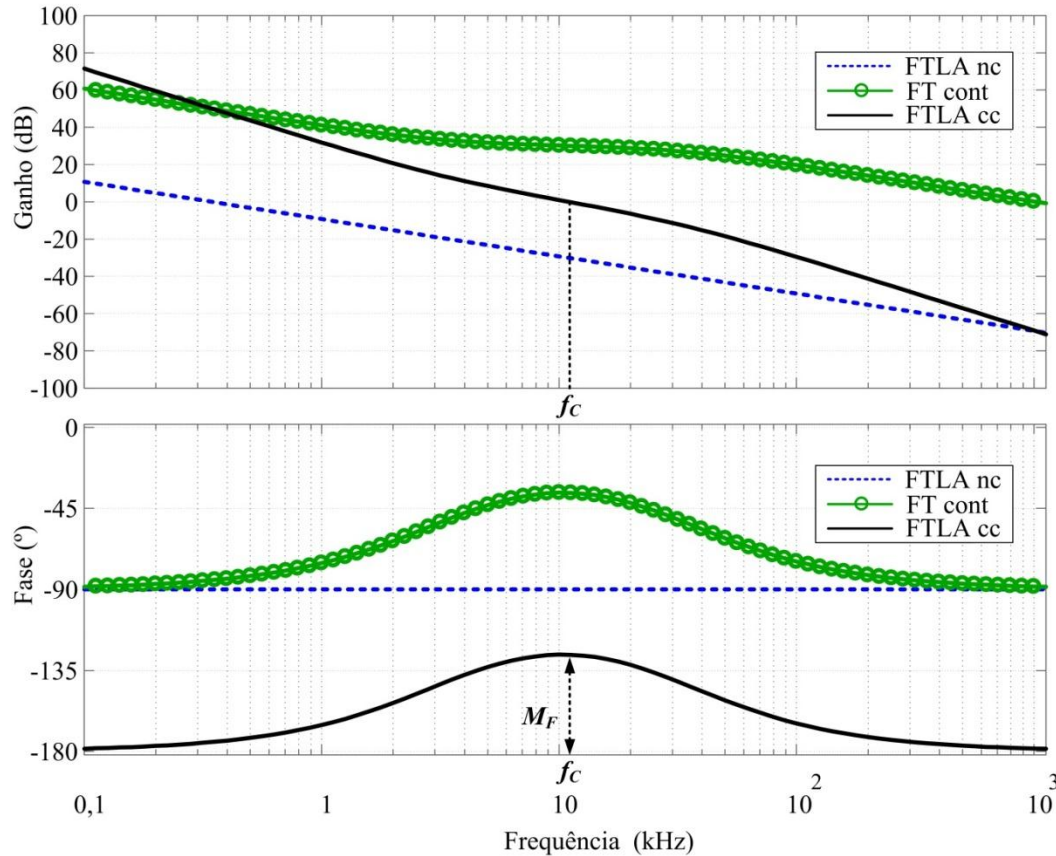
Resolvendo a equação (74), o ganho do controlador é dado pela equação (75).

$$K_{i_{pi}} = 6,4 \cdot 10^6 \quad (75)$$

Calculado o controlador é possível comparar o diagrama de bode da FTMA não compensada com a FTMA compensada e verificar se o controlador atendeu as especificações.

Ambos os diagramas de bode estão na Figura 35, juntamente com o diagrama de bode da função de transferência do controlador.

Figura 35 - FTMA da malha de corrente, não compensada, compensada e compensador.



Fonte: produção do próprio autor

Com a malha compensada a frequência de cruzamento ficou em 11Khz e a margem de fase ficou em torno de 54° , atendendo as especificações do projeto. Além disso, o controlador apresenta ganhos elevados em baixas frequências, permitindo robustez frente a perturbações nessa banda.

A aplicação do controle será analógica e será implementada através de amplificadores operacionais, onde a estrutura do controlador de corrente é apresentada na Figura 36.

A função de transferência do controlador analógico da Figura 36 está apresentada na equação (76).

$$H_i(s) = \frac{\left(s + \frac{1}{R_1 \cdot C_2}\right)}{R_2 \cdot C_2 \cdot s \cdot \left(s + \frac{C_1 + C_2}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1}\right)} \quad (76)$$

Comparando a equação (76) com a equação (70) foi encontrado valores adequados para os componentes, apresentados nas equações a seguir:

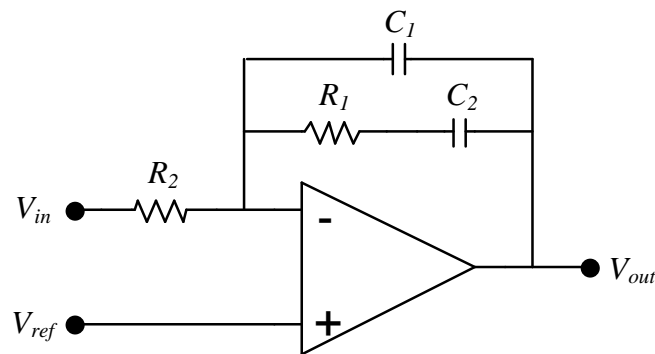
$$C_2 = 1 \text{ nF} \quad (77)$$

$$R_1 = \frac{1}{C_2 \cdot Zi_{pi}} = 47 \text{ k}\Omega \quad (78)$$

$$C_1 = \frac{1}{(Pi_{pi} - Zi_{pi}) \cdot R_1} = 120 \text{ pF} \quad (79)$$

$$R_2 = \frac{1}{C_1 \cdot Ki_{pi}} = 1,3 \text{ k}\Omega \quad (80)$$

Figura 36 - Estrutura física do controlador de corrente.



Fonte: (20)

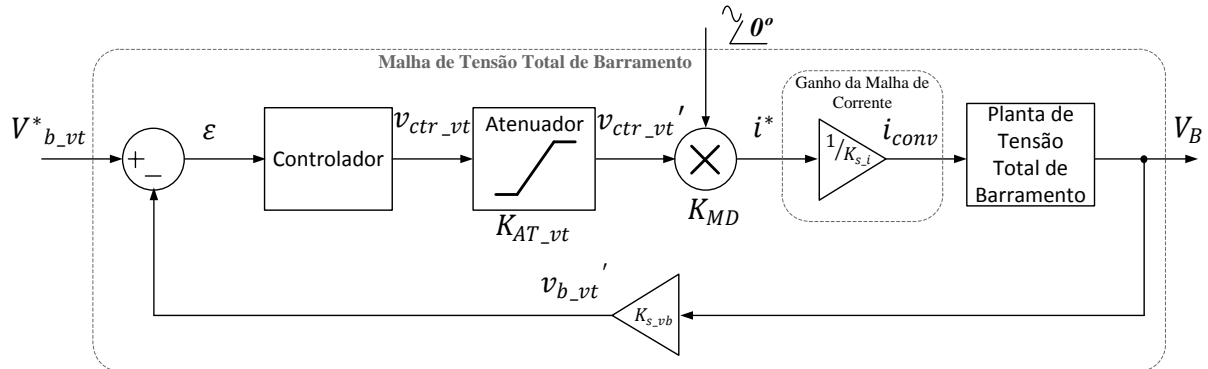
3.3.2 Projeto do Controlador de Tensão Total de Barramento

Como a independência entre os controladores de corrente permitem diferentes correntes entre as fases do conversor, torna-se possível um grande desequilíbrio de potência entre as fases, causando ondulação na tensão de barramento. Foi considerando o pior caso de ondulação quando há potência circulando em somente uma fase do conversor, impactando em uma ondulação da tensão de barramento com o dobro da frequência da tensão da rede. A estrutura do controlador atual não foi projetada para a extinção dessa oscilação, atuando apenas no valor médio da tensão total do barramento CC, sendo a ondulação limitada apenas pelo valor da capacitância de barramento, ou seja, quanto maior é a capacitância, menor é a ondulação. Dessa forma a banda passante do controlador da tensão total de barramento ficará na ordem de unidades de Hertz, não interagindo com oscilações providas da frequência nominal da tensão da rede, porém o controlador do barramento CC deve ser capaz de atuar em transitórios de carga, elevações e afundamentos suaves na tensão do PAC.

Como já mencionado a malha de tensão total de barramento possui uma dinâmica significativamente mais lenta que a malha de corrente, sendo considerado que para qualquer referência imposta pela malha de tensão a malha de corrente irá seguir “instantaneamente” com um ganho sendo o inverso do sensor de corrente, ou seja, a FTMF da malha de corrente

será considerada como uma constante para a malha de tensão total. A malha de tensão total é apresentada na Figura 37, a mesma possuirá uma tensão constante como referência.

Figura 37 - Malha de tensão total do barramento CC.



Fonte: produção do próprio autor

O projeto do controlador é feito utilizando a função de transferência de malha aberta considerando o controlador como um ganho unitário. A representação matemática da FTMA da malha de controle é mostrada na equação (81).

$$FTMA_{vt}(s) = K_{at_vt} \cdot K_{md} \cdot \frac{1}{K_{s_i}} \cdot \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{V_{rd_pk}}{V_B} \cdot \frac{1}{s \cdot C_o} \right) \cdot K_{s_vb} \quad (81)$$

A FTMA não compensada da malha de tensão total, equação (81), pode ser visualizada na Figura 38, a mesma apresenta boa margem de fase, porém a frequência de cruzamento está em torno de 0,2 Hz, o que se traduz em uma dinâmica lenta. Assim é necessário um ganho na planta, porém considerando que o modelo da planta foi simplificado torna-se interessante inserir um integrador na origem a fim de reduzir o erro em regime permanente da tensão de saída. Ao inserir um integrador na planta a margem de fase é prejudicada, sendo necessária a inserção de um zero próximo a frequência de cruzamento, dessa forma a margem de fase ficará em torno de 45°. Para que os efeitos de altas frequências sejam reduzidos um polo adicional é inserido em uma frequência de aproximadamente 40 vezes a frequência do zero, reduzindo efeitos providos de ruídos (principalmente devido ao chaveamento) e não terá grandes interferências no controle. Portanto o controlador a ser projetado será um PI com um polo adicional, como o zero antes do polo.

A função de transferência do controlador de corrente é apresentada na equação (82).

$$H_{vt_pi}(s) = K_{vt_pi} \cdot \frac{s + Z_{vt_pi}}{s \cdot (s + P_{vt_pi})} \quad (82)$$

A frequência de cruzamento foi definida em torno de $f_{vt_c} = 6,7$ Hz. Com o objetivo obter razoável margem de fase o zero foi inserido em 6,0 Hz. Dessa forma a frequência de

cruzamento o zero e o polo do controlador são definidos pelas equações (83), (84) e (85) respectivamente.

$$\omega vt_c = 2\pi \cdot 6,7 \text{ (rad/seg)} \quad (83)$$

$$Zvt_{pi} = 2\pi \cdot 6,0 \text{ (rad/seg)} \quad (84)$$

$$Pvt_{pi} = 2\pi \cdot 243 \text{ (rad/seg)} \quad (85)$$

Para o cálculo do ganho do controlador pode-se aplicar a operação módulo na FTMA da planta considerando o controlador Hvt_{pi} projetado e considerar que na frequência de cruzamento o módulo da FTMA deverá ser unitário. O ganho Kvt_{pi} do controlador é dado pela equação (86).

$$Kvt_{pi} = \frac{K_{s_i} \cdot 2 \cdot V_B \cdot C_o}{K_{at_vt} \cdot K_{md} \cdot 3 \cdot V_{rd_pk} \cdot K_{s_vb}} \cdot \frac{\omega vt_c^2 \cdot \sqrt{\omega vt_c^2 + Pvt_{pi}^2}}{\sqrt{\omega vt_c^2 + Zvt_{pi}^2}} \quad (86)$$

Resolvendo a equação (86), o ganho do controlador é dado pela equação (87).

$$Kvt_{pi} = 3,8 \cdot 10^4 \quad (87)$$

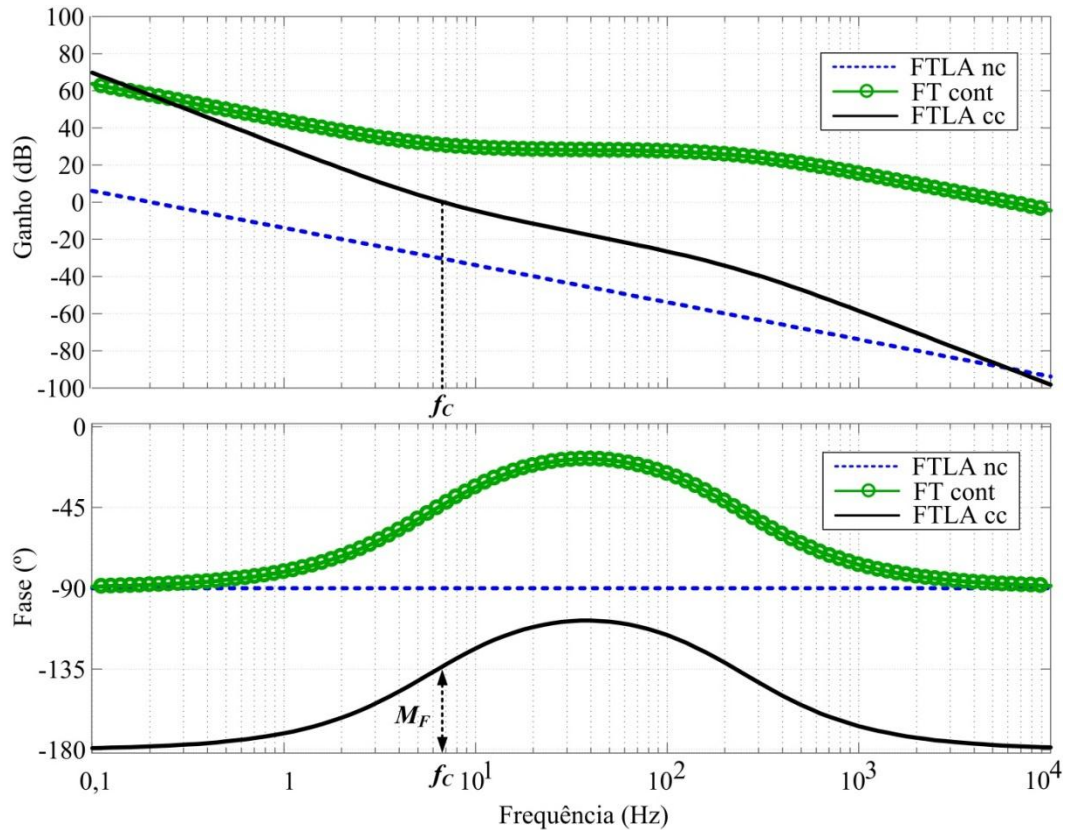
Calculado o controlador é possível comparar o diagrama de bode da FTMA não compensada com a FTMA compensada e verificar se o controlador atendeu as especificações. Ambos os diagramas de bode estão na Figura 38, juntamente com o diagrama de bode da função de transferência do controlador.

Com a malha compensada a frequência de cruzamento ficou em 6 Hz e a margem de fase ficou em torno de 46,5°, atendendo as especificações do projeto. Além disso, o controlador apresenta ganhos elevados em baixas frequências, permitindo robustez frente a perturbações nessa banda. A aplicação do controle será analógica e será implementada através de amplificadores operacionais, onde a estrutura do controlador de tensão total do barramento CC é apresentada na Figura 36.

A função de transferência do controlador analógico da **Erro! Fonte de referência não encontrada.** está apresentada na equação (88).

$$Hvt(s) = \frac{\left(s + \frac{1}{R_1 \cdot C_2}\right)}{R_2 \cdot C_2 \cdot s \cdot \left(s + \frac{C_1 + C_2}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1}\right)} \quad (88)$$

Figura 38 - FTMA da malha de tensão total, não compensada, compensada e compensador.



Fonte: produção do próprio autor

Comparando a equação (88) com a equação (82), do controlador, foram encontrados valores adequados para os componentes, apresentados nas equações a seguir:

$$C_2 = 470 \text{ nF} \quad (89)$$

$$R_1 = \frac{1}{C_2 \cdot Zvt_{pi}} = 56 \text{ k}\Omega \quad (90)$$

$$C_1 = \frac{1}{(Pvt_{pi} - Zvt_{pi}) \cdot R_1} = 12 \text{ nF} \quad (91)$$

$$R_2 = \frac{1}{C_1 \cdot Kvt_{pi}} = 2,2 \text{ k}\Omega \quad (92)$$

Finalizado o controlador de tensão total.

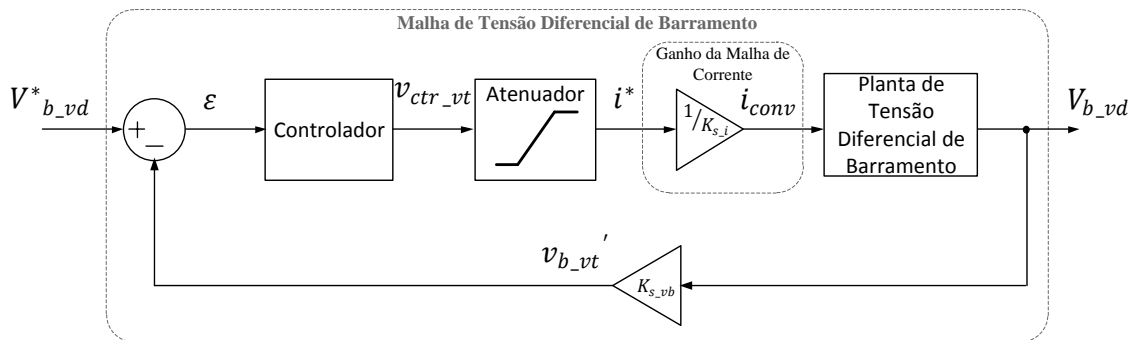
3.3.3 Projeto do Controlador da Tensão Diferencial do Barramento

A tensão de desequilíbrio é causada por níveis contínuos de corrente, como esses níveis variam lentamente o controlador de tensão desequilíbrio possui banda passante em torno da unidade de Hertz, não atuando em perturbações de frequências mais altas.

Como já mencionado a malha de tensão diferencial de barramento possui uma dinâmica significativamente mais lenta que a malha de corrente, sendo considerado que para

qualquer referência imposta pela malha de tensão a malha de corrente irá seguir “instantaneamente” com um ganho sendo o inverso do sensor de corrente, ou seja, a FTMF da malha de corrente será considerada como uma constante para a malha de tensão diferencial. A malha de tensão diferencial é apresentada na Figura 39, a mesma possuirá uma tensão constante como referência, igual a zero, para não haver desequilíbrio de tensão entre os capacitores.

Figura 39 - Malha de tensão diferencial do Barramento CC.



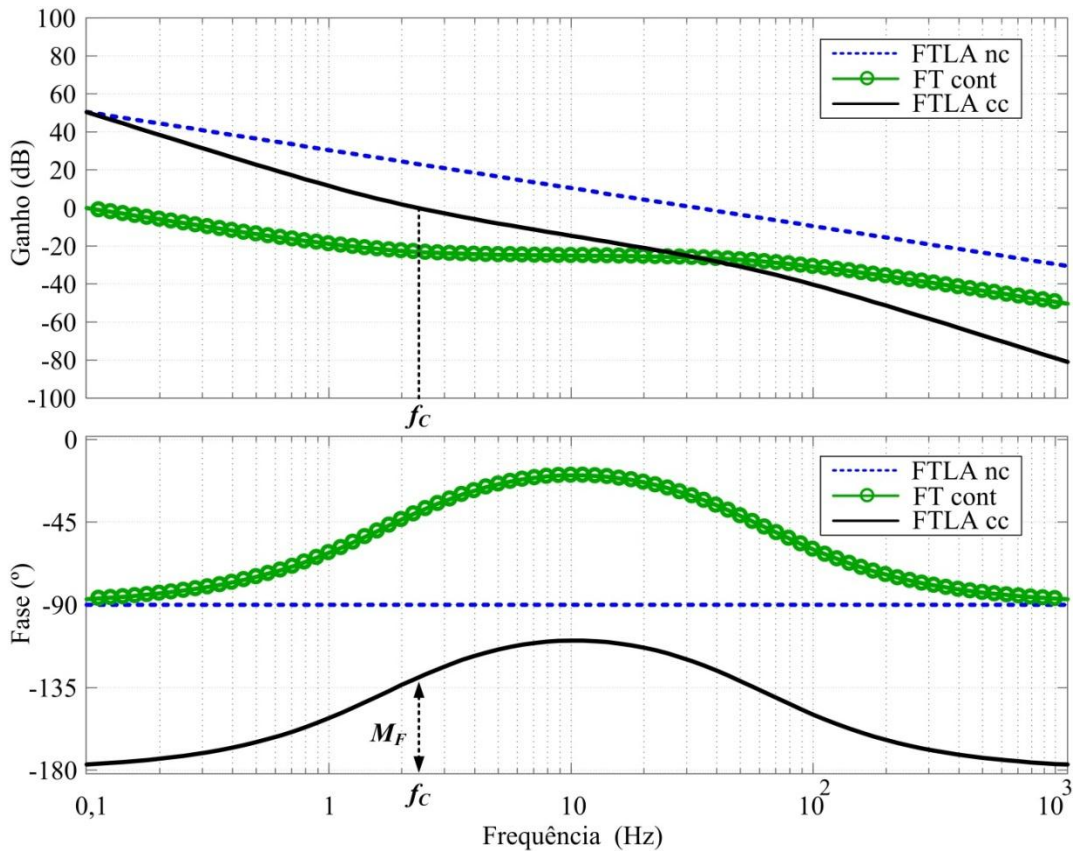
Fonte: produção do próprio autor

O projeto do controlador é feito utilizando a função de transferência de malha aberta considerando o controlador como um ganho unitário. A representação matemática da FTMA da malha de controle é mostrada na equação (93).

$$FTMA_{b_vd}(s) = K_{at_vd} \cdot \frac{1}{K_{s_i}} \cdot \left(\frac{3}{2 \cdot s \cdot C_o} \right) \cdot K_{s_vb} \quad (93)$$

A FTMA não compensada da malha de tensão diferencial, equação (93), pode ser visualizada na Figura 40. A FTMA da planta de corrente apresenta boa margem de fase, 90° , porém a frequência de cruzamento está em torno de 35Hz, o que traduz-se em uma dinâmica muito rápida, podendo interagir com oscilações diferentes dos níveis contínuos de tensão diferencial. Assim é necessário um ganho na planta, reduzindo sua banda passante, porém considerando que o modelo da planta foi simplificado torna-se interessante inserir um integrador na origem a fim de reduzir o erro em regime permanente a uma entrada próxima ao degrau. Ao inserir um integrador na planta a margem de fase ficaria prejudicada, assim é sugestiva a inserção de um zero próximo a frequência de cruzamento, dessa forma a margem de fase ficará em torno de 45° . Para que os efeitos de altas frequências sejam reduzidos um polo adicional é inserido em uma frequência de aproximadamente 30 vezes a frequência do zero, reduzindo efeitos providos de ruídos (principalmente devido ao chaveamento), e não terá grandes interferências no controle. Portanto o controlador a ser projetado será um PI com um polo adicional, como zero antes do polo.

Figura 40 - FTMA da malha de tensão diferencial, não compensada, compensada e compensador.



Fonte: produção do próprio autor

A função de transferência do controlador de corrente é apresentada na equação (94).

$$Hvd_{pi}(s) = Kvd_{pi} \cdot \frac{s + Zvd_{pi}}{s \cdot (s + Pvd_{pi})} \quad (94)$$

A frequência de cruzamento foi definida em torno de $fvd_c = 2,3\text{Hz}$. Com o objetivo de permitir obter razoável margem de fase o zero foi inserido em 1,8Hz. Dessa forma a frequência de cruzamento o zero e o polo do controlador são definidos pelas equações (95), (96) e (97) respectivamente.

$$\omega vd_c = 2\pi \cdot 2,3 \text{ (rad/seg)} \quad (95)$$

$$Zvd_{pi} = 2\pi \cdot 1,8 \text{ (rad/seg)} \quad (96)$$

$$Pvd_{pi} = 2\pi \cdot 60,7 \text{ (rad/seg)} \quad (97)$$

Para o cálculo do ganho do controlador pode-se aplicar a operação módulo na FTMA da planta considerando o controlador Hvd_{pi} projetado, e considerar que na frequência de cruzamento o módulo da FTMA deverá ser unitário. O ganho Kvd_{pi} do controlador será dado pela equação (98).

$$Kvd_{pi} = \frac{K_{s_i} \cdot 2 \cdot C_o}{K_{at_vd} \cdot 3 \cdot K_{s_vb}} \cdot \frac{\omega vd_c^2 \cdot \sqrt{\omega vd_c^2 + Pvd_{pi}^2}}{\sqrt{\omega vd_c^2 + Zvd_{pi}^2}} \quad (98)$$

Resolvendo a equação (98), o ganho do controlador é dado pela equação (99).

$$Kvd_{pi} = 3,8 \cdot 10^4 \quad (99)$$

Calculado o controlador é possível comparar o diagrama de bode da FTMA não compensada com a FTMA compensada e verificar se o controlador atendeu as especificações. Ambos os diagramas de bode estão na Figura 40, juntamente com o diagrama de bode da função de transferência do controlador.

Com a malha compensada a frequência de cruzamento ficou em 2,33Hz e a margem de fase ficou em torno de 50,4°, atendendo as especificações do projeto. Além disso, o controlador apresenta ganhos elevados em baixas frequências, permitindo robustez frente a perturbações nessa banda.

A aplicação do controle será analógica e será implementada através de amplificadores operacionais, onde a estrutura do controlador de corrente é apresentada na Figura 36.

A função de transferência do controlador analógico da Figura 36 está apresentada na equação (100).

$$Hvd(s) = \frac{\left(s + \frac{1}{R_1 \cdot C_2}\right)}{R_2 \cdot C_2 \cdot s \cdot \left(s + \frac{C_1 + C_2}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1}\right)} \quad (100)$$

Comparando a equação (100) com a equação (94) foi encontrado valores adequados para os componentes, apresentados nas equações a seguir:

$$C_2 = 3,3\mu F \quad (101)$$

$$R_1 = \frac{1}{C_2 \cdot Zvd_{pi}} = 27k\Omega \quad (102)$$

$$C_1 = \frac{1}{(Pvd_{pi} - Zvd_{pi}) \cdot R_1} = 100nF \quad (103)$$

$$R_2 = \frac{1}{C_1 \cdot Kvd_{pi}} = 470k\Omega \quad (104)$$

3.3.4 Projeto do Controlador de Tensão no PAC

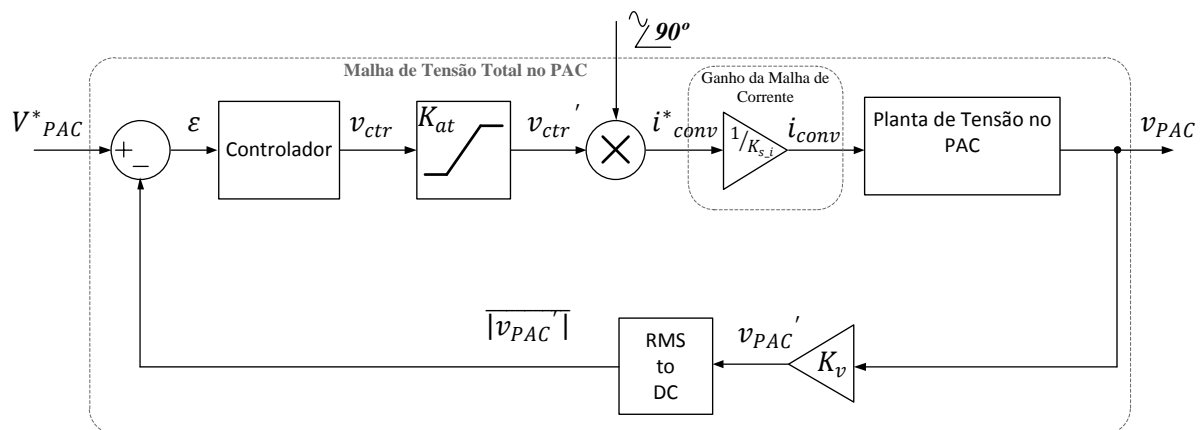
Para o projeto do controlador é necessário abordar sobre a banda passante da malha, sabe-se que para o cálculo da tensão eficaz, que determina a magnitude de VPAC, é

necessário ao menos um ciclo de rede, portando espera-se que a banda passante dessa malha seja inferior à frequência da rede.

Uma variação na magnitude de VPAC pode ser classificada como momentânea ou temporária, como tratada pela ANNEL (1) e descrito na Tabela 2, essas variações podem ocorrer devido a cargas conectadas a rede ou até mesmo pela atuação de reguladores nas subestações. Para uma variação de VPAC, que inflija os limites descritos na Tabela 1, não ser registrada como tensão não adequada de fornecimento, a mesma deve ser classificada apenas como uma variação momentânea, tendo uma duração máxima de 3 segundos fora da faixa adequada de fornecimento. Portanto, atuando nesse tempo, o controlador de VPAC estará evitando penalidades aplicadas à distribuidora, mas visando futuras penalidades para algumas variações momentâneas de tensão e para proporcionar melhor qualidade de energia ao consumidor, o controlador foi projetado para atuar em tempos inferiores a 1 segundo. Um limitante da banda passante do controlador de VPAC é o circuito para a conversão de tensão RMS para tensão contínua, uma vez que o modelo do mesmo apresenta um polo com frequência inferior à unidade de Hertz.

Para o projeto do controlador a malha de VPAC desconsidera as perturbações externas à mesma. O diagrama de blocos da malha é apresentado na Figura 41.

Figura 41 - Malha de tensão no PAC.



Fonte: produção do próprio autor

Para uma banda passante com ordem de unidade de Hertz malha tensão no PAC possui uma dinâmica significativamente mais lenta que a malha de corrente, sendo considerado que para qualquer referência imposta pela malha de tensão a malha realimentada de corrente irá segui-la “instantaneamente”, comportando-se apenas como um ganho, quantificado pelo inverso do ganho do sensor de corrente. Como mencionado, a referência da malha de VPAC é variável e imposta pelo módulo digital, porém a mesma possui uma

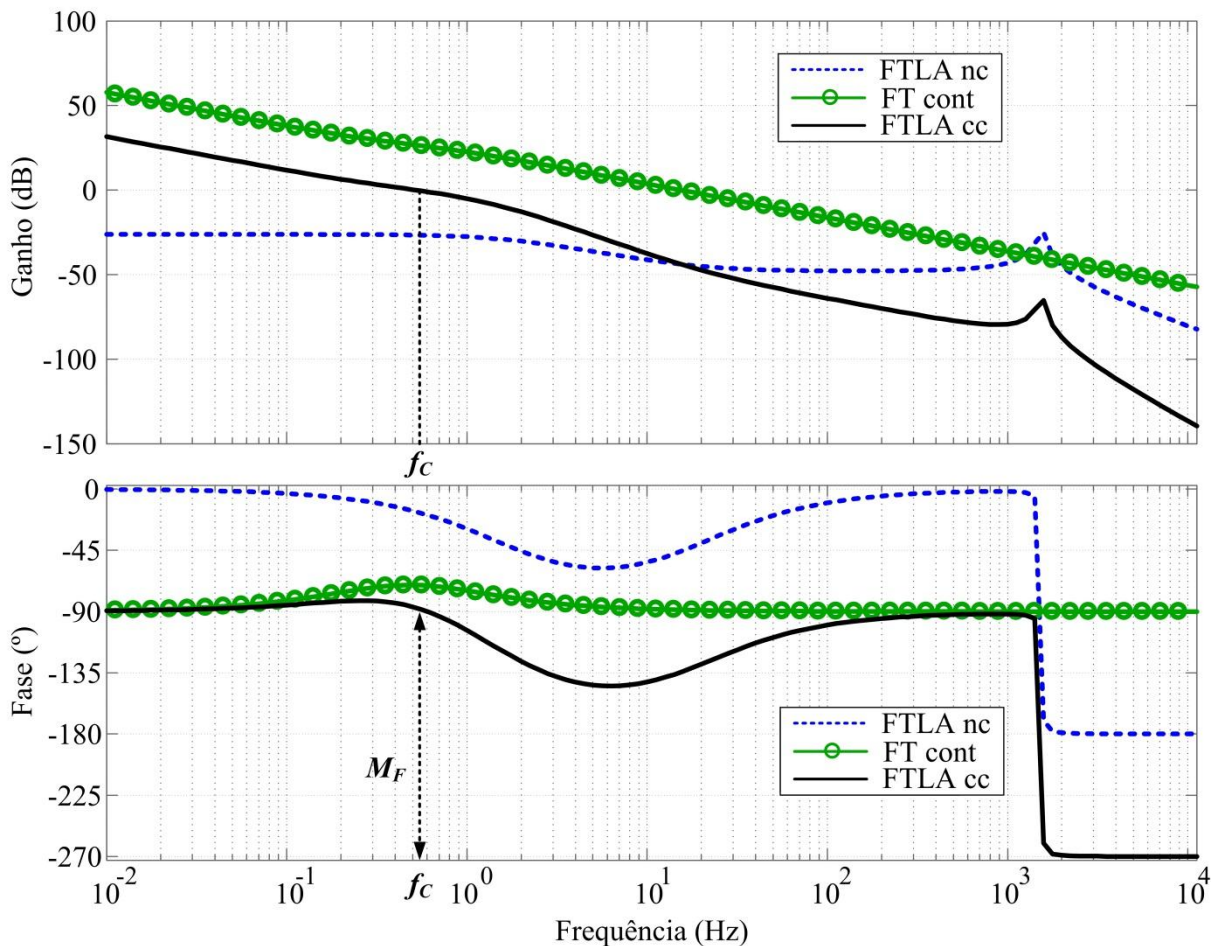
variação muito inferior à dinâmica da malha de tensão, sendo considerada uma referência constante.

Após as considerações anteriores o projeto do controlador foi concebido utilizando a resposta em frequência da FTMA e o controlador Hv_{PAC_pi} como um ganho unitário. A representação matemática da FTMA da malha de VPAC é mostrada na equação (105).

$$FTMA(s) = K_{at} \cdot K_{mult} \cdot \frac{1}{K_{si}} \cdot \left[\frac{\frac{1}{C_f} \cdot \left(s + \frac{r_{rd}}{L_{rd}} \right)}{s^2 + s \frac{r_{rd}}{L_{rd}} + \frac{1}{L_{rd} \cdot C_f}} \right] \cdot K_v \cdot G_{rms}(s) \cdot Hv_{PAC_pi}(s) \quad (105)$$

O diagrama de bode da FTMA não compensada da malha de tensão no PAC, equação (105), pode ser visualizada na Figura 42.

Figura 42 - FTMA da malha de tensão no PAC, não compensada, compensada e compensador.



Fonte: produção do próprio autor

A FTMA da planta de tensão no PAC não apresenta frequência de cruzamento, é uma malha estável com margem de fase infinita. Para aumentar a dinâmica da malha é necessário um ganho no controlador, a planta não possui integrador na origem, para reduzir o erro em

regime permanente o mesmo é empregado, após a frequência do primeiro polo o ganho da planta apresenta queda de 40dB/déc, para que na frequência de cruzamento a inclinação da curva de ganho seja de -20dB/déc um zero foi inserido, e após esse zero há um pólo adicional, que reduz a amplificação de frequências acima da banda passante, evitando oscilações no controlador.

O controlador a ser projetado será um PI com um polo adicional, como zero antes do polo. A função de transferência do controlador de VPAC é apresentada na equação (106).

$$Hv_{PAC_pi}(s) = Kv_{PAC_pi} \cdot \frac{s + Zv_{PAC_pi}}{s \cdot (s + Pv_{PAC_pi})} \quad (106)$$

A frequência de cruzamento foi definida em torno de $fv_{PAC_C} = 0,5Hz$. Com o objetivo de permitir uma inclinação de -20dB/déc à malha o zero foi inserido em 0,34Hz. Para haver boa atenuação de frequências acima da frequência da rede o polo adicional foi inserido em 0,68Hz. Dessa forma a frequência de cruzamento o zero e o polo do controlador são definidos pelas equações (107), (108) e (109) respectivamente.

$$\omega v_{PAC_C} = 2\pi \cdot 0,5 \text{ (rad/seg)} \quad (107)$$

$$Zv_{PAC_pi} = 2\pi \cdot 0,34 \text{ (rad/seg)} \quad (108)$$

$$Pv_{PAC_pi} = 2\pi \cdot 0,68 \text{ (rad/seg)} \quad (109)$$

Para o cálculo do ganho do controlador pode-se aplicar a operação módulo na FTMA de VPAC considerando o controlador Hv_{PAC_pi} projetado, e considerar que na frequência de cruzamento o módulo da FTMA deverá ser unitário. O ganho Kv_{PAC_pi} do controlador será dado pela equação (110).

$$Kv_{PAC_pi} = \frac{K_{Si}}{K_{at} \cdot K_{mult}} \cdot \left[\frac{\sqrt{\left(\omega v_{PAC_C} \cdot \frac{r_{rd}}{L_{rd}}\right)^2 + \left(\frac{1}{L_{rd} \cdot C_f} - \omega v_{PAC_C}^2\right)^2}}{\frac{1}{C_f} \cdot \left(\sqrt{\omega v_{PAC_C}^2 + \frac{r_{rd}^2}{L_{rd}}}\right)} \right] \quad (110)$$

$$\cdot \frac{\sqrt{(\omega v_{PAC_C} \cdot R_{RMS} \cdot C_{RMS})^2 + 1}}{K_v}$$

$$\cdot \frac{\omega v_{PAC_C} \cdot \sqrt{\omega v_{PAC_C}^2 + Pv_{PAC_pi}^2}}{\sqrt{\omega v_{PAC_C}^2 + Zv_{PAC_pi}^2}}$$

Resolvendo a equação (110), o ganho do controlador é dado pela equação (111).

$$Kv_{PAC_pi} = 96,7 \quad (111)$$

Calculado o controlador é possível comparar o diagrama de bode da FTMA não compensada com a FTMA compensada e verificar se o controlador atendeu as especificações. Ambos os diagramas de bode estão na Figura 42, juntamente com o diagrama de bode da função de transferência do controlador.

Com a malha compensada a frequência de cruzamento ficou em 0,505Hz e a margem de fase ficou em torno de 93,3°, atendendo as especificações do projeto. Além disso, o controlador apresenta ganhos elevados em baixas frequências, permitindo robustez frente a perturbações nessa banda.

A aplicação do controle será analógica e será implementada através de amplificadores operacionais, onde a estrutura do controlador de corrente é apresentada na Figura 36.

A função de transferência do controlador analógico da **Erro! Fonte de referência não encontrada.** está apresentada na equação (112).

$$Hv_{PAC}(s) = \frac{\left(s + \frac{1}{R_1 \cdot C_2}\right)}{R_2 \cdot C_2 \cdot s \cdot \left(s + \frac{C_1 + C_2}{C_1 \cdot C_2 \cdot R_1}\right)} \quad (112)$$

Comparando a equação (112) com a equação (106) foi encontrado valores adequados para os componentes, apresentados nas equações a seguir:

$$C_2 = 470 \text{ nF} \quad (113)$$

$$R_1 = \frac{1}{C_2 \cdot Zv_{PAC_pi}} = 1 \text{ M}\Omega \quad (114)$$

$$C_1 = \frac{1}{(Pv_{PAC_pi} - Zv_{PAC_pi}) \cdot R_1} = 470 \text{ nF} \quad (115)$$

$$R_2 = \frac{1}{C_1 \cdot Kv_{PAC_pi}} = 22 \text{ k}\Omega \quad (116)$$

4 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Este capítulo tem por objetivo avaliar o funcionamento do compensador de tensão através de simulações numéricas. Dessa forma, será possível validar a técnica de compensação juntamente os modelos obtidos e com o projeto dos controladores. O sistema automático de regulação responsável por compensar a tensão no PAC foi inserido em um sistema com cargas lineares conectadas na rede de alimentação visando uma avaliação do desempenho do mesmo, frente às quedas de tensão no PAC causadas pelas cargas.

O software *PSim* foi utilizado para simular o sistema proposto. Os níveis das tensões presentes no PAC são comparados com os requisitos do PRODIST (módulo 8) (1), primeiramente sem a utilização do conversor e em seguida fazendo utilização do mesmo.

Inicialmente é apresentada a estrutura simulada, seguida das especificações de carga e de tensão do PAC, finalizando com os resultados obtidos nas simulações e com as conclusões do capítulo.

4.1 ESTRUTURA SIMULADA

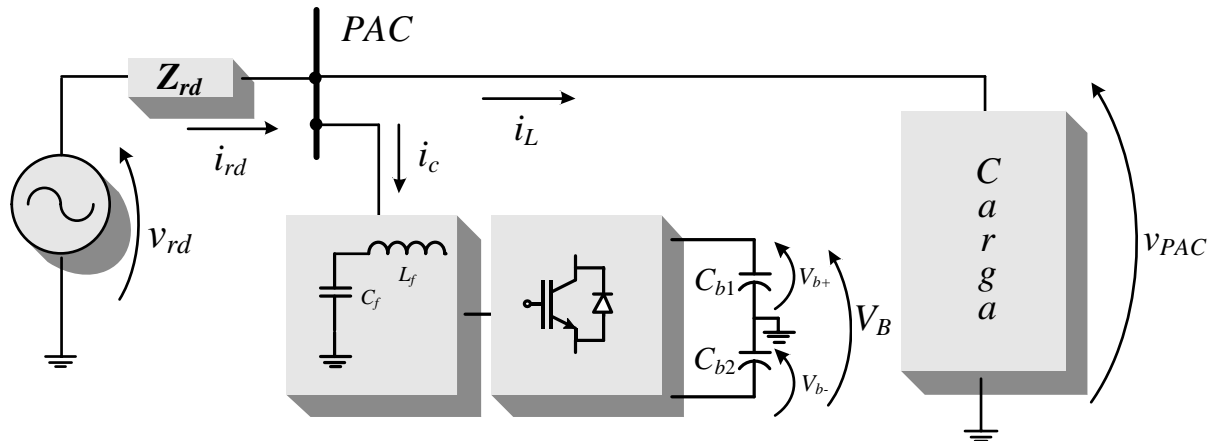
A estrutura simulada constitui-se de uma fonte de tensão trifásica com uma impedância série representando a rede de alimentação, do conversor e de uma carga trifásica. Esses três componentes estão conectados através do PAC. A Figura 43 apresenta o diagrama unifilar da estrutura simulada.

Foi simulado duas situações de carga trifásica, uma desequilibrada e outra equilibrada (designada como nominal), sendo possível a seleção dessas através da comutação de uma chave bidirecional. A Figura 44 apresenta o diagrama da carga simulada.

Foi escolhida a simulação de dois tipos de carga para analisar a resposta do sistema sob situações variadas. A carga equilibrada possui uma potência reativa próxima à potência nominal do conversor e apresenta característica indutiva com fator de potência de 0,8. A carga desequilibrada apresenta potência reativa menor que a potência do conversor (para as três

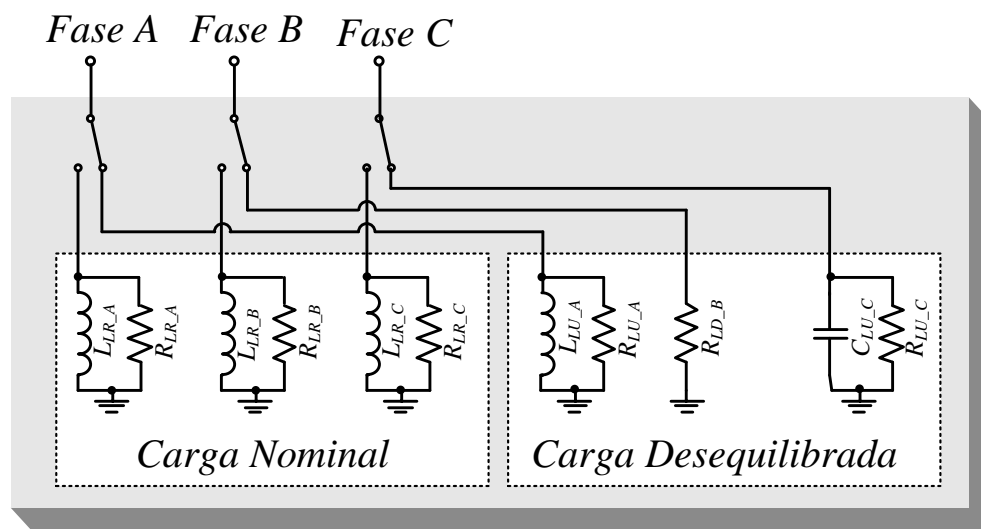
fases) e é composta pelos três tipos de carga linear, tendo a fase A com característica indutiva, a fase B com característica resistiva e a fase C com característica capacitiva.

Figura 43 - Diagrama unifilar da estrutura simulada.



Fonte: produção do próprio autor

Figura 44 - Estrutura da carga simulada.



Fonte: produção do próprio autor

Os parâmetros fundamentais utilizados na simulação estão reunidos na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros fundamentais utilizados na simulação.

Tensão nominal da rede	$V_{rd} = 127 V_{RMS}$
Frequência da rede	$f_{rd} = 60 \text{ Hz}$
Indutância série da linha	$L_{rd} = 2,7mH$
Resistência série da linha	$r_{rd} = 0,3 \Omega$
Tensão nominal do barramento CC	$V_O = 600 V$
Indutância do filtro de saída	$L_f = 1100 \mu H$
Capacitância do barramento CC	$C_O = 1 mF$
Frequência de comutação	$f_s = 50 kHz$

Fonte: produção do próprio autor

As cargas são especificadas a partir da especificação da queda de tensão no PAC a ser simulada e são apresentadas no tópico a seguir.

Como mencionado no Capítulo 1 a impedância da linha também influencia na queda de tensão no PAC, porém a mesma foi calculada e especificada para que seja possível uma variação significativa na tensão do PAC utilizando a máxima potência do conversor disponível para execução deste trabalho. A tensão de alimentação foi fixada em $127V_{rms}$.

4.1.1 Especificação de queda de tensão no PAC

A carga nominal foi escolhida de modo a provocar uma queda de tensão no PAC necessária para que a tensão de atendimento seja classificada como crítica, sendo abaixo de $109V_{rms}$. Nessa situação de carga, para que a tensão de atendimento passe a ser classificada como adequada através da compensação de reativo, é necessário que o conversor opere próximo a sua potência nominal. A queda de tensão devido a carga nominal simula um suposto problema de tensão de atendimento crítica, que é solucionado através do compensador de tensão.

A carga desequilibrada foi escolhida com o objetivo de apresentar a operação do sistema quando há tensões desequilibradas nas fases do PAC e com diferentes tipos de carga. Essa carga desequilibrada também permitirá análise da resposta transitória do compensador de tensão, na comutação entre a carga nominal e a carga desequilibrada.

As cargas utilizadas são mostradas na Tabela 7.

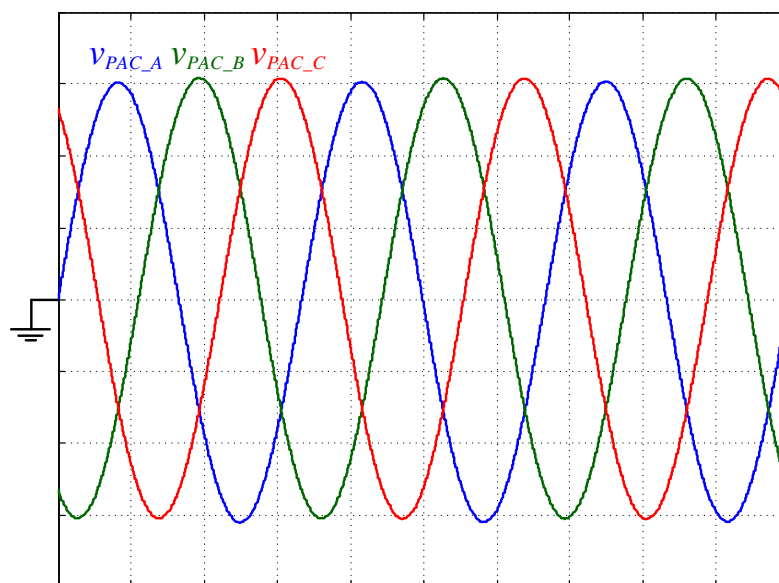
Tabela 7 - Cargas simuladas.

Potência ativa da carga nominal	$P_{LR} = 2.688 W$
Potência reativa da carga nominal	$Q_{LR} = 1.860 VA_R$
Fator de potência da carga nominal	$Fp = 0,8_{ind}$
Potência ativa da carga desequilibrada, para fase A	$P_{LU_A} = 1.344 W$
Potência reativa da carga desequilibrada, para fase A	$Q_{LU_A} = 930 VA_R$
Fator de potência da carga nominal	$Fp = 0,8_{ind}$
Potência ativa da carga desequilibrada, para fase B	$P_{LU_B} = 1.344 W$
Fator de potência da carga nominal	$Fp = 1,0$
Potência ativa da carga desequilibrada, para fase C	$P_{LU_C} = 2.016 W$
Potência reativa da carga desequilibrada, para fase C	$Q_{LU_C} = -2.006 VA_R$
Fator de potência da carga nominal	$Fp = 0,7_{cap}$

Fonte: produção do próprio autor

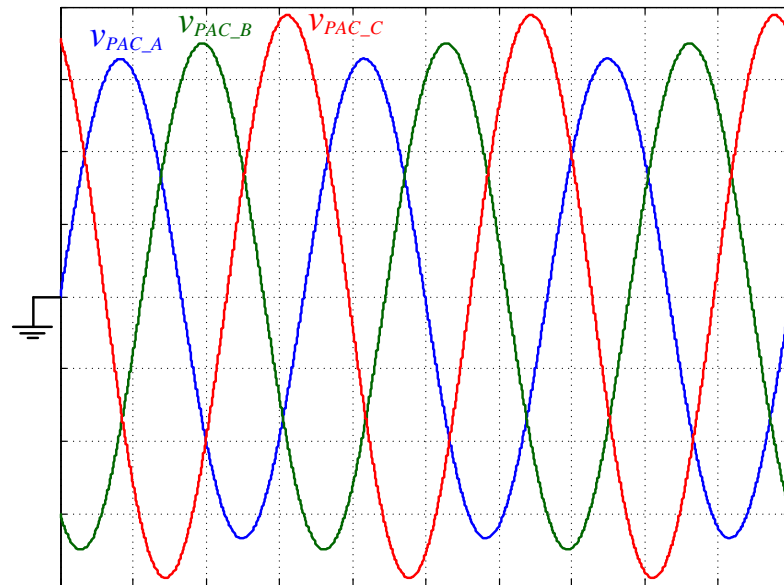
A Figura 45 trás a forma de onda das tensões das fases A, B e C do PAC, quando o sistema alimenta a carga nominal e não faz a utilização do compensador de tensão. A Figura 46 trás a forma de onda das tensões das fases A, B e C do PAC, quando o sistema alimenta a carga desequilibrada e não utiliza o compensador de tensão.

Figura 45 - Tensão no PAC com carga nominal e sem compensação (50 V/div, 5 ms/div).



Fonte: produção do próprio autor

Figura 46 - Tensão no PAC com carga desequilibrada e sem compensação (50 V/div, 5 ms/div).



Fonte: produção do próprio autor

A Tabela 8 informa a magnitude das tensões apresentadas na Figura 45 e Figura 46 juntamente com seus respectivos enquadramentos referentes a tensão de atendimento. Para maior detalhamento do problema a classificação de atendimento está discriminada por fase, mesmo que a ANNEL classifique a tensão de atendimento do sistema trifásico, considerando para classificação o pior nível de atendimento dentre as três fases, para sistemas com neutro.

Tabela 8 - Tensões no PAC sem compensação de reativo.

Fase / Carga	Tensão de leitura no PAC (V_{rms})	Tensão de atendimento
Fase A / Carga desequilibrada	117	Adequado
Fase B / Carga desequilibrada	123	Adequado
Fase C / Carga desequilibrada	137	Precário
Fase A / Carga nominal	108	Crítico
Fase B / Carga nominal	108	Crítico
Fase C / Carga nominal	108	Crítico

Fonte: produção do próprio autor

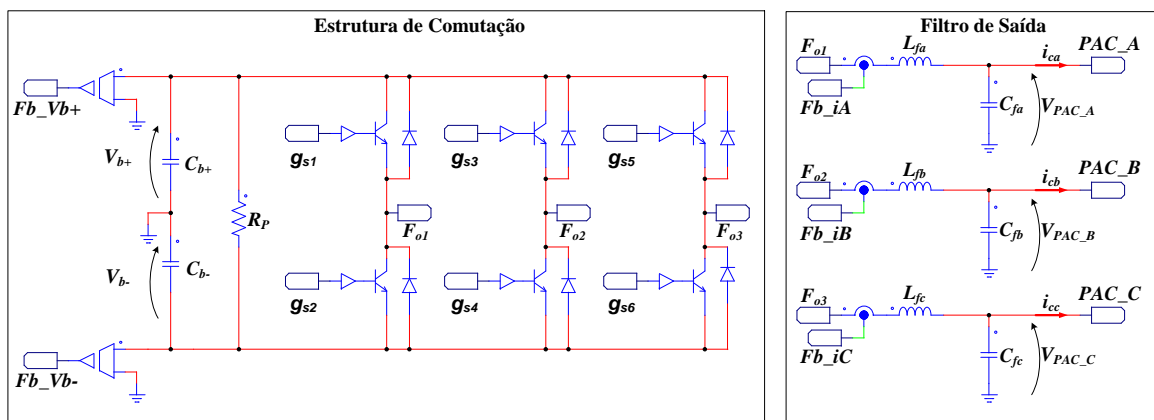
4.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO COMPENSAOR DE TENSÃO

Para comprovar o funcionamento do compensador de tensão foi feita a simulação numérica contendo toda a estrutura previamente apresentada, sendo composta pela rede de alimentação, pelo conversor e pelas cargas.

A simulação é composta pelas estruturas de potência, de rede de distribuição, de sincronismos das referências, estrutura de cargas, de controle de corrente, do modulador *PWM*, do controle do barramento e pela estrutura de controle da tensão no *PAC*, sendo essas, apresentadas respectivamente da Figura 47 à Figura 52.

A estrutura de potência está apresentada na Figura 47. Na simulação da mesma foi imposta uma tensão de saturação das chaves e nos diodos, que juntamente com uma resistência conectada diretamente ao barramento simula algumas perdas ativas do conversor, tornando a simulação mais próxima da implementação prática do dispositivo.

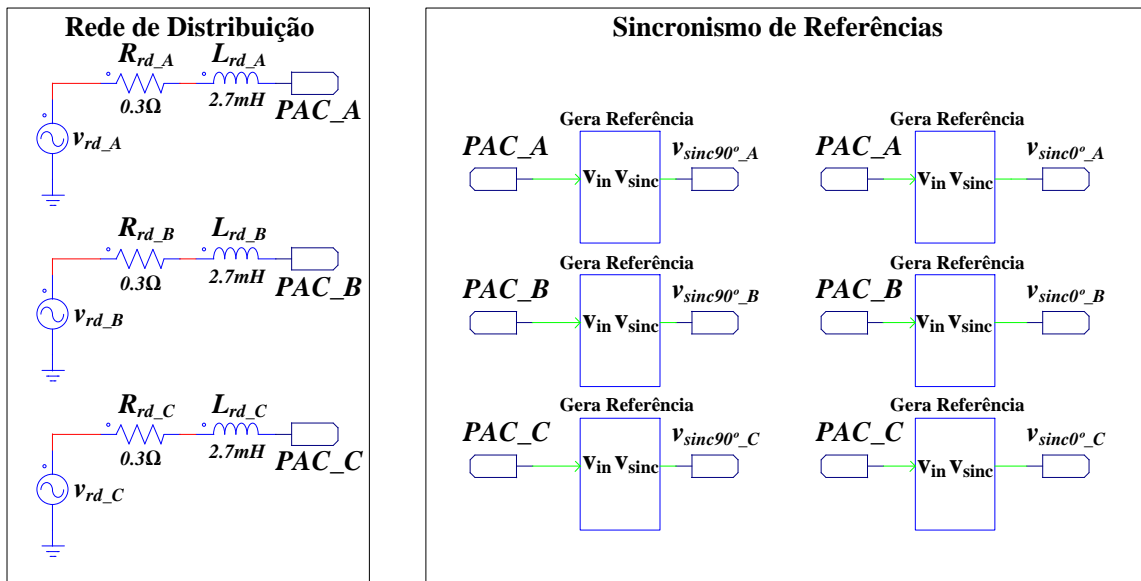
Figura 47 - Estrutura de potência do conversor simulada.



Fonte: produção do próprio autor

Os blocos da geração de referência juntamente com a estrutura da rede de distribuição simulada são apresentados na Figura 48. Para a geração de referências foi utilizado recursos da transformada de Fourier presentes no *PSIM*, permitindo o sincronismo com a tensão no *PAC*. A tensão da rede foi mantida constante e com amplitude de $127V_{rms}$.

Figura 48 - Estrutura da rede de distribuição e estrutura de geração de referências simulada.

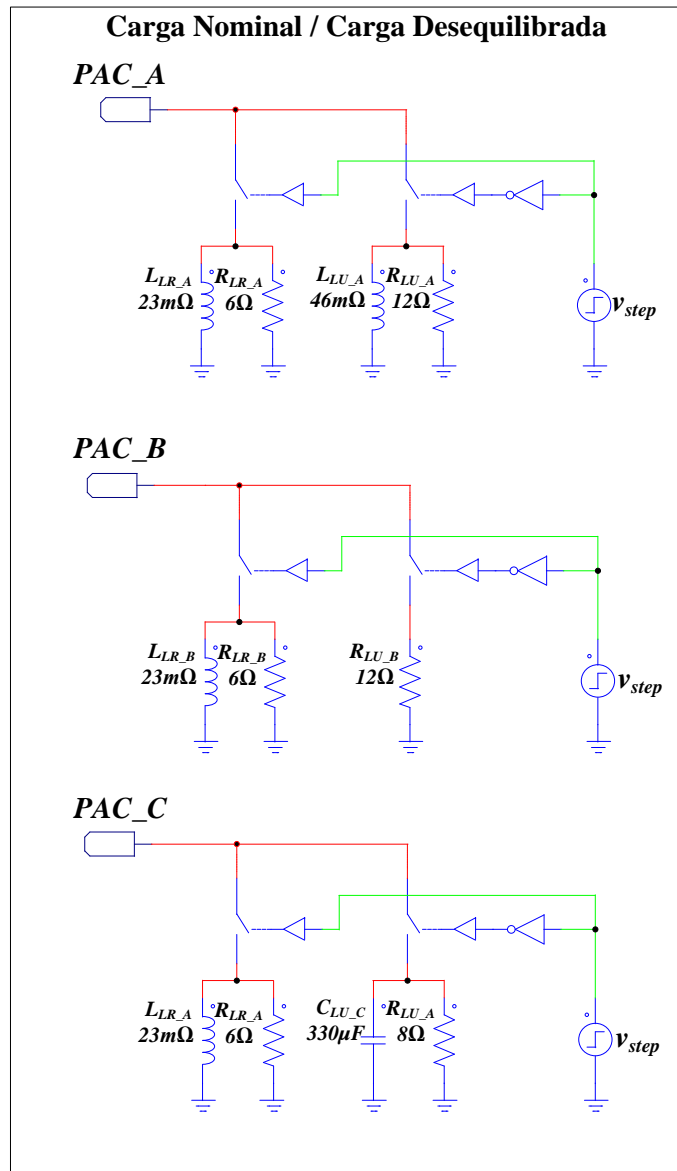


Fonte: produção do próprio autor

A estrutura de cargas simulada é apresentada na Figura 49, onde a fonte de tensão v_{step} é utilizada para fazer a comutação entre as cargas.

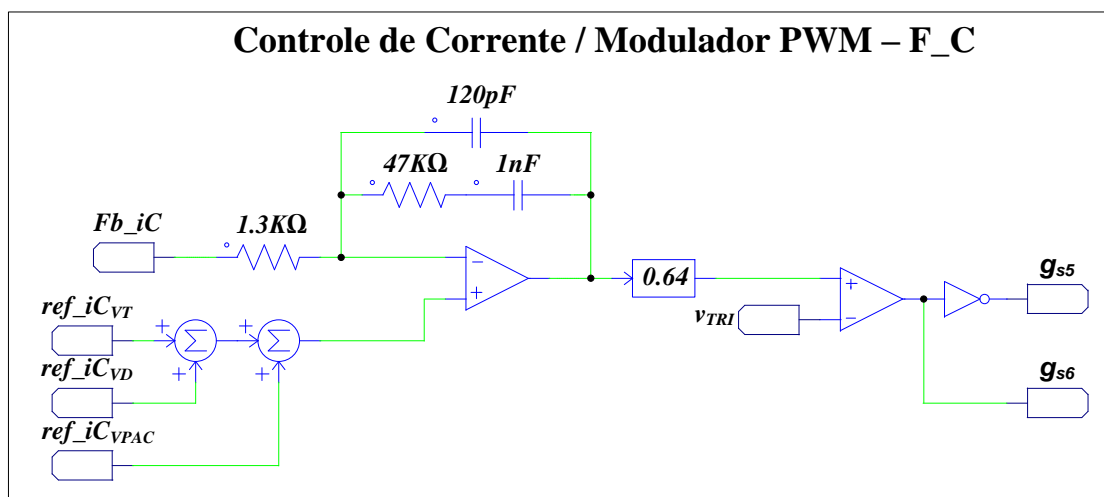
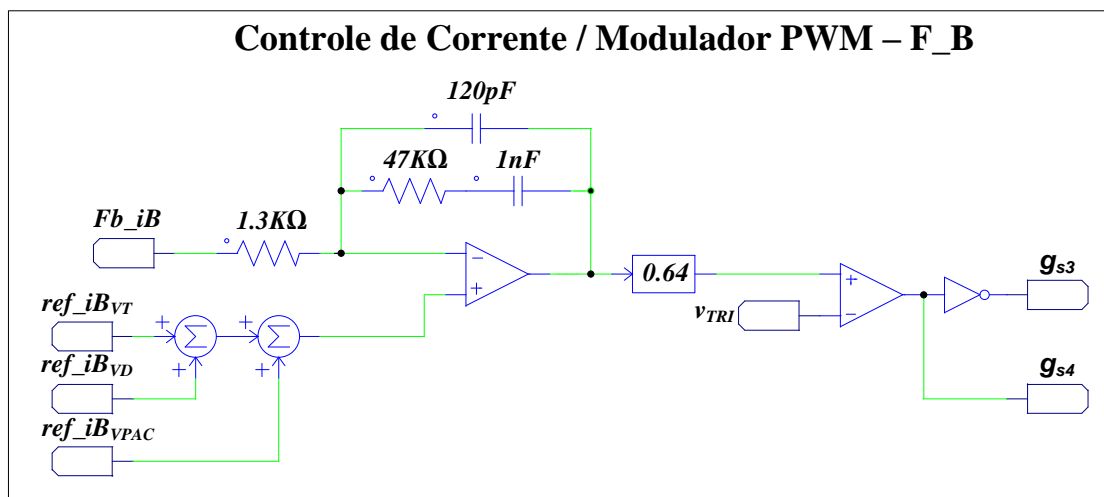
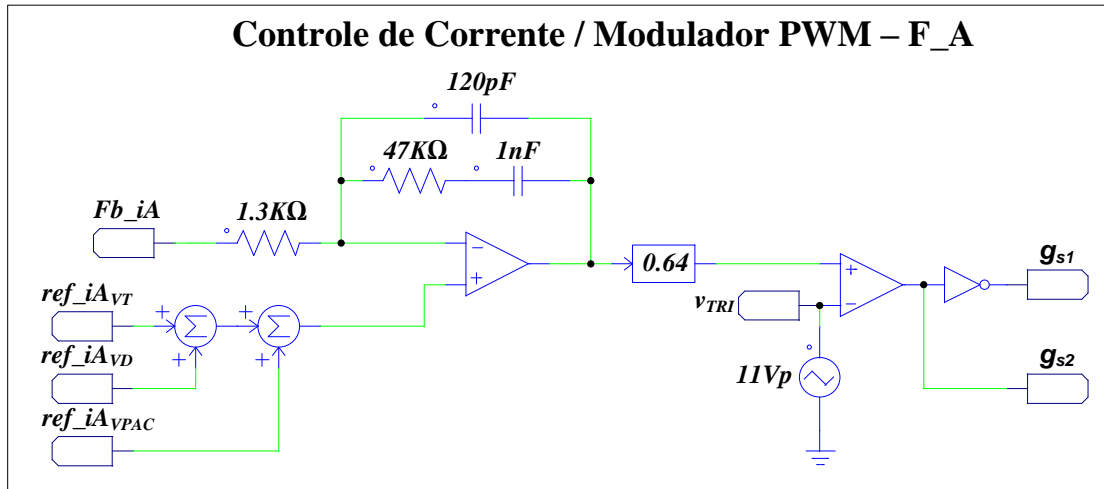
A estrutura do controlador de corrente, juntamente com o modulador PWM são similares para todas as fases do conversor e estão mostradas na Figura 50. Após devida atenuação, a tensão de saída do controlador entra no modulador PWM . A referência de corrente para o controlador é resultado da soma de três parcelas, geradas pelos dois controladores de tensão de barramento CC e pelo controlador de tensão no PAC.

Figura 49 - Estrutura de cargas simulada.



Fonte: produção do próprio autor

Figura 50 - Estrutura do controle de corrente com o modulador PWM simulada.



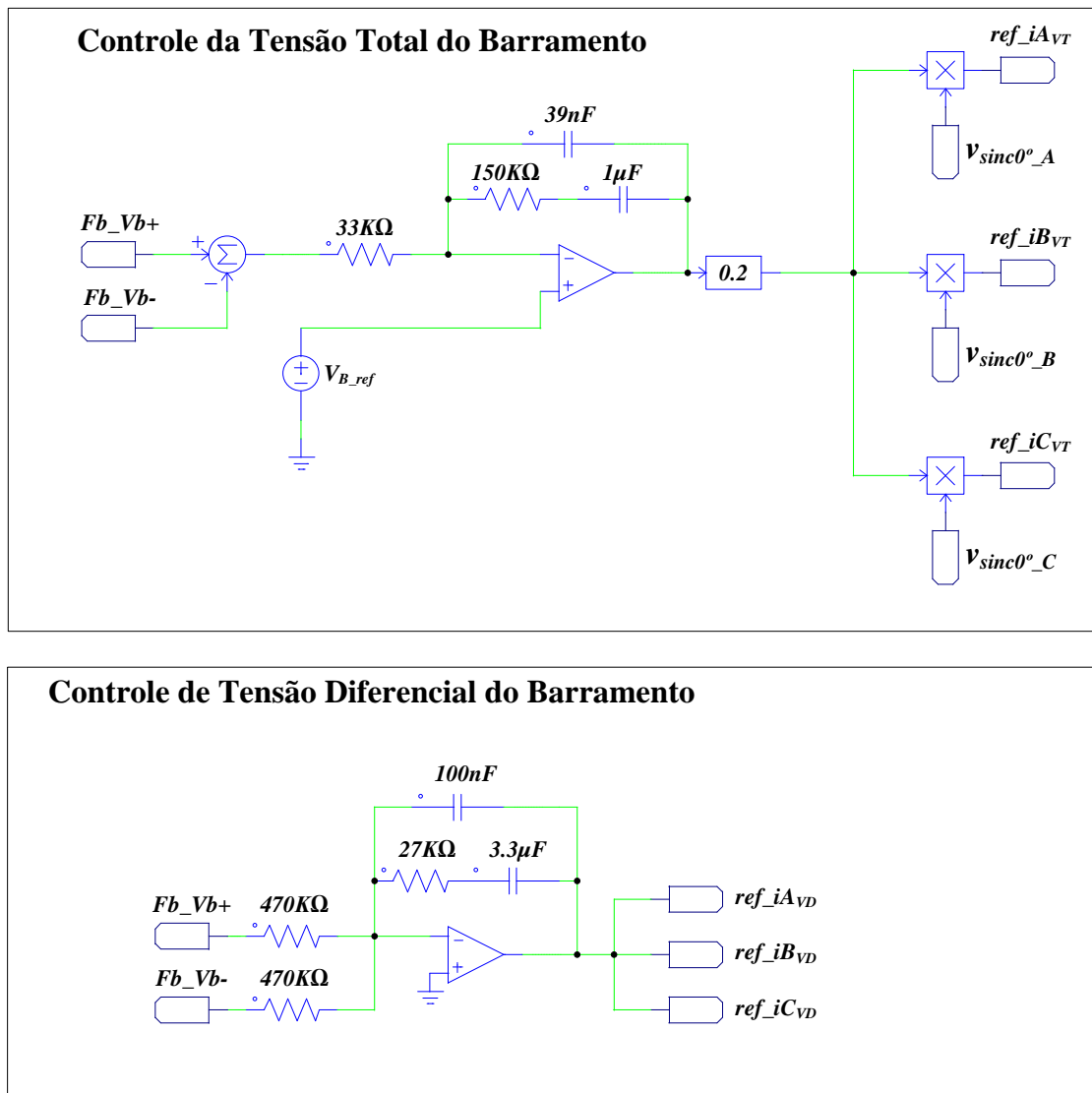
Fonte: produção do próprio autor

As estruturas do controlador de tensão total e do controlador de tensão diferencial do barramento CC estão apresentadas na Figura 51. A tensão total e a tensão diferencial, que entram nos controladores, são lidas através do sensor de tensão do barramento CC.

Depois da devida atenuação, o sinal do controlador de tensão total é modulado através das referências senoidais em fase com as tensões no PAC, gerando as referências de corrente direta para os controladores de corrente das fases A, B e C.

O controlador de tensão diferencial gera uma referência contínua para os controladores de corrente das fases A, B e C.

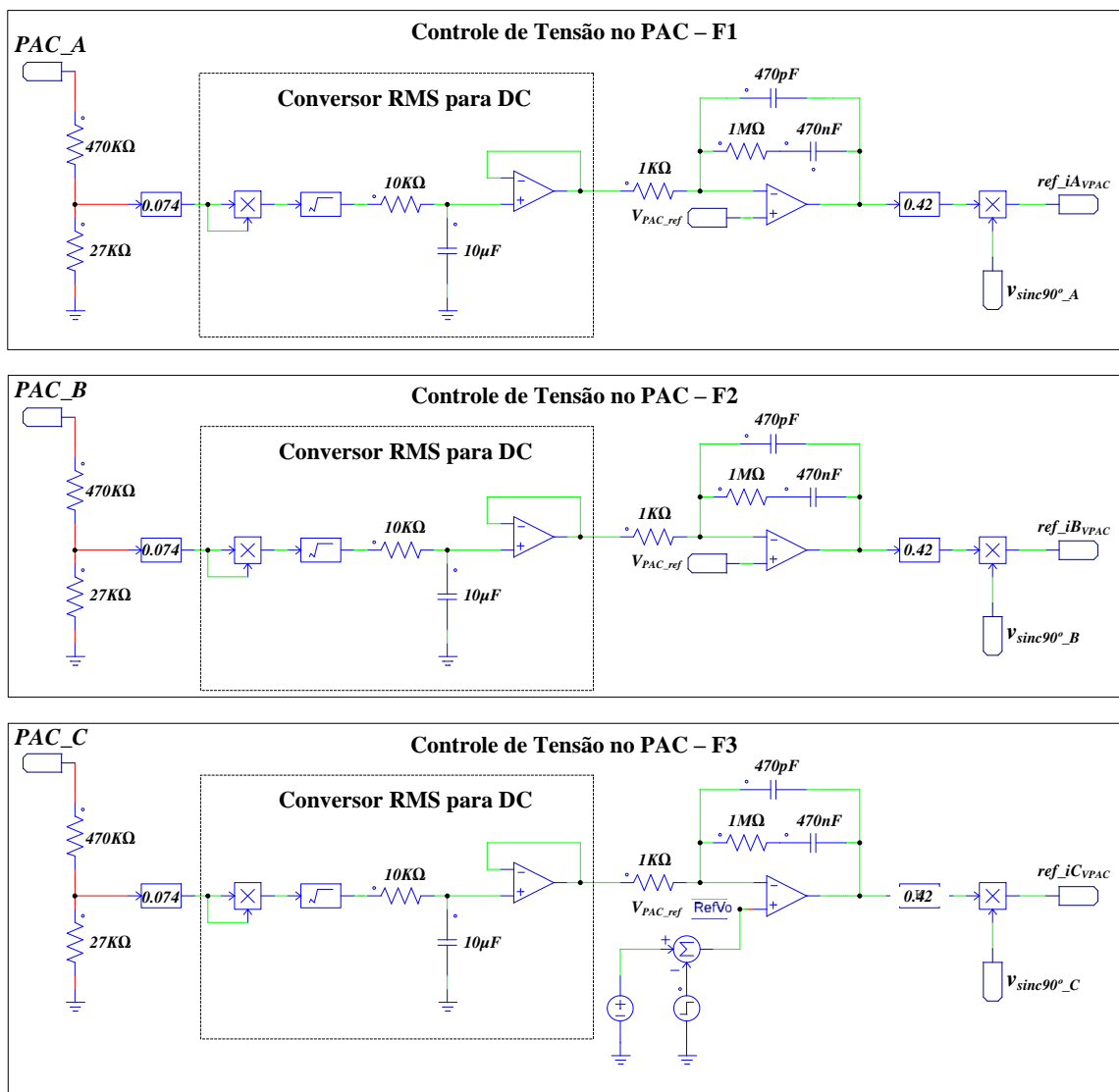
Figura 51 - Estrutura dos controladores de tensão do barramento CC simulada.



Fonte: produção do próprio autor

A estrutura do controle de tensão do PAC é similar nas três fases do conversor, essa é apresentada na Figura 52. A referência deste controlador é a mesma para as três fases, mantendo as tensões no PAC equilibradas. A tensão no PAC é lida através de sensores, atenuada e tem seu valor transformado para RMS, onde é comparado com a referência, atenuado novamente e por fim, o sinal do controlador de tensão no PAC é modulado através das referências senoidais em quadratura com as tensões no PAC, gerando as referências de corrente em quadratura para os controladores de corrente das fases A, B e C.

Figura 52 - Estrutura do controle de tensão no PAC simulada.

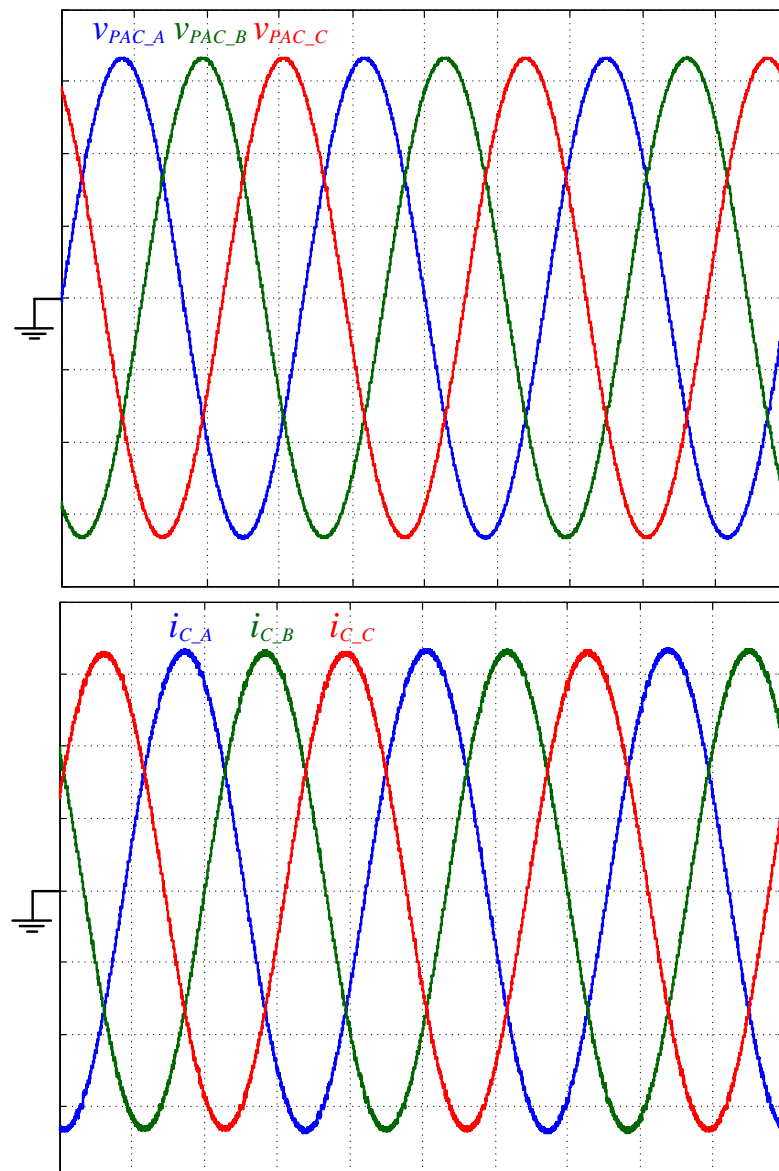


Fonte: produção do próprio autor

A seguir são apresentados os resultados das simulações dos circuitos previamente apresentados. Inicialmente os resultados do conversor operando em regime permanente são mostrados, em seguida os resultados no momento que ocorre a transição das cargas são apresentados.

Utilizando a carga nominal e o compensador de tensão, a Figura 53 mostra as formas de onda das tensões presentes no PAC e as respectivas correntes que entram do conversor.

Figura 53 - Tensões no PAC e correntes no conversor utilizando a carga nominal e com compensação de tensão (50 V/div, 5 A/div, 5 ms/div).



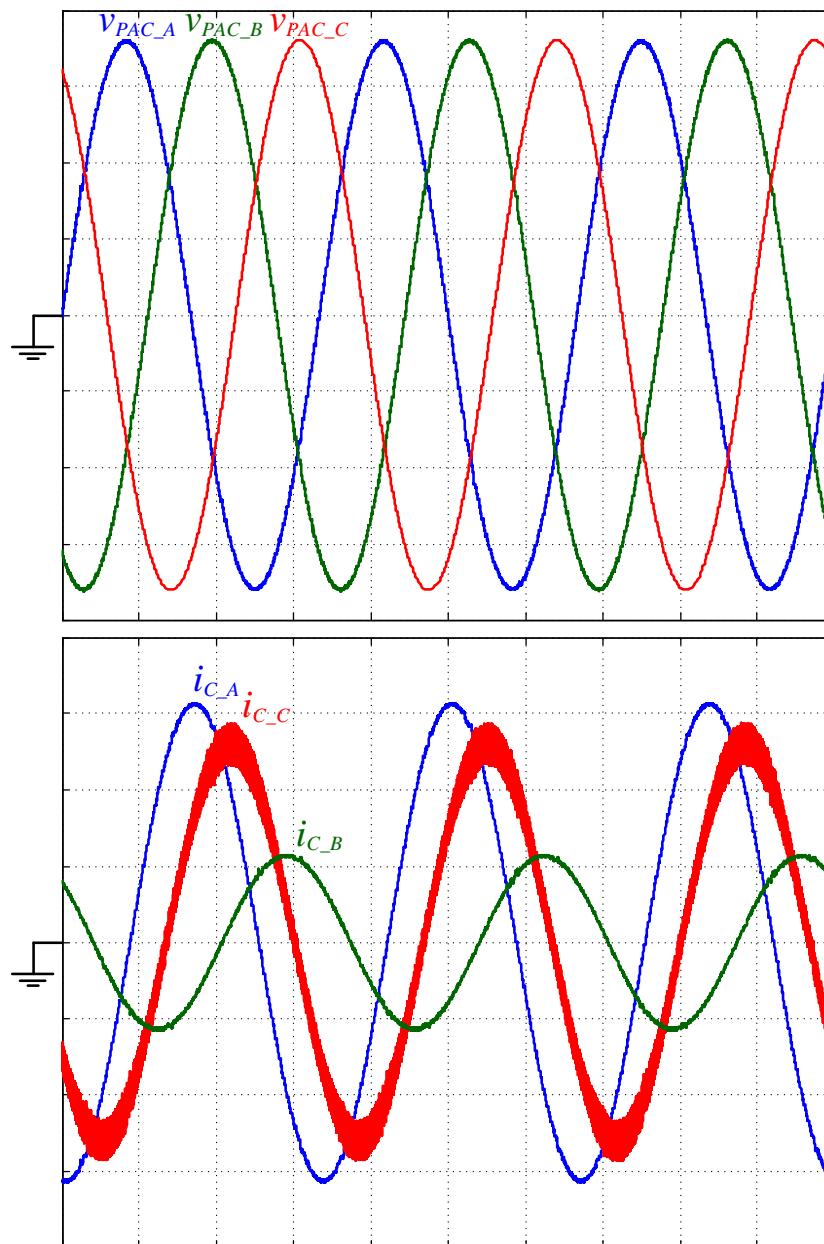
Fonte: produção do próprio autor

Na Figura 53 as tensões no PAC têm magnitude de 117 Vrms e são equilibradas, correspondendo a uma tensão de atendimento adequada. Como se utilizou a carga nominal, as correntes do conversor estão próximas do limite máximo do conversor. Como as tensões de

alimentação e a carga são equilibradas, as correntes do conversor também são equilibradas. A corrente drenada pelo conversor tem característica capacitiva, fornecendo potência reativa à carga, que têm característica indutiva.

Utilizando a carga desequilibrada e o compensador de tensão, a Figura 54 mostra as formas de onda das tensões presentes no PAC e as respectivas correntes drenadas pelo conversor.

Figura 54 - Tensões no PAC e corrente no conversor com carga desequilibrada e com compensação de tensão (50 V/div, 5 A/div, 5 ms/div).



Fonte: produção do próprio autor

As tensões mostradas na Figura 54 são equilibradas devido a compensação de tensão, obtendo magnitude de 126 Vrms, o que corresponde a uma tensão adequada de fornecimento.

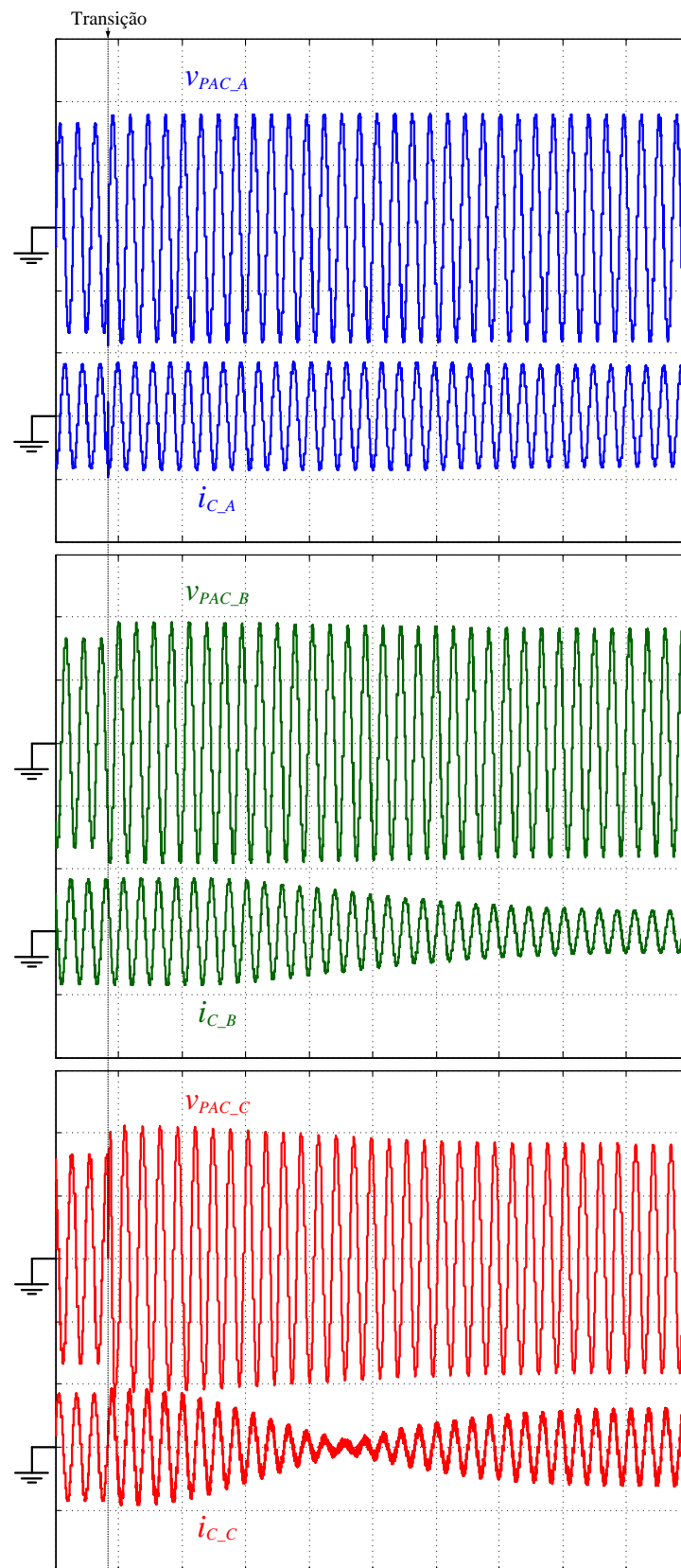
Essa magnitude está próxima à média das tensões desequilibradas quando não há compensação. As correntes das fases A, B e C apresentam amplitude e fase correspondente a carga compensada e a tensão de referência (126 Vrms). Dessa forma, na fase “A” há a maior compensação de reativo (amplitude de 11,3 A) e a corrente tem característica capacitiva. Na fase B há a menor compensação de reativo (amplitude de 4,3 A) e a corrente tem característica capacitiva. Na fase C a corrente do conversor tem característica indutiva (amplitude de 8,8 A), uma vez que a carga apresenta característica capacitiva. Na fase C observa-se maior ondulação de corrente na frequência de comutação, isso ocorre devido à influência da capacitância da carga no filtro de alta frequência do conversor.

Visto que o conversor atende as especificações em regime permanente, o mesmo foi simulado no momento da transição de cargas para que se possa avaliar sua dinâmica.

A Figura 55 apresenta as formas de onda das tensões presentes no PAC e das respectivas correntes do conversor no momento da transição da carga nominal para a carga desequilibrada.

Na Figura 55 observa-se que a corrente da fase C do conversor mudou sua fase de indutiva para capacitiva enquanto as demais somente reajustaram as amplitudes para compensar a tensão de acordo com a nova carga.

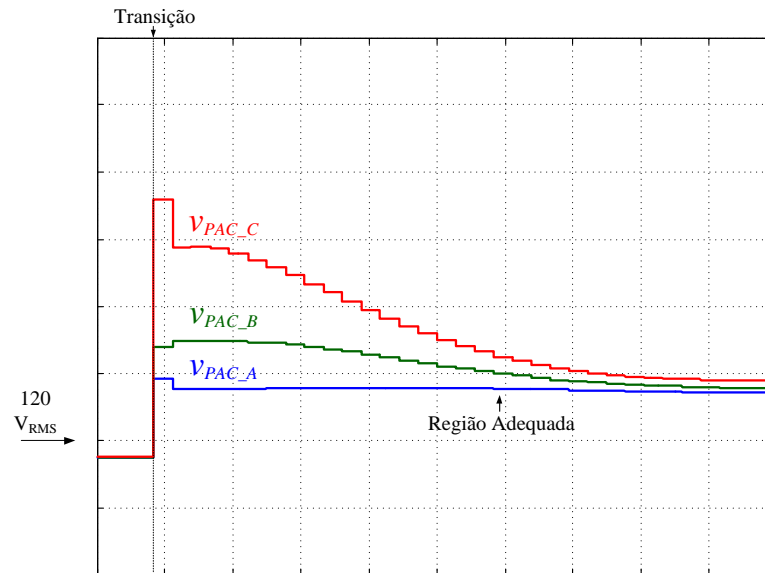
Figura 55 - Tensões no PAC e correntes no conversor na transição da carga nominal para a carga desequilibrada (100 V/div, 20 A/div, 60 ms/div).



Fonte: produção do próprio autor

A Figura 56 mostra os valores eficazes das tensões presentes no PAC durante a transição, possibilitando melhor análise da resposta do conversor.

Figura 56 - Tensões eficazes no PAC na transição da carga nominal para desequilibrada (10 V/div, 60 ms/div).



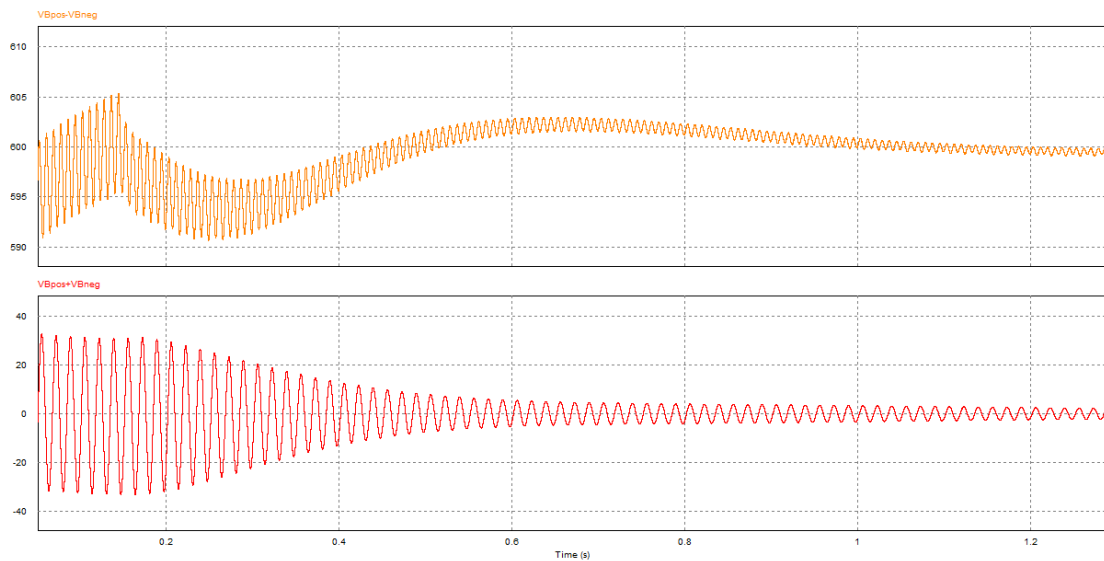
Fonte: produção do próprio autor

A Figura 56 mostra que logo após o degrau de carga as tensões estão desequilibradas e a fase C está fora da faixa adequada de atendimento. Em aproximadamente 0,3 segundos as tensões do PAC passam a operar na região adequada de tensão de atendimento. Como o tempo de resposta do conversor é menor que 3 segundos considera-se que o mesmo atendeu as especificações normativas.

Como apresentado em regime permanente, com a utilização do conversor a tensão no PAC é regulada para 116 Vrms quando o sistema opera com a carga nominal, passando para 126Vrms quando o sistema opera com a carga desequilibrada. Essa referência de tensão imposta ao compensador, variando com a carga, é imposta no momento de transição de carga. A utilização de diferentes referências para diferentes cargas é vantajosa, pois permite melhor aproveitamento da capacidade de compensação do conversor, evitando que ocorra saturação da capacidade de compensação em ambas cargas simuladas.

Mesmo durante a transição de carga o barramento CC manteve-se próxima da sua tensão nominal, a Figura 57 apresenta o comportamento do mesmo no momento da transição da carga nominal para a carga desequilibrada.

Figura 57 - Tensão total e diferencial do barramento CC (5 V/div, 200 ms/div).



Fonte: produção do próprio autor

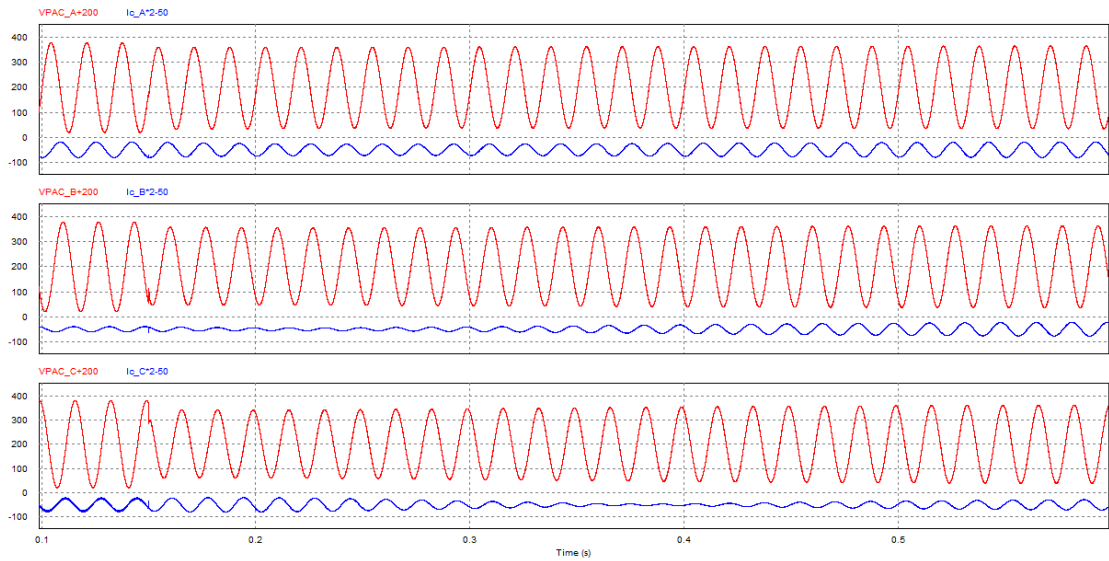
Conforme mencionado no capítulo 2, a tensão do barramento possui maior oscilação quando há cargas desequilibradas, porém os controladores de tensão do barramento CC mantiveram os níveis médios das tensões próximos às referências, atendendo as necessidades do projeto.

Um degrau mudando da carga desequilibrada para carga nominal também foi realizado. A Figura 58 mostra a forma de onda das tensões presentes no PAC juntamente com as respectivas correntes do conversor, no momento da transição das cargas.

Na Figura 58 as correntes da fase A e fase B reajustam suas amplitudes para que a tensão no PAC seja compensada, ambas mantêm fase capacitiva. A fase C reajusta sua amplitude e muda sua fase de indutiva para capacitiva, uma vez que a carga presente nessa fase mudou de capacitiva para indutiva. Observa-se que a ondulação de alta frequência na fase C é atenuada, após a mudança de carga.

A Figura 59 mostra que inicialmente as tensões no PAC estão desequilibradas, onde todas estão fora da faixa adequada de atendimento, em aproximadamente 0.6 segundos todas as tensões entram na faixa adequada de atendimento, como tal tempo é menor que 3 segundos o compensador atende as especificações dinâmicas.

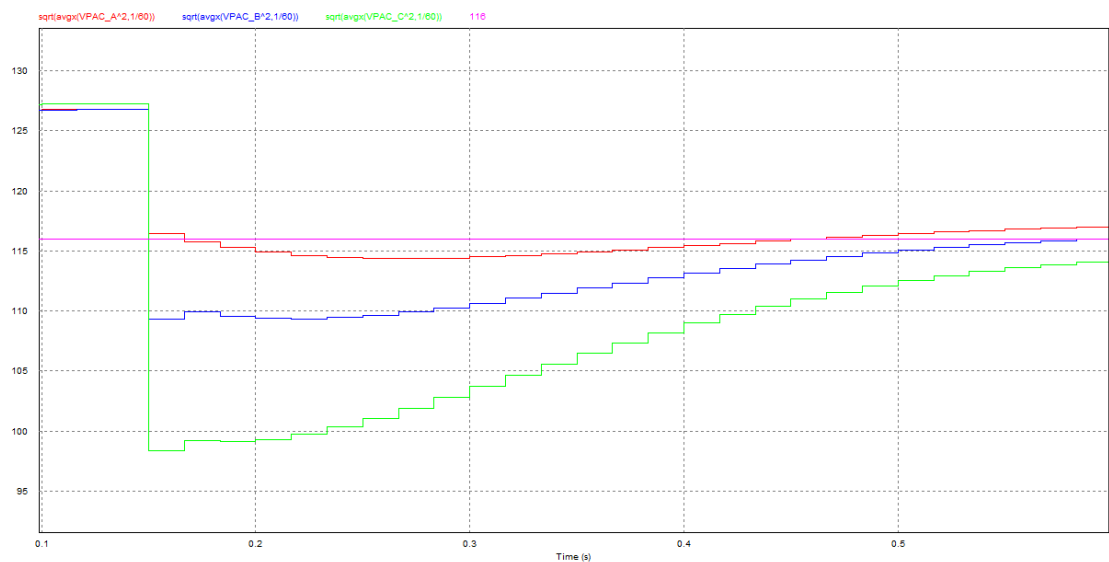
Figura 58 - Tensão no PAC na transição da carga nominal para desequilibrada (100 V/div, 100 ms/div).



Fonte: produção do próprio autor

A Figura 59 mostra os valores eficazes das tensões presentes no PAC durante a transição, possibilitando melhor análise da resposta do conversor.

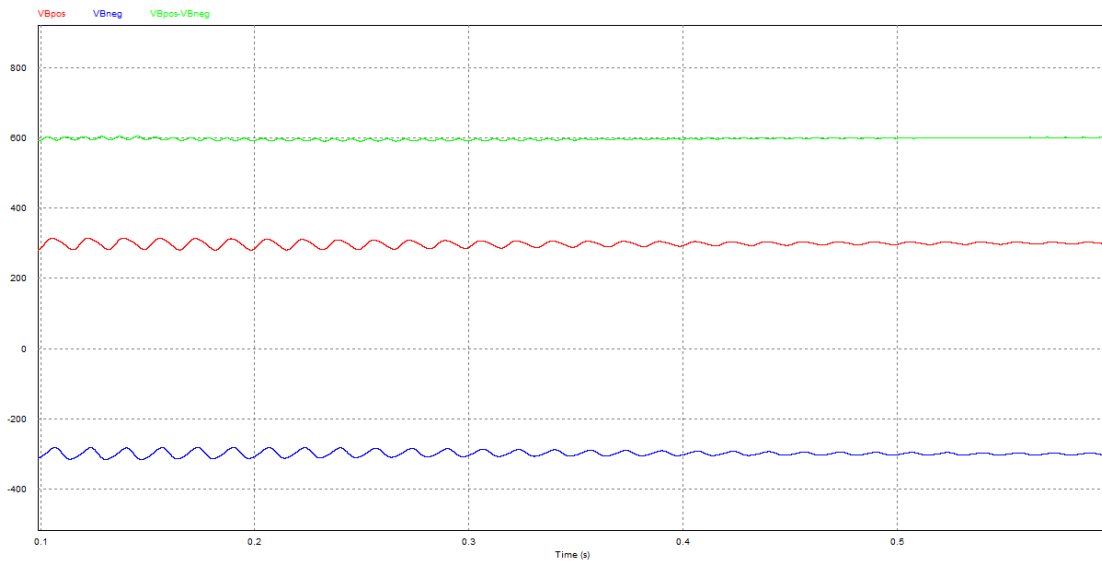
Figura 59 - Tensões eficazes no PAC na transição da carga nominal para a carga desequilibrada. (5 V/div, 100 ms/div).



Fonte: produção do próprio autor

No degrau da carga nominal para carga desequilibrada as tensões de barramento também devem se mantêm próximas à nominal. A Figura 60 mostra as tensões no barramento no momento da transição da carga nominal para a carga desequilibrada.

Figura 60 - Tensões barramento CC no momento da transição de carga nominal para a carga desequilibrada (200 V/div, 100 ms/div).



Fonte: produção do próprio autor

Ao mudar de uma carga desequilibrada para uma carga equilibrada a ondulação de tensão no barramento CC é reduzida. A média das tensões no mesmo se mantém próximas a referência, atendendo as especificações do projeto.

4.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Este capítulo mostrou a estrutura simulada, definiu as cargas simuladas, mostrou todos os blocos utilizados na simulação numérica, os resultados foram apresentados. Inicialmente foram apresentados resultados referentes ao regime permanente seguindo dos resultados obtidos no momento da transição de cargas. Os resultados consistiram em tensões no PAC, correntes do conversor e tensões do barramento.

A estrutura permitiu avaliar a capacidade do compensador de manter a magnitude da tensão no PAC sob regime permanente e sob transitório. O coerente dimensionamento da impedância da linha e o dimensionamento da carga contribuíram para uma boa avaliação da ação do conversor, uma vez que tais impedâncias permitiram significativas quedas de tensão no PAC juntamente com significativa mudança de tensão no PAC causada pela ação no compensador de tensão.

As perdas ativas inseridas na estrutura de potência do conversor contribuíram testar o desempenho do controlador de barramento CC.

As tensões de regime permanente mantiveram-se reguladas em seus valores nominais. No transitório de cargas o conversor foi capaz de controlar a tensão no PAC em tempos

inferiores a 1 segundo, atendendo as especificações dinâmicas do projeto, que exige resposta inferior a 3 segundos. O conversor foi capaz de compensar a carga nominal e a carga desequilibrada, sendo ambas cargas lineares compostas por resistores, indutores e capacitores.

A variação da referência do controlador de tensão no PAC contribuiu para a não saturação do conversor ao comutar as cargas. Mesmo ocorrendo uma variação na referência do controle, ainda foi possível avaliar o comportamento dinâmico do mesmo.

No degrau de carga não há grande variação na tensão do barramento. Como o conversor varia sua potência reativa para compensar variações de tensão no PAC, essa potência apenas influencia na ondulação da tensão do barramento CC nas frequências harmônicas da rede, não influenciando na tensão média no barramento, que varia somente com a circulação de potência ativa no conversor.

Como o compensador de tensão atendeu todas as expectativas de suas funcionalidades, considera-se que os modelos obtidos e controladores calculados estão adequados a planta.

Esta etapa de simulação é de grande importância, uma vez que no próximo tópico do trabalho ocorre a implementação prática do compensador.

5 IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Este tópico abordará os resultados experimentais do projeto, trazendo resultados providos de uma estrutura física composta por cargas, impedância de rede e por toda estrutura do compensador de tensão. Os resultados experimentais deverão comprovar o funcionamento da estrutura proposta.

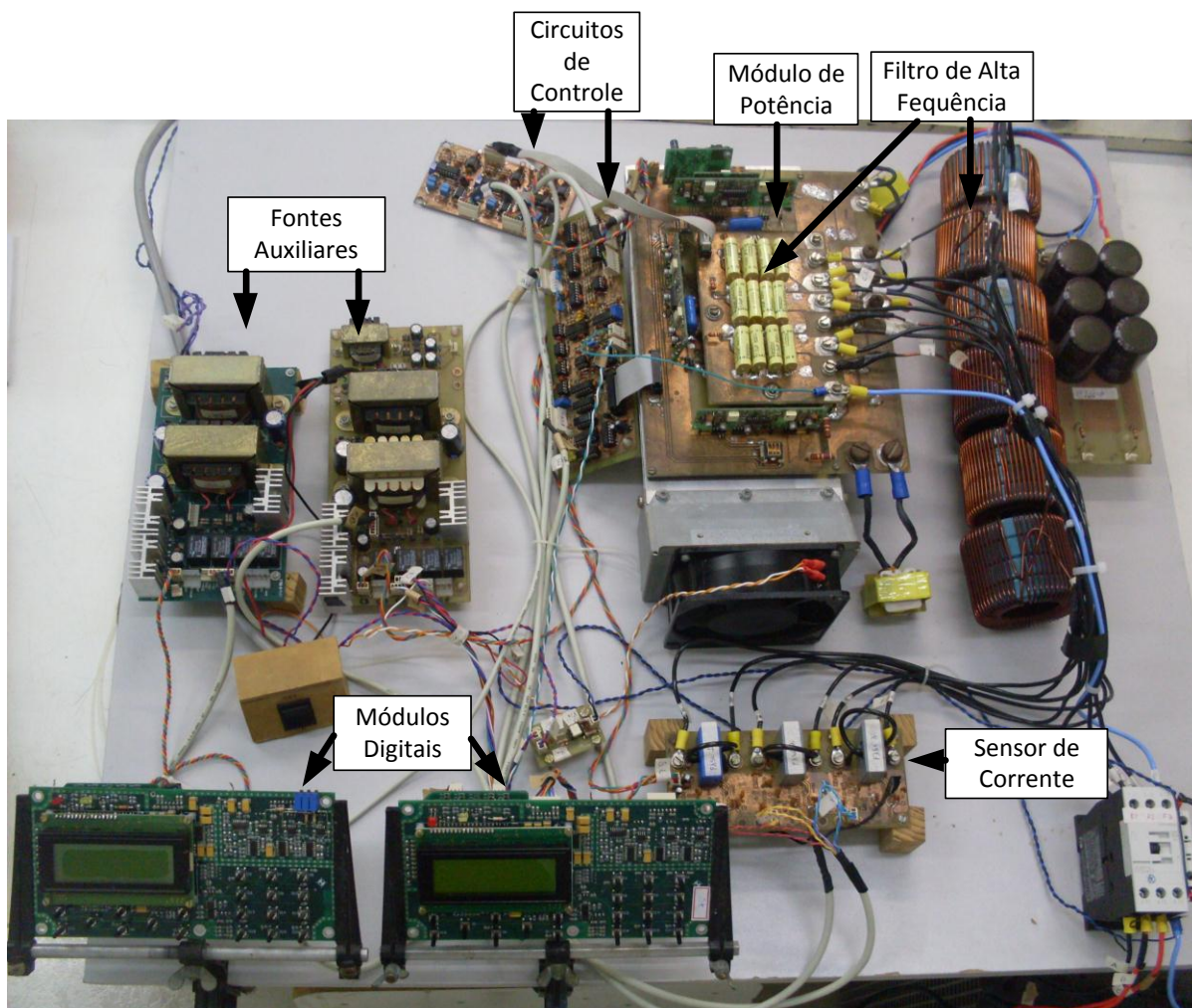
O compensador utiliza um conversor trifásico bidirecional a quatro fios com ponto médio, tal estrutura foi projetada e implementada em um trabalho anterior (16), essa suporta uma potência de 4500 VA. Os controladores são implementados de forma analógica, utilizou-se de módulos digitais para geração das referências e proteção do conversor. A potência da carga utilizada foi de 10200 VA.

Primeiramente são apresentados os circuitos eletrônicos implementados, seguindo com os resultados obtidos, esses são comparados com o PRODIST (módulo 8) (1) e por fim o capítulo é encerrado com as conclusões da implementação do dispositivo.

5.1 CIRCUITOS ELETRÔNICOS IMPLEMENTADOS

A Figura 61 apresenta o protótipo completo do compensador de tensão implementado. A eletrônica que compõem mesmo é composta por um módulo de potência com o filtro de alta frequência, sensores de tensão (que estão anexados ao módulo de potência), sensor de corrente, duas placas de controle, duas fontes auxiliares e dois módulos digitais capazes gerar as referências senoidais.

Figura 61 - Protótipo implementado.



Fonte: produção do próprio autor

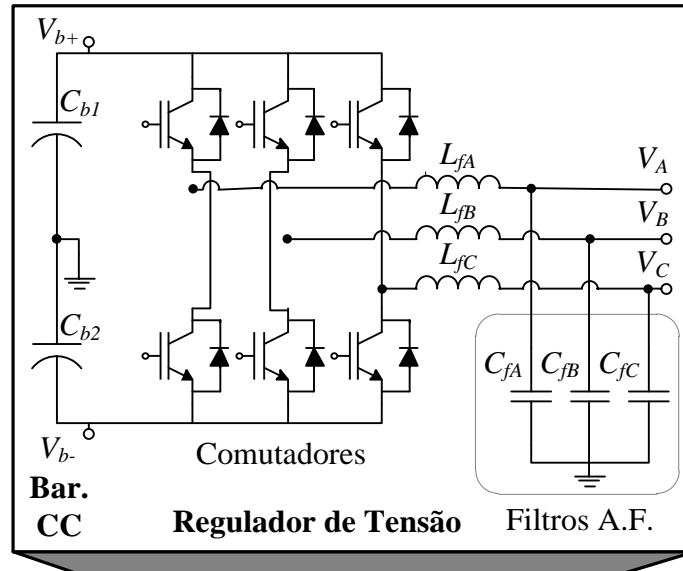
5.1.1 Unidade de Potência

A unidade de potência consiste em um inversor trifásico a quatro fios, seu filtro de saída é composto por indutores e capacitores previamente calculados. Um diagrama da estrutura apresentado no capítulo 2 pode ser visto na Figura 60, e a Figura 61 mostra uma foto do conversor utilizado.

Este módulo foi desenvolvido em Sperb (16), é capaz de operar com 4500VA de potência para tensões de 127 Vrms à 220 Vrms. Para constituir os três braços do inversor foi utilizado seis chaves do tipo IGBT, modelo IRG4F50WD do fabricante IR (*International Rectifier*) que operam com 50 khz na frequência de chaveamento. Para o acionamento das chaves é usado driver do modelo SKHI 20opa, fabricados pela Semikron. O barramento CC é composto por 6 capacitores, que formam dois bancos de 2mF cada. Para dissipação nas perdas

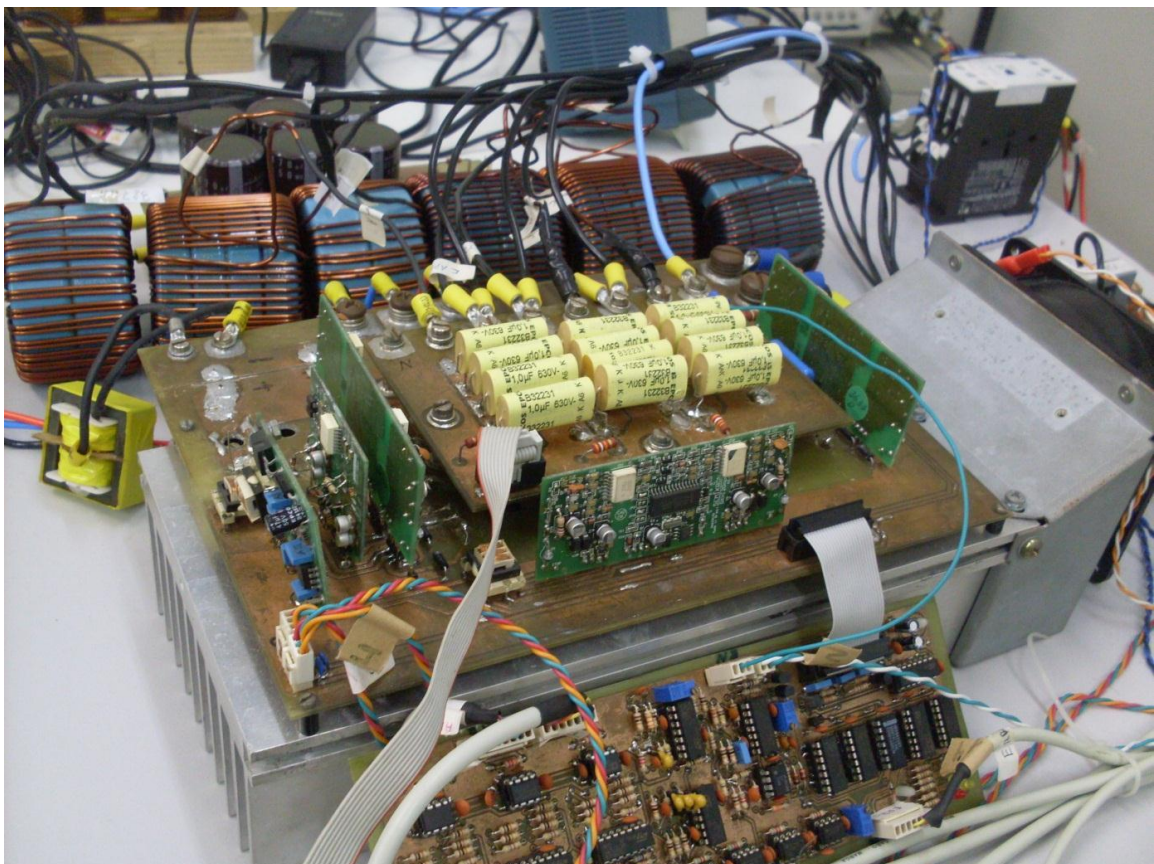
de potência nas chaves é utilizado um dissipador de alumínio com ventilação forçada. Ainda há um circuito responsável por regenerar energia das chaves para o barramento CC.

Figura 62 - Inversor composto a estrutura do regulador de tensão.



Fonte: adaptado de (15)

Figura 63 - Unidade de potência utilizada.



Fonte: produção do próprio autor

5.1.2 Drivers

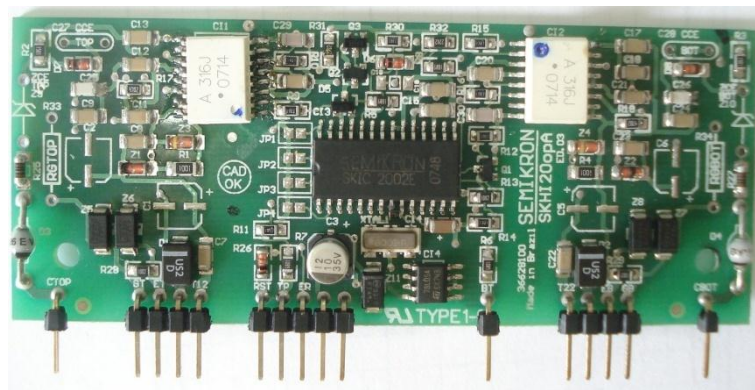
Utilizaram-se os *drivers* SKHI 20opa da Semikron para o acionamento das chaves semicondutoras do inversor.

A função destes *drivers* é garantir comando isolado para as chaves, tempo morto na comutação das chaves de um mesmo braço, possuindo ainda proteção contra curto circuito, contra sobre corrente e sub tensão de alimentação. É capaz de operar com tensão máxima de 1200 V entre coletor e emissor e sua máxima frequência operação é de 100 khz.

Caso uma das proteções do driver venha a ser excitada, o mesmo bloqueia as chaves e envia um sinal para o módulo digital do conversor, este desliga todas as chaves do conversor, bloqueia as referências e desconecta eletricamente o conversor da rede, por meio de um contator.

A Figura 64 apresenta uma foto do *driver* utilizado em cada braço do inversor.

Figura 64 - *Driver* SKHI 20opa utilizado em cada braço do conversor.

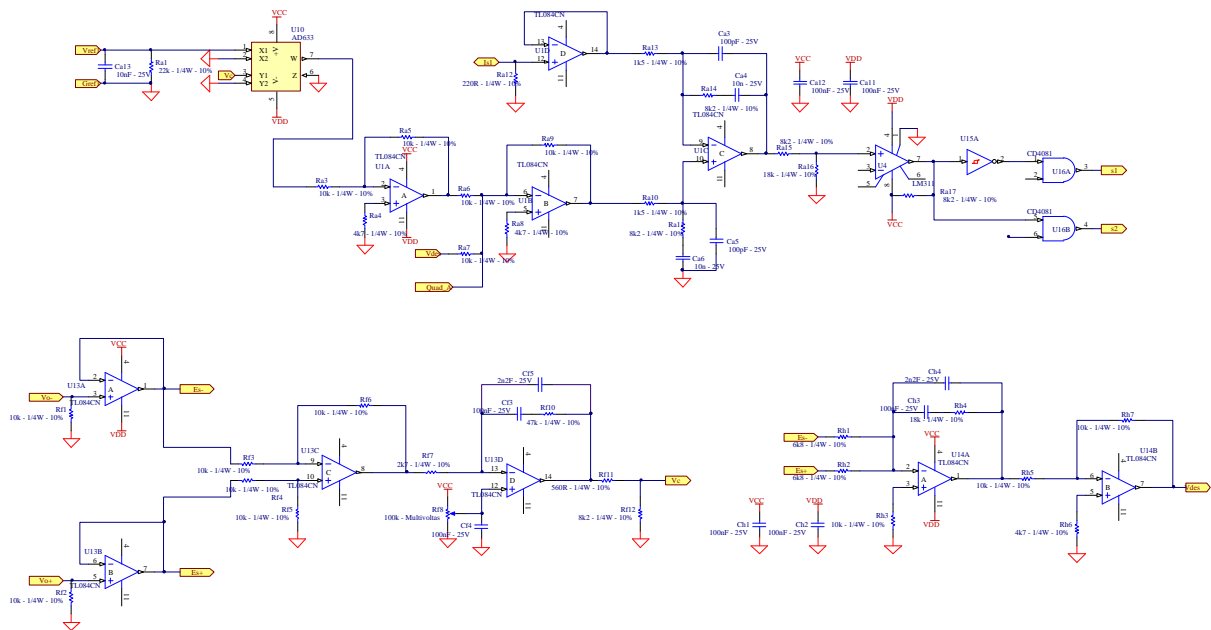


Fonte: (15)

5.1.3 Comando do Conversor

A placa de comando do conversor contém os controladores analógicos de corrente, projetados na secção 3.3.1, os dois controladores da tensão do barramento CC projetados nas secções 3.3.2 e 3.3.3 e os moduladores PWM. A Figura 65 apresenta o esquema parcial da placa de comando compensador do conversor. No circuito também é mostrado o multiplicador responsável por modular o sinal de corrente direta com a referência senoidal sincronizada com a rede, provida do módulo digital. A referência em quadratura é gerada em outra placa, esse sinal é somado no controlador de corrente. A Figura 65 o apresenta o circuito do controlador de corrente de apenas uma fase, o mesmo é utilizado nas demais fases.

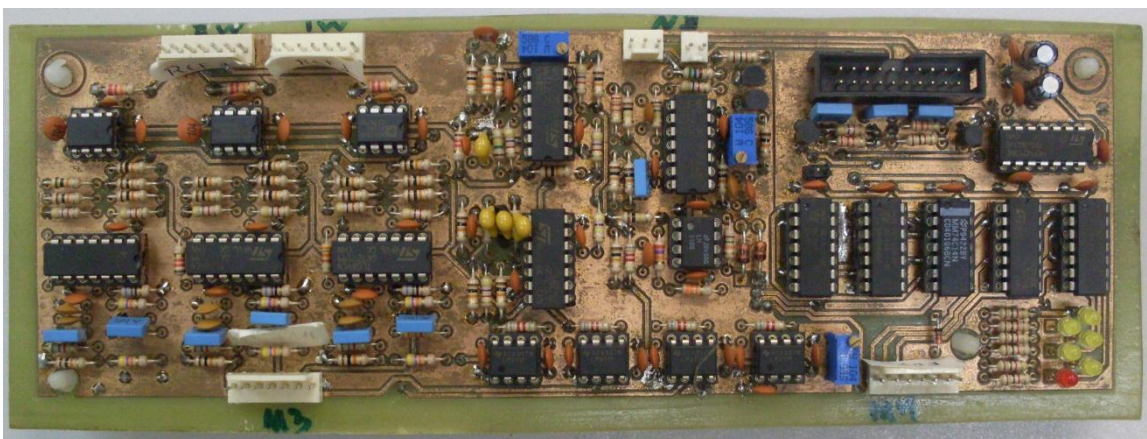
Figura 65 - Esquemático parcial da placa de comando do conversor.



Fonte: produção do próprio autor

Além dos circuitos de controle, a placa de comando possui um circuito de intertravamento, que inibe os pulsos enviados aos gatinhos dos *drivers* quando um erro é detectado por um dos próprios drives, por um circuito de proteção de sobre tensão no barramento CC, ou ainda pelo próprio módulo digital, que monitora a corrente de saída do conversor. A Figura 66 mostra uma fotografia da placa de comando utilizada no compensador de tensão no PAC.

Figura 66 - Placa de comando do conversor.



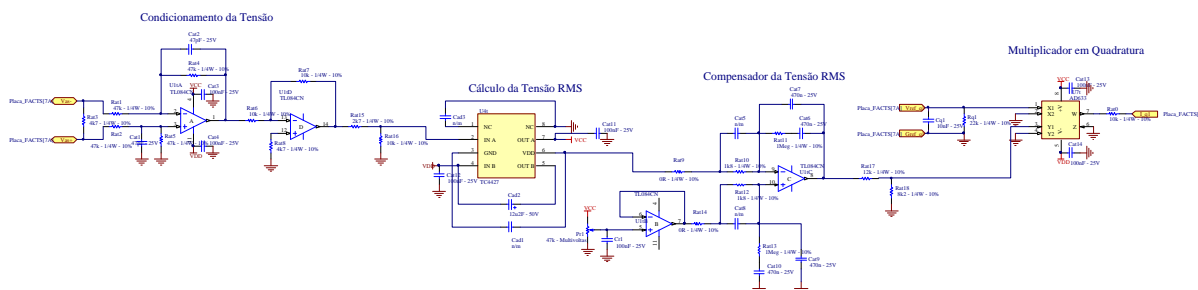
Fonte: produção do próprio autor

5.1.4 Controle de Tensão no PAC

A placa de controle de tensão no PAC contém o circuito de controle de tensão no PAC, projetado na secção 3.3.4, o circuito de conversão de tensão RMS para tensão contínua,

mencionado na secção 3.2.6, e o multiplicador responsável por modular o sinal de controle com o sinal de referência em quadratura. A Figura 67 mostra o circuito de controle de tensão de apenas uma fase, o mesmo é utilizado nas demais fases.

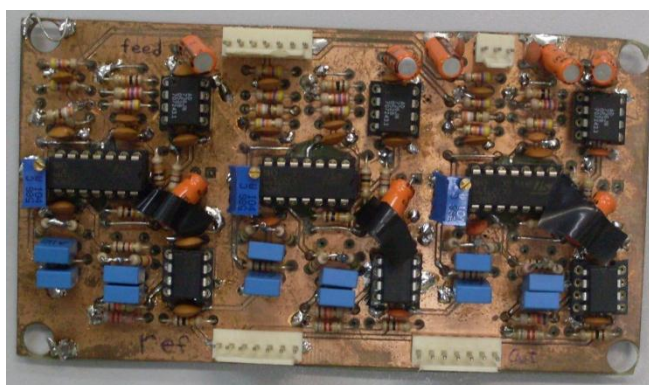
Figura 67 - Esquema parcial da placa de controle de tensão no PAC.



Fonte: produção do próprio autor

Esta placa é acoplada com a placa de comando do conversor, ela tem a função de enviar a parcela em quadratura para gerar a referência do controlador de corrente. A Figura 68 mostra uma foto da placa.

Figura 68 - Placa de controle de tensão no PAC.

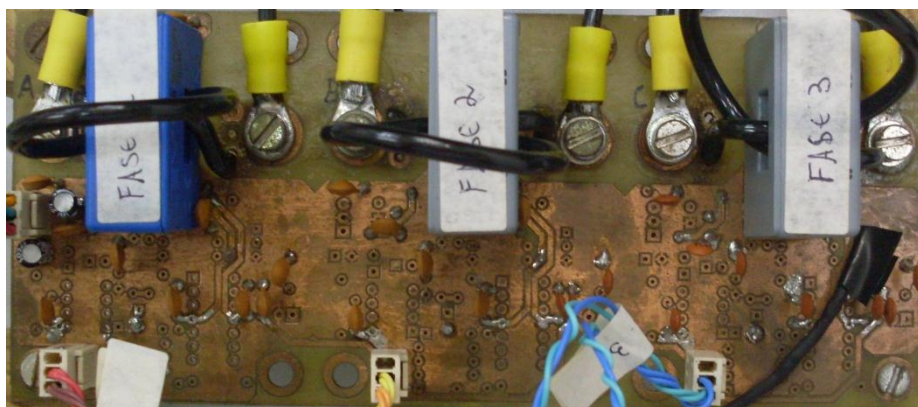


Fonte: produção do próprio autor

5.1.5 Sensores de Corrente

A placa de sensores de corrente comporta 3 sensores de efeito Hall, modelo CSNT-651 SP1, fabricados pela Honeywel. Essa placa monitora a corrente nos indutores de filtro do conversor, gerando um sinal de corrente proporcional a corrente que flui pelo interior do sensor com uma razão de 1000:1. A saída dessa placa é conectada a placa de comando, chegando ao controlador de corrente, e também é utilizada no módulo digital, que faz uma proteção de sobre corrente. Para obter um ganho de 0.068 V/A são necessárias duas espiras no sensor e um resistor de carga de 68 Ω . A Figura 69 mostra uma foto da placa.

Figura 69 - Placa de sensores de corrente.



Fonte: produção do próprio autor

5.1.6 Módulo Digital.

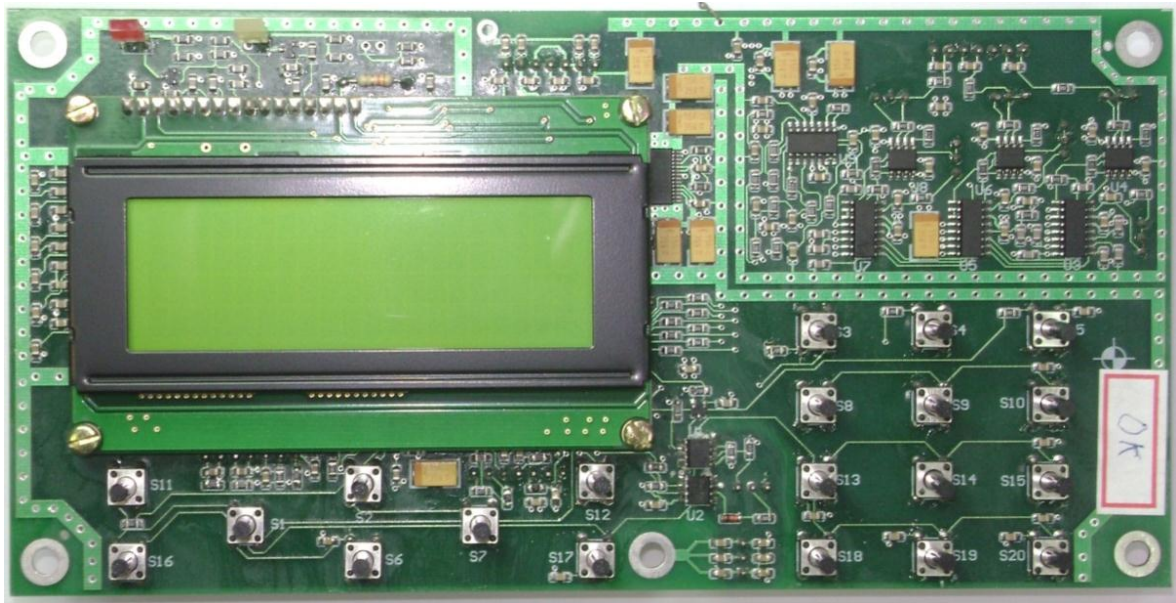
O módulo digital têm como principal função a de gerar as referências senoidais em fase, e em quadratura com a tensão do PAC, para o sistema trifásico. Neste trabalho utiliza-se dois módulos digitais, pois cada módulo disponibiliza apenas 3 sinais de referência, e no presente caso é necessário 6 referências senoidais. Cada módulo monitora a tensão de apenas uma fase, e a partir da detecção de passagem por zero dessa tensão, sincroniza todas as referências senoidais.

O módulo também é responsável pela geração de comando para o acionamento de uma contatora que conecta o conversor na rede, monitoramento dos erros dos *drivers* leitura da corrente de saída de conversor e sinais de erro da placa de comando, para fins de proteção do circuito.

Uma foto de um dos dois módulos digitais é mostrada na Figura 70.

O módulo digital foi desenvolvido por (19) e adaptado para o projeto atual.

Figura 70 - Módulo digital utilizado para geração de referências.

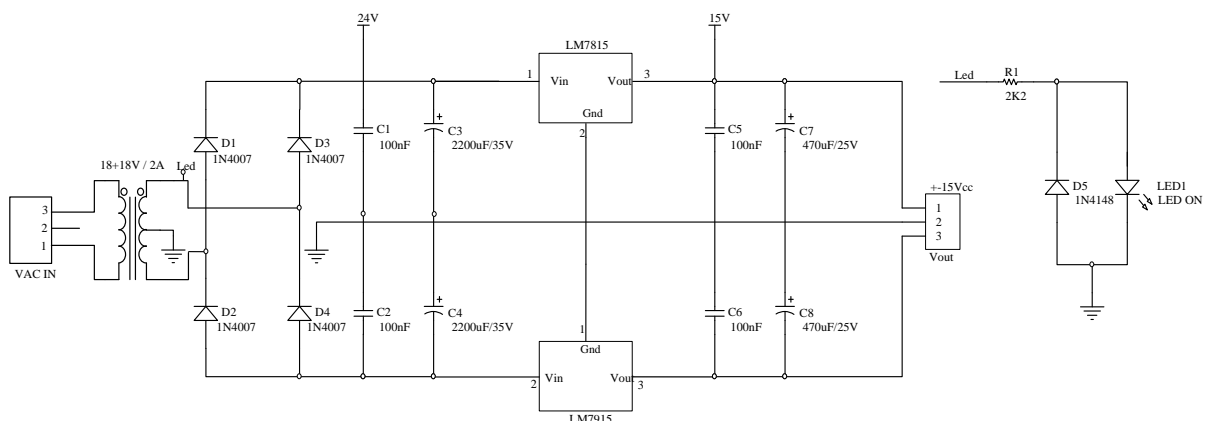


Fonte: (15)

5.1.7 Fonte de Auxiliar

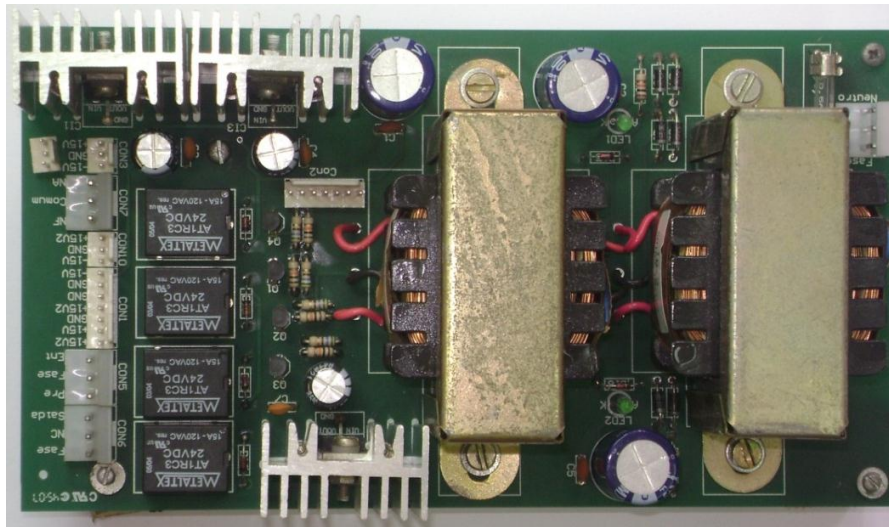
A fonte supre a alimentação dos *drivers* fornecendo uma tensão simétrica estável de 15 VDC, essa mesma tensão é compartilhada com os circuitos de comando, controle, sensores e pelo módulo digital. A fonte também disponibiliza tensão de 5VDC que é utilizada no módulo digital. A placa da fonte possui relés auxiliares, comandados pelo módulo digital, que acionam a contatora presente na entrada do conversor. Neste trabalho foram utilizadas duas fontes auxiliares de alimentação, assim a carga foi dividida entre elas, não extrapolando os limites de potência das mesmas. A Figura 71 mostra o circuito de alimentação simétrica de 15 VDC, compondo parte do esquemático da fonte auxiliar. E a Figura 72 mostra uma foto da fonte de alimentação.

Figura 71 - Esquemático parcial da fonte auxiliar de alimentação.



Fonte: (15)

Figura 72 - Fonte de alimentação auxiliar.



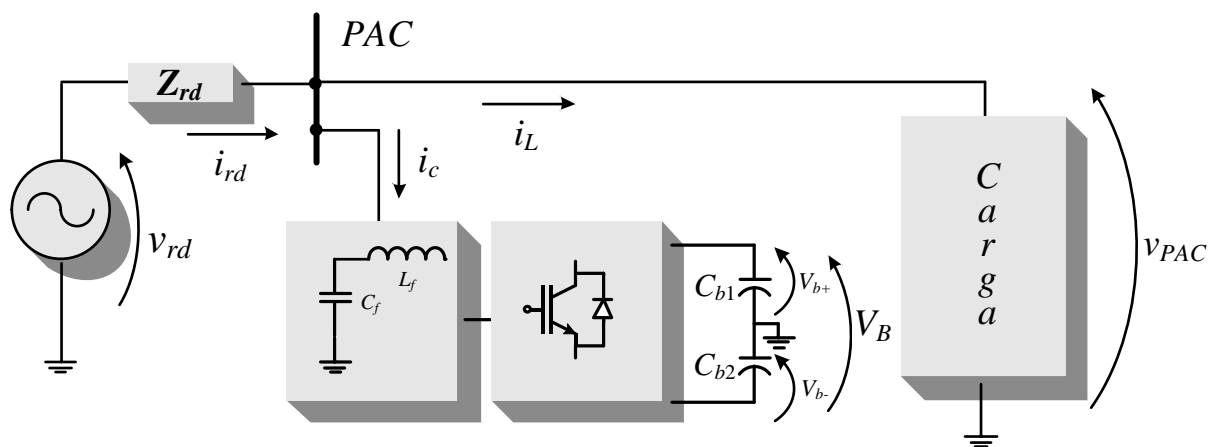
Fonte: (15)

5.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Aqui são apresentados os resultados produzidos com a implementação do compensador de tensão, cujo projeto foi discutido nos capítulos anteriores. Inicialmente a carga utilizada é apresentada, seguindo com os resultados do conversor operando em regime permanente, e então os resultados no momento em que ocorre a conexão ou a desconexão da carga são apresentados.

Um diagrama geral da estrutura implementada é mostrado na Figura 73, sendo semelhante a estrutura simulada.

Figura 73 - Estrutura implementada.

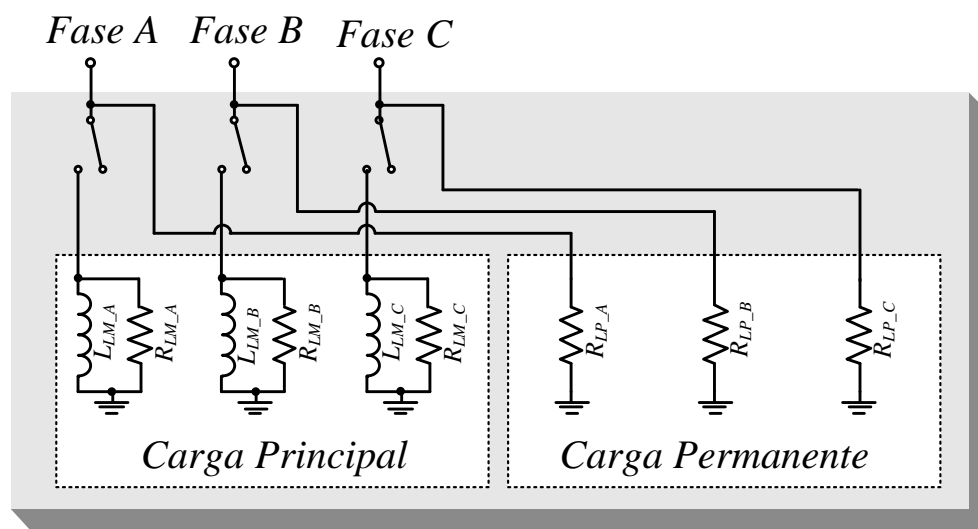


Fonte: produção do próprio autor

A carga utilizada não é idêntica à carga simulada por não disponibilidade da mesma. A Figura 74 traz o diagrama da carga implementada. A mesma é composta por uma carga

principal e uma carga permanente, a carga principal pode ser conectada e desconectada do circuito a qualquer momento, já a carga permanente, como o próprio nome sugere, está conectada ao PAC durante todos os testes.

Figura 74 - Estrutura de carga implementada.



Fonte: produção do próprio autor

A carga principal possui as seguintes características em cada fase (para 127 V_{rms}):

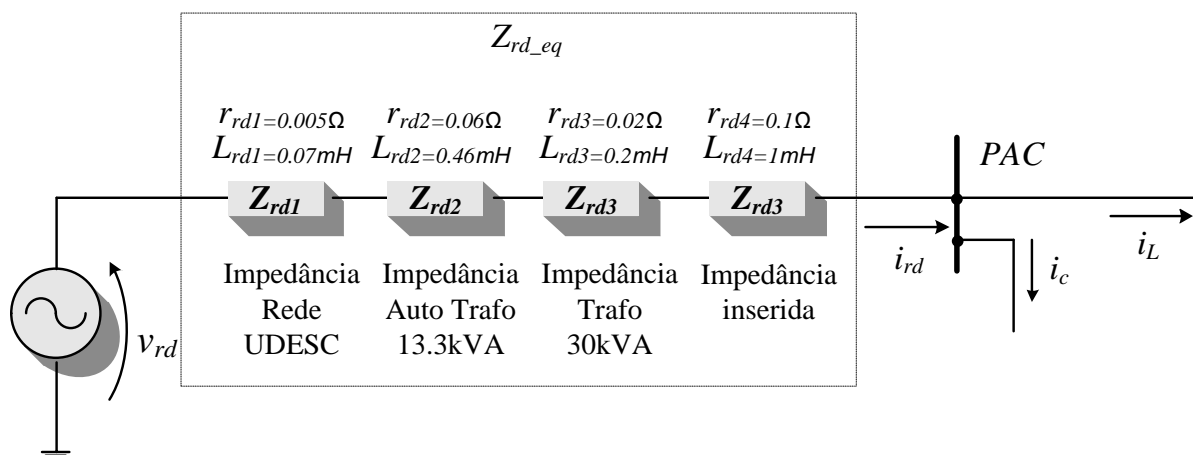
- Potência Ativa: 2.150 W;
- Potência Reativa: 2.377 VA_R ;
- Fator de Potência: 0,7_{ind};

A carga permanente possui potência de 288 W por fase.

Para implementar o sistema foi utilizado um transformador de 30 kVA juntamente com um autotransformador de 13200 VA de potência, ambos foram conectados na rede de 380 V do laboratório da UDESC. O autotransformador foi necessário para iniciar a alimentação do sistema com baixa tensão, assim promovendo um carregamento suave do barramento CC presente no conversor. Este artifício é necessário uma vez que o circuito de pré carga do barramento CC não foi implementado.

Para emular uma rede de alimentação que apresente queda de tensão significativa quando a carga principal é conectada, uma impedância série foi inserida entre os transformadores e o PAC, aumentando a impedância da linha de distribuição emulada. A Figura 75 traz os valores de impedância estimados, entre a rede e o PAC. A resistência série equivalente da rede foi estimada em 0,2 Ω e a indutância série equivalente da rede foi estimada em 1,7 mH.

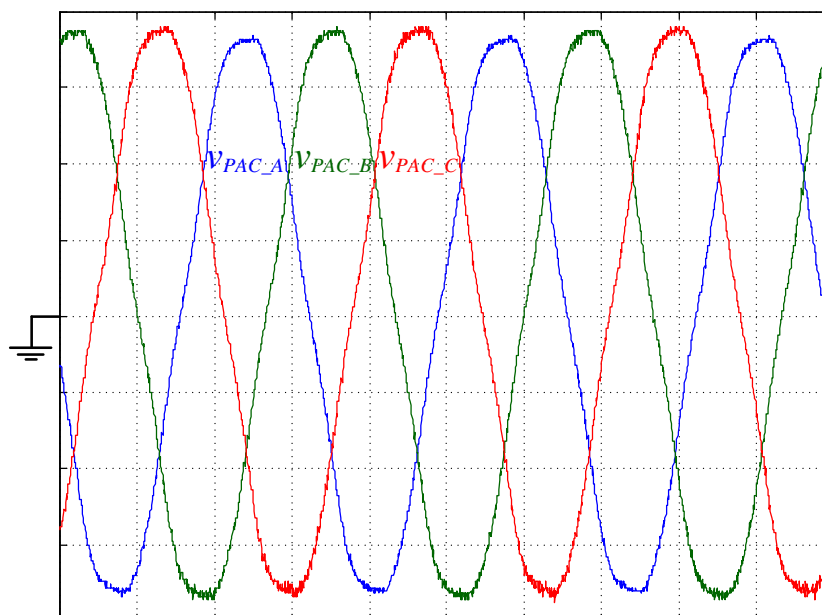
Figura 75 - Estimativas das impedâncias equivalentes da rede.



Fonte: produção do próprio autor

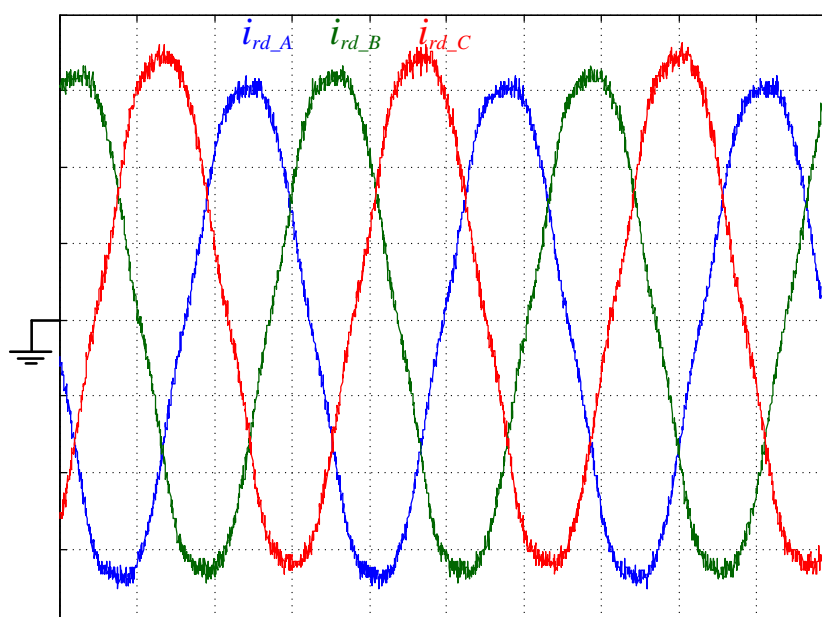
A Figura 76 mostra a forma de onda das tensões presentes no PAC e a corrente no mesmo quando a carga principal não está conectada. A magnitude dessas tensões são de 133 V_{rms} , 136 V_{rms} e 134 V_{rms} para as respectivas fases A, B e C. Como a tensão de atendimento é considerada precária para magnitudes acima de 133 V_{rms} e inferiores ou idênticas à 140 V_{rms} , a tensão de atendimento no PAC sem a carga principal é considerada precária. A corrente no alimentador (na rede) está na ordem de 2,4 A_{rms} .

Figura 76 - Tensões no PAC sem a carga principal e sem compensação (50 V/div, 5 ms/div).



Fonte: produção do próprio autor

Figura 77 - Corrente na rede sem a carga principal e sem compensação (1 A/div, 5 ms/div).

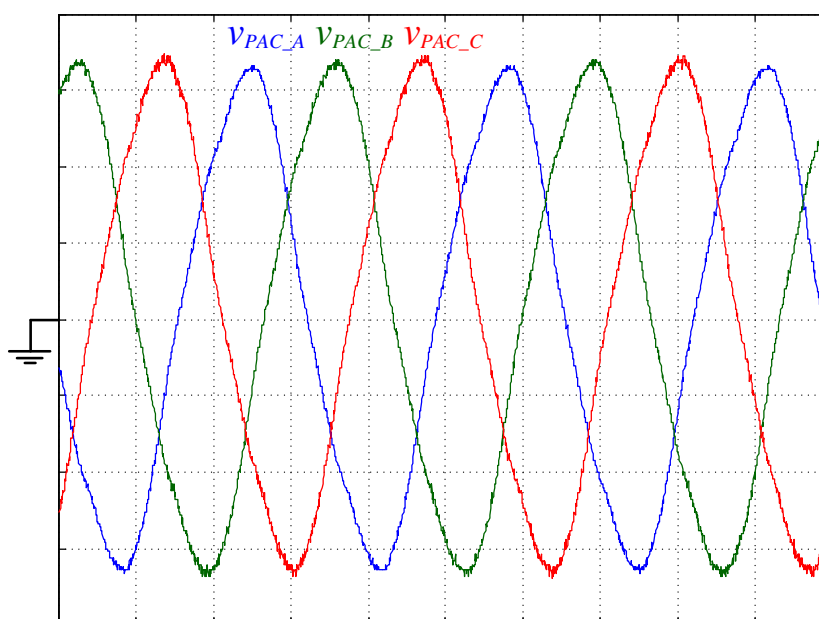


Fonte: produção do próprio autor

Ao inserir a carga principal no circuito há maior queda de tensão na impedância da rede, a Figura 78 e a Figura 79 mostram respectivamente as formas de onda das tensões presentes no PAC e as formas de ondas das correntes presentes na rede, com a carga principal conectada e sem utilizar o compensador de tensão. A magnitude dessas tensões são de 113

V_{rms} , 115 V_{rms} e 114 V_{rms} para as respectivas fases A, B e C. Como a tensão de atendimento é considerada precária para magnitudes abaixo de 116 V_{rms} e superiores ou idênticas à 109 V_{rms} , a tensão de atendimento no PAC com a carga é considerada precária. A corrente no alimentador (na rede) está na ordem de 25 A_{rms} .

Figura 78 - Tensões no PAC com a carga principal e sem compensação (50 V/div, 5 ms/div).

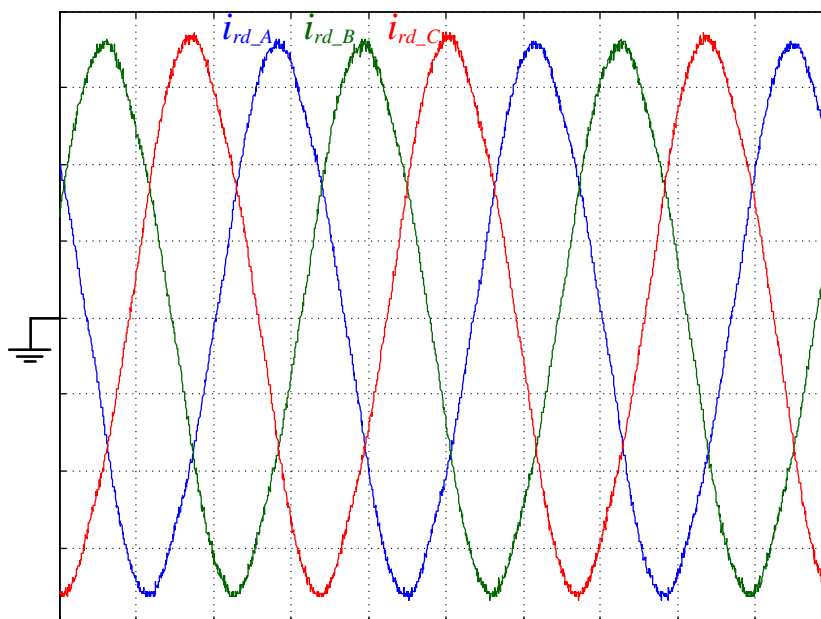


Fonte: produção do próprio autor

Como resultados da Figura 76 e da Figura 78 se têm que as tensões da rede já estão levemente desequilibradas, situação semelhante à de uma carga desequilibrada, o que pode estar ocorrendo devido às demais cargas presentes na rede da própria UDESC, onde foram feitos os ensaios. Há também a influência de uma variação de parâmetros das cargas e da impedâncias equivalente da rede.

O compensador de tensão foi inserido no sistema, porém a referência do controlador de tensão no PAC é mantida constante, não sendo possível mudança de referência para as diferentes situações de carga, como efetuado no capítulo referente às simulações numéricas do sistema.

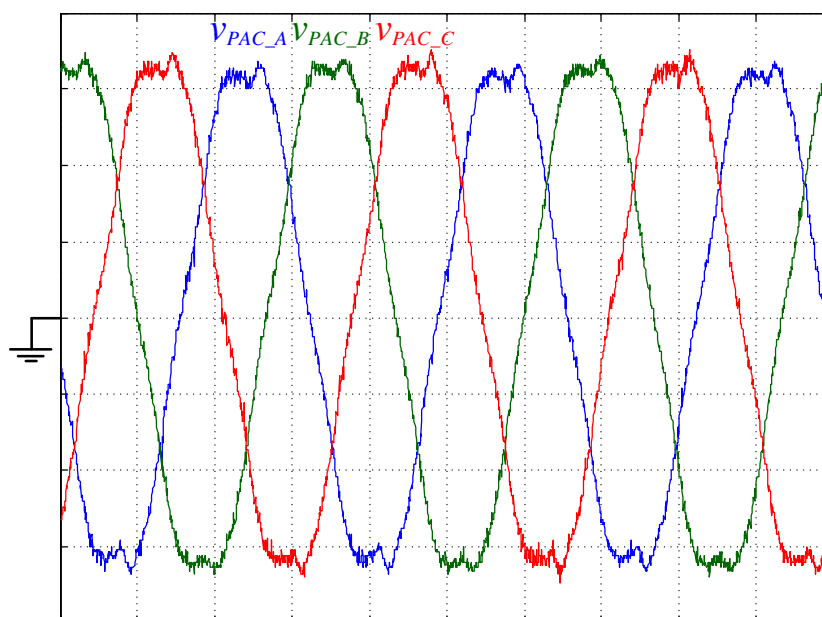
Figura 79 - Correntes na rede com a carga principal e sem compensação (10 A/div, 5 ms/div).



Fonte: produção do próprio autor

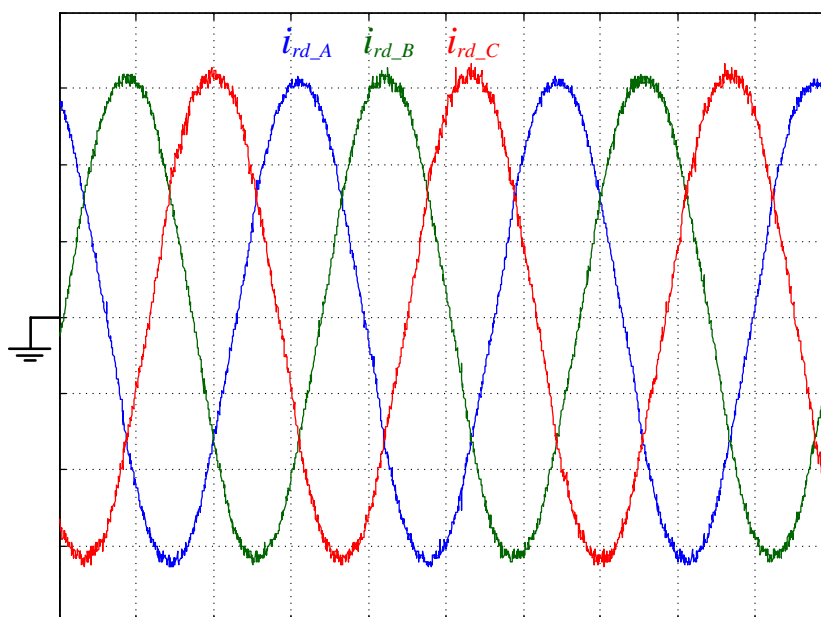
As formas de onda das tensões presentes no PAC e das correntes circulantes pela rede, em regime permanente, são respectivamente mostradas na Figura 80 e na Figura 81. Os resultados foram obtidos para a situação com a carga principal desconectada e com o compensador de tensão conectado.

Figura 80 - Tensões no PAC sem a carga principal e com compensação de tensão (50 V/div, 5 ms/div).



Fonte: produção do próprio autor

Figura 81 - Correntes na rede sem a carga principal e com compensação de tensão (5 A/div, 5 ms/div).



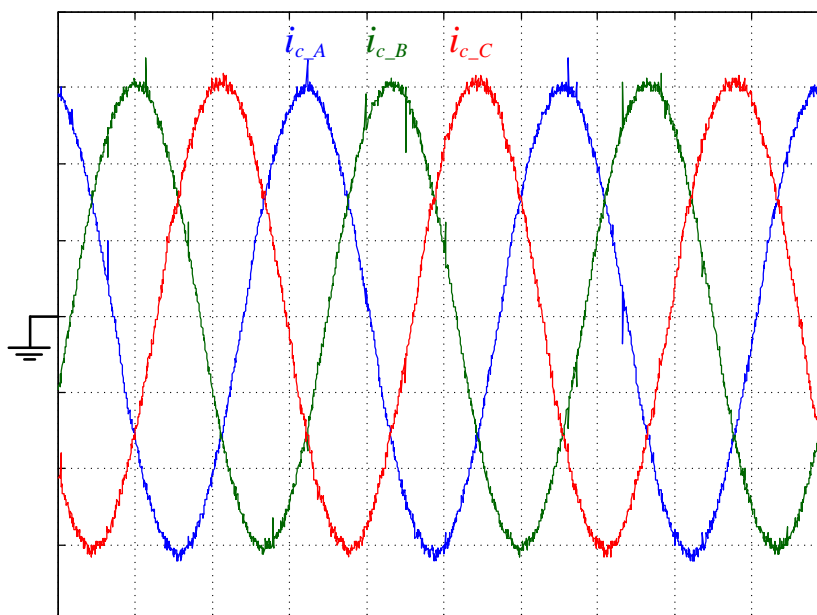
Fonte: produção do próprio autor

As tensões no PAC são de 121 V_{rms} , 124 V_{rms} e 122 V_{rms} respectivamente para as fases A, B e C. As correntes da rede têm magnitude de 11,3 A_{rms} , correspondendo a máxima da capacidade física de compensação do conversor, o que justifica o desequilíbrio de tensão presente no PAC. Apesar da saturação no controlador de tensão do PAC, a tensão de atendimento no PAC é classificada como adequada.

Como se pode verificar pela Figura 77 (1 A/div) e pela Figura 81 (5 A/div) há um significativo aumento na corrente do alimentador, esse aumento de corrente é devido a potência reativa drenada pelo compensador de tensão, esse drena corrente com característica indutiva da rede, provocando maior queda de tensão na impedância da rede, e por consequência há redução da tensão no PAC. A corrente da carga permanente não apresenta grandes variações.

A Figura 82 traz as formas de onda das correntes presentes no compensador de tensão.

Figura 82 - Correntes no conversor sem a carga principal e com compensação de tensão (5 A/div, 5 ms/div).

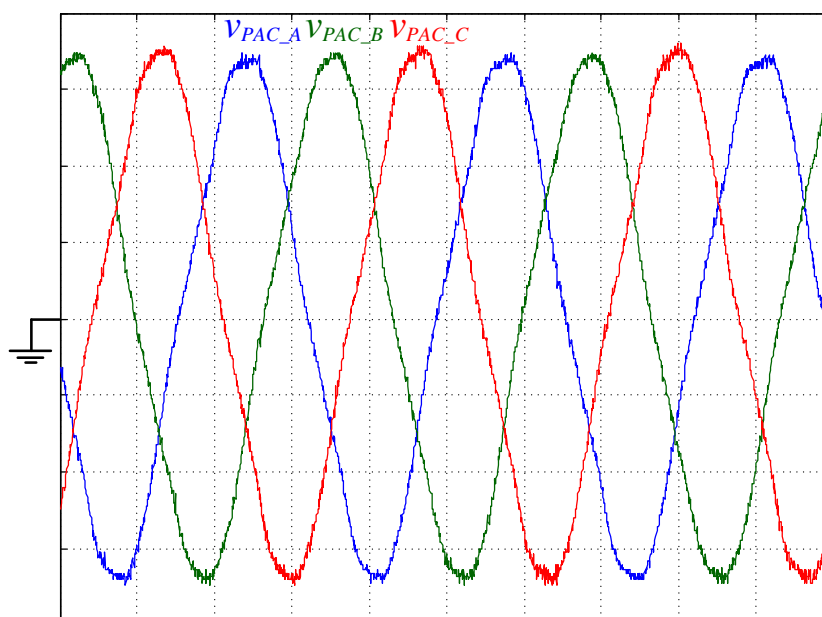


Fonte: produção do próprio autor

A Figura 83 traz as formas de onda das tensões no PAC quando a carga principal está conectada e se utiliza o compensador de tensão. As tensões se mantêm equilibradas e com amplitude de 118 Vrms, dentro da faixa adequada de tensão de atendimento.

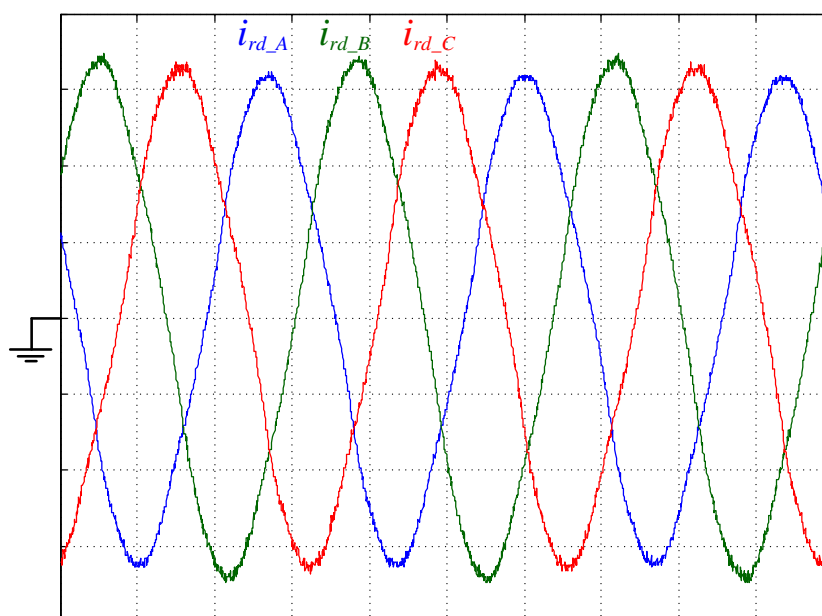
A Figura 84 traz as formas de onda das correntes da rede, que têm magnitudes de 22,1 Arms, 23,5 Arms e 22,7 Arms respectivamente para as fases A, B e C. As correntes estão levemente desequilibradas, havendo diferentes compensação entre as fases e dessa forma, mantendo as tensões equilibradas. Com a utilização do conversor houve uma elevação de tensão nas três fases do PAC, como é utilizado cargas passivas há um aumento da corrente drenadas, porém, há uma redução nos níveis de corrente da rede, sendo esses inferiores aos 25 Arms. Tal redução de corrente no alimentador ocorre devido ao fornecimento de potência reativa do conversor para a carga, reduzindo também a queda de tensão na impedância equivalente da rede, e por fim elevando a tensão no PAC.

Figura 83 - Tensões no PAC com a carga principal e com compensação de tensão (50 V/div, 5 ms/div).



Fonte: produção do próprio autor

Figura 84 - Correntes na rede com a carga principal e com compensação de tensão (5 A/div, 5 ms/div).

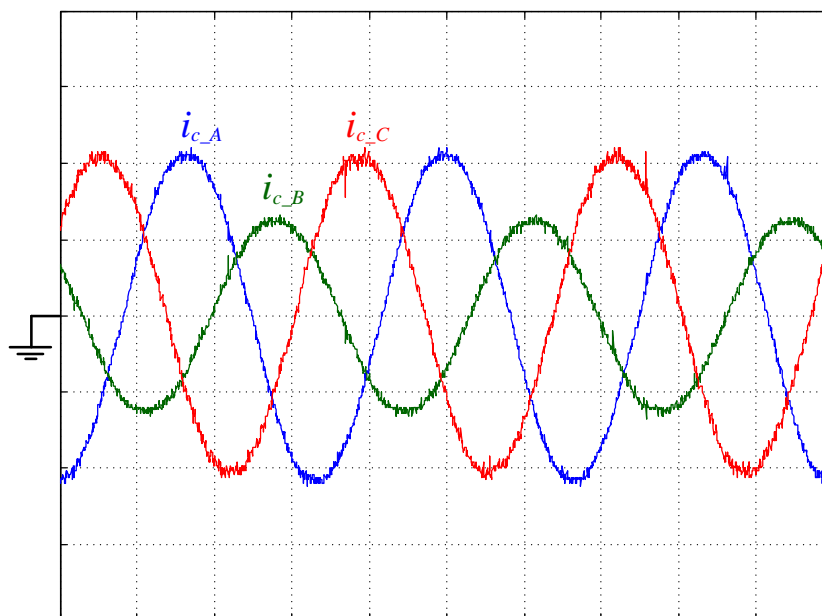


Fonte: produção do próprio autor

A Figura 85 mostra as correntes presentes no compensador de tensão, as mesmas apresentam amplitudes de 7,7 Arms, 4,4 Arms e 7,5 Arms respectivamente para as fases A, B e C. Todas correntes têm característica capacitiva e são desequilibradas apesar da carga ser equilibrada, uma vez que as tensões sem a compensação são desequilibradas. Como não há

saturação da capacidade de corrente do conversor em nenhuma das três fases, o mesmo tem capacidade de manter as tensões do PAC equilibradas.

Figura 85 - Correntes no conversor com a carga principal e com compensação de tensão (5 A/div, 5 ms/div).



Fonte: produção do próprio autor

Desde a Tabela 9 até a Tabela 12 trazem o balanço de potência do sistema para as situações aqui abordadas, respectivamente:

- Sem a carga principal conectada e sem utilizar o compensador de tensão.
- Com a carga principal conectada e sem utilizar o compensador de tensão.
- Sem a carga principal conectada e utilizando o compensador de tensão.
- Com a carga principal conectada e utilizando o compensador de tensão.

Tabela 9 - Balanço de potência do sistema sem a carga principal e sem compensação de tensão.

FASE A ($V_{PAC_A} = 133V_{rms}$)			
	Entrada	Compensador	Cargas
Potência Ativa (W)	301	0	301
Potência Reativa (VA_R)	19	0	0
Fator de Potência	1	-	1
FASE B ($V_{PAC_B} = 136V_{rms}$)			
	Entrada	Compensador	Cargas
Potência Ativa	329	0	329
Potência Reativa	6	0	0
Fator de Potência	1	-	1
FASE C ($V_{PAC_C} = 134V_{rms}$)			
	Entrada	Compensador	Cargas
Potência Ativa	308	0	308
Potência Reativa	23	0	0
Fator de Potência	1	-	1

Fonte: produção do próprio autor

Tabela 10 - Balanço de potência do sistema com a carga principal e sem compensação de tensão.

FASE A ($V_{PAC_A} = 113V_{rms}$)			
	Entrada	Compensador	Cargas
Potência Ativa (W)	1874	0	1930
Potência Reativa (VA_R)	1917	0	1882
Fator de Potência	0,70	-	0,7
FASE B ($V_{PAC_B} = 115V_{rms}$)			
	Entrada	Compensador	Cargas
Potência Ativa (W)	2108	0	1999
Potência Reativa (VA_R)	1950	0	1949
Fator de Potência	0,70	-	0,7
FASE C ($V_{PAC_C} = 114V_{rms}$)			
	Entrada	Compensador	Cargas
Potência Ativa (W)	1938	0	1965
Potência Reativa (VA_R)	1931	0	1915
Fator de Potência	0,70	-	0,71

Fonte: produção do próprio autor

Tabela 11 - Balanço de potência do sistema sem a carga principal e com compensação de tensão.

FASE A ($V_{PAC_A} = 121V_{rms}$)			
	Entrada	Compensador	Cargas
Potência Ativa (W)	294	88	261
Potência Reativa (VA_R)	1338	1279	0
Fator de Potência	0,21	0,07	1
FASE B ($V_{PAC_B} = 124V_{rms}$)			
	Entrada	Compensador	Cargas
Potência Ativa (W)	370	94	274
Potência Reativa (VA_R)	1409	1351	0
Fator de Potência	0,25 _{ind}	0,07 _{ind}	1
FASE C ($V_{PAC_C} = 122V_{rms}$)			
	Entrada	Compensador	Cargas
Potência Ativa (W)	303	145	265
Potência Reativa (VA_R)	1350	1306	0
Fator de Potência	0,22 _{ind}	0,11 _{ind}	1

Fonte: produção do próprio autor

Tabela 12 - Balanço de potência do sistema com a carga principal e com compensação de tensão.

FASE A ($V_{PAC_A} = 117V_{rms}$)			
	Entrada	Compensador	Cargas
Potência Ativa (W)	2143	82	2070
Potência Reativa (VA_R)	1261	1013	2017
Fator de Potência	0,86	0,08 _{cap}	0,72 _{ind}
FASE B ($V_{PAC_B} = 118V_{rms}$)			
	Entrada	Compensador	Cargas
Potência Ativa (W)	2272	142	2105
Potência Reativa (VA_R)	1660	632	2051
Fator de Potência	0,81	0,22 _{cap}	0,72 _{ind}
FASE C ($V_{PAC_C} = 119V_{rms}$)			
	Entrada	Compensador	Cargas
Potência Ativa (W)	2198	100	2141
Potência Reativa (VA_R)	1471	973	2087
Fator de Potência	0,83	0,10 _{cap}	0,72 _{ind}

Fonte: produção do próprio autor

Como esperado, ao utilizar o compensador com a carga principal conectada, a potência aparente que circula pelo alimentador é inferior à potência aparente drenada pela

carga. E ao utilizar o compensador de tensão sem a carga principal conectava, a potência aparente que circula pelo alimentador é superior à potência aparente drenada pela carga.

Independente da potência aparente consumida pelo alimentador a tensão no PAC se mantém regulada.

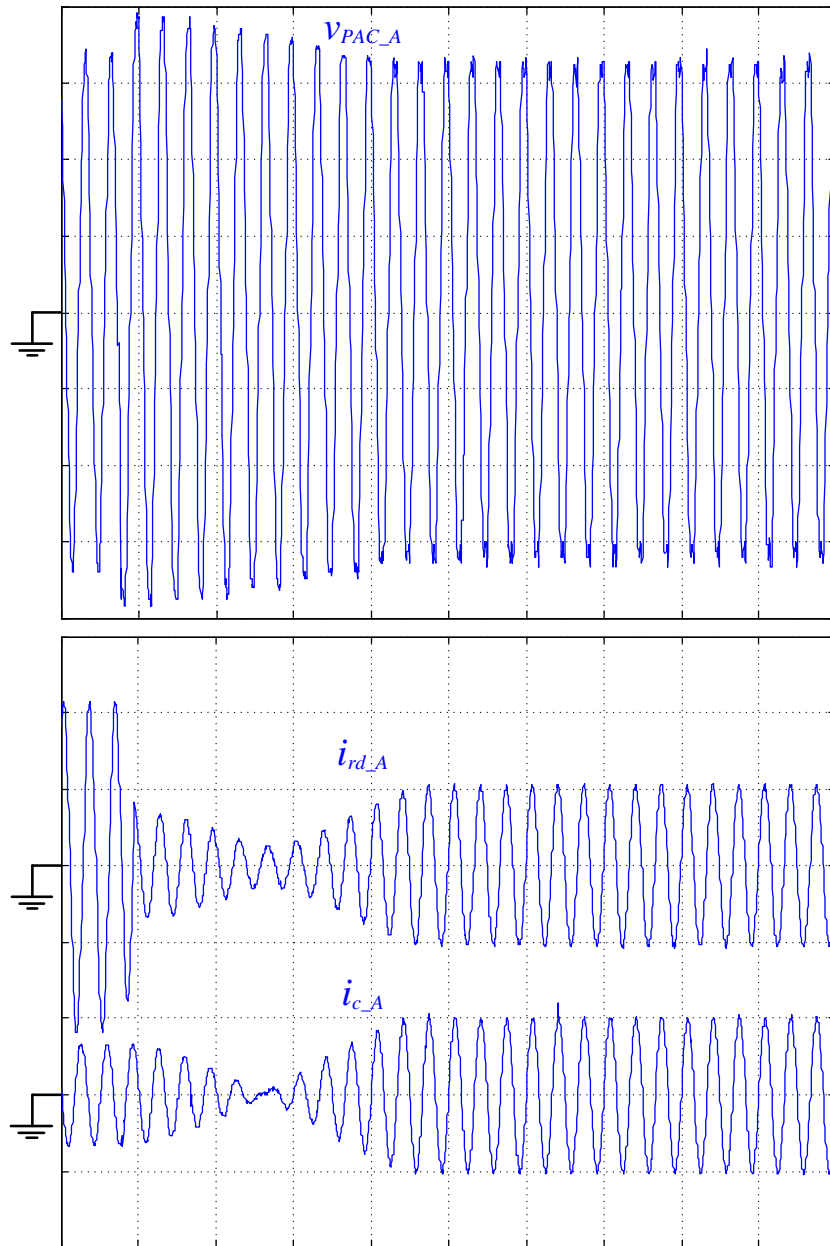
A seguir são apresentados alguns resultados referentes à resposta dinâmica do conversor. Foram medidas as tensões no PAC, correntes na rede e as correntes no compensador durando a conexão e desconexão da carga principal.

A Figura 86, Figura 87 e Figura 88 trazem respectivamente para as fases A, B e C as tensões presentes no PAC, as correntes presentes na rede e as correntes drenadas pelo conversor no momento em que a carga principal é retirada do sistema.

Observa-se que antes da desconexão da carga principal as tensões no PAC estavam reguladas em 118 Vrms, a corrente da rede é alta, em torno de 23 Arms, e o conversor apresenta correntes desequilibradas e inferiores a sua capacidade máxima. No momento da desconexão da carga há uma elevação na tensão do PAC, que é mais acentuada por conta da injeção de potência reativa no PAC pelo conversor. Na medida em que a corrente do conversor é reduzida a corrente da rede também reduz e a tensão no PAC chega aos níveis de 134 Vrms. Como a tensão no PAC não é adequada sem a ação do compensador o mesmo passa a consumir potência reativa, a fim de reduzir a tensão no PAC. Por fim o conversor drena sua máxima potência reativa (saturando), a tensão no PAC é regulada aos níveis em torno de 122 Vrms e a corrente da rede também aumenta para o mesmo nível de corrente drenada pelo conversor, apesar do sistema alimentar uma carga que consome apenas 2,4 Arms.

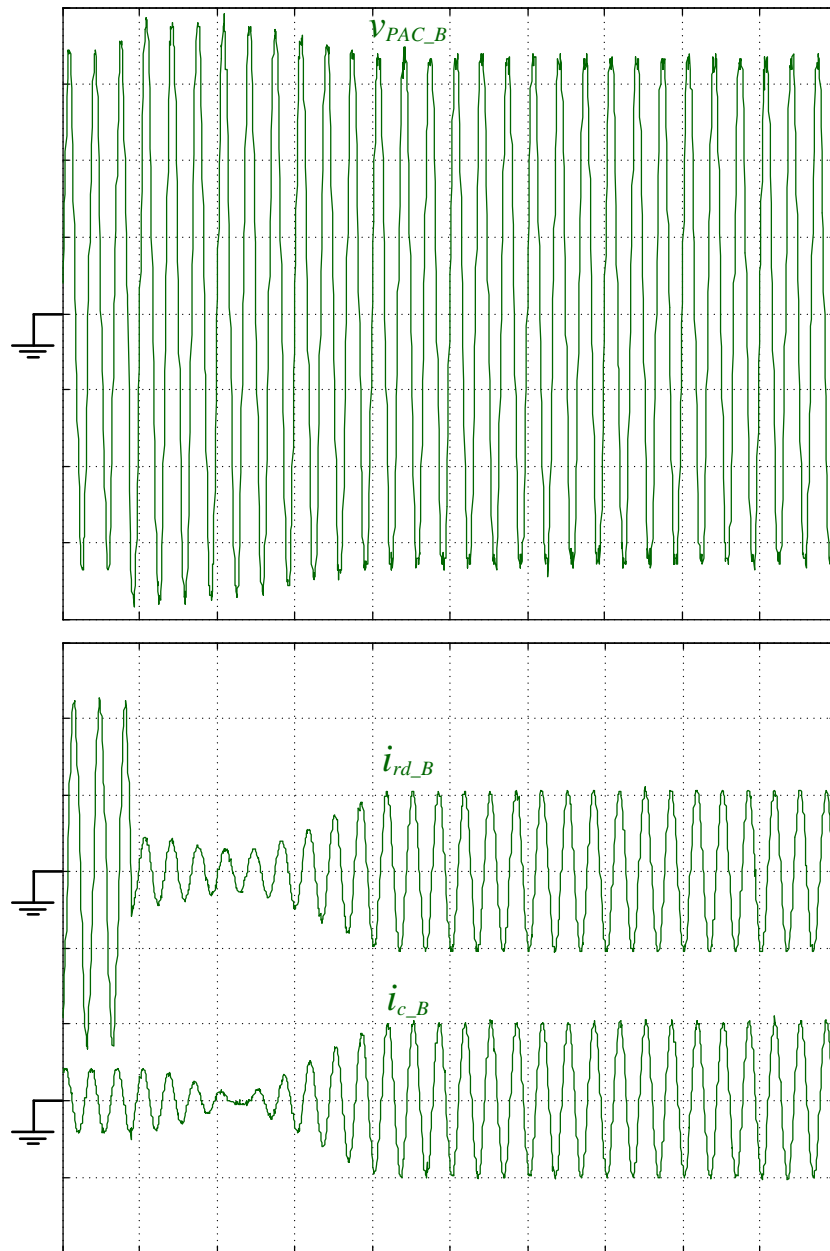
A mudança na característica do compensador, de injeção para consumo de potência reativa pode ser visualizada pela mudança de fase da corrente do conversor.

Figura 86 - Tensão no PAC, corrente na rede e corrente no conversor relativas a fase A, durante a desconexão da carga principal (50 V/div, 15 A/div, 50 ms/div).



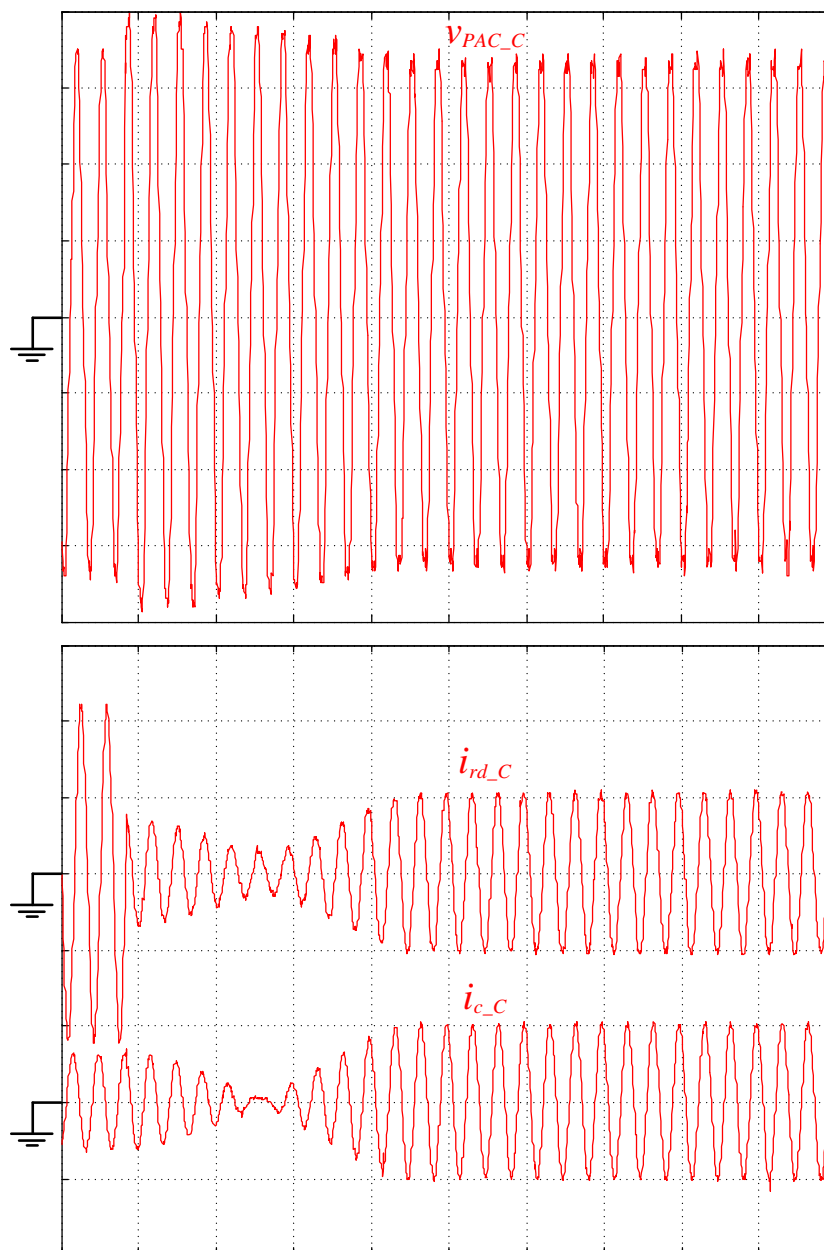
Fonte: produção do próprio autor

Figura 87 - Tensão no PAC, corrente na rede e corrente no conversor relativas a fase B, durante a desconexão da carga principal (50 V/div, 15 A/div, 50 ms/div).



Fonte: produção do próprio autor

Figura 88 - Tensão no PAC, corrente na rede e corrente no conversor relativas a fase C, durante a desconexão da carga principal.(50 V/div, 15 A/div, 50 ms/div).

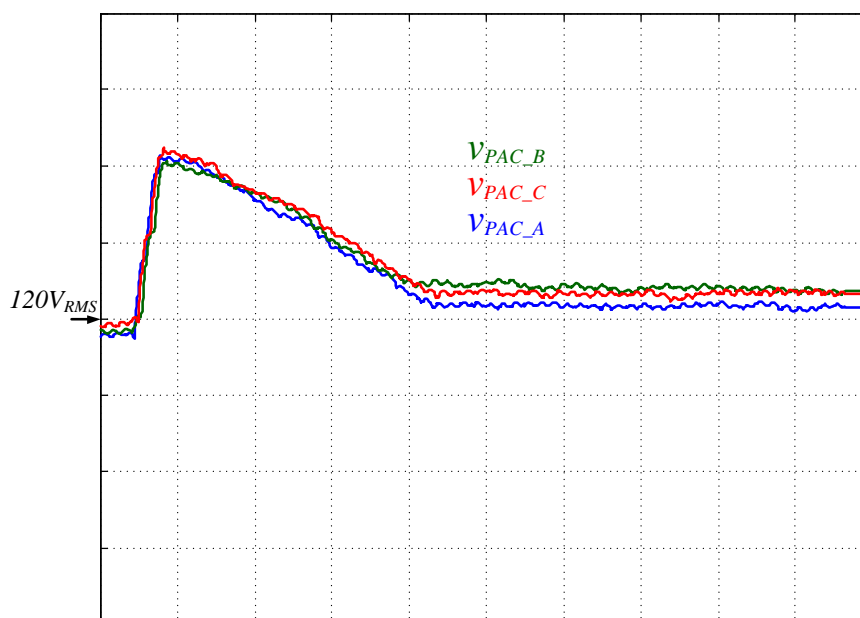


Fonte: produção do próprio autor

Para melhor visualização do comportamento dinâmico do sistema, a Figura 89 traz as tensões eficazes presentes no PAC durante a desconexão da carga principal. Observa-se que logo após a desconexão da carga as tensões do PAC atingem níveis acima de 140 Vrms. Em aproximadamente 100 ms (6 ciclos de rede) após a desconexão da carga as tensões no PAC entram na região adequada de tensão de atendimento, que é abaixo de 133Vrms. E em aproximadamente 200 ms (12 ciclos de rede) o conversor atinge a máxima capacidade de compensação, onde as tensões no PAC estão em torno de 122 Vrms. Conclui-se que apesar de

haver uma saturação na capacidade de potência do conversor as respostas de compensação de tensão apresentam níveis muito inferiores aos 3 segundos necessários para a adequação das tensões do PAC.

Figura 89 - Tensões eficazes no PAC durante a desconexão da carga principal (10 V/div, 50 ms/div).



Fonte: produção do próprio autor

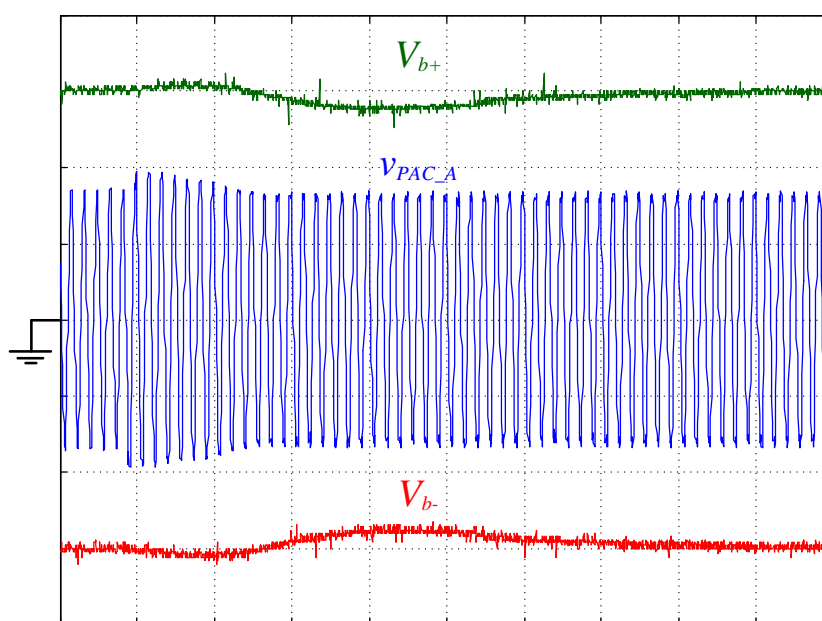
Durante mudanças de carga as tensões do barramento CC deverão se manter próximas a tensão média de referência, que se trata de ± 300 V neste projeto. A Figura 90 mostra a tensão no barramento no momento em que a carga principal é desconectada do PAC.

Como se pode observar na Figura 90 o barramento possui baixa variação (aproximadamente 10%) e o controle estabiliza a tensão do mesmo em aproximadamente 700 ms.

Apesar de não se utilizar as mesmas cargas, a simulação apresenta menor variação da tensão do barramento nos degraus de carga. Na implementação do projeto concluiu-se que há superior mudança da tensão total do barramento CC, em relação a simulação, devido a um deslocamento de fase da referência corrente em quadratura, isso ocorre devido à forma de sincronismo utilizada, onde a referência em quadratura pode não estar exatamente em quadratura com a tensão no PAC, havendo um pequeno deslocamento em sua fase. A referência de corrente em quadratura é importante para que o controlador da tensão no PAC atue somente na injeção e no consumo de potência reativa do sistema, uma vez que essa referência não está exatamente em quadratura com a tensão no PAC o controlador de tensão do PAC passa atuar no consumo ou injeção de potência ativa, mesmo que em pequenas

parcelas. Em regime permanente essas pequenas parcelas não prejudicam o controle de tensão total de barramento CC, uma vez que esse possui maior capacidade de consumo de potência ativa e compensa as mudanças efetuadas pelo controlador de tensão no PAC. Porém nos grandes transitórios de tensão no PAC, que é o que acontece nas figuras recém-apresentadas, há uma variação significativa no consumo de reativo, que pelos motivos mencionados acabam consumindo/injetando potência ativa no PAC, e conseqüentemente, causando mudança na tensão do barramento CC. As mudanças de tensão no Barramento CC ocorrem também pelo fato de que o controlador de tensão do PAC possui maior velocidade que o controlador de tensão total do barramento CC. Para uma referência de corrente em quadratura ideal as mudanças de cargas apenas provocariam pequenas ondulações no barramento CC, uma vez que variações de potência reativa não modificam a tensão média do barramento CC.

Figura 90 - Tensões no barramento CC durante a desconexão da carga principal (100 V/div, 100 ms/div).



Fonte: produção do próprio autor

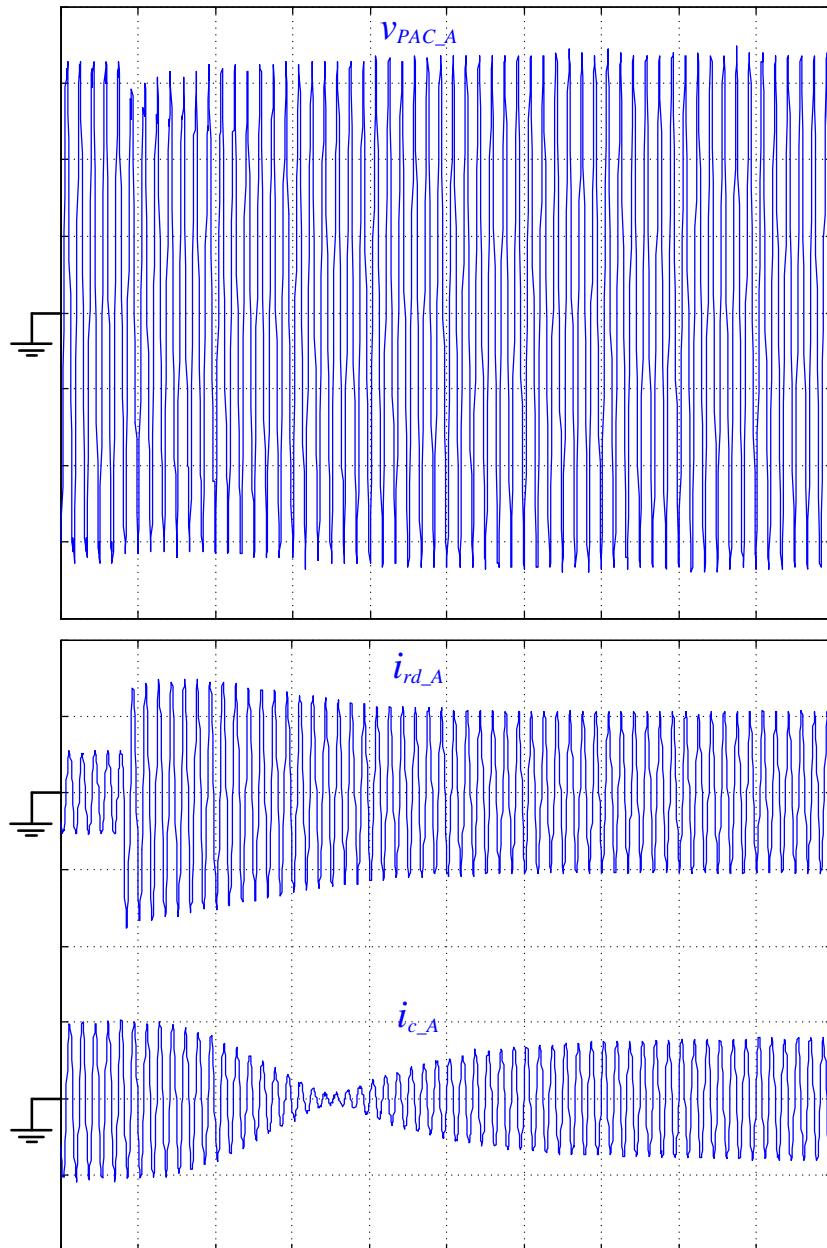
Aqui o sincronismo das correntes é efetuado utilizando a passagem por zero da tensão de apenas uma fase, a partir dessa fase é considerado que haverá uma defasagem de 120° entre as demais fases, assim gera-se as demais referências. Porém essa afirmação poderá não ser verdadeira, quando há cargas desequilibradas, drenando diferentes potências ativas haverá diferença angular entre as fases do mesmo PAC. A potência ativa está relacionada com o ângulo de abertura entre duas barras, assim como a potência reativa está relacionada com a diferença de amplitude da tensão entre duas barras de transmissão de energia.

A Figura 91, Figura 92 e Figura 93 trazem respectivamente para as fases A, B e C as tensões presentes no PAC, as correntes presentes na rede e as correntes drenadas pelo conversor no momento em que a carga principal é conectada no PAC.

Observa-se que antes da conexão da carga principal as tensões no PAC estavam reguladas em torno de 122 Vrms, a corrente da rede está em torno de 12 Arms, e o conversor apresenta correntes equilibradas correspondentes a sua capacidade máxima. No momento da conexão da carga há uma queda na tensão do PAC, que é mais acentuada por conta do consumo de potência reativa no PAC pelo conversor. Na medida em que a corrente do conversor é reduzida a corrente da rede também reduz e a tensão no PAC chega aos níveis de 114 Vrms. Como a tensão no PAC não é adequada sem a ação do compensador o mesmo passa a injetar potência reativa, a fim de aumentar a tensão no PAC. Por fim o conversor injeta níveis adequados de potência reativa, as tensões no PAC são reguladas para 118 Vrms e a corrente da rede também reduz para níveis inferiores a corrente da carga.

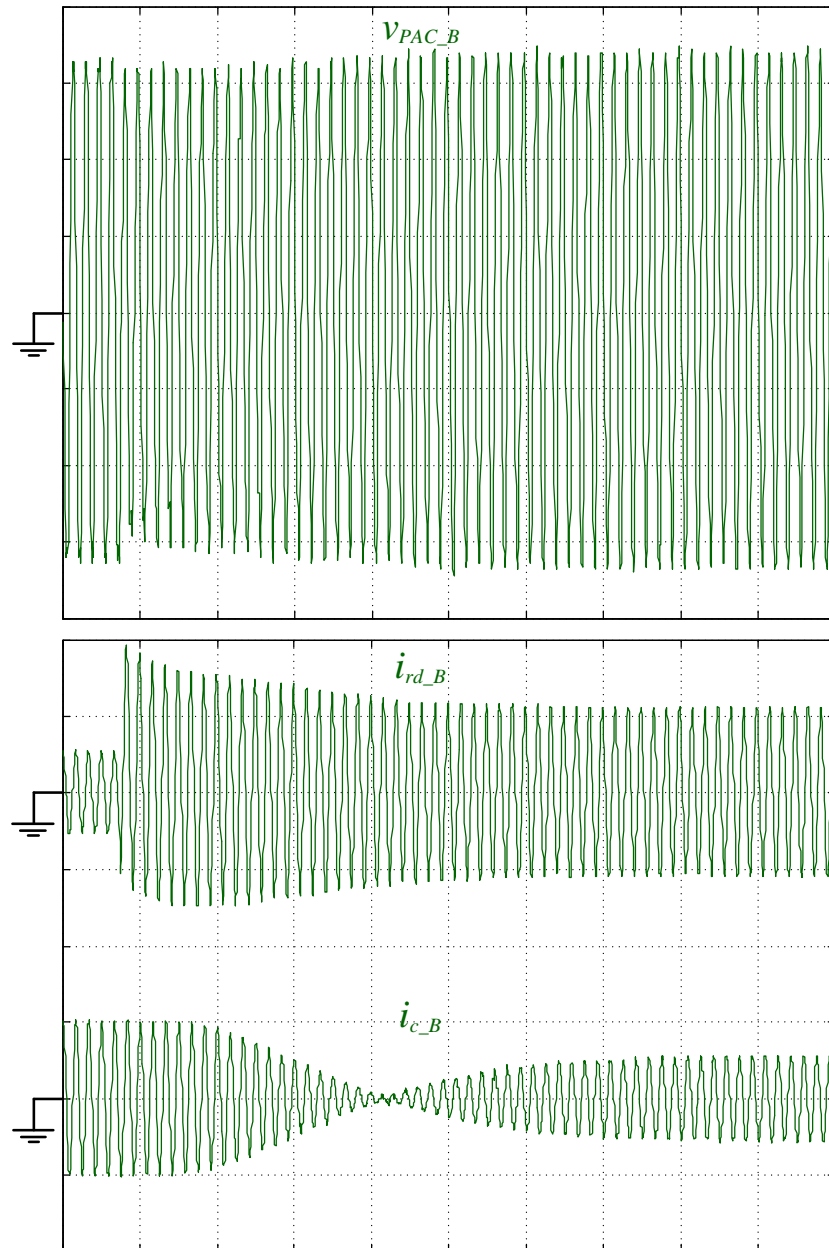
A mudança na característica do compensador, de injeção para consumo de potência reativa pode ser visualizada pela mudança de fase da corrente do conversor.

Figura 91 - Tensão no PAC, corrente na rede e corrente no conversor relativas a fase A, durante a conexão da carga principal (50 V/div, 15 A/div, 100 ms/div).



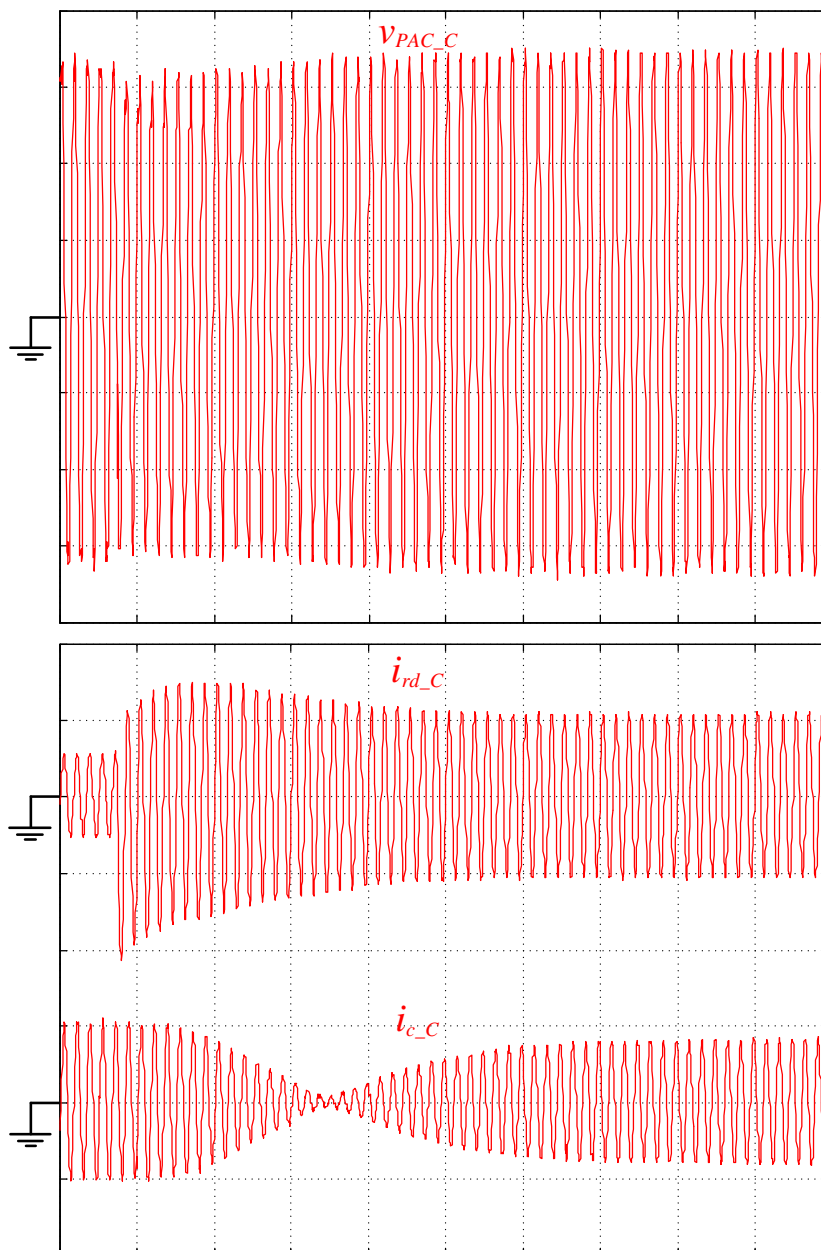
Fonte: produção do próprio autor

Figura 92 - Tensão no PAC, corrente na rede e corrente no conversor relativas a fase B, durante a conexão da carga principal (50 V/div, 15 A/div, 100 ms/div).



Fonte: produção do próprio autor

Figura 93 - Tensão no PAC, corrente na rede e corrente no conversor relativas a fase C, durante a conexão da carga principal (50 V/div, 15 A/div, 100 ms/div).

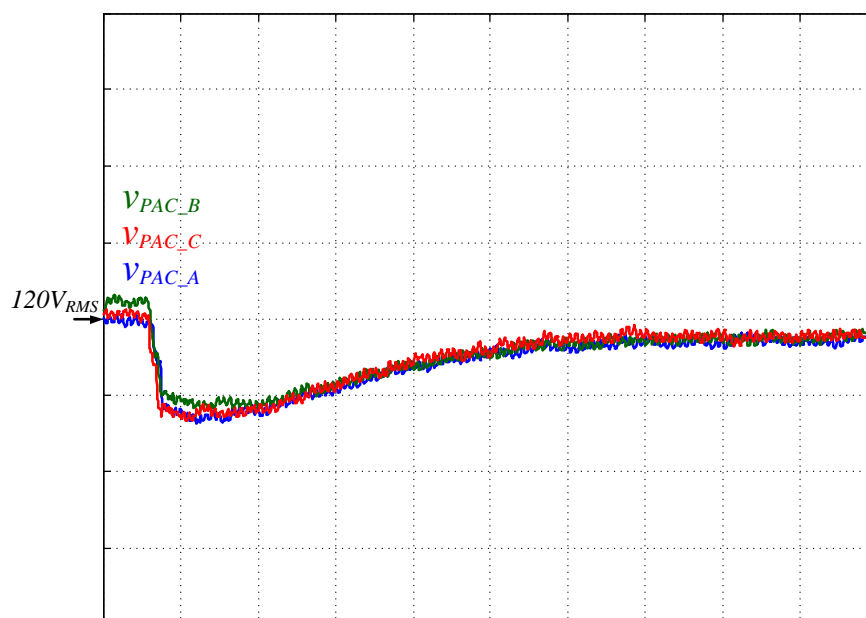


Fonte: produção do próprio autor

Para melhor visualização do comportamento dinâmico do sistema, a Figura 94 traz as tensões eficazes presentes no PAC durante a conexão da carga principal. Observa-se que logo após a conexão da carga as tensões do PAC atingem níveis abaixo de 110 Vrms. Em aproximadamente 450 ms (27 ciclos de rede) após a conexão da carga as tensões no PAC entram na região adequada de tensão de atendimento, que é acima de 116 Vrms. E em aproximadamente 650 ms (39 ciclos de rede) o conversor atinge sua referência de tensão no

PAC, onde as tensões no PAC estão em torno de 118 Vrms. Conclui-se que as respostas de compensação de tensão apresentam níveis inferiores aos 3 segundos necessários para a adequação das tensões do PAC, atendendo as especificações do projeto.

Figura 94 - Tensões eficazes no PAC durante a conexão da carga principal (10 V/div, 100 ms/div).

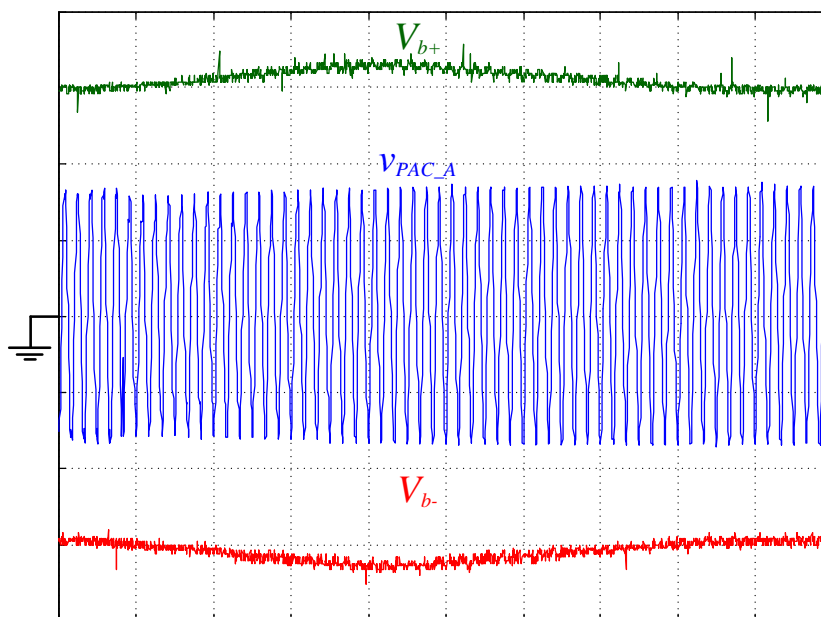


Fonte: produção do próprio autor

A Figura 95 mostra as tensões do barramento no momento em que a carga principal é conectada ao PAC.

Como se pode observar na Figura 95 o barramento possui baixa variação (aproximadamente 10%) e o controle estabiliza a tensão do mesmo em aproximadamente 700 ms.

Figura 95 - Tensão no barramento CC durante a conexão da carga principal (100 V/div, 100 ms/div).



Fonte: produção do próprio autor

5.3 CONCLUSÕES DO CAPÍTULO

Os resultados obtidos experimentalmente validam todo o projeto do compensador de tensão. Depois de fixada uma referência o mesmo foi capaz de manter as tensões no PAC dentro da região adequada de atendimento. Para que não ocorram registros de tensão de atendimento diferentes de adequada o compensador de tensão deve regular a tensão em um tempo inferior a 3 segundos. Mesmo sob variações bruscas de carga o mesmo foi capaz de regular a tensão no PAC em tempos inferiores a 1 segundo. Concluindo que o compensador atingiu as especificações de regulação de tensão e especificações de tempo de regulação exigido pela ANEEL (PRODIST – Módulo8) (1).

Nos momentos em que somente há a necessidade de alimentar uma carga leve, conectada ao PAC, o uso do regulador automático de tensão promove alta circulação de corrente no alimentador. Essa situação produz maiores perdas no alimentador, porém o regulador cumpre sua função, mantendo a tensão no PAC regulada.

As tensões diferencial e total do barramento CC se mantiveram reguladas, validando os controladores e modelos utilizados.

As variações da tensão total do barramento CC com as variações de potência reativa circulantes pelo conversor são devido a uma pequena diferença de fase das referências de

corrente em quadratura, situação que poderá ser resolvida com a uma mudança na forma de geração das referências senoidais.

Por fim, considera-se o comportamento do compensador de tensão no PAC satisfatório, atendendo suas especificações de projeto.

6 CONCLUSÕES GERAIS

Este trabalho apresentou um sistema capaz de regular a tensão presente no PAC automaticamente. O mesmo é destinado a resolução rápida para um problema de tensão de atendimento não adequada.

No capítulo 1 foi apresentado o problema de regulação de tensão, as exigências da ANEEL para com a distribuidora, o módulo 8 do PRODIST foi interpretado, gerando as especificações de tempo e nível de regulação que o sistema deve atingir. Foram definidas algumas características do produto, como baixo volume, baixa injeção de correntes harmônicas. Um estudo de alguns tipos de equipamentos que também compensam a tensão no PAC foi feito e assim definiu-se a estrutura utilizada no trabalho.

No capítulo 2 a estrutura de potência definida no capítulo 1 foi apresentada com maior detalhamento, os componentes passivos da estrutura de potência foram projetados. O projeto do filtro de alta frequência do conversor levou em consideração uma pequena variação na impedância da rede, porém, para obter um sistema mais robusto poderá ser viável a implementação de outro filtro de alta frequência.

O capítulo 3 mostrou a estratégia utilizada para compensar a tensão no PAC utilizando a estrutura de potência definida no capítulo 2. Foi apresentado os controladores necessários na implementação do compensador de tensão, na sequência os modelos da planta de corrente, planta de tensão total do barramento CC, planta da tensão diferencial do barramento CC e a planta da tensão no PAC foram obtidos. E finalizando o capítulo, os controladores foram projetados.

O capítulo 4 se referiu à simulação numérica de toda a estrutura que compõe o compensador de tensão. A mesma foi de suma importância ao trabalho, pois através dela foi identificada a necessidade da mudança na banda passante do controlador de tensão do PAC.

No capítulo 5 foi feita a implementação do sistema, onde o mesmo teve seu comportamento semelhante ao simulado. O compensador foi capaz de responder em tempos inferiores ao mínimo exigido nas especificações do projeto, assim como foi capaz de regular a

tensão no PAC para níveis adequados. Neste capítulo foi identificada uma não idealidade na geração de referências.

Sugestões de melhorias para este projeto:

- Implementar o circuito de pré-carga.
- Utilizar um método diferente para o cálculo da tensão RMS presente no PAC, de forma a reduzir componentes harmônicos a frequência da rede. E permitir maior velocidade de resposta do controlador de tensão no PAC.
- Efetuar sincronismo das tensões do PAC com as referências senoidas individualmente para cada fase do conversor, assim eliminando o problema de defasagem nas referências quando há cargas desequilibradas no sistema.
- Utilizar outro método de sincronismo.
- Efetuar a compensação de correntes harmônicas presentes na carga.

BIBLIOGRAFIA

- 1 ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional**. 4. ed. [S.l.]: [s.n.], 2012.
- 2 COLNAGO, G. P. et al. **Desenvolvimento e Implementação de um Sistema de Monitoramento em Tempo Real da Tensão da Rede com Acesso Remoto**. XVIII Congresso Brasileiro de Automática. Bonito-MS: CBA. 2012.
- 3 BARAN, M. E. Optimal capacitor placement on radial distribution systems. **Power Delivery, IEEE Transactions on**, v. 4, p. 725 - 734 , Jan 1989.
- 4 GRAINGER, J. J. Optimum Size and Location of Shunt Capacitors for Reduction of Losses on Distribution Feeders. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, v. PAS-100, n. 3, p. 1105 - 1118 , March 1981.
- 5 PETERSON, N. M. Automatic Adjustment of Transformer and Phase-Shifter Taps in the Newton Power Flow. **Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on**, v. PAS-90, n. 1, p. 103 - 108, Jan 1971.
- 6 WATANABE, E. H. et al. TECNOLOGIA FACTS - TUTORIAL. **SBA Controle e Automação**, v. 9, Jan., Fev., Mar. e Abril 1998.
- 7 HINGORANI, N. G. Power electronics in electric utilities: role of power electronics in future power systems. **Proceedings of the IEEE**, v. 76, n. 4, p. 481 - 482, Apr 1988.
- 8 AXENTE, I. **Bibliography of FACTS**: 1999. Power and Energy Society General Meeting. [S.l.]: IEEE. 2011. p. 1 - 8.
- 9 SAADAT, H. **Power Systems Analysis**. [S.l.]: [s.n.], 2002.
- 10 MORI, S. Development of a large static VAR generator using self-commutated inverters for improving power system stability. **Power Systems, IEEE Transactions on**, v. 8, n. 1, p. 371 - 377 , Feb 1993.
- 11 MORAN, L. A solid-state high-performance reactive-power compensator. **Industry Applications, IEEE Transactions on**, v. 29, n. 5, p. 969 - 978 , Set/Oct 1993.
- 12 FUKUDA, S.; IMAMURA, R. **Application of a sinusoidal internal model to current control of three phase utility-interface-converters**. Power Electronics Specialist Conference. [S.l.]: IEEE. 2003. p. 1301 - 1306.

13 LIU, Z.; RAO, N. D. **A Comparative Analysis and A New Approach For Var Compensation in Power systems**. Electrical and Computer Engineering. Canadian: IEEE. 1999. p. 1170 - 1174.

14 CARDOSO, F. L. **Projeto de Um Retificador Bidirecional com Elevado Fator de Potência com Controle por Valores Médios Instantâneos Implementado no DSP TMS320F2812**. Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville. 2006. Dissertação de Mestrado.

15 SANTOS, R. J. **Condicionador de Qualidade de Energia Dual com Controle Simplificado**. Universidade Estadual de Santa Catarina (UDESC). Joinville. 2012.

16 SPERB, J. D. **Projeto de um Inversor Trifásico com Snubber de Undeland Regenerativo e Controle Digital Implementado no DSP TMS320F2812**. CCT/UDESC. Joinville. 2007. (002). Dissertação de Mestrado.

17 BARBI, I. **Projeto de Fontes Chaveadas**. Florianópolis: Edição do Autor, 2001.

18 LISERRE, M.; BLAABJERG, F.; HANSEN, S. **Design and control of an LCL-filter based three-phase active rectifier**. Industry Applications Conference. [S.l.]: IEEE. 2001. p. 299 - 307.

19 HEERDT, J. A. et al. **Generic Generator of Three-Phase Periodic Signals for Application in AC Power Sources**. 9th Brazilian Power Electronics Conference. [S.l.]: [s.n.]. 2007. p. 1060-1065.

20 KLEIN, R. L. **Emulação de Cargas não Lineares com Regeneração de Energia**. Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, p. 49 - 52. 2012. Dissertação de Mestrado.

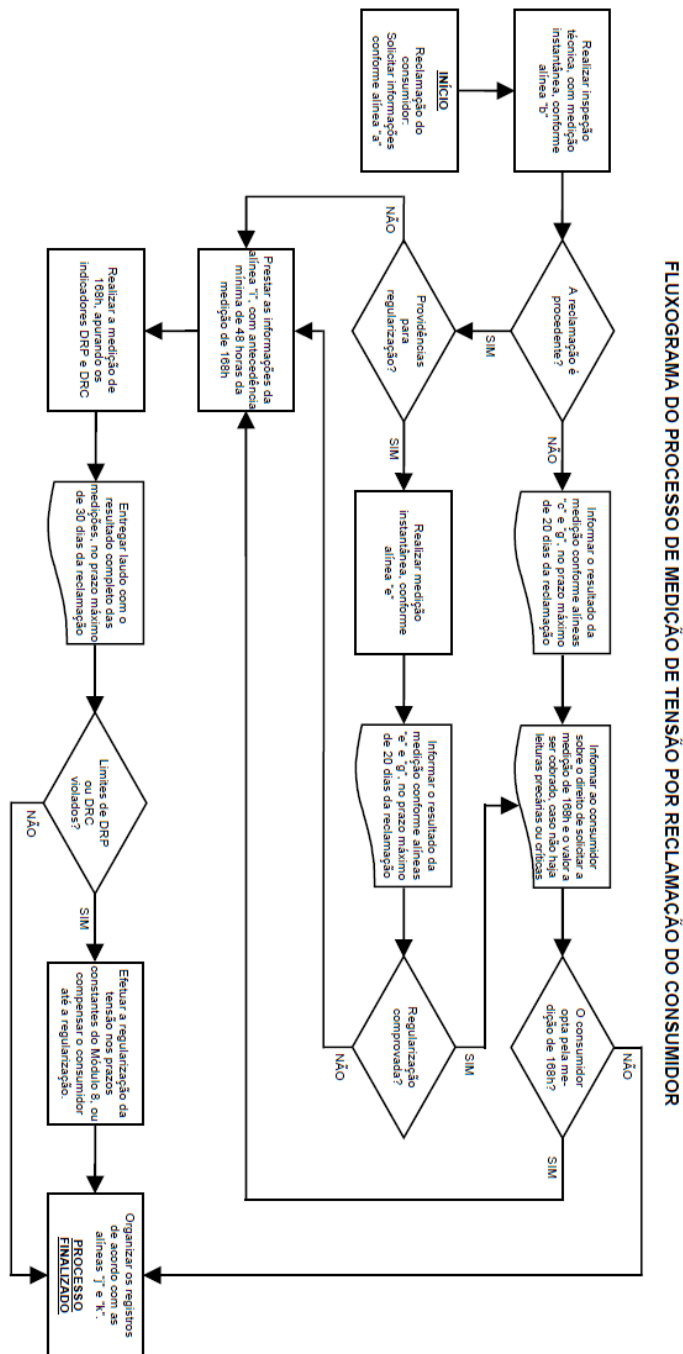
21 DIAS, J. **Condicionador Unificado de Energia com Controle Digital**. UDESC. Joinville. 2009. Dissertação de Mestrado.

22 OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 4^a. ed. São Paulo: Pearson Hall, 2003.

23 JOOS, G.; MORAN, L.; ZIOGAS, P. Performance analysis of a PWM inverter VAR compensator. **Power Electronics, IEEE Transactions on**, v. 6, p. 380 - 391, Jun 1991.

24 GYUGYI, L. **A unified flow control concept for flexible AC transmission systems**. AC and DC Power Transmission, 1991., International Conference on. [S.l.]: IEEE. 1991. p. 19 - 26.

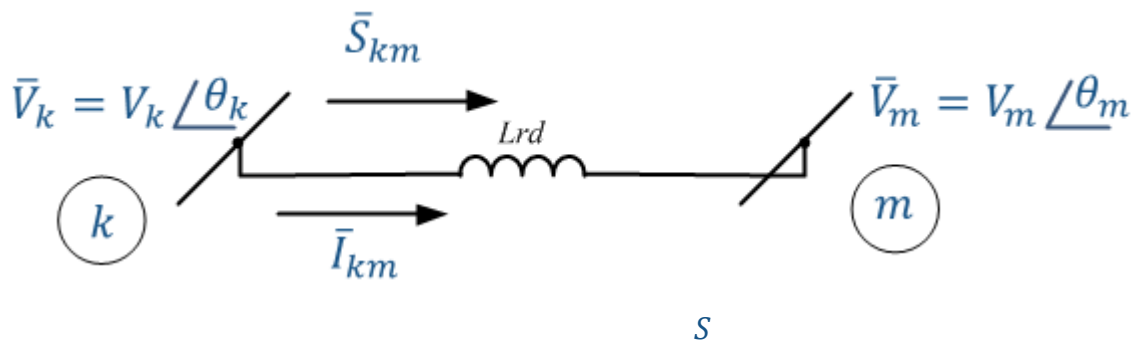
ANEXO A – Fluxograma do processo de medição de tensão por reclamação do consumidor



APÊNDICE A – Fluxo de potência entre barras e efeito da injeção de potência reativa

Fluxo de Potência entre barras:

$$\delta = \theta_m$$



$$P_{km} = \text{Re}\{\bar{S}_{km}\} = \frac{V_k \cdot V_m}{X_{km}} \sin \delta$$

$$Q_{km} = \text{Im}\{\bar{S}_{km}\} = \frac{V_k^2 - V_k \cdot V_m \cdot \cos \delta}{X_{km}}$$

Injeção de Potência Reativa:

$$\bar{V}_m = V_k - \frac{x_{km}}{V_k} \cdot Q - j \cdot \frac{x_{km}}{V_k} \cdot P$$

