

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

LUCAS SINATRA DA SILVA CAMARGO

ESTUDO DE UM FILTRO ATIVO PARALELO CONTROLADO EM TENSÃO

JOINVILLE

2024

LUCAS SINATRA DA SILVA CAMARGO

ESTUDO DE UM FILTRO ATIVO PARALELO CONTROLADO EM TENSÃO

Trabalho de Conclusão de Curso - Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Alessandro Luiz Batschauer

JOINVILLE

2024

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, gostaria de expressar minha gratidão a Deus - Pai, Filho e Espírito Santo - pela dádiva da vida e pela imensa Graça que sempre me foi, generosamente, concedida.

Agradeço aos meus pais, Ilizeu e Edinéia, por me colocarem neste mundo, por me criarem com todo amor e carinho e por sempre me incentivarem a trilhar o caminho do conhecimento.

Agradeço à minha noiva, Jaiane, pela paciência durante toda a graduação, por sempre me incentivar e por estar ao meu lado em todas as adversidades.

Agradeço aos meus irmãos, João Alceu e Eduarda, por todo o apoio e amizade.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Alessandro Luiz Batschauer, por aceitar conduzir o meu TCC, pelos conselhos valiosos e pela dedicação do seu escasso tempo em me ajudar com este trabalho.

A todos os meus professores do curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, pela excelência técnica de cada um.

Por fim, agradeço a todos os meus colegas, que proporcionaram momentos de companheirismo, amizade e discussões produtivas para o meu crescimento intelectual.

RESUMO

Este trabalho desenvolve um Compensador Estático de Reativos para Redes de Distribuição (DSTATCOM, do inglês "*Distribution Static Compensators*") para corrigir o fator de potência em cargas não lineares. A pesquisa aborda a modelagem matemática, projeto e implementação do Filtro Ativo Paralelo (FAP) controlado em tensão, focando na minimização de distorções harmônicas e na regulação da tensão no Ponto de Acoplamento Comum (PAC). São apresentados os parâmetros projetados e os métodos de controle utilizados, como o rastreamento do Ponto de mínima Potência Aparente (mPPT, do inglês "*minimum Apparent Power Point Tracking*"). Resultados de simulação mostram a eficácia do sistema proposto na melhoria da qualidade de energia, melhora do fator de potência, minimização de esforços de corrente e cumprimento das normas da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL)

Palavras-chave: Fator de potência. DSTATCOM. Filtro ativo paralelo. Harmônicas. Qualidade de energia.

ABSTRACT

This work develops a Distribution Static Compensators (DSTATCOM) aimed at correcting the power factor in non-linear loads. The research addresses the mathematical modeling, design, and implementation of the voltage-controlled Parallel Active Filter (PAF), focusing on minimizing harmonic distortions and regulating voltage at the Point of Common Coupling (PCC). The designed parameters and control methods, such as the minimum Power Point Tracking (mPPT), are presented. Simulation results demonstrate the proposed system's effectiveness in improving power quality, improving power factor, minimization of current efforts and complying with ANEEL standards.

Keywords: Power factor. DSTATCOM. Parallel active filter. Harmonics. Power quality.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Potência da geração média anual medida — Brasil	14
Figura 2 – Diagrama simplificado de uma rede de distribuição	17
Figura 3 – Modelo mais realístico — transformador	18
Figura 4 – Influência das harmônicas na forma de onda da tensão	21
Figura 5 – Exemplo de <i>sag</i> de tensão que dura por 4 ciclos	23
Figura 6 – Exemplo <i>notch</i> de tensão	23
Figura 7 – Exemplo de <i>flicker</i> de tensão com frequência de 15 Hz	24
Figura 8 – Diagrama simplificado de um sistema de distribuição — Sem DSTATCOM .	25
Figura 9 – Diagrama simplificado de um sistema de distribuição — Com DSTATCOM	25
Figura 10 – Filtro ativo série	27
Figura 11 – Filtro ativo paralelo	28
Figura 12 – Estrutura do DSTATCOM	29
Figura 13 – Unifilar DSTATCOM	29
Figura 14 – Variação do ângulo de compensação em função da potência aparente da carga e a tensão do PAC para fator de potência 0,8 indutivo ($Z = 0,2$ pu, $\phi = 45^\circ$ e $V_r = 1$ pu)	30
Figura 15 – Variação da potência reativa processada pelo conversor em função da potência aparente da carga e a tensão do PAC para fator de potência 0,8 indutivo ($Z = 0,2$ pu, $\phi = 45^\circ$ e $V_r = 1$ pu)	31
Figura 16 – Diagrama de blocos simplificado do sistema de controle	33
Figura 17 – Diagrama de blocos simplificado da malha de tensão de saída	34
Figura 18 – Circuito monofásico FAP para modelagem	36
Figura 19 – Variação da potência reativa processada pelo DSTATCOM	38
Figura 20 – Frequência medida na UFSC de Florianópolis pelo projeto MedFasee	41
Figura 21 – Representação simplificada PLL	42
Figura 22 – Malhas de controle — DSTATCOM	45
Figura 23 – Resposta em frequência de malha aberta — tensão ca	46
Figura 24 – Diagrama de blocos do controle de tensão ca com amortecimento ativo . . .	47
Figura 25 – Diagrama de blocos do controle de tensão ca — dinâmica em malha fechada do compensador de amortecimento ativo	47
Figura 26 – Diagrama de bode — amortecimento ativo	48
Figura 27 – Diagrama de bode — malha de tensão ca	49
Figura 28 – Diagrama de blocos — malha de tensão total do barramento	50
Figura 29 – Diagrama de bode — malha de tensão total do barramento	51
Figura 30 – Diagrama de blocos — malha de tensão diferencial do barramento	51
Figura 31 – Diagrama de blocos — malha de tensão diferencial do barramento	52
Figura 32 – Diagrama de bode — malha de tensão diferencial do barramento	52

Figura 33 – Circuito simulado — topologia	56
Figura 34 – Circuito simulado — topologia fase A	56
Figura 35 – Circuito simulado — malha de controle tensão ca	57
Figura 36 – Circuito simulado — malha de controle tensão ca da fase A	57
Figura 37 – Circuito simulado — malha de controle tensão do barramento de capacitores	58
Figura 38 – Circuito simulado — malhas de controle de potência processada pelo conversor	58
Figura 39 – Tensões no PAC em comparação com as tensões do alimentador - carga resistiva sem DSTATCOM	60
Figura 40 – Tensões no PAC em comparação com as tensões do alimentador sem DSTATCOM - carga não linear leve	61
Figura 41 – Correntes alimentador em comparação com as tensões do PAC - carga não linear leve sem DSTATCOM	62
Figura 42 – Correntes de cargas separadas - carga não linear leve sem DSTATCOM	62
Figura 43 – Tensões no PAC em comparação com as tensões do alimentador sem DSTATCOM - carga não linear pesada	63
Figura 44 – Correntes do alimentador em comparação com as tensões do alimentador sem DSTATCOM - carga não linear pesada	64
Figura 45 – Correntes de cargas separadas - carga não linear pesada sem DSTATCOM	64
Figura 46 – Tensões no PAC em comparação com as tensões do alimentador com DSTATCOM - carga resistiva	65
Figura 47 – Correntes no alimentador em comparação com as tensões no alimentador com DSTATCOM - carga resistiva	66
Figura 48 – Tensões barramento cc com DSTATCOM - carga resistiva	66
Figura 49 – Tensões no PAC em comparação com as tensões do alimentador com DSTATCOM - carga não linear leve	67
Figura 50 – Correntes no alimentador em comparação com a tensões no alimentador com DSTATCOM - carga não linear leve	68
Figura 51 – FFT correntes com DSTATCOM - carga não linear leve	69
Figura 52 – Comparação entre as correntes da carga, do PAC e do alimentador com DSTATCOM - carga não linear leve	69
Figura 53 – Tensões do barramento cc - carga não linear leve	70
Figura 54 – Tensões no PAC em comparação com as tensões do alimentador com DSTATCOM - carga não linear pesada	71
Figura 55 – Correntes no alimentador em comparação com as tensões no alimentador com DSTATCOM - carga não linear pesada	72
Figura 56 – FFT correntes com DSTATCOM - carga não linear pesada	72
Figura 57 – Comparação entre as correntes da carga, do PAC e do alimentador - carga não linear pesada	73
Figura 58 – Tensões do barramento cc - carga não linear pesada	73

Figura 59 – Tensões no PAC e correntes na rede - variação de carga	74
Figura 60 – Comportamento da potência aparente - variação de carga	75
Figura 61 – Comportamento da potência ativa - variação de carga	75
Figura 62 – Tensão positiva do barramento cc - variação de carga	76
Figura 63 – Potência aparente total processada pelo DSTATCOM e ação de controle mPPT	77
Figura 64 – Tensão positiva do barramento cc durante o algoritmo de mPPT	78
Figura 65 – Tensões no PAC em comparação com as tensões do alimentador - cargas desbalanceadas	79
Figura 66 – Correntes no alimentador em comparação com as tensões do alimentador - cargas desbalanceadas	80
Figura 67 – Comparação entre as correntes da carga, do PAC e do alimentador - cargas desbalanceadas	81
Figura 68 – Tensão no barramento positivo de capacitores - cargas desbalanceadas . . .	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites de tensão para pontos de tensão abaixo de 2,3 kV (380/220)	15
Tabela 2 – Parâmetros do DSTATCOM	32
Tabela 3 – Lógica de ação mPPT	40
Tabela 4 – Elementos que compõem DSTATCOM	45
Tabela 5 – Indicadores de distorções harmônicas	53
Tabela 6 – Limites para os indicadores de distorções harmônicas	54
Tabela 7 – Limites dos harmônicos de corrente	54
Tabela 8 – Especificações de carga e parâmetros da rede	59
Tabela 9 – Potências em cada subsistema do sistema e FP- cargas desbalanceadas . . .	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ca	Corrente Alternada
cc	Corrente Contínua
DSTATCOM	Compensador Estático de Reativos para Redes de Distribuição, do inglês " <i>Distribution Static Compensators</i> "
EMI	Interferência Eletromagnética, do inglês " <i>Electromagnetic Interference</i> "
FAP	Filtro Ativo Paralelo
FAS	Filtro Ativo Série
FFT	Transformada Rápida de Fourier, do inglês " <i>Fast Fourier Transform</i> "
MMGD	Microgeração e Minigeração Distribuídas de Energia Elétrica
mPP	Ponto de Mínima Potência, do inglês "minimum Power Point"
mPPT	Rastreamento do Ponto de Mínima Potência, do inglês "minimum Power Point Traking"
MPP	Ponto de Máxima Potência, do inglês "Maximum Power Point"
MPPT	Rastreamento do Ponto de Máxima Potência, do inglês "Maximum Power Point Tracking"
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
P&O	Perturba e Observa, do inglês " <i>Perturb and Observe</i> "
PAC	Ponto de Acoplamento de Comum
PLL	Malha de Captura de Fase, do inglês " <i>Phase Locked Loop</i> "
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PWM	Modulação por Largura de Pulso " <i>Pulse Width Modulation</i> "
TDH	Taxa de Distorção Harmônica

LISTA DE SÍMBOLOS

$\%$	Porcento
$^{\circ}$	Graus
θ	Fase Tensão do PAC Referenciada ao Alimentador
ϕ	Ângulo Impedância da Rede
μ	Micro
Ω	Unidade de Resistência
A	Unidade de Corrente
dB	Decibel
C_{o1-2}	Capacitor 1-2 do barramento CC
C_f	Capacitor do filtro LC
F	Unidade de Capacitância
H	Unidade de Indutância
Hz	Hertz
k	Quilo
L_r	Indutância da Rede de Distribuição
LC	Filtro LC da saída do inversor
LCL	Filtro Resultante da saída do inversor conectado à rede de distribuição
L_f	Indutor do filtro LC
m	Mili
P_o	Potência Ativa da carga
pu	Por Unidade de Medida Nominal
R_r	Resistência da Rede de Distribuição
Q_{inv}	Potência Reativa processada pelo inversor
Q_o	Potência Reativa da carga
Q_r	Potência Reativa gerada pelo alimentador
s	Unidade de Tempo
V	Unidade de Tensão
V_{pac}	Módulo da Tensão do PAC
V_r	Módulo da Tensão do Alimentador da Rede de Distribuição
VA	Unidade de Potência Aparente

var	Unidade de Potência Não Ativa
W	Unidade de Potência Ativa
Z_r	Módulo Impedância da Rede de Distribuição

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	ANÁLISE DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO COM O DSTATCOM	17
2.1.1	Composição da rede de distribuição	17
2.1.1.1	<i>Transformadores</i>	18
2.1.1.2	<i>Condutores</i>	19
2.1.1.3	<i>Cargas</i>	19
2.1.2	Impacto das cargas pulsadas na rede de distribuição	19
2.1.2.1	<i>Distorções harmônicas</i>	20
2.1.2.2	<i>Sags e Swells</i>	22
2.1.2.3	<i>Notches</i>	22
2.1.2.4	<i>Flickes</i>	23
2.1.3	Análise do fluxo de potência em um sistema de distribuição	24
2.2	COMPENSADORES DE REATIVOS	26
2.2.1	Filtro ativo série	26
2.2.2	Filtro ativo paralelo	27
2.2.3	Topologia DSTATCOM	28
2.2.4	Expressões do fluxo de potência para o DSTATCOM	29
2.3	PROJETO DOS ELEMENTOS DO DSTATCOM	32
2.3.1	Projeto filtro de saída	32
2.3.2	Projeto da capacitância do barramento cc	33
2.4	SISTEMA DE CONTROLE	33
2.4.1	Modelagem matemática	35
2.4.1.1	<i>Modelagem da planta de tensão ca</i>	35
2.4.1.2	<i>Modelagem da planta de tensão total do barramento cc</i>	36
2.4.1.3	<i>Modelagem da planta de tensão diferencial do barramento cc</i>	37
2.5	MALHA DE AMPLITUDE DE TENSÃO	37
2.5.1	Método perturba e observa	38
2.5.2	Rastreamento de ponto de mínima potência	39
2.6	VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA DA REDE	40
2.6.1	Proposta de medição e correção da frequência do PAC	42
3	PROJETO DOS CONTROLADORES	44
3.1	PLANTA DE TENSÃO CA	45
3.1.1	Amortecimento ativo	46
3.1.2	Compensador tensão ca	48

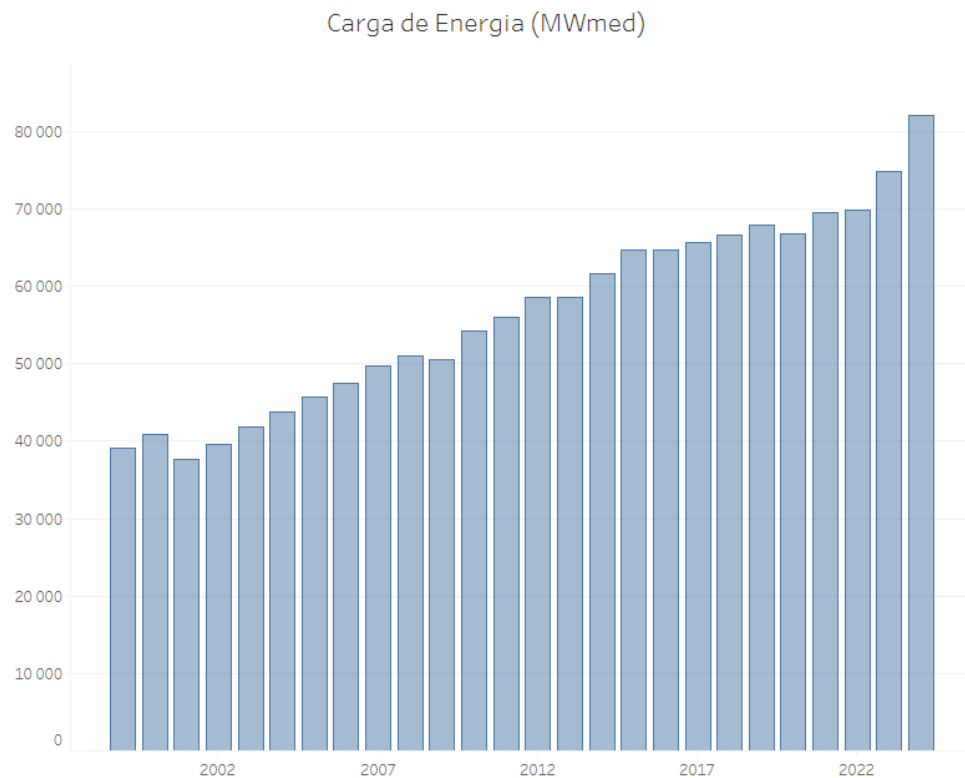
3.2	PLANTA DE TENSÃO TOTAL DO BARRAMENTO CAPACITIVO	50
3.3	PLANTA DE TENSÃO DIFERENCIAL DO BARRAMENTO CAPACITIVO	51
4	SIMULAÇÕES	53
4.1	CIRCUITO SIMULADO	55
4.2	OPERAÇÃO DO SISTEMA SEM DSTATCOM	59
4.2.1	Carga resistiva	59
4.2.2	Carga mista - carga não linear leve	60
4.2.3	Carga Mista - Carga Não Linear Pesada	63
4.3	OPERAÇÃO DO SISTEMA COM DSTATCOM - SEM mPPT	65
4.3.1	Carga resistiva	65
4.3.2	Carga mista - carga não linear leve	67
4.3.3	Carga mista - carga não linear pesada	70
4.4	ANÁLISE DA DINÂMICA DO FAP COM VARIAÇÃO E DESEQUILÍBRIO DE CARGA	74
4.5	OPERAÇÃO DO SISTEMA COM A IMPLEMENTAÇÃO DO mPPT . . .	76
4.6	OPERAÇÃO DO SISTEMA COM DSTATCOM COM CARGAS DESBA- LANCEADAS	78
5	CONCLUSÃO E PRÓXIMOS PASSOS	82
	REFERÊNCIAS	84
	APÊNDICE A – IMPEDÂNCIA DO TRANSFORMADOR	86
	APÊNDICE B – CÓDIGO DE MEDIÇÃO PARA POTÊNCIA APA- RENTE	87
	APÊNDICE C – CÓDIGO MPPT	88
	APÊNDICE D – CÁLCULO CARGAS	90
D.1	CARGA RESISTIVA	90
D.2	CARGA NÃO LINEAR LEVE	90
D.2.1	Carga não linear	90
D.2.2	Carga Resistiva	90
D.2.3	Carga RL	91
D.3	CARGA NÃO LINEAR PESADA	91

1 INTRODUÇÃO

O aumento do consumo de energia elétrica no mundo tem sido uma tendência observada nas últimas décadas, impulsionada por diversos fatores. Em países emergentes e economias em desenvolvimento, com 85% da população mundial, a demanda de energia aumentou 2,6% ao ano na última década, impulsionada por crescimento populacional, econômico e industrial (IEA, 2024).

Em relação ao cenário nacional, a Figura 1 apresenta a potência média gerada, durante o ano, medida no Brasil, entre os anos de 1999 e 2024 pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

Figura 1 – Potência da geração média anual medida — Brasil



Fonte: (ONS, 2024).

Há um grande salto entre os anos de 2023 e 2024, relacionados à incorporação dos valores estimados das micro e minigerações distribuídas (MMGD) com base em dados meteorológicos verificados. Contudo, observa-se uma nítida tendência de crescimento do consumo de energia elétrica (ONS, 2024).

Diante da crescente demanda por energia elétrica e das restrições ambientais associadas ao aumento da geração, a eficiência do sistema elétrico torna-se crucial. Cargas com baixo fator de potência e distorção harmônica elevada impactam negativamente a qualidade da energia, resultando em circulação de energia reativa no sistema elevada, ou seja, uma energia que não realiza trabalho.

Entre as cargas de baixo fator de potência e elevada distorção harmônica estão as cargas não lineares que demandam energia de forma pulsada. Esse tipo de carga é comum no sistema elétrico e, com o avanço das tecnologias e o aumento do acesso da população a dispositivos eletrônicos, a tendência é que sua presença aumente ainda mais.

Cargas não lineares são especialmente frequentes em residências, que possuem diversos equipamentos eletrônicos. Neste trabalho, o foco são as cargas não lineares que geram um elevado conteúdo harmônico devido à sua demanda de energia pulsada. A presença de componentes harmônicos nos sistemas de potência resulta em aumento das perdas na distribuição de energia elétrica. Além disso, as distorções nas formas de onda de tensão podem levar a falhas e até mesmo à interrupção da operação de equipamentos conectados à rede elétrica (Martinenas; Knezović, 2017).

Ainda, outros problemas associados à presença da distorção harmônica elevada são: aquecimento e vibração excessivos em motores, aquecimento e ruídos excessivos em transformadores, erros de frequência, nível de tensão elevado entre neutro e terra e campos magnéticos significativos em transformadores e disjuntores próximos à carga (Lopez, 2013). A crescente presença de cargas não lineares no sistema elétrico destaca a importância de medidas adequadas para diminuir os efeitos negativos das distorções harmônicas elevadas, garantindo a eficiência, qualidade energética e confiabilidade da distribuição de energia elétrica.

A Resolução Normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) núm. 956, de 7 de dezembro de 2021, estabelece os procedimentos que devem ser seguidos na distribuição de energia, chamado de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). A PRODIST possui 11 módulos, sendo o de interesse o módulo 8 intitulado: “Qualidade de Fornecimento de Energia Elétrica”. Nesse módulo são tratados os fenômenos associados à qualidade de energia, os quais são: variação de tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variação de frequência e variações de tensão de curta duração (ANEEL, 2022).

Segue na Tabela 1 abaixo os parâmetros estabelecidos pela ANEEL:

Tabela 1 – Limites de tensão para pontos de tensão abaixo de 2,3 kV (380/220)

Tensão de Atendimento	Faixa de Variação de tensão (V)
Adequada	$(350 \leq TL \leq 399)/(202 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(331 \leq TL < 350 \text{ ou } 399 < TL \leq 403)$ $(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 331 \text{ ou } TL > 403)/(TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

Fonte: Adaptado de (ANEEL, 2022).

Além disso, segundo (ANEEL, 2022), no módulo 8 item 41, “Para unidade consumidora do Grupo A ou ponto de conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230 kV, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivo, ou 1,00 e 0,92 capacitivo, conforme as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia

Elétrica”. O não cumprimento dos padrões estabelecidos pela ANEEL, inclusive quanto ao fator de potência mínimo, pode levar a penalidades para as concessionárias.

Existem diversos equipamentos e formas que podem ser usados na correção do fator de potência como: indutores a jusante, indutores a montante, filtros sintonizados, filtros passa-baixas de entrada, conversor *boost* em modo de condução contínua, conversor *bridgeless totem pole* e retificador reversível em corrente. Neste trabalho está desenvolvido um Filtro Ativo Paralelo (FAP) controlado em tensão configurado como um Compensador Estático de Reativos para Redes de Distribuição (DSTATCOM, do inglês "Distribution Static Compensators") que atua na circulação de energia reativa no sistema regulando o fator de potência e melhorando a qualidade da energia que circula pela rede.

A proposta do filtro ativo paralelo controlado em tensão é impor uma tensão senoidal no ponto em que está conectado, o que também resulta na imposição de uma corrente senoidal entre o ponto de conexão e o alimentador da carga. Assim, o filtro ativo fornece as correntes harmônicas para a carga, consequentemente o alimentador é responsável apenas pela fundamental da corrente. Vale destacar que o filtro ativo pode ser utilizado tanto para cargas lineares quanto não lineares.

Dessa forma, este trabalho aspira contribuir para a compreensão e aplicação de soluções que visam promover a melhora do fator de potência e qualidade da energia que circula pela rede no contexto da geração e distribuição de energia elétrica. Assim, a implementação bem-sucedida do FAP controlado em tensão pode tanto levar ao cumprimento dos padrões estabelecidos pela ANEEL quanto melhorar a qualidade no fornecimento geral de energia, como a redução das perdas de energia no sistema associadas ao consumo de energia não ativa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O capítulo de fundamentação teórica aborda os principais conceitos relacionados à qualidade de energia elétrica em sistemas de distribuição, com foco em cargas não lineares e suas implicações.

Para mitigar esses problemas, são apresentados os compensadores de potência reativa, com ênfase no FAP. Este dispositivo permite a correção do fator de potência e a redução das distorções harmônicas, garantindo uma forma de onda de corrente mais senoidal em 60 Hz e o cumprimento dos padrões estabelecidos pela ANEEL.

A fundamentação também detalha o modelo matemático do DSTATCOM. O controle proposto é projetado para atuar em redes com diferentes condições de carga, incluindo cenários de desequilíbrios e variações de carga.

2.1 ANÁLISE DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO COM O DSTATCOM

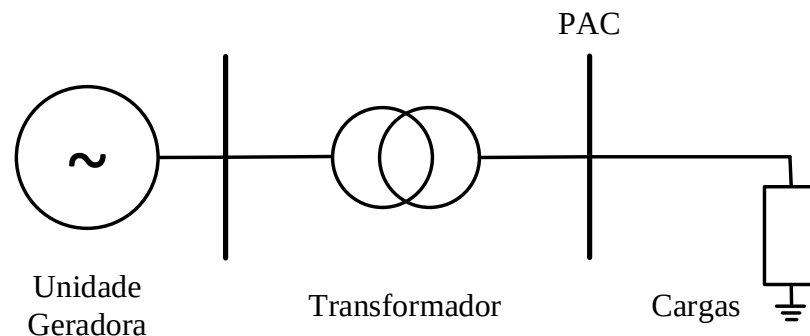
Para melhor compreensão do impacto que o DSTATCOM tem na rede em que é conectado, é necessário o estudo dos principais elementos que compõem os sistemas de distribuição. Após esta análise, o conversor é inserido em uma rede genérica, assim é avaliado o novo perfil da transferência de potência entre a unidade geradora e os consumidores (Hock Júnior, 2015).

A seguir, estão detalhados os principais componentes que compõem uma rede de distribuição, sendo: transformadores, condutores das linhas de distribuição e cargas.

2.1.1 Composição da rede de distribuição

Convencionalmente, a rede de distribuição é composta por uma rede de média tensão que fornece energia aos alimentadores por meio de transformadores abaixadores. Cada alimentador é responsável por atender a uma carga específica. A Figura 2 ilustra o sistema de distribuição de uma rede de distribuição.

Figura 2 – Diagrama simplificado de uma rede de distribuição



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

O transformador fornece à rede uma tensão reduzida para as diversas cargas conectadas ao seu secundário. O ponto onde as cargas estão conectadas ao alimentador é conhecido na literatura como Ponto de Acoplamento Comum (PAC).

2.1.1.1 Transformadores

Todo transformador apresenta não idealidades, independentemente da qualidade de sua construção. Nem todo o fluxo magnético é entrelaçado pelas espiras; para isso, seria necessário um núcleo com permeabilidade magnética infinita. Por esse motivo, sempre existe um fluxo disperso, modelado como indutâncias de dispersão.

Além disso, há perdas decorrentes das variações cíclicas do sentido do fluxo magnético (histerese) e também devido às correntes parasitas, conhecidas como correntes de Foucault. Mesmo com o secundário em aberto, uma pequena corrente circula quando o primário está energizado, denominada corrente de magnetização. O efeito dessa corrente é representado pela impedância em paralelo com o primário do transformador (Hock Júnior, 2015).

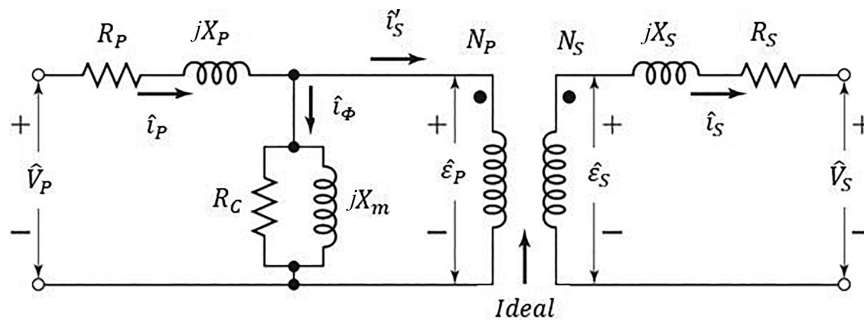
E, por fim, as perdas por efeito Joule devido à corrente elétrica que passa pelo condutor, modelado por uma resistência. A Figura 3 apresenta um modelo, conhecido como modelo pi do transformador, utilizado para representar de maneira mais próxima ao real um transformador (Alves et al., 2022).

Na Figura 3, R_P representa as perdas ôhmicas nas bobinas do primário do transformador, enquanto R_S indica as perdas ôhmicas nas bobinas do secundário. As reatâncias X_P e X_S quantificam as dispersões magnéticas no primário e no secundário, respectivamente. O parâmetro R_C corresponde às perdas por histerese e correntes de Foucault no núcleo, e X_m representa a reatância de magnetização do núcleo.

Em relação às tensões, $\hat{V}_P$ é a tensão no primário do transformador, e $\hat{V}_S$ é a tensão no secundário. Já $\hat{\varepsilon}_P$ e $\hat{\varepsilon}_S$ correspondem às tensões nos enrolamentos do primário e do secundário, respectivamente. O número de espiras é representado por N_P no primário e N_S no secundário.

Quanto às correntes, $\hat{I}_P$ é a corrente de entrada no primário do transformador, enquanto $\hat{I}_S$ é a corrente de saída no secundário. A corrente de magnetização do núcleo é representada por $\hat{I}_\Phi$ e $\hat{I}'_S$ refere-se à corrente do secundário refletida ao primário.

Figura 3 – Modelo mais realístico — transformador



Fonte: (Alves et al., 2022).

O valor dessas grandezas é geralmente fornecido pelo fabricante do transformador, podendo também ser projetado sob encomenda para atender aos requisitos específicos da aplicação ou do cliente. Caso os dados do transformador não estejam disponíveis, é possível determinar seus parâmetros por meio de ensaios de circuito aberto e de curto-circuito (Fitzgerald; Kingsley; Umans, 2006).

Os efeitos das perdas e não idealidades dos transformadores são frequentemente representados por impedâncias em série com o enrolamento secundário, ou seja, desconsiderando a indutância de magnetização e perdas no núcleo. Os efeitos associados ao primário são refletidos, ou seja, são representados por impedâncias que produzem o mesmo efeito no secundário. Simplificando a representação do transformador sem perder nenhuma informação significativa.

2.1.1.2 Condutores

Além das componentes do transformador representadas nas linhas de distribuição, há também uma parcela de resistência e indutância devido aos condutores que fazem as conexões entre os alimentadores. Esse acréscimo pode ser mais considerável em situações em que o transformador esteja mais afastado da carga.

Os condutores utilizados em redes de baixa tensão possuem uma seção transversal reduzida, o que faz com que suas parcelas resistivas sejam maiores do que as indutivas (Hock Júnior, 2015). Essa característica impacta diretamente o fluxo de potência ativa e não ativa entre o conjunto rede, carga e filtro ativo, além de influenciar a modelagem da rede, que, por sua vez, afeta a modelagem da planta.

2.1.1.3 Cargas

As unidades consumidoras presentes em sistemas de distribuição em baixa tensão são principalmente residenciais e pequenos estabelecimentos comerciais. Embora essas unidades geralmente demandem pouca energia individualmente, a soma de suas contribuições e a distância até o transformador podem resultar em tensões precárias ou até mesmo críticas no fornecimento de energia.

É importante notar que as unidades residenciais consomem correntes com elevada distorção harmônica, devido ao uso de equipamentos eletrodomésticos, eletroeletrônicos e sistemas de aquecimento de água com controle de temperatura. Portanto, é fundamental considerar a inclusão de circuitos com características não lineares em análises e considerações futuras (Hock Júnior, 2015).

2.1.2 Impacto das cargas pulsadas na rede de distribuição

Cargas pulsadas são dispositivos ou equipamentos que, devido ao seu modo de operação, demandam energia elétrica em pulsos intermitentes ao invés de uma corrente contínua e estável. Esse tipo de carga geralmente utiliza eletrônica de potência que utiliza de semicondutores que

recortam a forma de onda e, por consequência, geram harmônicos que resulta na distorção na forma de onda da tensão e corrente.

Esse tipo de carga é uma fonte de distúrbios para equipamentos presentes na instalação. Quando a carga pulsante entra em operação, a queda de tensão na impedância da fonte aumenta. Como consequência, diferentes problemas aparecem, relacionados à qualidade de energia, como: distorção harmônica elevada, sobretensão (do inglês, "*swell*"), afundamento de tensão (do inglês, "*sag*"), microcortes de tensão (do inglês, "*notches*") e cintilamento (do inglês, "*flicker*") devido às características das cargas (Lopez, 2013).

Existem diversos exemplos de onde esse tipo de carga é encontrada (nPEE, 2024), segue abaixo alguns exemplos:

- Fontes de alimentação chaveadas: usadas em dispositivos como computadores, televisores, e impressoras. Essas fontes convertem a tensão ca em cc através de retificação, produzindo distorções harmônicas devido ao chaveamento que tem como consequência uma descontinuidade na forma de onda da corrente.
- Reatores eletrônicos para iluminação: presentes em sistemas de iluminação, esses reatores funcionam em alta frequência e também utilizam fontes chaveadas em sua topologia, resultando em uma situação análoga ao item anterior.
- Controladores de tensão para dimerização: empregados no controle de intensidade luminosa de lâmpadas e no ajuste de aquecimento em resistências elétricas, esses controladores utilizam tiristores que operam em meia onda ou onda completa, gerando distorções significativas.
- Conversores trifásicos e inversores de frequência: utilizados em acionamento de motores de indução, como em sistemas de controle de velocidade e em sistemas de energia ininterrupta. Ainda, se esquadra nesse item aparelhos de ar-condicionado e geladeiras com tecnologia inverter. A estrutura desses dispositivos, como a ponte de Graetz, possuem semicondutores que distorcem a forma de onda da corrente.
- Fogões de indução: Existem fogões de indução resistivos que controlam a temperatura por ciclos inteiros. Durante determinados ciclos, esses fogões consomem energia, o que pode causar quedas momentâneas de tensão. Esse comportamento é periódico e resulta na geração de flickers na rede.

2.1.2.1 Distorções harmônicas

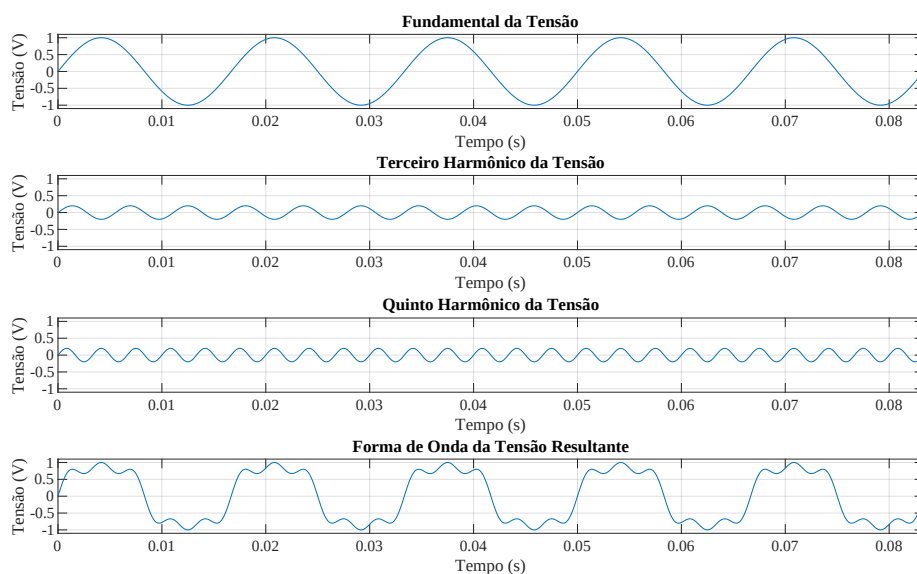
A eletricidade gerada possui forma de onda senoidal na frequência de 60 Hz, contudo a corrente solicitada por carga de equipamentos eletrônicos não espelha a forma de onda da tensão original. Os harmônicos de ordem ímpar são os mais comuns em sistemas elétricos,

especialmente em circuitos que utilizam dispositivos não lineares, devido à natureza de simetria ímpar nas formas de onda de tensão e corrente.

A presença de harmônicos na corrente, considerando a tensão do alimentador uma senoide de 60 Hz, resulta, de maneira geral, em baixo fator de potência, pois a potência devido às correntes de harmônicos diferentes da fundamental não realiza trabalho.

A Figura 4 apresenta o conceito das harmônicas e a influência que possuem na forma de onda resultante para um caso em que a amplitude da fundamental é 1 pu, do quinto harmônico 0,2 pu e do terceiro harmônico 0,2 pu.

Figura 4 – Influência das harmônicas na forma de onda da tensão



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

A presença de harmônicas em uma instalação não representa, por si só, um problema, mas a interação dessas com o sistema de distribuição pode causar distorções e perdas na tensão. Quando o nível de distorção da tensão se eleva, diversos problemas podem surgir em equipamentos eletrônicos. Caso os picos de tensão sejam suprimidos, as fontes de alimentação podem não acumular energia suficiente para compensar os *sags* momentâneos. Por outro lado, se os picos forem amplificados, sistemas de proteção podem ser acionados, desligando a carga (Lopez, 2013).

Ainda conforme (Lopez, 2013), seguem algumas características e consequências da presença de harmônicas elevadas:

- Aquecimento dos condutores de neutro devido à corrente elevada;
- Transformadores quentes e ruidosos;
- Motores com falhas frequentes e temperatura elevada de operação;

- Geradores de energia abaixo do rendimento nominal;
- Interferência com equipamentos eletrônicos conectados a rede elétrica;
- Possibilidade de medições errôneas;
- Interferências telefônicas;
- Sobreaquecimento das sapatas polares de máquinas síncronas devido à circulação de correntes harmônicas nos enrolamentos amortecedores;
- Carregamento exagerado do neutro, principalmente em malhas de aterramento mal projetadas;
- Pode originar condição de ressonância com banco de capacitores;

2.1.2.2 *Sags e Swells*

Sags são eventos em que ocorre um decréscimo entre 0,1 e 0,9 pu na tensão ou corrente, com tempo de duração entre 0,5 ciclos e 1 minuto.

Swells são eventos em que ocorre um aumento entre 1,1 e 1,8 pu na tensão ou corrente, com tempo de duração entre 0,5 ciclos e 1 minuto.

Os *sags* ocorrem quando cargas pesadas são conectadas à linha. Essas cargas apresentam uma alta corrente de partida, reduzindo o nível de tensão por curtos períodos. Esse fenômeno também pode ser causado por eventos naturais, como tempestades, queda de árvores na linha de transmissão ou acidentes.

Os *sags* podem provocar a reinicialização de equipamentos eletrônicos ou seu desligamento devido à atuação de sistemas de proteção (Lopez, 2013). Além disso, podem causar instabilidades no sistema, levando ao desligamento geral das cargas em uma determinada região.

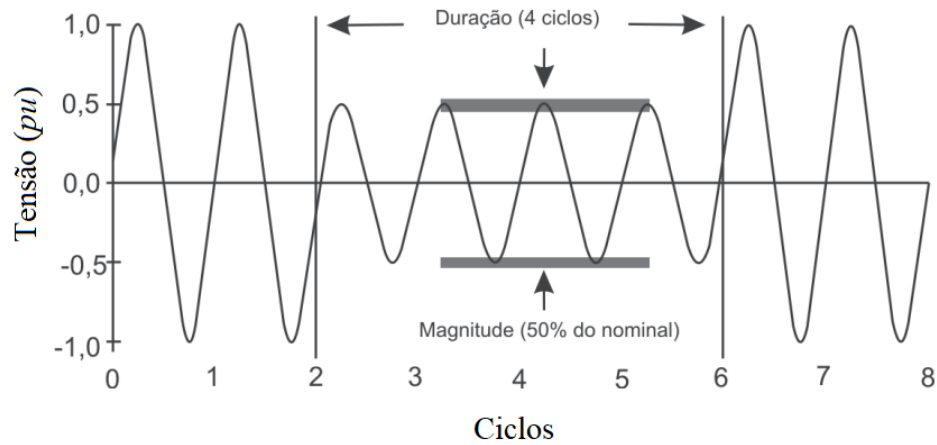
Os *swells* são causados pelo processo inverso ao dos *sags*. Esse fenômeno ocorre quando cargas pesadas são desconectadas da linha, resultando em uma diminuição significativa da carga, aumentando o nível de tensão por curtos períodos. Além disso, podem provocar a reinicialização ou o desligamento de equipamentos eletrônicos, além de possivelmente causar instabilidades no sistema.

A Figura 5 apresenta um exemplo de *sag* que dura por 4 ciclos.

2.1.2.3 *Notches*

Os *notches* são interrupções periódicas na forma de onda da tensão, causadas por quedas de tensão nas indutâncias do sistema elétrico. Esses cortes ocorrem devido a cargas que consomem correntes com variações bruscas e periódicas, como os retificadores com filtro capacitivo ou indutivo. Esse distúrbio de tensão resulta da comutação de corrente entre fases durante a operação normal de equipamentos de eletrônica de potência. O fenômeno pode ser identificado

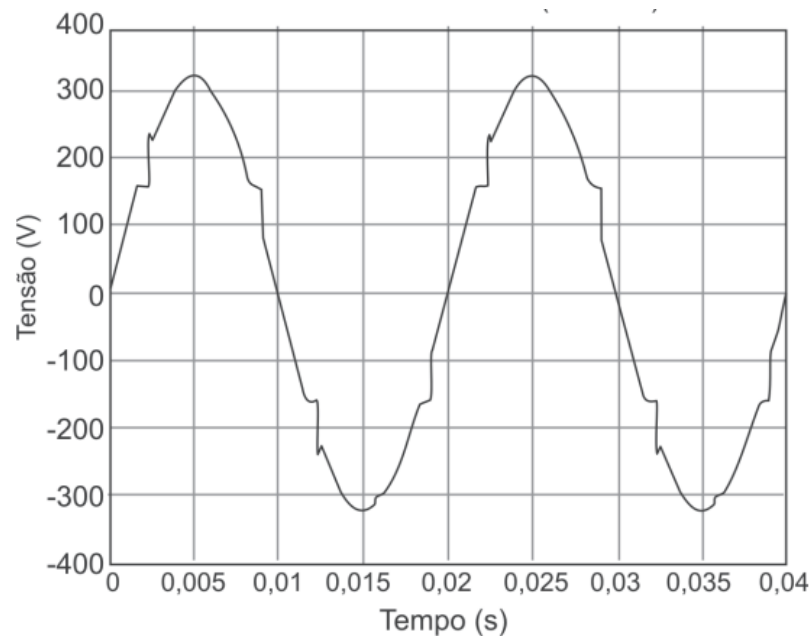
Figura 5 – Exemplo de *sag* de tensão que dura por 4 ciclos



Fonte: Adaptado de (Lopez, 2013).

pelo conteúdo harmônico da tensão afetada. As frequências associadas aos *notches* são de alto valor e, portanto, não podem ser detectadas com os equipamentos convencionais usados em análises de qualidade de energia, pois possuem uma baixa banda passante. A Figura 6 apresenta um exemplo de *notch*.

Figura 6 – Exemplo *notch* de tensão



Fonte: (Lopez, 2013).

2.1.2.4 Flickes

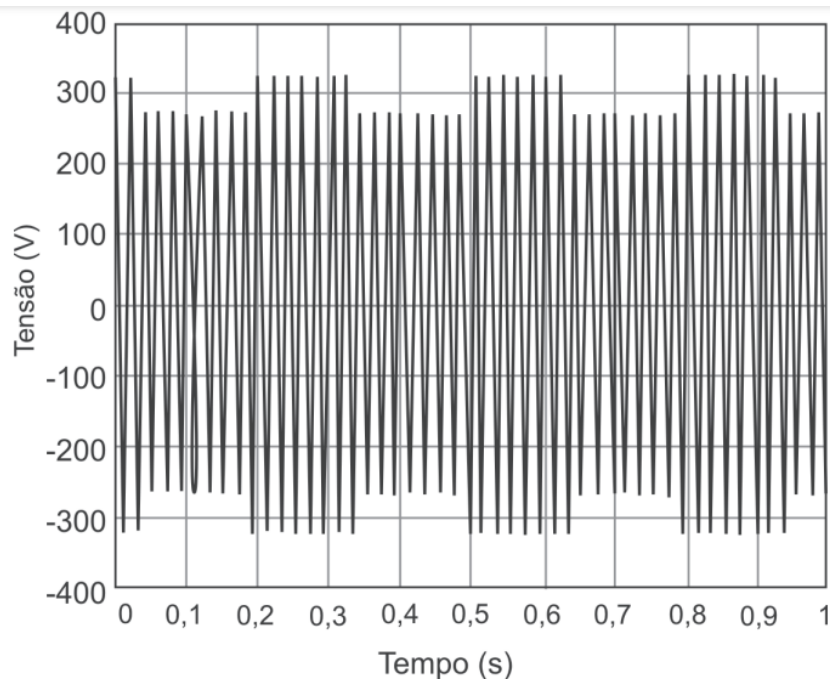
As flutuações de tensão entre 0,5 e 25 Hz podem causar variações visíveis na iluminação. Essas flutuações resultam de pequenas e repetitivas quedas de tensão, causadas por cargas

pesadas que demandam altas correntes por períodos curtos e frequentes. O fenômeno conhecido como cintilação luminosa, ou efeito *flicker*, é percebido visualmente através das variações no fluxo luminoso, especialmente em lâmpadas incandescentes. As principais causas desse efeito incluem cargas com ciclos variáveis, cuja frequência de operação modula a magnitude da tensão da rede na faixa de 0 a 30 Hz. O olho humano é particularmente sensível às variações na emissão luminosa dentro dessa faixa, sendo que sua maior sensibilidade ocorre em torno de 10 Hz (Lopez, 2013).

A impedância da rede, composta pelo conjunto de cabos e transformadores, é menor quanto maior for a potência aparente nominal do transformador. Nas redes de distribuição pública, o *flicker* é mais comum em áreas rurais ou em locais com baixa densidade de consumidores. Embora o *flicker* tenha um efeito fisiológico desconfortável para as pessoas que trabalham em ambientes com lâmpadas incandescentes, ele não afeta aparelhos ou circuitos eletrônicos.

O *flicker* torna-se uma preocupação significativa apenas em situações de manobras de cargas pesadas ou quando a impedância do circuito é alta. Nesses casos, pode ocorrer uma queda de tensão mais acentuada no PAC, resultando em mau funcionamento ou reinicialização de equipamentos conectados ao PAC (Lopez, 2013). A Figura 7 apresenta um exemplo de *flicker* com frequência de 15 Hz.

Figura 7 – Exemplo de *flicker* de tensão com frequência de 15 Hz



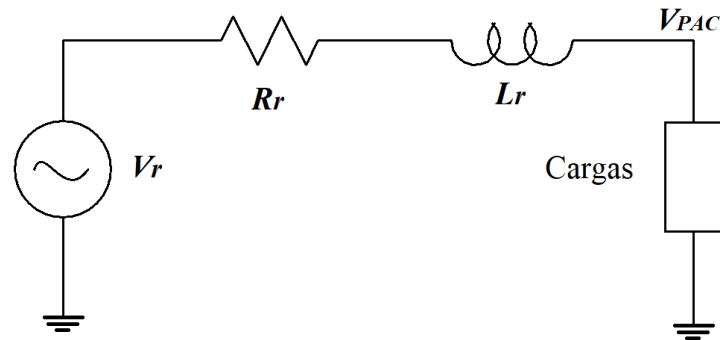
Fonte: (Lopez, 2013).

2.1.3 Análise do fluxo de potência em um sistema de distribuição

O modelo convencional utilizado para a análise do fluxo de potência com cargas conectadas ao PAC consiste em um alimentador ideal com onda senoidal livre de distorções, uma

resistência e uma indutância associadas à linha de transmissão, além de uma impedância equivalente da carga vista pelo secundário do transformador, lado de baixa tensão. Nesse modelo, o módulo e o ângulo da tensão são definidos exclusivamente pela carga, e as potências ativa e reativa fluem do alimentador para a carga. A Figura 8 ilustra este modelo, onde “Cargas” corresponde à impedância equivalente que representa todas as cargas reais conectadas ao alimentador, L_r e R_r representam as impedâncias do ramo de distribuição, e V_r é a tensão do alimentador.

Figura 8 – Diagrama simplificado de um sistema de distribuição — Sem DSTATCOM

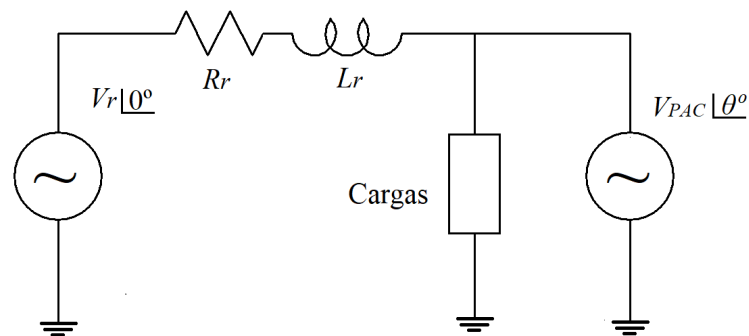


Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Ao conectar o DSTATCOM ao PAC, possibilita-se impor uma tensão (módulo e fase) no barramento PAC por meio do FAP. Assim, o comportamento do PAC conectado ao FAP pode ser modelado como uma fonte de tensão com módulo e fase fixos. Com essa configuração, é possível determinar o fluxo de potência ativa e reativa no sistema de distribuição.

Para a análise do fluxo de potência, a carga e o conversor são substituídos por uma fonte de tensão senoidal ideal de módulo e fase controlados. A representação está conforme a Figura 9.

Figura 9 – Diagrama simplificado de um sistema de distribuição — Com DSTATCOM



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Com o DSTATCOM conectado à rede de distribuição, é possível calcular o fluxo de potência ativa e reativa fornecida pelo alimentador, conforme expresso nas Equações (1) e (2)

apresentadas abaixo.

$$P_r = \frac{V_r^2}{Z_r} \cdot \cos \phi - \frac{V_r \cdot V_{PAC}}{Z_r} \cdot \cos \phi \cdot \cos \theta + \frac{V_r \cdot V_{PAC}}{Z_r} \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(\theta) \quad (1)$$

$$Q_r = \frac{V_r^2}{Z_r} \cdot \sin(\phi) - \frac{V_r \cdot V_{PAC}}{Z_r} \cdot \sin(\phi) \cdot \cos \theta - \frac{V_r \cdot V_{PAC}}{Z_r} \cdot \cos \phi \cdot \sin(\theta) \quad (2)$$

Vale ressaltar que ϕ representa o ângulo da impedância da rede calculado pela Equação (3), Z_r seu módulo calculado pela Equação (4) e θ o ângulo da tensão no PAC. Nos equacionamentos f_r é a frequência da rede.

$$\phi = \angle(R_r + j2\pi f_r L_r) = \arctan\left(\frac{2\pi f_r L_r}{R_r}\right) \quad (3)$$

$$Z_r = |(R_r + j2\pi f_r L_r)| = \sqrt{R_r^2 + (2\pi f_r L_r)^2} \quad (4)$$

2.2 COMPENSADORES DE REATIVOS

Os compensadores estáticos de reativos são conversores que, idealmente, processam apenas energia reativa com o intuito de reduzir a queda de tensão na parcela indutiva das redes de distribuição. Estes compensadores injetam correntes senoidais em quadratura com a tensão do PAC, assim é como se o compensador simulasse o efeito de uma capacitância ou indutância, dessa forma, é possível controlar o fluxo de potência reativa (Singh et al., 2006).

Ainda, com o avanço da eletrônica de potência, problemas de qualidade de energia elétrica tornaram-se mais frequentes nos sistemas elétricos. Isso ocorre devido às cargas não lineares, que usam dispositivos semicondutores e distorcem a forma de onda das correntes e tensões, gerando harmônicos de diferentes naturezas no sistema. Assim, faz-se necessário um compensador com capacidade para compensar tanto os reativos devido à defasagem entre a tensão e corrente, quanto os reativos relacionados às não linearidades das cargas.

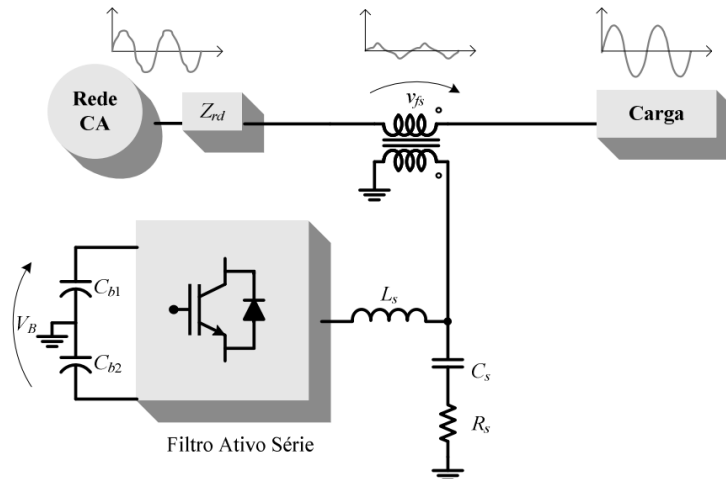
Os filtros ativos, baseados em conversores eletrônicos controlados, podem ser projetados para mitigar problemas de distorção harmônica, bem como para auxiliar no controle de potência reativa e restauração de tensão (Devassy; Singh, 2017).

2.2.1 Filtro ativo série

Os filtros ativos série (FAS) têm como principal objetivo compensar as distorções na tensão fornecida pela rede elétrica à qual estão conectados. A principal função desses filtros é garantir que a tensão fornecida à carga seja uma onda senoidal com baixa Taxa de Distorção Harmônica (TDH). Para isso, os filtros utilizam um transformador de acoplamento para se conectar ao sistema e são, geralmente, instalados o mais próximo possível da carga, a fim de

proporcionar uma correção eficaz. O nome “série” é dado porque o filtro é conectado em série entre a carga e a rede (Santos, 2012). A Figura 10 ilustra um exemplo de filtro ativo série. Vale destacar que nessa figura todas as formas de onda apresentadas se referem a tensão.

Figura 10 – Filtro ativo série



Fonte: (Santos, 2012).

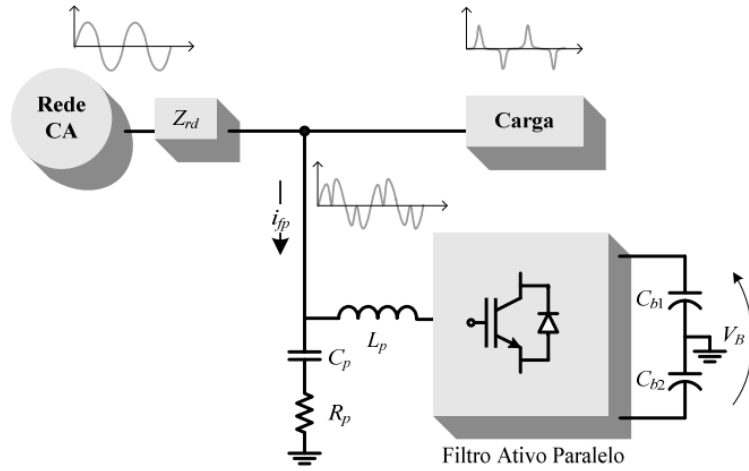
Esses filtros são frequentemente aplicados em cargas críticas, ou seja, em equipamentos que devem estar sempre em funcionamento e onde o funcionamento pode ser interrompido devido a problemas de qualidade na rede elétrica.

A tensão gerada pelo filtro ativo série, presente no transformador de acoplamento, é complementar à forma de onda das harmônicas da rede. Ao somar essas tensões, o filtro consegue fornecer à carga uma tensão senoidal. Os distúrbios mais comuns que os filtros ativos série corrigem incluem desequilíbrios de tensão, *sags*, *swells*, além da eliminação ou minimização de harmônicos de tensão (Santos, 2012).

2.2.2 Filtro ativo paralelo

O filtro ativo paralelo (FAP) é usado para compensar distorções de corrente no sistema ao qual é inserido, nesse caso, o filtro é inserido paralelamente à carga. Desta forma, o filtro atua em sistemas onde a corrente apresenta distorções harmônicas, cargas desequilibradas, circulação de potência reativa e de corrente no neutro, fazendo com que a distorção de corrente circule apenas no próprio filtro e na carga, eliminando da fonte a circulação de componentes harmônicos, dessa forma, para a rede circula apenas uma corrente senoidal. (Santos, 2012). A Figura 11 ilustra um exemplo de filtro ativo paralelo. Nessa figura, todas as formas de onda se referem a corrente e V_B representa a tensão total do barramento cc.

Figura 11 – Filtro ativo paralelo



Fonte: (Santos, 2012).

2.2.3 Topologia DSTATCOM

As topologias mais utilizadas para o DSTATCOM estão discutidas em (Hock Júnior, 2015). Dentre tais topologias possíveis, escolheu-se o inversor meia ponte trifásico a quatro fios devido à operação independente para cada fase, sendo interessante para redes trifásicas com cargas desequilibradas.

Essa é uma estrutura mais simples e de fácil operação com as três fases operando independente uma das outras, ou seja, para os projetos de controle e validação via simulações, basta simular para uma fase, pois as outras possuem mesma forma de onda de resposta, porém, atrasada ou adiantada em 120° com relação a referência, considerando um sistema equilibrado. Contudo, vale ressaltar que essa topologia opera bem com sistemas desequilibrados, também, devido à independência entre as fases.

Para se obter um sinal de tensão senoidal, usa-se um filtro LC incluído entre o conversor e o PAC. Assim, o conteúdo harmônico gerado pela comutação é reduzido. Segue na Figura 12 a representação do DSTATCOM.

Por fim, na Figura 13 está demonstrado o diagrama unifilar da rede com a presença do DSTATCOM.

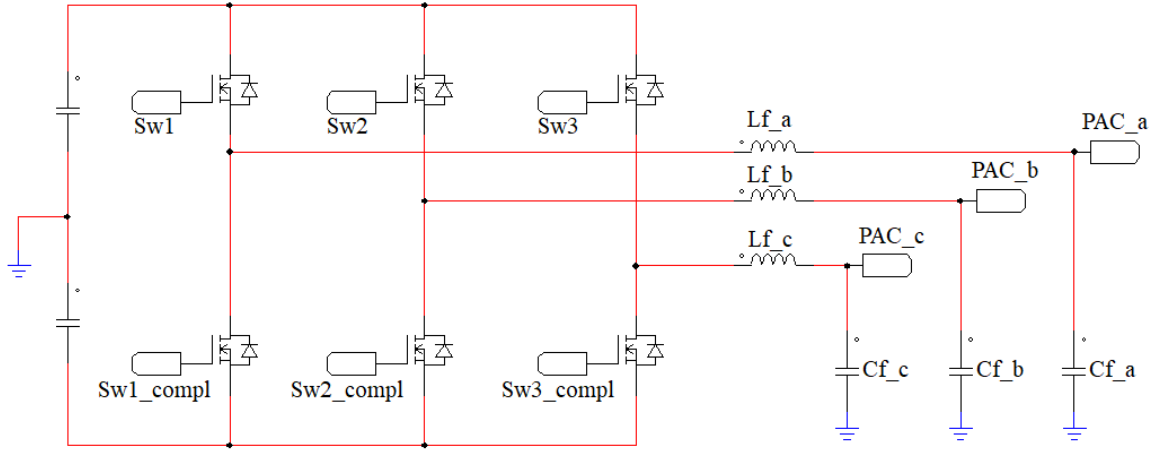
Quando o DSTATCOM está desconectado do PAC, a frequência de corte do filtro LC é representada pela Equação (5), um modelo amplamente utilizado e difundido. Nos estágios iniciais de projeto, esse modelo pode ser adotado com precisão satisfatória.

$$f_{cLC} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}} \quad (5)$$

No entanto, vale ressaltar que, ao ser conectado a saída do conversor ao PAC, há uma indutância em série com o filtro LC devido à linha de distribuição, transformando o filtro LC em um filtro LCL. Com isso, há uma presença maior do efeito de ressonância na frequência de corte

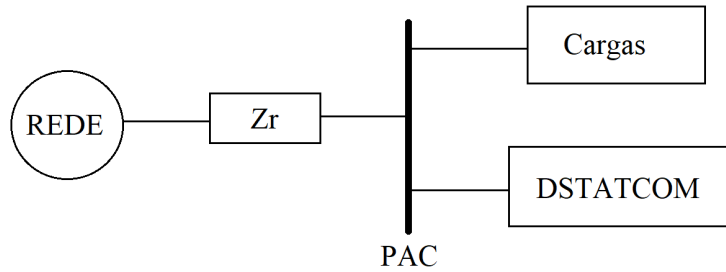
do filtro, o qual pode ser compensado por amortecimento ativo ou passivo. Neste trabalho está implementado uma malha de amortecimento ativo.

Figura 12 – Estrutura do DSTATCOM



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Figura 13 – Unifilar DSTATCOM



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

2.2.4 Expressões do fluxo de potência para o DSTATCOM

Sabe-se que, idealmente, o conversor não processa energia ativa, pois levaria a um desbalanceamento no nível de tensão dos capacitores do barramento de entrada; portanto, apenas energia não ativa deve ser processada pelo DSTATCOM. Dessa forma, pode-se calcular o balanço de potência através da expressão:

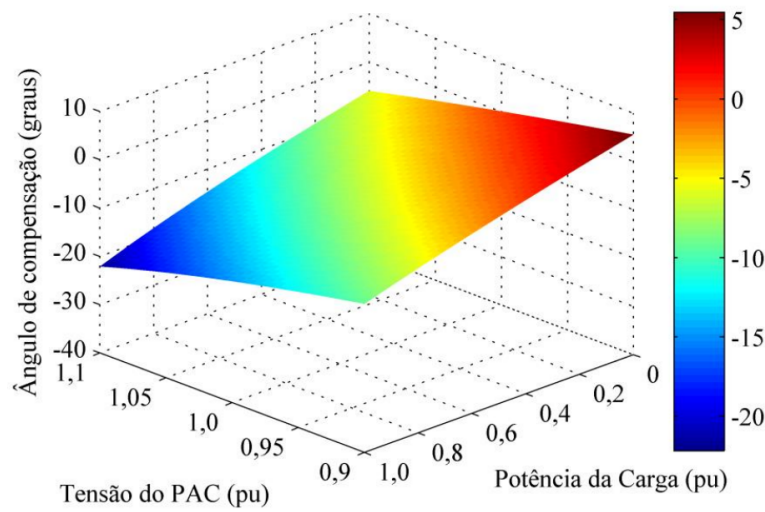
$$P_r + P_0 = 0 \quad (6)$$

Onde P_0 corresponde à potência ativa consumida pela carga. Substituindo (1) em (6) obtém-se uma das equações que devem ser respeitadas.

$$\frac{V_r^2}{Z_r} \cdot \cos \phi - \frac{V_r \cdot V_{PAC}}{Z_r} \cdot \cos \phi \cdot \cos \theta + \frac{V_r \cdot V_{PAC}}{Z_r} \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(\theta) + P_0 = 0 \quad (7)$$

A partir da (7), observa-se que o ângulo de carga θ impacta, de forma mais significativa, a potência ativa demandada pela carga, pois os demais parâmetros permanecem constantes para uma condição de operação específica. Isso implica que, para uma potência ativa requerida pela carga e considerando as características da rede constantes, existe um ângulo da fase do PAC que satisfaz a equação (7), desde que esteja dentro dos limites impostos pelo alimentador. Dessa forma, são possíveis diversas soluções para diferentes níveis de tensão no PAC e diferentes potências aparentes requeridas pela carga. A Figura 14 ilustra essas soluções para a equação (7), os valores para impedância de carga e tensão da rede estão em por unidade (pu).

Figura 14 – Variação do ângulo de compensação em função da potência aparente da carga e a tensão do PAC para fator de potência 0,8 indutivo ($Z = 0,2$ pu, $\phi = 45^\circ$ e $V_r = 1$ pu)



Fonte: (Hock Júnior, 2015).

Diferente do fluxo de potência ativa, o fluxo da potência reativa é influenciado diretamente pela presença do DSTATCOM. Isso pode ser descrito como:

$$Q_{inv} = Q_0 - Q_r \quad (8)$$

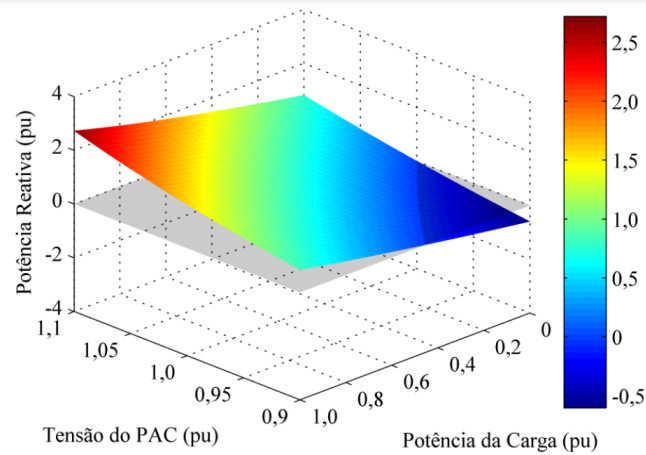
Na qual Q_{inv} a potência reativa processada pelo DSTATCOM e Q_0 a potência não ativa requerida pela carga. Substituindo (2) em (8) é obtido a segunda equação que deve ser respeitada, logo abaixo:

$$Q_{inv} = Q_0 - \frac{V_r^2}{Z_r} \cdot \sin(\phi) + \frac{V_r \cdot V_{PAC}}{Z_r} \cdot \sin(\phi) \cdot \cos \theta + \frac{V_r \cdot V_{PAC}}{Z_r} \cdot \cos \phi \cdot \sin(\theta) \quad (9)$$

A potência fornecida pela rede também depende do ângulo de defasagem do PAC, constante em regime permanente. Assim, a Figura 15 apresenta a potência reativa processada nos pontos de operação do DSTATCOM, mantendo os parâmetros da Figura 14.

Pode-se observar que há uma zona de operação do DSTATCOM onde a potência reativa é aproximadamente duas vezes maior do que a potência das cargas. No entanto, a Figura 15 revela uma característica importante: uma diminuição na tensão do PAC resulta em uma redução na

Figura 15 – Variação da potência reativa processada pelo conversor em função da potência aparente da carga e a tensão do PAC para fator de potência 0,8 indutivo ($Z = 0,2$ pu, $\phi = 45^\circ$ e $V_r = 1$ pu)



Fonte: (Hock Júnior, 2015).

potência processada pelo conversor. Além disso, existem valores onde a combinação da tensão do PAC e da potência da carga demanda uma potência nula do conversor.

2.3 PROJETO DOS ELEMENTOS DO DSTATCOM

Para projetar os elementos que compõe o DSTATCOM, são definidos os parâmetros iniciais, que estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros do DSTATCOM

Parâmetro	Variável	Valor adotado
Potência Nominal do DSTATCOM	S_o	30 kVA
Tensão do Barramento cc	V_o	800 V
Tensão eficaz de fase	V_r	220 V
Frequência da Rede	f_r	60 Hz
Frequência de Comutação	f_s	20 kHz
Frequência de Ressonância	f_{res}	1 kHz
Ondulação de tensão no capacitor do barramento cc	ΔV_o	5% de $V_o/2$
Ondulação de corrente no indutor	ΔI_L	30% da Corrente de Pico de Fase

Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Vale ressaltar que, nesta seção, os valores foram projetados com base nos valores teóricos mínimos necessários para satisfazer as especificações do projeto. No entanto, esses valores podem ser ajustados conforme a disponibilidade no laboratório.

2.3.1 Projeto filtro de saída

Na saída do conversor, há um filtro LC . Contudo, ao ser conectado à rede, a indutância L_r da rede de distribuição interage com o filtro LC . Dessa forma, a topologia de saída do conversor se comporta como um filtro LCL . Assim, conforme em (Santos, 2012), projetam-se os valores de L_f e C_f do conversor pelas Equações (10) e (11).

$$L_f = \frac{V_o}{4 \cdot f_s \cdot \Delta I_L} \quad (10)$$

$$C_f = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f_{res})^2 \cdot L_f} \quad (11)$$

Aplicando os parâmetros presentes na Tabela 2 nas equações (10) e (11).

$$L_f = \frac{800}{4 \cdot 20 \text{ k} \cdot 0.3 \cdot \frac{30 \text{ k}/3}{220} \cdot \sqrt{2}} = 518,54 \mu H \quad (12)$$

$$C_f = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot 1 \text{ k})^2 \cdot 518,54 \mu} = 48,85 \mu F \quad (13)$$

2.3.2 Projeto da capacitância do barramento cc

O projeto das capacitâncias do barramento cc é apresentado em (Hock Júnior, 2015). A Equação (14) apresenta a mínima capacitância necessária.

$$C_{o1} = C_{o2} \geq \frac{S_o}{3 \cdot \pi \cdot f_r \cdot V_o \cdot \Delta V_o} \quad (14)$$

Aplicando os parâmetros de projeto na Equação (14), é obtido o mínimo que é preciso de capacitância para atender os parâmetros de projeto.

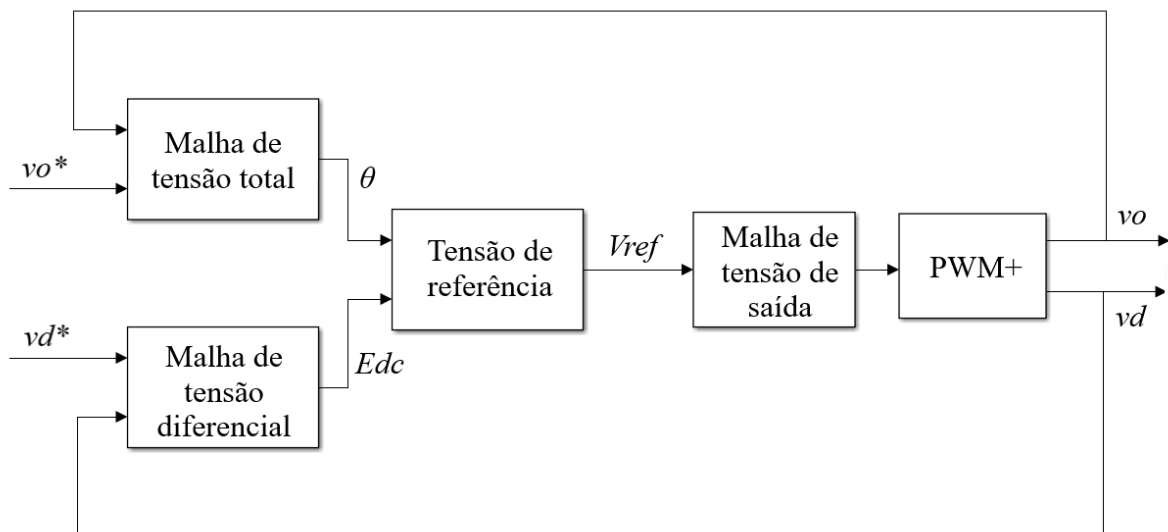
$$C_{o1} = C_{o2} \geq \frac{30k}{3 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 800 \cdot (0.05 \cdot 800)} = 1660 \mu F \quad (15)$$

2.4 SISTEMA DE CONTROLE

A estrutura de potência precisa de um sistema de controle adequado para regular a tensão do PAC. O sistema de controle do conversor deve garantir tensões de saída senoidais com baixa distorção harmônica, regular a tensão total do barramento cc e evitar desequilíbrios de tensão nos capacitores do barramento.

O controle do DSTATCOM opera com três malhas distintas: malha de tensão de saída Corrente Alternada (ca), malha de tensão total e malha de tensão diferencial do barramento cc. Para o conversor trifásico, a malha de tensão ca é triplicada, com uma malha para cada fase. Na Figura 16 está presente o diagrama de blocos simplificado do sistema de controle do DSTATCOM.

Figura 16 – Diagrama de blocos simplificado do sistema de controle



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

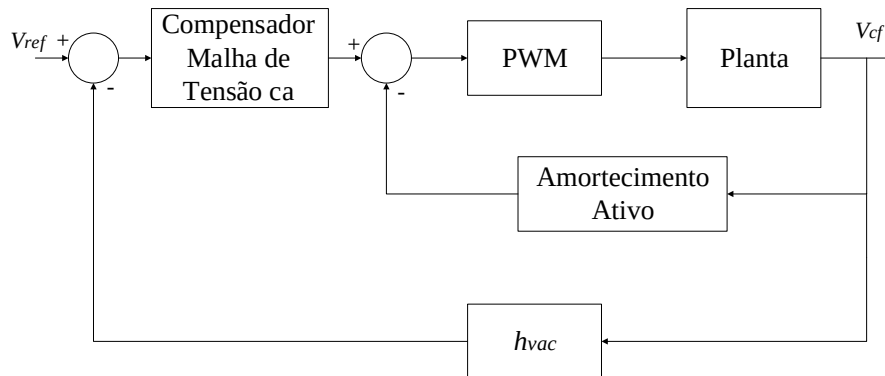
Neste diagrama de blocos, a “Tensão de referência” é dada pela Equação (16), onde E representa a amplitude da senoide, E_{dc} é o nível de tensão cc somado à senoide, θ é o ângulo de

defasagem entre a tensão do PAC e a da rede, ω é a frequência angular e t é o tempo.

$$E_{ref} = E \cdot \sin(\omega t - \theta) + E_{dc} \quad (16)$$

A malha de tensão de saída inclui uma malha de amortecimento ativo e uma malha de síntese da referência de tensão ca (v_{ref}). A malha de amortecimento atenua o pico de ressonância do filtro LCL, monitorando a tensão nos capacitores de saída do FAP compensando sua dinâmica atenuando sinais na frequência de ressonância, ou seja, é como se houvesse um filtro rejeita-faixa na saída do compensador da malha de tensão ca na frequência de ressonância. O sinal de controle dessa malha é subtraído do sinal de controle da malha de tensão ca para reduzir significativamente o efeito de ressonância, que pode apresentar problema, na ausência da malha de amortecimento ativo, caso haja excitação na frequência de ressonância. O diagrama de blocos presente na Figura 17 apresenta a composição, de maneira simplificada, da “Malha de tensão de saída”. Neste diagrama, “PWM” representa a Modulação por Largura de Pulso (PWM, do inglês *Pulse Width Modulation*), h_{vac} o ganho do sensor de tensão que mede a forma de onda no capacitor de saída do conversor e v_{cf} a tensão sobre o capacitor de saída.

Figura 17 – Diagrama de blocos simplificado da malha de tensão de saída



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Conforme a Figura 16, a malha de tensão ca sintetiza uma tensão adequada sobre os capacitores conectados ao PAC. Essa malha é rápida, operando em torno de um quarto da frequência de comutação dos interruptores, sendo influenciada pela dinâmica da malha de amortecimento.

A malha de tensão total do barramento cc monitora a tensão total do barramento e atua sobre a fase (θ) da tensão sintetizada pela malha de tensão ca. Essa malha é projetada para ser mais lenta que a ondulação natural do barramento cc, sendo 360 Hz para o FAP deste trabalho. Assim, a frequência de cruzamento por zero pretendida nessa malha é entre 30 Hz e 60 Hz. Vale ressaltar que “frequência de cruzamento por zero” se refere a frequência, na função de transferência de malha aberta, na qual o ganho é de 0 dB.

A malha de tensão diferencial equilibra as tensões do barramento cc. É a malha mais lenta do sistema, operando em torno de alguns hertz, para evitar interferências nas outras malhas.

Esta malha de controle monitora a diferença entre as tensões dos capacitores e ajusta a tensão média (E_{dc}) para equilibrar a energia entre os capacitores e manter, consequentemente, o valor das tensões iguais e equilibrados.

O bloco de tensão de referência recebe os sinais de ângulo e nível médio dos controladores de tensão do barramento cc, que gera três sinais trifásicos equilibrados, defasados em 120° e com amplitude E . Vale destacar que cada fase possui um E , enquanto θ e E_{dc} é o mesmo para as três fases.

2.4.1 Modelagem matemática

A modelagem matemática é uma forma de representar tanto o modelo estático e dinâmico do conversor. O modelo dinâmico pode ser representado por meio de funções de transferências. Conforme apresentado em (Hock Júnior, 2015) são necessárias as seguintes funções de transferências para o projeto dos compensadores:

- $G_{vac}(s)$ - função de transferência que representa a relação entre a variação da tensão de saída e a variação da razão cíclica;
- $G_{vo}(s)$ - função de transferência que representa a relação entre a variação da tensão total do barramento cc e variação do ângulo de defasagem entre a tensão da rede e a tensão do PAC.
- G_{vd} - função de transferência que representa relação entre a variação da tensão diferencial do barramento cc e nível de tensão contínua da saída do filtro ativo no PAC.

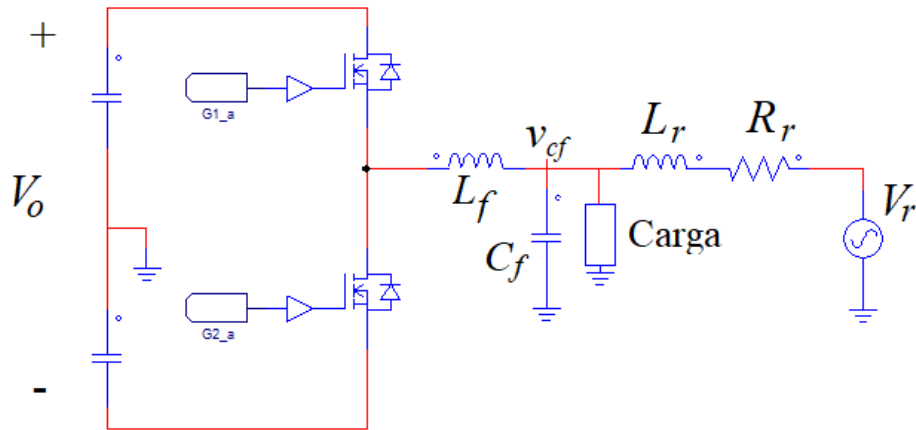
Nesta subseções está apresentado, de maneira sucinta, a técnica de controle utilizada para cada malha de controle e as expressões obtidas. Toda a modelagem está bem detalhada em (Hock Júnior, 2015).

2.4.1.1 Modelagem da planta de tensão ca

A técnica de controle utilizada para controlar as tensões de saída do conversor baseia-se na variação da largura de pulso do comando dos interruptores. Monitorando as tensões dos capacitores do filtro de saída, o controle ajusta a tensão de saída para seguir a referência senoidal. As referências para as tensões de saída são geradas pelo circuito Loop de Fase Travada (PLL, do inglês *Phase Locked Loop*), sincronizadas com as tensões do PAC, resultando em sinais quase puramente senoidais na fundamental devido à baixa distorção harmônica.

O inversor trifásico com ponto médio é representado por um circuito monofásico, onde cada fase é analisada separadamente, conforme apresentado na Figura 18. A comutação dos interruptores gera uma tensão modelada como uma fonte com valor médio em um período de comutação. Esse valor médio é utilizado no modelo dinâmico, substituindo valores instantâneos por seus respectivos valores médios.

Figura 18 – Circuito monofásico FAP para modelagem



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

A função de transferência do modelo da planta de tensão de saída é dada pela Equação (17), onde s é a variável da Transformada de Laplace, v_{cf} é a tensão no capacitor de saída do inversor, d é a razão cíclica, V_o a tensão total do barramento Corrente Contínua (cc), L_r a indutância da rede de distribuição, R_r a resistência da rede de distribuição e k_{vd0} , k_{vd1} , k_{vd2} , k_{vd3} são constantes definidas, respectivamente, pelas Equações (18), (19), (20), (21).

$$G_{vac} = \frac{v_{cf}(s)}{d(s)} = \frac{s \cdot V_o \cdot L_r + V_o \cdot R_r}{s^3 \cdot k_{vd3} + s^2 \cdot k_{vd2} + s \cdot k_{vd1} + k_{vd0}} \quad (17)$$

$$k_{vd0} = R_r \quad (18)$$

$$k_{vd1} = L_f + L_r \quad (19)$$

$$k_{vd2} = R_r \cdot L_f \cdot C_f \quad (20)$$

$$k_{vd3} = L_f \cdot L_r \cdot C_f \quad (21)$$

2.4.1.2 Modelagem da planta de tensão total do barramento cc

A técnica de controle para regular a tensão do barramento cc do conversor ajusta o ângulo de defasagem entre a tensão da rede e a tensão de saída do conversor no PAC. Monitorando as tensões de cada capacitor do barramento, o controle garante que a tensão total siga a referência

determinada e que a tensão diferencial seja nula. O controlador de tensão total do barramento aplica uma pequena defasagem nos sinais de referência gerados pelos circuitos PLL.

A planta de tensão total do barramento cc é modelada considerando a relação entre a variação da tensão total e a variação do ângulo de defasagem. Este modelo é crucial para o projeto do controlador que regula a tensão total do barramento cc. A expressão que representa a planta de tensão total do barramento cc é dada pela Equação (22), na qual $\hat{v}_{cc}$ é a tensão do barramento, $\hat{\theta}$ a variação do ângulo de defasagem entre as tensões, V_r a tensão do alimentador, C_{oeq} a capacitância equivalente do barramento cc e ω a frequência angular da rede.

$$G_{vo}(s) = \frac{\hat{v}_{cc}}{\hat{\theta}} = -\frac{3 \cdot V_r \cdot V_{PAC}}{s \cdot \omega \cdot L_r \cdot C_{oeq} \cdot V_o} \quad (22)$$

2.4.1.3 Modelagem da planta de tensão diferencial do barramento cc

A planta de tensão diferencial do barramento cc é modelada pela relação entre a variação da tensão diferencial e a variação da tensão no PAC. Esse modelo ajuda no projeto do controlador que corrige desequilíbrios nas tensões dos capacitores do barramento cc. O controlador de tensão diferencial do barramento cc ajusta a referência de tensão com um nível médio, esse nível médio faz com que a energia drenada por um capacitor seja maior do que a energia drenada pelo outro, compensando o desequilíbrio das tensões.

O modelo mais realista apresenta dois zeros e dois polos. No entanto, pode-se desprezar a dinâmica do polo fora da origem e dos zeros que são mais rápidos do que a banda passante desejada para este controlador. Assim, a expressão que representa essa planta é dada pela Equação (23), onde v_d é a diferença de tensão entre os capacitores do barramento CC.

$$G_{vd} = \frac{v_d}{V_{cf}} = \frac{3}{s \cdot R_r \cdot C_o} \quad (23)$$

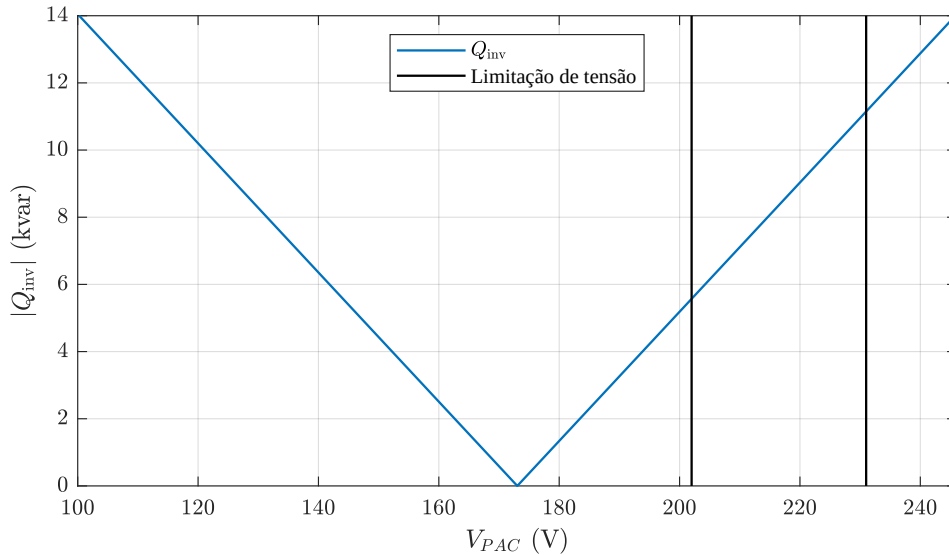
2.5 MALHA DE AMPLITUDE DE TENSÃO

Inicialmente, a amplitude imposta ao PAC é definida como a tensão nominal do sistema. Entretanto, a ANEEL permite uma oscilação de tensão dentro de certos valores, que estão presentes na Tabela 1 como “Adequada”, ou seja, considerando 220 V eficazes o nominal do sistema, a tensão do PAC pode variar entre 202 V e 231 V.

Ainda, conforme apresentado nas Equações (8) e (9), pode ser observado que a diminuição do valor eficaz de tensão no PAC resulta na redução de potência reativa processada pelo conversor. Ou seja, há um ponto de tensão para o PAC onde a potência reativa processada, em módulo, é mínima, esse nível de tensão deve respeitar os limites impostos pela ANEEL. Na Figura 19 está apresentado um gráfico que demonstra a potência reativa processada pelo conversor (Q_{inv}) com a variação do nível de tensão no PAC (V_{PAC}). Para esta análise foi assumido V_r como 220 V, Z_r como 0,97 Ω , Q_o como 0,2 pu, ou seja, 2 kvar e θ como 13°. Esses valores variam muito conforme a rede em que o FAP está sendo inserido e a característica da carga selecionada, assim,

está definido um ponto arbitrário de operação, que corresponda a realidade, de forma que seja visível o ponto de mínima potência processada.

Figura 19 – Variação da potência reativa processada pelo DSTATCOM



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Para esta situação apresentada, o melhor ponto de operação do conversor é entre 160 V e 180 V onde o processamento de reativos pelo DSTATCOM é praticamente nulo. Contudo, esse ponto de operação está longe do que é considerado adequado segundo a ANEEL, pela Tabela 1 esta situação se enquadra em uma faixa de tensão crítica. Portanto, nessa situação, a melhor opção de operação para o DSTATCOM é o limite inferior permitido pela ANEEL.

O conversor operando com mínima potência apresenta valores eficazes menores de corrente, resultando em menores perdas nos componentes. A redução dos valores eficazes de corrente também aumenta a vida útil do conversor. Com a adição de uma malha externa, responsável pela determinação das amplitudes de tensão do PAC, minimizam-se os esforços de potência do conversor e garante-se que essa amplitude permaneça na faixa adequada.

É necessário medir as grandezas elétricas para calcular a potência processada pelo DSTATCOM e, com base nessas informações, atuar sobre o sistema. Algoritmos utilizados em fontes renováveis de energia, especialmente energia solar, são semelhantes a essa necessidade, buscando o ponto de máxima potência (MPP, do inglês "*Maximum Power Point*"). O algoritmo Perturba e Observa (P&O, do inglês "*Perturb and Observe*") é escolhido devido à sua fácil implementação e boa rastreabilidade (Hock Júnior, 2015).

2.5.1 Método perturba e observa

Os métodos de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT, do inglês "*Maximum Power Point Tracking*") variam em complexidade, sensores requeridos, velocidade de convergência, custo e eficiência, entre outros. Dentre os inúmeros sistemas que buscam o MPP, o

método P&O é o mais utilizado por possuir implementação simples, baixo esforço computacional, precisão, não necessita de ajustes periódicos e requer apenas dois sensores. Entretanto, esse método apresenta baixa resposta transiente, oscilações em regime permanente e convergência relativamente lenta (Hock Júnior, 2015).

Esse método consiste em aplicar pequenas perturbações na tensão imposta ao sistema e, a partir disso, verificar o comportamento da variação de potência extraída do sistema. Caso a variação de potência seja positiva, a próxima variação de tensão é no mesmo sentido do aplicado. Caso a variação seja negativa, a próxima variação de tensão deve ser no sentido oposto ao aplicado.

Esse processo é repetido até o sistema chegar no ponto de MPP e então, em torno desse ponto, o sistema oscila na frequência de amostragem conforme a amplitude da oscilação. Mas, vale ressaltar, a redução na amplitude resulta em uma resposta mais lenta e maior tempo para chegar ao MPP (Esram; L., 2007).

Assim, observa-se que o método de P&O é de simples implementação, contudo há algumas deficiências:

- Devido às perturbações, o sistema não opera sempre no MPP.
- Mesmo em regime permanente, a tensão imposta possui uma oscilação.
- O sistema pode falhar em rastrear o MPP em casos de mudanças bruscas e sucessivas.

Apesar das limitações do método, sua simplicidade e a aplicação em questão compensam suas deficiências.

Na técnica de P&O, dois parâmetros precisam ser definidos. O primeiro é o período de amostragem, que corresponde ao intervalo onde a tensão e a corrente são amostradas e a referência de tensão é determinada. Esse período deve ser maior que o tempo de estabilização do sistema para evitar instabilidades no algoritmo do MPPT.

O segundo parâmetro é o tamanho da perturbação. Perturbações maiores proporcionam um rastreamento mais rápido, mas resultam em uma maior oscilação em torno do MPP. Por outro lado, perturbações menores definem um rastreamento mais lento, porém com oscilações menores.

2.5.2 Rastreamento de ponto de mínima potência

Para a minimização da potência processada pelo conversor é utilizado um método análogo ao P&O com a diferença da pretensão em obter o ponto de mínima potência (mPP, do inglês "*minimum Power Point*").

Como a potência ativa que o DSTATCOM processa é muito inferior à potência reativa, idealmente nula, opta-se por minimizar a potência reativa do conversor. Além disso, a utilização da potência aparente para a minimização também considera o conteúdo harmônico que

o conversor irá processar na presença de cargas não lineares e/ou uma rede de distribuição contaminada.

A Tabela 3 apresenta um resumo da ação do rastreamento de ponto de mínima potência (mPPT, do inglês "*minimum Power Point Traking*") e mostra que, se a potência aparente processada pelo conversor diminuir, a ação a ser tomada deve seguir a mesma direção da ação anterior. Por outro lado, se a potência aparente processada pelo conversor aumentar, a ação deve ser na direção oposta à ação anterior. Portanto, as ações são semelhantes ao MPPT, porém o objetivo é minimizar a potência aparente. Importante destacar que caso não haja um ponto de mínimo local, o código a tensão até os limites impostos pelo código, que são próximos, com uma margem de segurança, aos impostos pela ANEEL.

Tabela 3 – Lógica de ação mPPT

Sentido da potência aparente	Sentido da amplitude de tensão	Ação a ser tomada
Aumentando	Aumentando	Decrementar
Aumentando	Diminuindo	Incrementar
Diminuindo	Aumentando	Incrementar
Diminuindo	Diminuindo	Decrementar

Esta malha de controle é relativamente mais lenta que as outras malhas de controle, de forma que não haja interação e provoque instabilidade ao sistema.

2.6 VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA DA REDE

A frequência da rede elétrica é amplamente controlada pelo ONS. No entanto, devido às grandes variações nas cargas e nas diferenças de consumo e geração entre as regiões, a frequência da rede sofre oscilações em torno do ponto nominal. Isso pode ser observado por meio do projeto “MedFasee” da UFSC (UFSC, 2024), que monitora a frequência da rede em tempo real em determinados pontos. A Figura 20 mostra a frequência momentânea medida na UFSC em Florianópolis. Como apresentado, observa-se que, no momento da medição, a frequência é de 59,95 Hz.

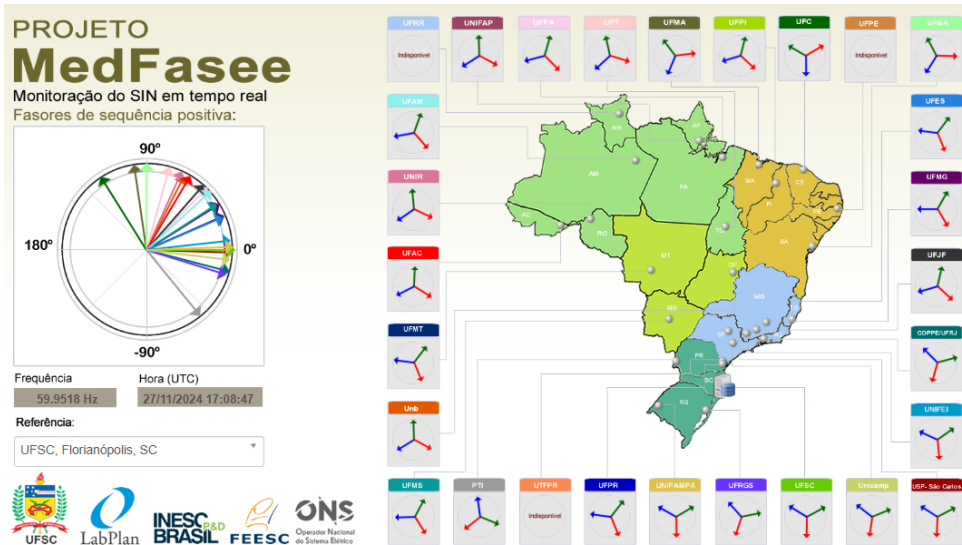
Consoante a PRODIST de 2021, o sistema de distribuição e as instalações de geração conectadas devem operar, em condições normais e em regime permanente, nos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz.

Quando ocorrem distúrbios no sistema de distribuição, as instalações de geração devem garantir que a frequência retorne à faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz no intervalo de 30 segundos após a transgressão, visando a recuperação do equilíbrio entre carga e geração.

Se houver necessidade de corte de geração ou de carga para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração durante os distúrbios, a frequência deve atender aos seguintes critérios:

- Não pode exceder 66 Hz ou ser inferior a 56,5 Hz em condições extremas.

Figura 20 – Frequência medida na UFSC de Florianópolis pelo projeto MedFasee



Fonte: (UFSC, 2024).

- Pode permanecer acima de 62 Hz por no máximo 30 segundos e acima de 63,5 Hz por no máximo 10 segundos.
- Pode permanecer abaixo de 58,5 Hz por no máximo 10 segundos e abaixo de 57,5 Hz por no máximo 5 segundos.

Essas diretrizes garantem a estabilidade do sistema e a proteção dos equipamentos conectados, assegurando a continuidade e a qualidade do fornecimento de energia elétrica.

Grande parte dos sistemas e cargas não apresentam problema devido à variação de frequência na rede. Contudo, o DSTATCOM controlado em tensão é bastante afetado, podendo até inviabilizar o seu uso. Conforme (Hock Júnior, 2015) na seção 6.3 estão apresentados os impactos que a variação de frequência na rede tem no conversor.

A variação da frequência da rede afeta o conversor de duas maneiras: gera um erro de regime estático na tensão total do barramento cc e aciona controles em forma de rampa.

A primeira implicação não prejudica o conversor, pois o erro estático pode ser minimizado pelo ganho em baixa frequência do compensador de tensão total, abordado no capítulo seguinte. Além disso, pequenos erros estáticos não comprometem a qualidade da forma de onda gerada pelo conversor.

No entanto, a ação de controle em forma de rampa tem uma consequência importante para o sistema de controle: o compensador de tensão total possui limites bem definidos para a ação de controle. Se esses limites forem ultrapassados, a ação de controle será mantida no valor máximo ou mínimo, resultando na perda de controle sobre a tensão do barramento.

Se a diferença entre as frequências for positiva, o compensador atingirá o ângulo mínimo, descarregando o barramento. Isso prejudica a forma de onda da tensão do PAC e exige que o conversor seja desconectado da rede. Quando a diferença for negativa, o compensador atingirá

o ângulo máximo, elevando a tensão no barramento, o que também resulta na desconexão do conversor da rede para proteger seus componentes.

2.6.1 Proposta de medição e correção da frequência do PAC

O método proposto está presente em (Hock Júnior, 2015) na seção 6.4 que consiste em obter as informações de frequência e fase da tensão do transformador que alimenta o ramal no qual o PAC está conectado por sensores e circuitos PLL.

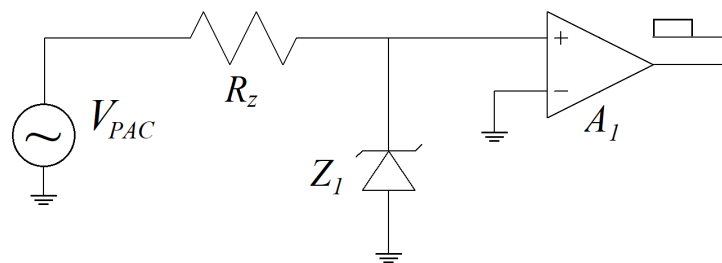
O método proposto para compensar a variação da frequência aproveita uma característica da malha de tensão total do barramento cc: quando o compensador de tensão total está compensando a diferença de frequência, a tensão no PAC tem a mesma frequência da rede elétrica. Portanto, ao medir a frequência da tensão que o conversor impõe ao PAC (ω_{PAC}), é possível determinar a frequência da rede. Atualizando a frequência do sinal de referência periodicamente, é possível mitigar o impacto da variação da frequência no sistema de controle. A Equação (24) apresenta uma representação possível para a tensão de referência, considerando as variações de frequência na rede, onde $\theta(t)$ é a variação da frequência no tempo, ω_{ref} a frequência nominal de operação e Θ a parcela constante de defasagem.

$$v_{ref} = \text{sen}([\omega_{ref} + \theta(t)]t + \Theta) \quad (24)$$

A ideia proposta é eliminar a parcela $\theta(t)$ que varia no tempo e manter apenas a parcela constante Θ .

Para medir a frequência da tensão do PAC, utiliza-se o circuito representado na Figura 21. O sinal da tensão do PAC (V_{PAC}) é grampeado por um diodo zener (Z_1) e comparado com zero pelo Amplificador Operacional (AMPOP) A_1 . A resistência R_z é definida conforme a necessidade de corrente do diodo zener. O sinal resultante é compatível com os níveis de tensão de uma porta IO do DSP.

Figura 21 – Representação simplificada PLL



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

A partir da contagem do tempo em que o sinal está em nível lógico alto ou baixo, a informação da frequência é extraída. Essa informação alimenta a rotina de geração das referências

em intervalos periódicos, onde a frequência anterior é imediatamente substituída pela frequência medida.

Este trabalho abrange apenas a parte de simulação, portanto, não há a necessidade de implementar o PLL para medir a frequência na rede. No entanto, o PLL é de extrema importância para o funcionamento do DSTATCOM por permitir considerar as variações na frequência da rede. Embora não seja necessário para esta simulação, o PLL deve ser considerado em implementações práticas, e poderia ser integrado nas simulações, se desejado.

Neste capítulo, foram apresentados os principais conceitos teóricos e modelos relacionados ao DSTATCOM e sua aplicação em redes de distribuição. A análise das características do sistema evidenciou os desafios associados à qualidade de energia e a necessidade de diferentes malhas de controle. Esses fundamentos fornecem a base para o desenvolvimento das estratégias de controle abordadas no próximo capítulo, onde será detalhada a implementação do modelo proposto.

3 PROJETO DOS CONTROLADORES

Este capítulo é destinado ao projeto das malhas de controle de tensão ca G_{vac} , tensão total do barramento cc G_{vo} e tensão diferencial do barramento cc G_{vd} , que pode ser feito baseando-se nos modelos apresentados anteriormente.

A metodologia de projeto se baseia na resposta em frequência, onde o ganho e a fase da função de transferência de malha aberta são analisados em função da frequência com o auxílio do software *MatLab*. Conforme a metodologia de projeto apresentada em (Barbi, 2007) os seguintes requisitos são necessários para garantir uma boa estabilidade e resposta dinâmica:

- Margem de fase entre 30° e 90° ;
- Inclinação da curva de ganho de malha aberta na passagem por 0 dB de -20 dB/década;
- Erro estático nulo a entrada ao degrau;
- Frequência de cruzamento por zero da curva de ganho para a função de transferência em malha aberta deve ser pelo menos quatro vezes menor do que a frequência de chaveamento;

Estes requisitos estão associados aos critérios de estabilidade da planta. Caso a margem de fase se aproxime muito de zero, o sistema passa a ter um comportamento mais oscilatório e próximo à instabilidade. Por outro lado, caso a margem de fase ultrapasse os 90° há risco do sistema ter um comportamento super amortecido e possuir má resposta dinâmica.

Os parâmetros utilizados no projeto estão presentes na Tabela 4 abaixo. Para quais, vale ressaltar que o cálculo dos componentes relacionados ao filtro *LC* e capacitância do barramento cc está calculado no capítulo 2 em “PROJETO DOS ELEMENTOS DO DSTATCOM”. Para os componentes do filtro são utilizados os valores comerciais próximos e para a capacitância do barramento cc são utilizados três capacitores de $4700 \mu\text{F}$ em paralelo.

Os valores de indutância e resistência da rede são calculados considerando uma impedância de 0,1 pu sendo 75% correspondente à indutância. Estes valores representam as não idealidades do transformador que faz a ligação entre a unidade geradora e o PAC e o memorial de cálculo está descrito no Apêndice A. Vale destacar que a indutância de magnetização e resistência do núcleo são desconsideradas devido a sua alta magnitude em comparação com as outras não idealidades. Ainda, está considerado um alimentador ideal, mas está considerado um valor alto de impedância do transformador.

Ainda, a Figura 22 apresenta, de maneira geral, as malhas de controle presentes no sistema.

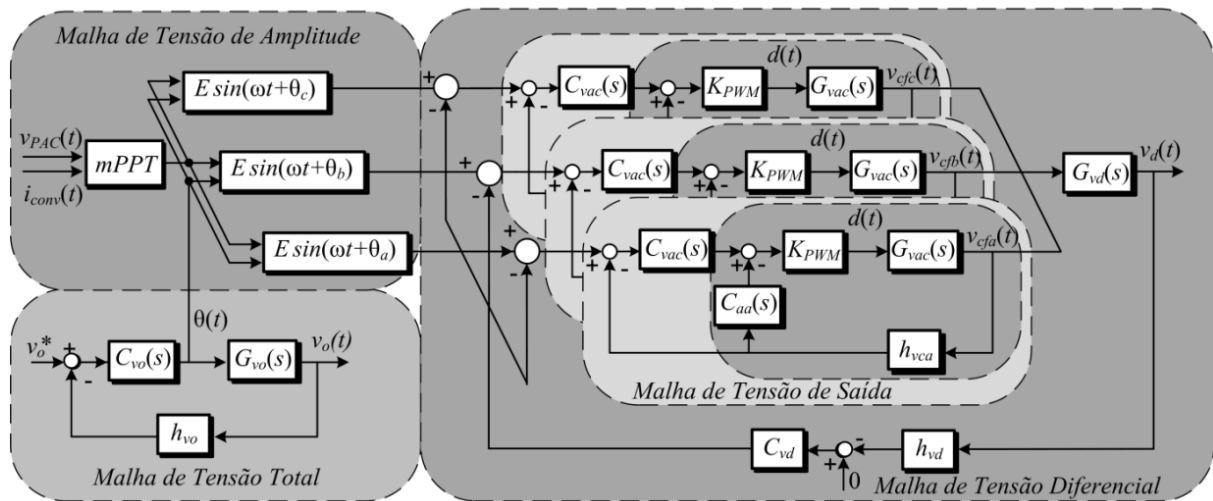
A “Malha de Tensão de Saída” é a mais interna e rápida e controla a tensão ca no PAC, nesta malha está presente o amortecimento ativo. A “Malha de Tensão Total” controla a tensão total do barramento cc e a ação de controle é sobre o ângulo de defasagem entre a tensão do PAC e do alimentador. A “Malha de Tensão Diferencial” atua inserindo um nível cc na tensão

Tabela 4 – Elementos que compõem DSTATCOM

Potência Nominal do DSTATCOM	30 kVA 3 Φ
Tensão do Barramento cc	800 V
Tensão Eficaz de Entrada	220 V
Frequência da Rede	60 Hz
Frequência de Comutação	20 kHz
Capacitância do Filtro LC	50 μ F
Indutância no Lado da Rede	962,9 μ H
Resistência no Lado da Rede	0,121 Ω
Indutância no Lado do Conversor	560 μ H
Capacitância Equivalente do Barramento cc	7,05 mF
Ganho do Sensor de Tensão do Barramento cc	1/100
Ganho do Sensor de Tensão ca de Entrada	1/100
Ganho do Modulador PWM	1/20

Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Figura 22 – Malhas de controle — DSTATCOM



Fonte: (Hock Júnior, 2015) Capítulo 5.

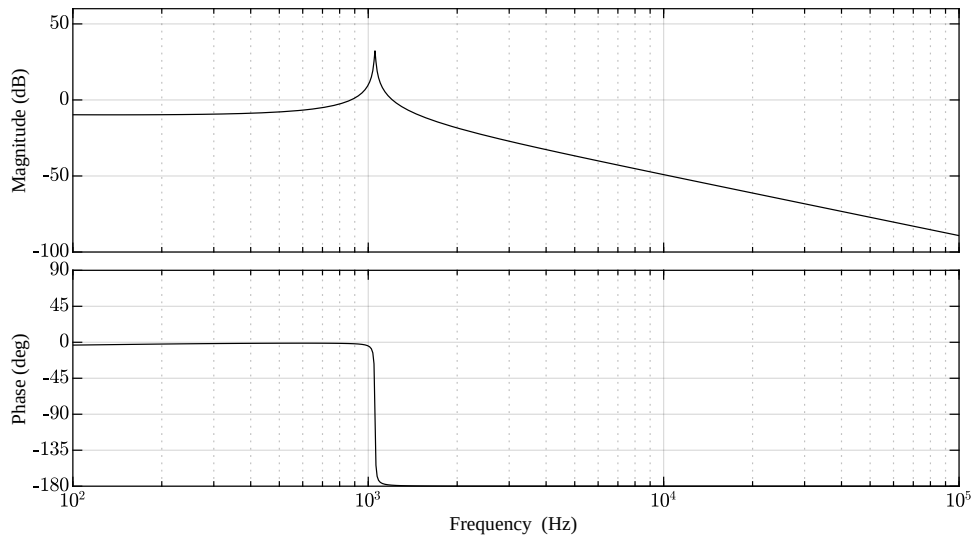
de referência da “Malha de Tensão de Saída. Por fim, a “Malha de Tensão de Amplitude” é responsável pela geração do sinal de referência do PAC e nessa está incorporado o algoritmo de mPPT.

3.1 PLANTA DE TENSÃO CA

O modelo matemático que representa o comportamento de pequenos sinais da planta de tensão ca em função da razão cíclica é uma função de terceira ordem, contendo 2 polos complexos conjugados e um zero. Utilizando os parâmetros estabelecidos há uma sobreposição entre o zero e o polo real que está em uma frequência aproximada de 60 Hz. Dessa forma,

predomina a dinâmica do par de polos complexos conjugados presente na frequência de 1,05 kHz. A Figura 23 apresenta a resposta em frequência de malha aberta da tensão ca. vale ressaltar que está sendo considerado o ganho do sensor (*hvac*) e o ganho do PWM (KPWM) junto à planta.

Figura 23 – Resposta em frequência de malha aberta — tensão ca



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Através do diagrama de bode é possível observar que na frequência dos polos ocorre o fenômeno de ressonância e como o DSTATCOM pode ser conectado a qualquer tipo de rede, diferentes combinações de resistência e impedância de rede levam a diferentes pontos em que ocorre o fenômeno da ressonância.

A presença de um pico de ressonância e uma queda abrupta de fase na planta de tensão ca representa desafios significativos no projeto do controlador de tensão ca. Para mitigar esses problemas, uma malha de controle adicional é introduzida no sistema, focada em amortecer o pico de ressonância da planta de tensão ca (Hock Júnior, 2015).

3.1.1 Amortecimento ativo

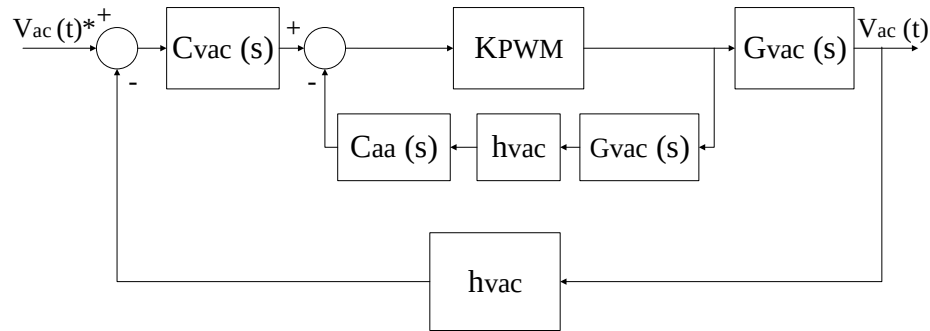
Na saída do conversor, devido à impedância da rede de distribuição, há um filtro *LCL* equivalente. O filtro *LCL* é um passa-baixa de terceira ordem que, em comparação com os filtros *L* e *LC*, apresenta boa atenuação dos harmônicos próximos à frequência de comutação, obtida com menores valores de indutância. Isso resulta na redução do volume dos indutores do filtro de entrada do conversor. No entanto, devido à interação entre os elementos armazenadores de energia que compõem o filtro *LCL* e as próprias impedâncias do sistema de alimentação, ocorre o fenômeno de ressonância. A ressonância do filtro *LCL* pode tornar o sistema instável ou fazer com que opere em uma região próxima à instabilidade (Nishioka, 2011).

Então, a técnica de amortecimento ativo é empregada de forma que o sistema seja estável em qualquer ponto de operação. Assim, mesmo que haja uma oscilação no barramento cc na

frequência de ressonância, o sistema tende a estabilidade.

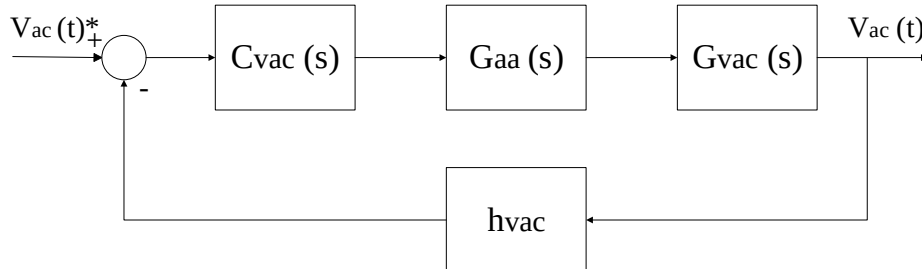
A técnica adotada está apresentada em (Nishioka, 2011), na qual é utilizado um compensador em avanço. O diagrama de blocos que representa o funcionamento está apresentado na Figura 24 e na Figura 25 está apresentada a dinâmica de malha fechada da ação de amortecimento ativo.

Figura 24 – Diagrama de blocos do controle de tensão ca com amortecimento ativo



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Figura 25 – Diagrama de blocos do controle de tensão ca — dinâmica em malha fechada do compensador de amortecimento ativo



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

A estrutura de um compensador em avanço é composta por um ganho, um polo e um zero. A Equação (25) apresenta a função de transferência, na qual k_{aa} é o ganho e β é uma constante calculada a partir do máximo avanço de fase.

$$C_{aa} = k_{aa} \cdot \frac{T_d \cdot s + 1}{\beta \cdot T_d \cdot s + 1} \quad (25)$$

O valor de β por ser calculado pela Equação (26), onde ϕ_{max} é o máximo avanço de fase especificado.

$$\beta = \frac{1 - \sin(\phi_{max})}{1 + \sin(\phi_{max})} \quad (26)$$

Ainda, T_d é calculado a partir da frequência em que ocorre o máximo avanço f_{max} e pela constante β . Assim, T_d é dado pela Equação (27) abaixo.

$$T_d = \frac{1}{2\pi \cdot f_{max} \cdot \sqrt{\beta}} \quad (27)$$

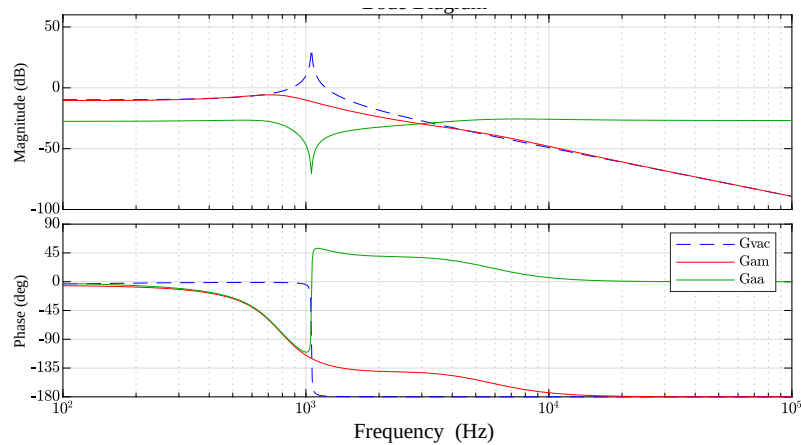
Em (Nishioka, 2011) é apresentada uma avaliação da influência de cada parâmetro no compensador. Com base nisso, optou-se por utilizar um compensador de avanço com dois estágios idênticos ϕ_{max} de 60° , k_{aa} de 0,51 e f_{max} sendo f_{ress} do filtro LCL equivalente.

A partir desses valores, obtém-se a função de transferência do compensador, apresentada na Equação (28).

$$C_{aa} = 50,458 \cdot \frac{(s + 1768)^2}{(s + 24620)^2} \quad (28)$$

A Figura 26 apresenta o diagrama de Bode da planta sem amortecimento ativo (G_{vac}), do compensador de amortecimento ativo (G_{aa}) e a planta com amortecimento ativo (G_{am}). Vale ressaltar que em G_{vac} está incorporado o ganho do sensor h_{vac} e o ganho do PWM. Já para G_{am} o ganho do PWM está incorporado em G_{aa} , dessa forma, G_{am} apresenta apenas o ganho do sensor h_{vac} .

Figura 26 – Diagrama de bode — amortecimento ativo



Fonte: Elaborada pelo Autor(2024).

Na Figura 26 observa-se que o compensador ativo está atenuando o efeito de ressonância que está presente em G_{vac} e não altera a dinâmica da planta em outros pontos.

3.1.2 Compensador tensão ca

Para o projeto do compensador de tensão ca é considerada a dinâmica de malha fechada do amortecimento ativo, conforme a Figura 25 apresentada na subseção anterior.

O compensador escolhido para compor a malha de controle de tensão ca é um compensador do tipo Proporcional Integral Derivativo (PID) mais polo, que possui um ganho, dois zeros, um polo na origem (integrador) e outro polo fora da origem. Sua função de transferência está

apresentada na Equação (29) abaixo, onde k_{pid} é o ganho ajustado para obter a frequência de cruzamento por zero desejada, z_{pid1} e z_{pid2} são a posição dos zeros em rad/s e p_{pid} a posição do polo, também, em rad/s.

$$C_{pid} = k_{pid} \cdot \frac{(s + z_{pid1}) \cdot (s + z_{pid2})}{s(s + p_{pid})} \quad (29)$$

O polo na origem fornece ao sistema alto ganho em baixas frequências, consequentemente, adiciona a característica de erro nulo para uma entrada do tipo degrau, enquanto o segundo polo auxilia na rejeição de ruído em alta frequência. Por fim, os zeros são posicionados antes da frequência de cruzamento por zero pretendida para garantir que a função de transferência da tensão ca possua inclinação de -20 dB/década na passagem por 0 dB. Dessa forma, todos os critérios (Barbi, 2007) para boa estabilidade e resposta dinâmica são atingidos.

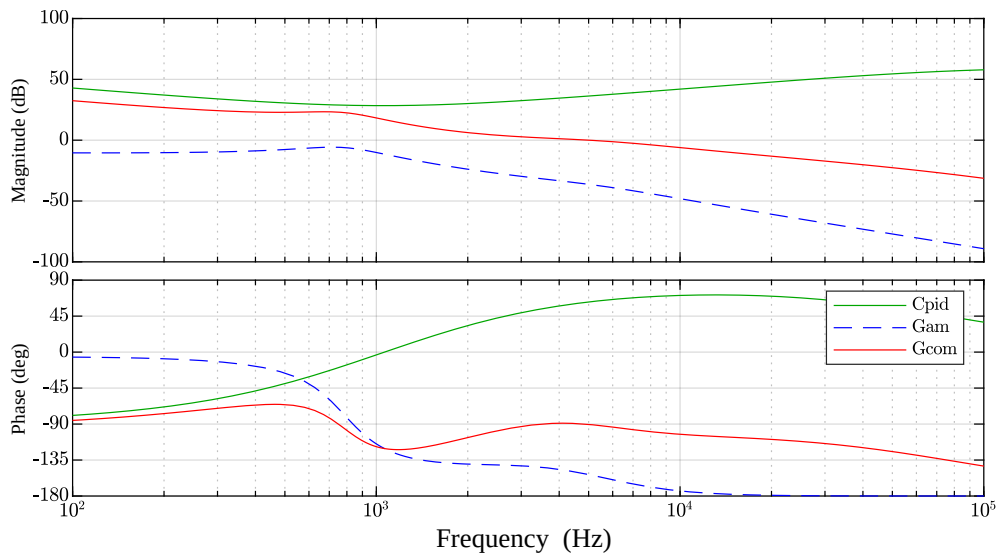
Assim, para esse trabalho os zeros são alocados em $1,05$ kHz e o polo 80 kHz (quatro vezes a frequência de comutação). Para que a frequência de cruzamento por zero seja em 5 kHz o ganho escolhido é de 1000 .

Dessa forma, a Equação (30) apresenta o compensador obtido, o qual possui frequência de cruzamento por zero em 5 kHz, sendo o alvo $1/4$ da frequência de comutação, e margem de fase de $89,4^\circ$.

$$C_{pid} = 1000 \cdot \frac{(s + 2\pi \cdot 1050)^2}{s(s + 2\pi \cdot 80000)} \quad (30)$$

A Figura 27 apresenta o diagrama de bode do compensador (C_{pid}), da planta com amortecimento ativo (G_{am}) e a malha da de tensão ca compensada (G_{com}). Nesse caso, o ganho do sensor h_{vac} está sendo considerado em G_{am} e G_{com} .

Figura 27 – Diagrama de bode — malha de tensão ca



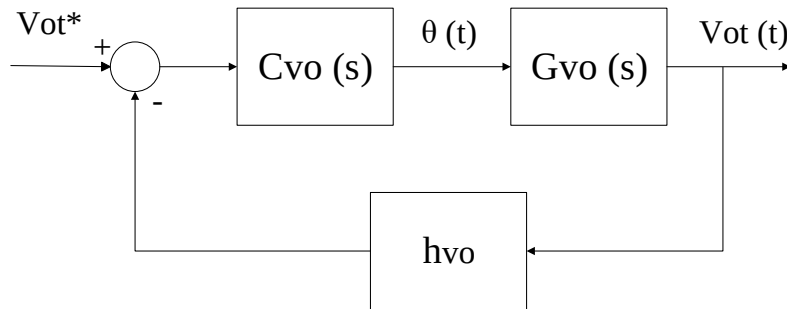
Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

3.2 PLANTA DE TENSÃO TOTAL DO BARRAMENTO CAPACITIVO

O modelo para a planta de tensão total do barramento capacitivo está apresentado na Equação (22). A planta consiste em um polo na origem com um ganho resultante dos parâmetros da rede de distribuição e do DSTATCOM. É extremamente importante destacar que a tensão total varia inversamente com a variação do ângulo da tensão aplicada ao PAC.

A Figura 28 apresenta o diagrama de blocos desta malha de controle. É importante ressaltar que a ação de controle é sobre o ângulo de defasagem da tensão aplicada no PAC.

Figura 28 – Diagrama de blocos — malha de tensão total do barramento



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

O compensador escolhido para compor a malha de controle de tensão total do barramento cc é um compensador do tipo Proporcional Integral (PI) mais polo. A função de transferência está apresentada na Equação (31) abaixo, onde k_{vo} é o ganho do compensador, z_{vo} é a posição do zero e p_{vo} a posição do polo.

$$C_{vo} = k_{vo} \cdot \frac{s + z_{vo}}{s(s + p_{vo})} \quad (31)$$

A malha de controle da tensão total do barramento cc deve ser suficientemente mais lenta que a malha de tensão ca, de forma que não haja distorção no formato de onda imposto pelo DSTATCOM. Além disso, deve ser mais lenta, também, que a frequência de oscilação natural do barramento cc. Se a malha de tensão total do barramento cc possui uma banda passante próxima à frequência de oscilação de tensão do próprio barramento, a ação de controle do compensador apresenta oscilações. Essas oscilações, ao longo de um ciclo da rede, aumentam e diminuem a frequência do sinal de referência para a malha de tensão ca, causando distorções e degradando a qualidade da tensão sintetizada no PAC (Hock Júnior, 2015). Na topologia trifásica, a frequência de oscilação natural esperada é de 360 Hz, definindo a frequência máxima de cruzamento por zero em 36 Hz. Neste projeto, o compensador é projetado com frequência de cruzamento por zero em 32 Hz, garantindo uma pequena margem e bom funcionamento.

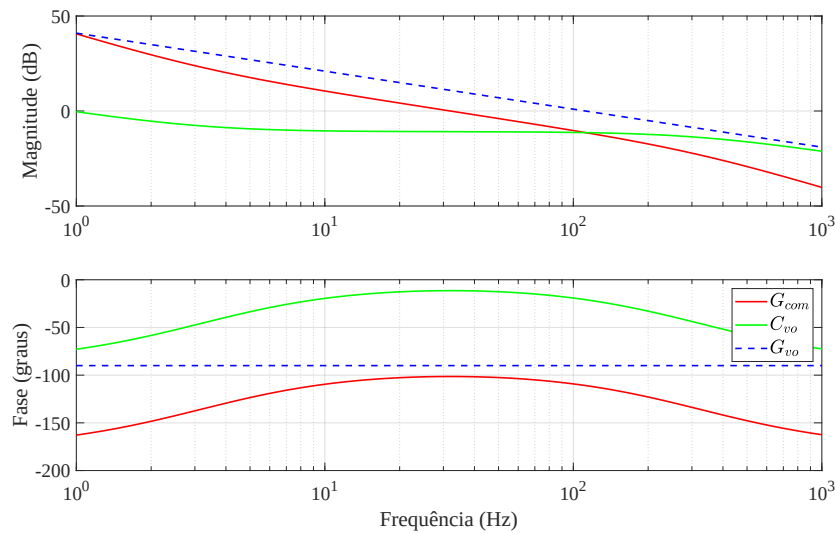
O zero do compensador é posicionado antes da frequência de cruzamento por zero, permitindo que a função de transferência apresente uma inclinação de -20 dB/década nesse ponto e assegure a margem de fase adequada. Ainda, o polo é posicionado uma década acima da

frequência de cruzamento por zero, que aumenta a atenuação para altas frequências. Assim, a função de transferência desse compensador está apresentada na Equação (32).

$$C_{vo} = 575 \cdot \frac{s + 2\pi \cdot 3,2}{s(s + 2\pi \cdot 320)} \quad (32)$$

A Figura 29 apresenta o diagrama de bode do compensador (C_{vo}), da planta de tensão total do barramento de capacitores (G_{vo}) e a malha de tensão total compensada (G_{com}).

Figura 29 – Diagrama de bode — malha de tensão total do barramento

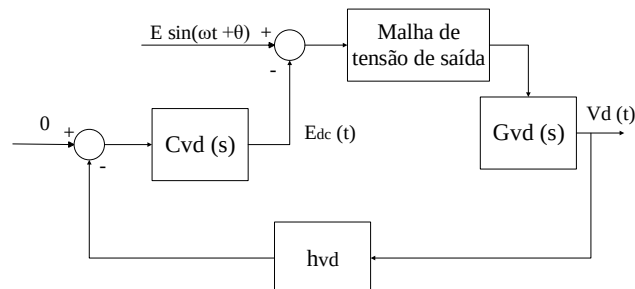


Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

3.3 PLANTA DE TENSÃO DIFERENCIAL DO BARRAMENTO CAPACITIVO

O modelo para a planta de tensão total do barramento capacitivo está apresentado na Equação (23). O comportamento é parecido com a planta de tensão total, ou seja, consiste em um polo na origem com um determinado ganho. O controle para essa planta é feito adicionando um nível cc a tensão imposta ao PAC e está representado no diagrama de blocos na Figura 30 abaixo.

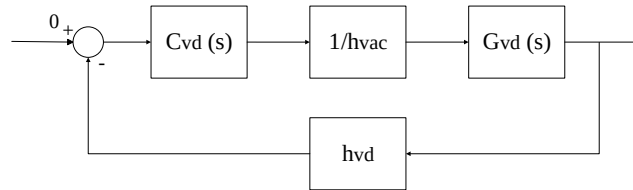
Figura 30 – Diagrama de blocos — malha de tensão diferencial do barramento



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

A malha de tensão diferencial é projetada para ser significativamente mais lenta que a malha de tensão ca, de forma que não haja interação entre as malhas. Dessa forma, a malha de tensão ca pode ser substituída por um ganho que equivale ao inverso do ganho do sensor de medição de tensão ca. Assim, a Figura 31 abaixo apresenta o diagrama de blocos referência para o projeto do controle.

Figura 31 – Diagrama de blocos — malha de tensão diferencial do barramento



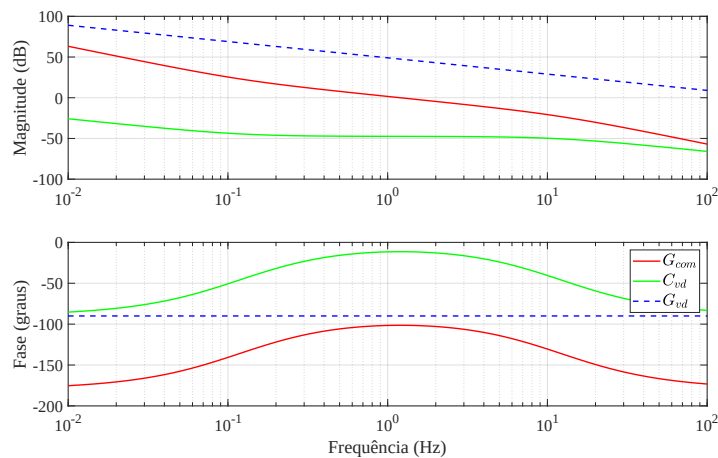
Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

O compensador escolhido para essa malha é do tipo proporcional integral mais polo. A frequência de cruzamento por zero da malha está ajustada para 1,2 Hz, consequentemente o zero do compensador é alocado uma década abaixo (0,12 Hz) e o polo uma década acima (12 Hz). Assim, a Equação (33) apresenta o compensador da malha tensão diferencial do barramento cc, onde a frequência de cruzamento por zero da malha de tensão diferencial é de 1,198 Hz e margem de fase 78,6°.

$$G_{vd}(s) = 0,32 \cdot \frac{s + 0,12 \cdot 2\pi}{s(s + 12 \cdot 2\pi)} \quad (33)$$

Por fim, o diagrama de bode da malha de tensão (C_{vo}), compensador da malha (C_{vd}) e a malha compensada (G_{com}) está apresentado na Figura 32 abaixo.

Figura 32 – Diagrama de bode — malha de tensão diferencial do barramento



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

4 SIMULAÇÕES

Este capítulo é dedicado para as simulações realizadas para validar o projeto e verificar o funcionamento das malhas de controle e da funcionalidade do filtro ativo paralelo para a correção do fator de potência.

As simulações foram realizadas no *PSIM* e os dados foram tratados no *MatLab*. Ainda, todos os componentes são considerados ideais, assim, têm-se as principais considerações, conforme abaixo.

- Diodos ideais: não há queda de tensão no período de condução, resistência de condução nula, tempo de entrada condução nulo, tempo de bloqueio nulo e corrente de bloqueio nula.
- Chaves ideais em entrada de condução e bloqueio: condução instantânea com o comando, assim como o bloqueio. Contudo, importante destacar que é considerado uma queda de tensão de condução de 3 V, resistência de condução 4,8 m Ω e resistência do diodo da chave 1 m Ω .
- Capacitores ideais: não há a presença da Resistência Série Equivalente (RSE), que eleva a ondulação de tensão.
- AMPOPs ideais: ganho em malha aberta infinito, *offset* nulo e corrente entre os terminais positivo e negativo nulo. Contudo, há a saturação, definida conforme a necessidade.
- Componentes passivos ideais: não presença de resistência/capacitância/indutância parasita nos componentes passivos do circuito.
- Barramento infinito: A tensão da unidade geradora não se altera conforme as cargas do sistema e frequência do sistema constante em 60 Hz.

Como exigência de projeto, o sistema deve atender a Resolução Normativa ANEEL n.º 956/2021 (PRODIST) e as práticas recomendadas apresentadas na IEEE 519–22.

Antes de apresentar os requisitos mínimos apresentados pelas normas, é necessário expor os indicadores de distorção harmônica, explicitados na Tabela 5, definidos na PRODIST.

Tabela 5 – Indicadores de distorções harmônicas

DITh%	Distorção harmônica individual de tensão de ordem h
DTT%	Distorção harmônica total de tensão
DTTp%	Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3
DTTi%	Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3
DTT3%	Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3

Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Na PRODIST, os requisitos mínimos são definidos para 1008 leituras válidas. Contudo, como não há diferença entre as simulações e as cargas são fixas, são analisados os valores de uma simulação.

Assim, a PRODIST define o menor fator de potência aceitável, indutivo ou capacitivo, entre 0,92 e 1,00. Para a distorção harmônica, o controle deve ser realizado sobre a tensão no PAC e deve seguir os valores apresentados na Tabela 6 .

Tabela 6 – Limites para os indicadores de distorções harmônicas

Indicador	Tensão nominal $\leq 2,3 \text{ kV}$
DTT%	10,0%
DTTp%	2,5%
DTTi%	7,5%
DTT3%	6,5%

Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Para a IEEE 519–22, há limites impostos tanto para a distorção harmônica na corrente quanto para a tensão. Em relação à tensão, para valores abaixo de 1,0 kV, basta que a TDH não ultrapasse 8,0% e, individualmente, a TDH de cada harmônico não supere 5,0%, ou seja, $V_h/V_1 \leq 0,05$, onde V_1 é a amplitude da fundamental da tensão e V_h é a amplitude do harmônico h da tensão. Em relação à corrente, é necessário conhecer a relação entre a corrente de curto-circuito trifásico $I_{cc3\Phi}$ e corrente nominal I_n . Considerando o pior caso, isto é, a potência de carga nominal é o máximo que o transformador pode suportar, obtém-se a relação $I_{cc3\Phi}/I_n$ conforme apresentado abaixo, que está calculado utilizando pu.

$$\frac{I_{cc3\Phi}}{I_n} = \frac{|V_{pu_r}|/|Z_{pu_r}|}{|V_{pu_r}|/(|1 + Z_{pu_r}|)} = \frac{1}{|Z_{pu_r}|} = 10 \quad (34)$$

Com essa relação, seguem os valores máximos para a TDH da corrente que circula pelo transformador conforme a IEEE 519–22 na Tabela 7. Além dos valores apresentados na Tabela 7 a TDH total não deve ultrapassar os 5%.

Tabela 7 – Limites dos harmônicos de corrente

$I_{cc3\Phi}/I_n$	Limite dos Harmônicos (%)				
	$2 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3

Fonte: Elaborada pelo Autor(2024).

Ainda, há outro indicador estabelecido pela PRODIST para garantir boa qualidade energética que representa o desequilíbrio de tensão entre as fases no PAC chamado Fator de Desequilíbrio de Tensão (FD%) sendo calculado a partir da amplitude da tensão eficaz de sequência negativa na frequência fundamental (V^-) e da amplitude da tensão eficaz de sequência

positiva na frequência fundamental (V^+) conforme a Equação (35) .

$$FD\% = \frac{V^-}{V^+} \cdot 100 \quad (35)$$

As tensões V^+ , V^- e de sequência zero (V^0) são calculadas pela matriz dada abaixo. Importante destacar que “ a ” equivale ao fasor $1\angle 120^\circ$.

$$\begin{bmatrix} V^0 \\ V^+ \\ V^- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}$$

Assim, é possível calcular V^+ e V^- a partir das tensões de cada fase do PAC conforme abaixo. Esse valor não deve ultrapassar 3% para tensões nominais menores que 1 kV.

$$V^+ = \frac{1}{3}(V_a + aV_b + a^2V_c) \quad (36)$$

$$V^- = \frac{1}{3}(V_a + a^2V_b + aV_c) \quad (37)$$

Assim, os critérios de avaliação estão definidos e há condições de mensurar a funcionalidade do FAP para a correção do fator de potência.

4.1 CIRCUITO SIMULADO

O circuito é composto por 4 partes principais, que correspondem a: topologia do sistema (inclui DSTATCOM, cargas e rede), malha de controle de tensão ca do PAC, malha de controle de tensão do barramento de capacitores e malha de minimização da potência aparente.

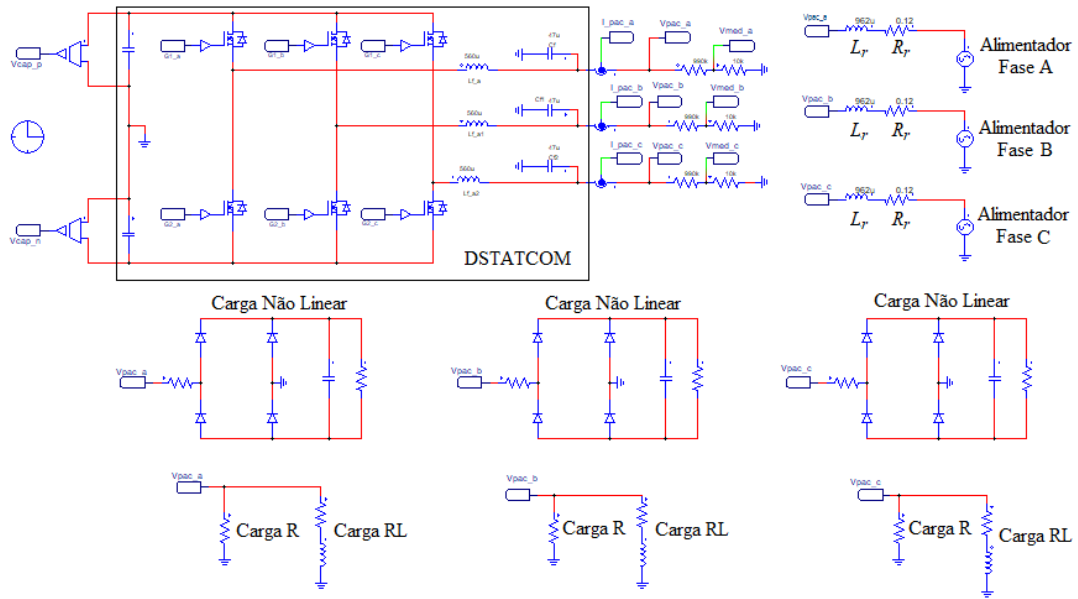
A Figura 33 apresenta a topologia de estudo de uma maneira bem ampla, enquanto a Figura 34 apresenta a topologia para apenas uma fase, sendo possível observar os detalhes da estrutura.

As cargas estão discutidas de forma mais detalhada na próxima sessão. De maneira sucinta, as cargas são uma composição de cargas resistivas, indutivas e não lineares.

A Figura 35 apresenta a malha de tensão ca do sistema e a Figura 36 apresenta apenas para uma das fases, com mais detalhes.

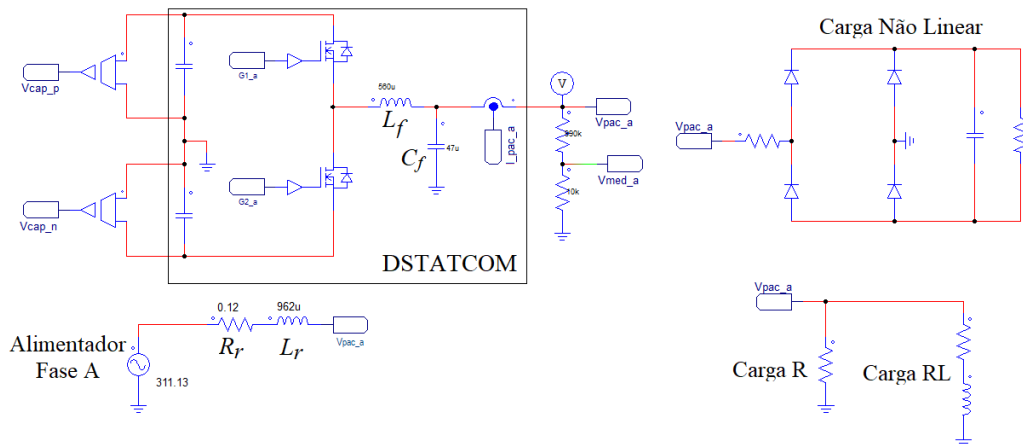
Alguns detalhes da Figura 36 são importantes evidenciar. Inicialmente, o bloco para a geração da referência é o *Math Function* do PSIM que possui as seguintes entradas: saída mPPT, frequência imposta com uma fonte cc, saída da malha de tensão total do barramento cc (θ) com a defasagem sendo o negativo da ação de controle da malha de tensão total. Ainda, vale destacar que o nível cc (E_{dc}), resultado da malha de controle de tensão diferencial do barramento, é aplicado na referência. Por fim, o compensador de amortecimento ativo (C_{aa}) é aplicado na ação de controle com sinal negativo.

Figura 33 – Circuito simulado — topologia



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Figura 34 – Circuito simulado — topologia fase A

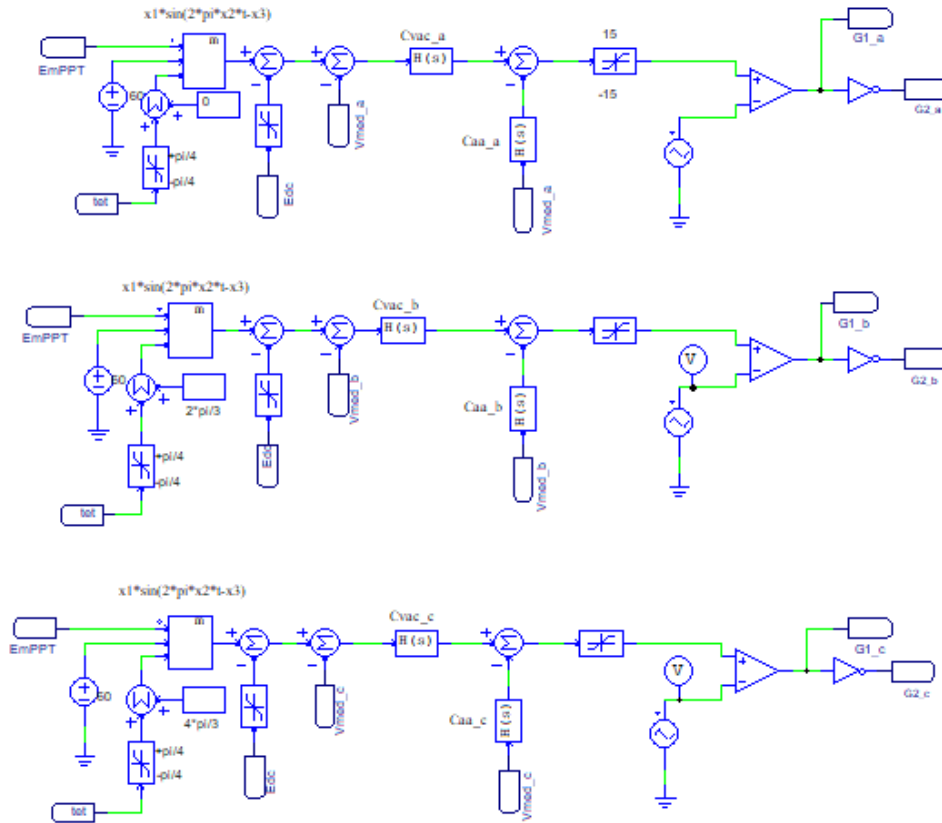


Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

A Figura 37 apresenta a malha de controle da tensão do barramento de capacitores.

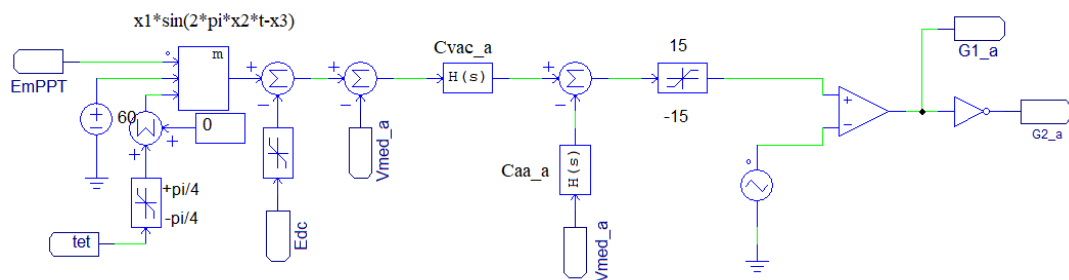
Por fim, a Figura 38 apresenta o mPPT. O código utilizado para o mPPT está presente no Apêndice C e o código para medição das potências processadas pelo conversor está presente no Apêndice B

Figura 35 – Circuito simulado — malha de controle tensão ca



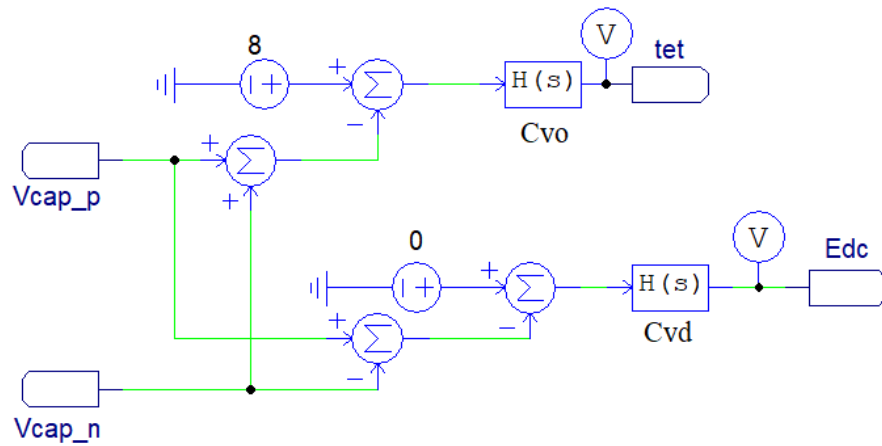
Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Figura 36 – Circuito simulado — malha de controle tensão ca da fase A



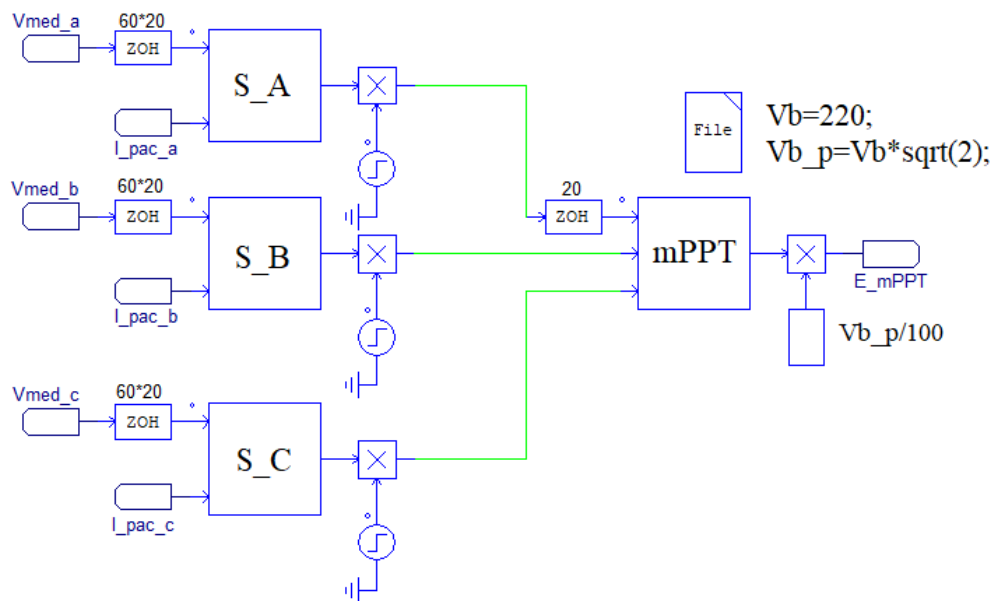
Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Figura 37 – Circuito simulado — malha de controle tensão do barramento de capacitores



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Figura 38 – Circuito simulado — malhas de controle de potência processada pelo conversor



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

4.2 OPERAÇÃO DO SISTEMA SEM DSTATCOM

Esta sessão é destinada às simulações das cargas com o DSTATCOM desconectado do PAC. Estão apresentadas as simulações com carga resistiva, cargas mistas com quantidade razoável de carga não linear e cargas mistas com predominância de carga não linear.

O cálculo de cada perfil de carga está detalhado no Apêndice D. Além disso, as especificações das cargas e os parâmetros da rede adotados para os cálculos estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Especificações de carga e parâmetros da rede

Potência Nominal Transformador	30 kVA 3 Φ
Potência Carga Puramente Resistiva	10 kW 1 Φ
Potência Carga Mista Leve - Carga R	3 kW 1 Φ
Potência Carga Mista Leve - Carga RL	3 kVA 1 Φ
Potência Carga Mista Leve - Carga Não Linear	3 kVA 1 Φ
Potência Carga Mista Pesada - Carga R	2 kW 1 Φ
Potência Carga Mista Pesada - Carga RL	2 kVA 1 Φ
Potência Carga Mista Pesada - Carga Não Linear	5 kVA 1 Φ
Tensão Eficaz de Entrada	220 V
Frequência da Rede	60 Hz
Indutância no Lado da Rede	962,9 μ H
Resistência no Lado da Rede	0,121 Ω

Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

4.2.1 Carga resistiva

As resistências para a simulação são cargas equivalentes a uma potência de 10 kW por fase e, para o cálculo, é desconsiderada a queda de tensão devido à impedância da rede. Segue abaixo o equacionamento da carga resistiva, onde R_c é a resistência de carga por fase.

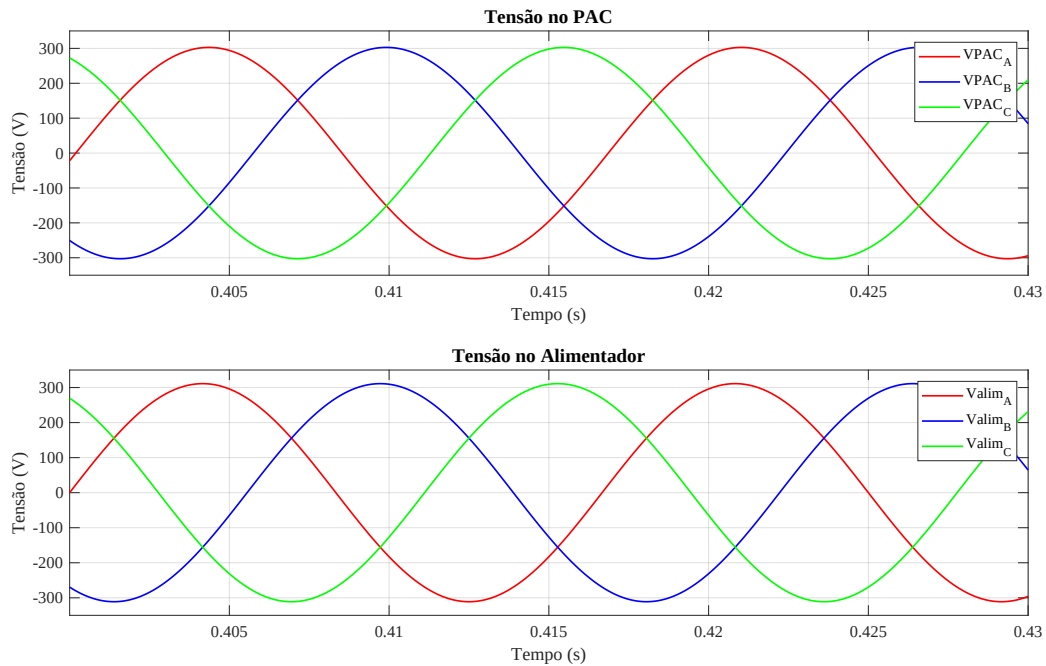
$$R_c = \frac{V_r^2}{10k} = \frac{220^2}{10000} = 4,84 \Omega \quad (38)$$

Para essa carga, o resultado da simulação está presente na Figura 39 .

Nesse caso, há uma pequena queda de tensão devido à impedância da rede, dessa forma, a tensão eficaz no PAC é de 214,11 V enquanto a do alimentador é de 220 V. Além disso, há uma defasagem entre as tensões causada pela indutância entre a unidade geradora e o PAC. Vale destacar que, por consequência, a potência aparente consumida pelas cargas é um pouco abaixo do valor projetado (em torno de 2,8 KVA para cada tipo de carga) devido a essa queda de tensão.

Por fim, como não há não linearidades nesse tipo de carga, a corrente que circula pelo alimentador é puramente senoidal, dessa forma, o fator de potência é apenas influenciado pela defasagem entre a corrente e a tensão. Para essa carga, o valor para o fator de potência para a rede encontrado é de 0,997. Ainda, a potência aparente gerada pelo gerador é de 9,73 kVA e a potência ativa 9,70 kW.

Figura 39 – Tensões no PAC em comparação com as tensões do alimentador - carga resistiva sem DSTATCOM



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

4.2.2 Carga mista - carga não linear leve

Entre as diversas possibilidades de cargas não lineares, a mais comum em sistemas de distribuição de baixa tensão — como os encontrados em consumidores residenciais e pequenos estabelecimentos comerciais — é o retificador monofásico com filtro capacitivo.

Uma normativa relevante para o contexto de dispositivos como o DSTATCOM é a IEC 62040-1-1, que estabelece critérios de teste para inversores de tensão, incluindo o comportamento frente a cargas não lineares (IEC62040-1-1, 2019). A norma também apresenta a metodologia de projeto dos componentes do retificador, detalhada pelas Equações (39) à (42), onde V_c é a tensão no capacitor, R_{ret} é a resistência de carga, R_s a resistência de entrada do retificador, S_{ret} a potência aparente do retificador e C_{ret} o capacitor de saída.

$$V_c = 1,22 \cdot V_r \quad (39)$$

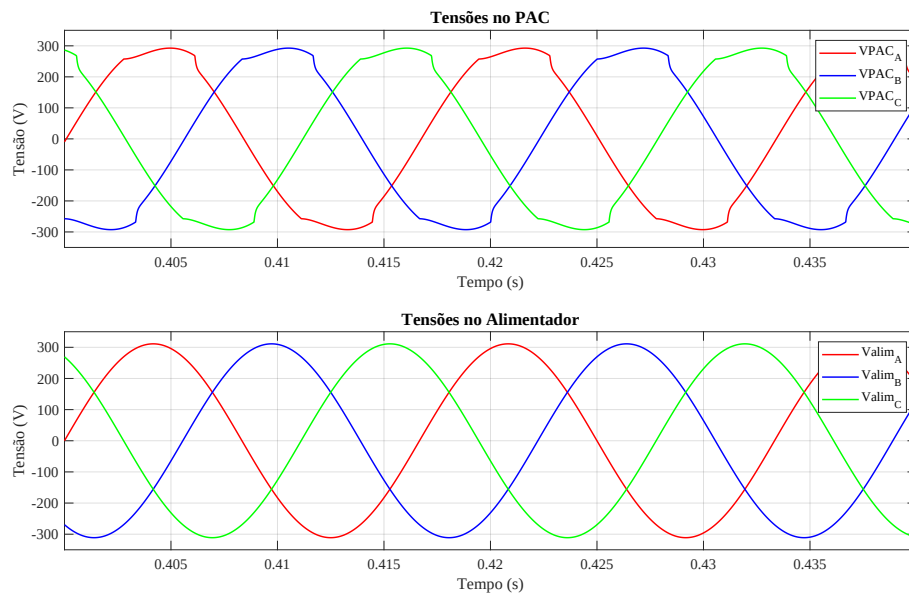
$$R_s = 0,04 \frac{V_c^2}{S} \quad (40)$$

$$R_{ret} = \frac{V_c^2}{0,66 \cdot S} \quad (41)$$

$$C_{ret} = \frac{7,5}{f_r \cdot R_{ret}} \quad (42)$$

Para carga mista com carga não linear leve são projetadas as cargas de cada fase. É definido 3 kVA ($0,3 \text{ pu}$) de carga não linear, 3 kW ($0,3 \text{ pu}$) de carga resistiva e 3 kVA ($0,3 \text{ pu}$) de carga RL com fator de potência 0,7, totalizando 9 kVA ($0,9 \text{ pu}$) de carga somada em cada fase. Para um sistema com essa característica, segue na Figura 40 as formas de onda de tensão no PAC em comparação com o alimentador. A tensão eficaz da tensão do PAC para essa simulação é de 215,48 V.

Figura 40 – Tensões no PAC em comparação com as tensões do alimentador sem DSTATCOM - carga não linear leve



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Nesse caso, é nítida a distorção na tensão do PAC que o retificador monofásico causa, onde a tensão no PAC possui uma TDH de 5,37% que se adequa a IEEE 519-22, mas está muito próxima ao limite. Nesse caso, é necessário analisar o conteúdo harmônico para verificar se a tensão está adequada aos indicadores da Tabela 6, contudo é analisada a corrente para verificar a qualidade da energia que circula pela rede.

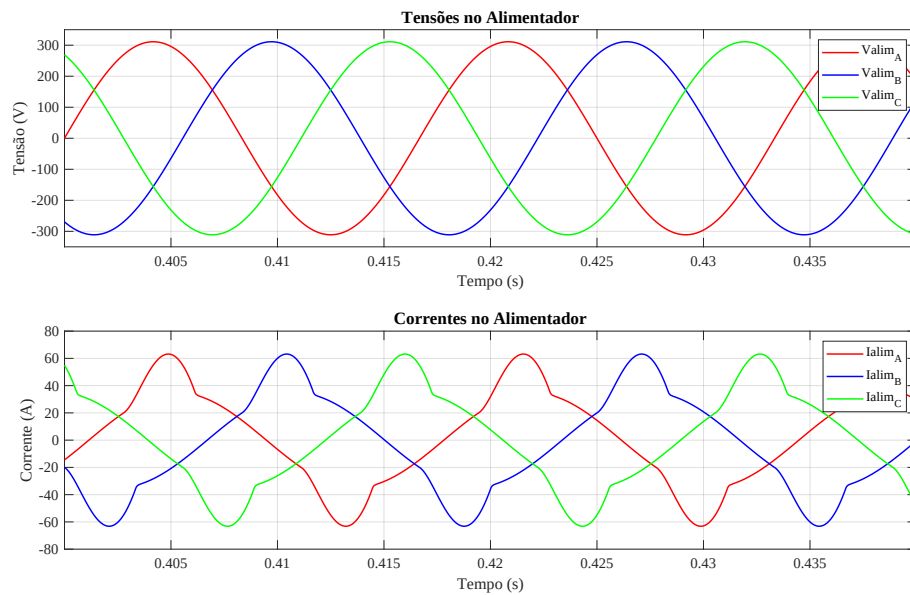
As correntes que circulam pelo transformador estão presentes na Figura 41. Os valores eficazes das correntes do alimentador são de 34,84 A, que correspondem a uma perda de 145,68 W na resistência da rede.

Sob tal condição, a corrente apresenta alto conteúdo harmônico com uma TDH de 24,11% infringindo a máxima TDH para a corrente de 5%, segundo a IEEE 519-22. Portanto, sobre esse critério, a carga não está adequada para ser conectada à rede diretamente.

A Figura 42 apresenta as correntes para cada carga. É importante destacar que essas correntes somadas resultam na corrente que circula pelo transformador.

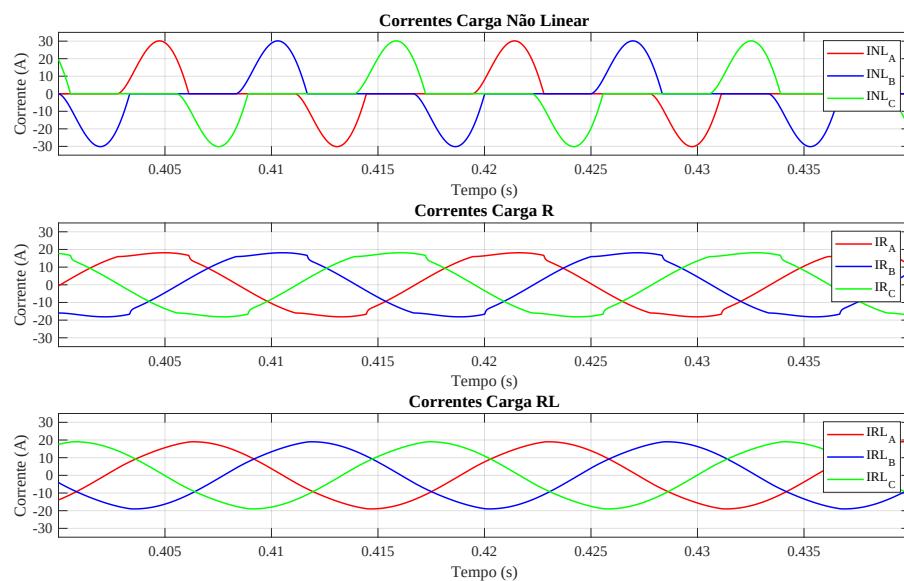
Ainda, a potência aparente medida no alimentador da fase A é de 7,66 kVA e potência ativa medida de 6,94 kW resultando em um fator de potência de 0,889. Como o sistema está equilibrado, as diferenças de potência ativa e reativa entre as fases são desprezíveis, sendo

Figura 41 – Correntes alimentador em comparação com as tensões do PAC - carga não linear leve sem DSTATCOM



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Figura 42 – Correntes de cargas separadas - carga não linear leve sem DSTATCOM



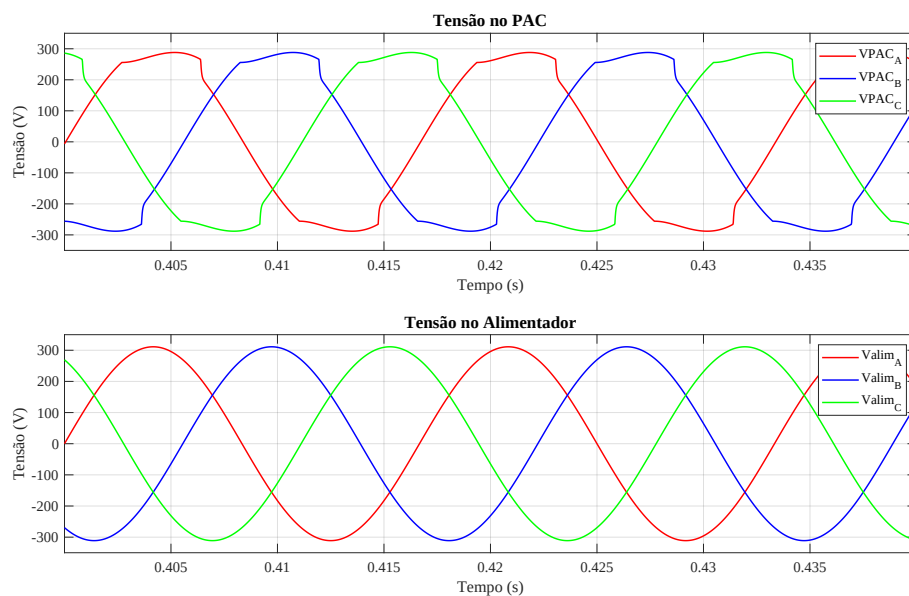
Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

consideradas iguais. Assim, é evidente a importância de não observar apenas o fator de potência em uma análise de qualidade de energia, pois, nesse caso, a carga está um pouco abaixo do 0,92 exigido pela PRODIST. Contudo, ao analisar outros parâmetros, é evidente que se faz necessário tomar alguma ação para corrigir a qualidade da energia processada pela rede.

4.2.3 Carga Mista - Carga Não Linear Pesada

Para carga mista com carga não linear pesada, é definido 5 kVA ($0,5 pu$) de carga não linear, 2 kW ($0,2 pu$) de carga resistiva e 2 kVA ($0,2 pu$) de carga RL com fator de potência 0,7, totalizando 9 kVA ($0,9 pu$) de carga somada em cada fase. Novamente, o projeto para a carga não linear está presente nas Equações (39) à (42). Para um sistema com essa característica, as formas de onda de tensão no PAC em comparação com o alimentador estão apresentadas na Figura 43.

Figura 43 – Tensões no PAC em comparação com as tensões do alimentador sem DSTATCOM - carga não linear pesada



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Com carga não linear pesada, a TDH harmônica é ainda mais elevada, sendo 7,88% em cada fase. Esse valor não extrapola os limites impostos na IEEE 519-22, mas está muito próximo ao limite. Assim, é analisada a corrente no transformador.

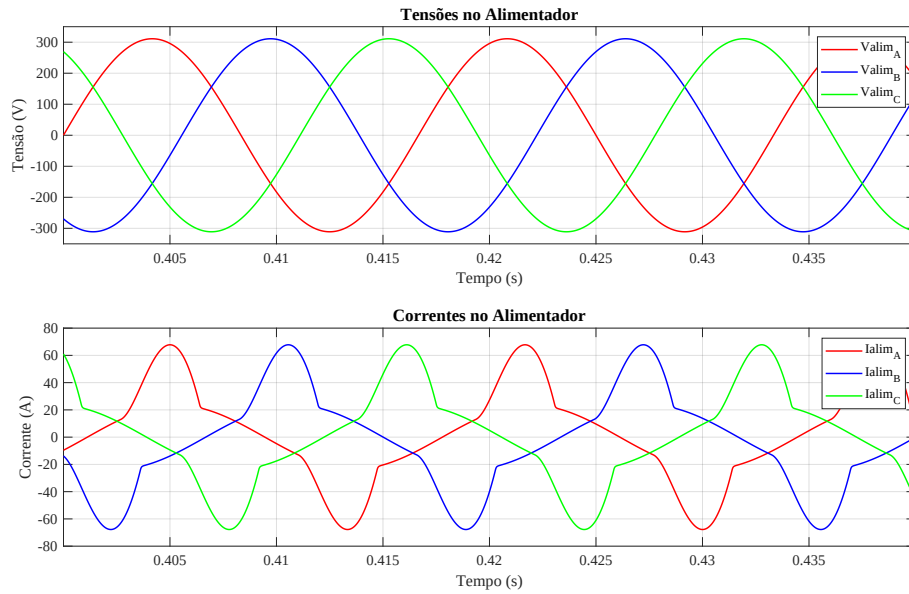
A Figura 44 apresenta as correntes que circulam pelo transformador. Os valores eficazes das correntes do alimentador são de 34,51 A, que correspondem a uma perda de 142,91 W na resistência da rede.

Com essa condição, a corrente em cada fase apresenta um elevado conteúdo harmônico com uma TDH de 38,40%, ultrapassando o limite de 5%.

A Figura 45 apresenta as correntes de cada carga. A escala foi mantida a mesma para evidenciar que a amplitude da corrente da carga não linear é consideravelmente maior, destacando o caráter dominante das cargas não lineares na composição total. Esse caráter reflete nas correntes do alimentador, que apresentam pulsos mais intensos em comparação à composição com carga não linear leve.

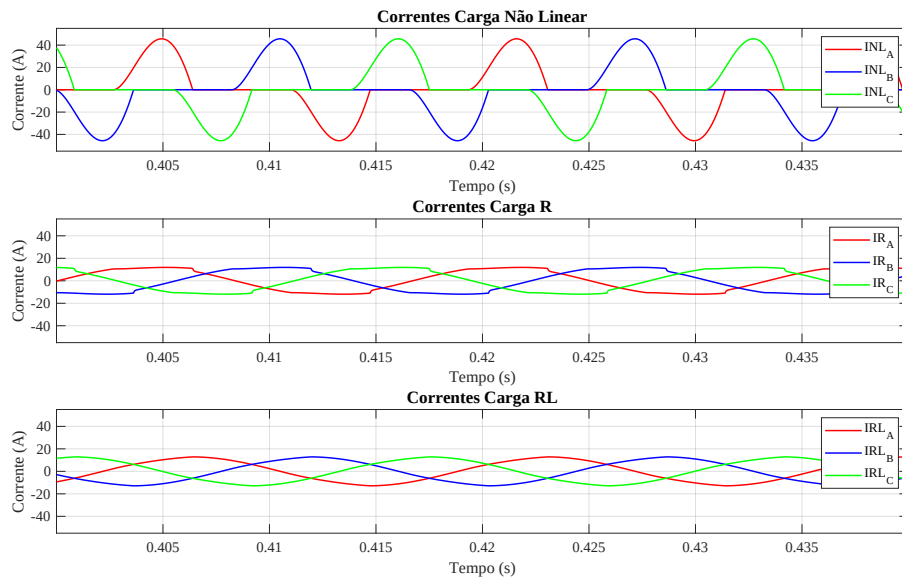
Por fim, a potência aparente medida no alimentador da fase A é de 7,59 kVA e a potência

Figura 44 – Correntes do alimentador em comparação com as tensões do alimentador sem DSTATCOM - carga não linear pesada



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Figura 45 – Correntes de cargas separadas - carga não linear pesada sem DSTATCOM



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

ativa medida de 6,68 kVA, resultando em um fator de potência de 0,880 que não é adequado para a rede. Importante observar que a potência aparente processada pela rede não é 9,00 kVA, mas cada carga está processando valores próximos à potência projetada. Isso é devido à soma vetorial das potências e à interação entre as cargas.

Assim, esse perfil de carga infringe os limites impostos no quesito qualidade de energia,

e há uma grande necessidade de soluções para a correção do fator de potência.

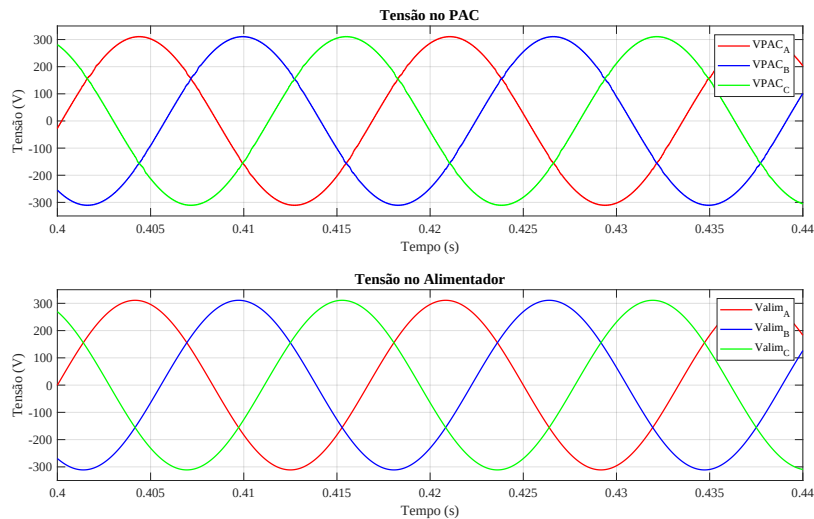
4.3 OPERAÇÃO DO SISTEMA COM DSTATCOM - SEM mPPT

Esta seção aborda as simulações para a rede com as cargas apresentadas na Seção 4.2 com o FAP conectado ao PAC. Nessa seção, não serão apresentadas as correntes de cada carga, pois o comportamento é o mesmo apresentado na Seção 4.2, alterando-se apenas a amplitude e a forma de onda da corrente no resistor, que reflete a forma de onda no PAC.

4.3.1 Carga resistiva

Para uma carga resistiva de 10 kW está apresentado na Figura 46 as tensões no PAC em comparação com as tensões de entrada.

Figura 46 – Tensões no PAC em comparação com as tensões do alimentador com DSTATCOM - carga resistiva



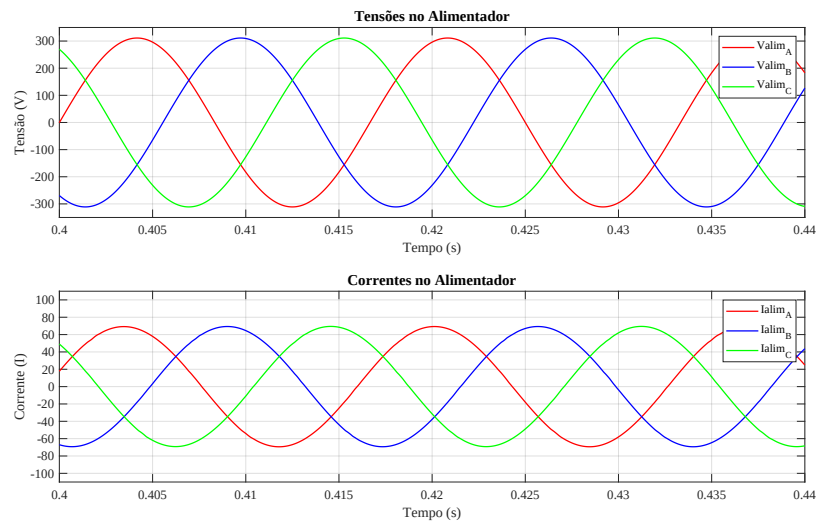
Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Há uma pequena distorção na tensão do PAC, devido ao chaveamento do conversor, contudo a amplitude dos harmônicos é baixa se comparada à fundamental, assim a TDH das tensões no PAC é de 0,4% que se adequa aos requisitos impostos. Ainda, a Figura 47 apresenta as correntes que fluem pelo alimentador em comparação com as tensões.

É nítido que quase não há distorção na corrente, contudo, é importante observar que a corrente está adiantada em relação à tensão. Como na topologia há apenas indutores e resistores, esse atraso na corrente é reflexo do DSTATCOM estar processando reativo capacitivo. Isso é corroborado observando a tensão no PAC, pois a tensão no PAC, em valores RMS, equivale aos valores da rede. Para que isso seja possível, o conversor deve injetar energia reativa capacitiva.

Para esse caso, cada fase da rede está processando 10,8 kVA de potência aparente e 10,4 kW de potência ativa, resultando em um FP de 0,96. Essa queda no FP é devido princi-

Figura 47 – Correntes no alimentador em comparação com as tensões no alimentador com DSTATCOM - carga resistiva

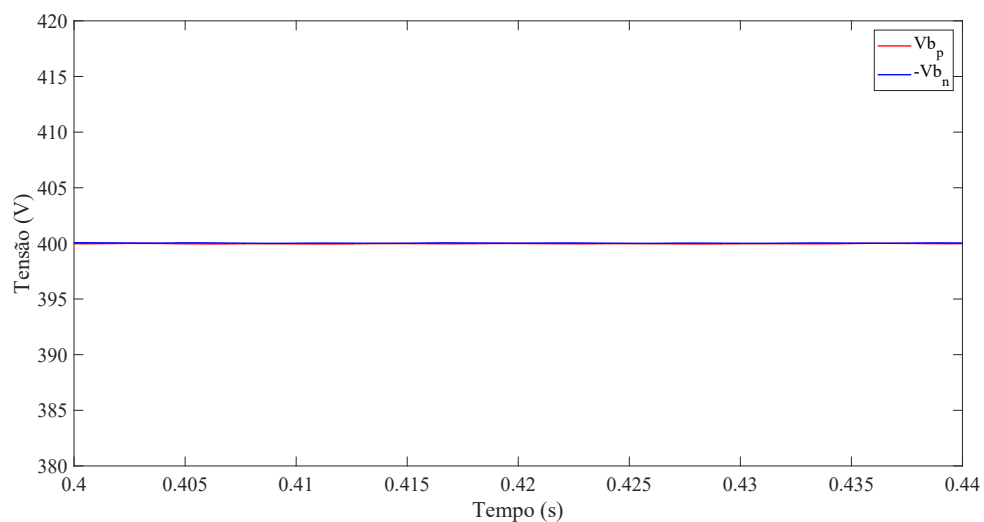


Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

palmente ao atraso da corrente em relação à tensão no alimentador, sendo justificada, pois o conversor passa a processar energia reativa para que a tensão no PAC se mantenha a mesma da rede.

Por fim, outro aspecto importante é o comportamento do barramento de tensão cc que está apresentado na Figura 48 .

Figura 48 – Tensões barramento cc com DSTATCOM - carga resistiva



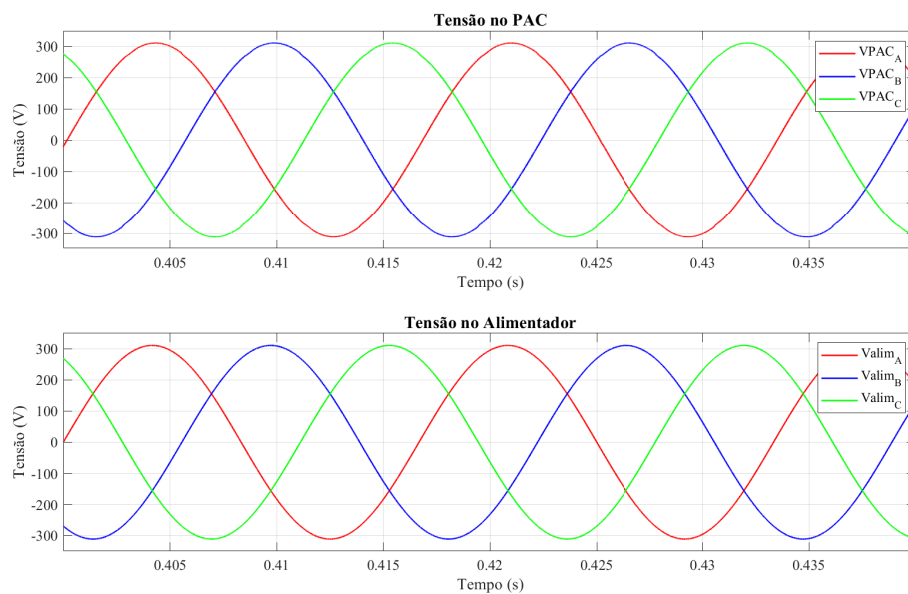
Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Para esse caso, é nítido que a oscilação do barramento é muito baixa, sendo quase imperceptível na escala adequada para a análise.

4.3.2 Carga mista - carga não linear leve

Para a carga mista leve, as tensões no PAC comparadas às tensões na rede com o conversor conectado ao PAC estão presentes na Figura 49. A tensão eficaz para essa simulação é de 220 V. Por consequência, as potências aparentes das cargas se aproximam muito do projetado, para o retificador está sendo consumido 3,3 KVA, para a carga R 2,99 kW e para a carga RL 2,99 kVA.

Figura 49 – Tensões no PAC em comparação com as tensões do alimentador com DSTATCOM - carga não linear leve



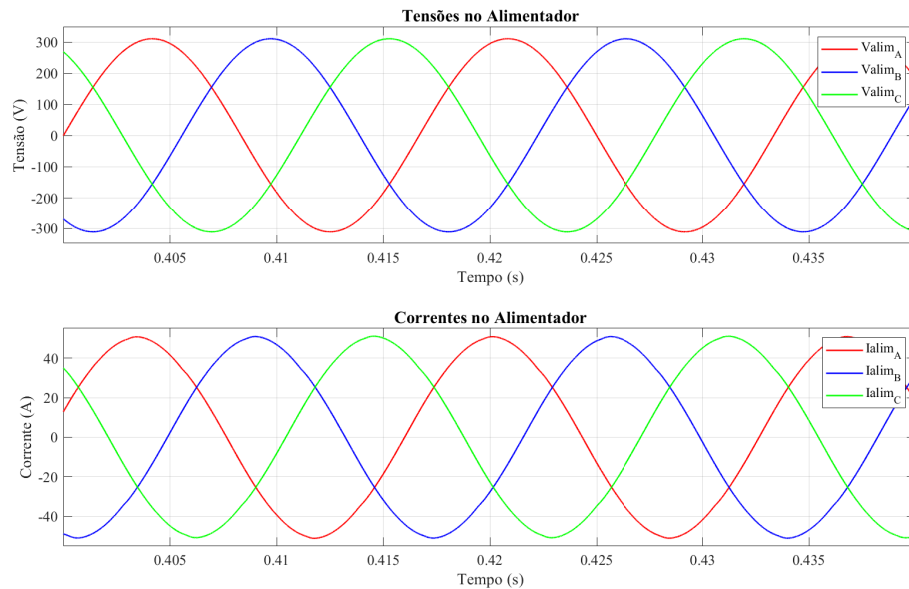
Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Novamente, há uma pequena distorção na tensão do PAC resultando em uma TDH de 0,4% que está conforme o permitido. A Figura 50 apresenta as correntes na fonte de alimentação em comparação com a tensão do alimentador.

Nesse caso, a corrente apresenta baixo conteúdo harmônico de 0,8%, que não ultrapassa os limites permitidos. Ainda, a Figura 51 apresenta o módulo da Transformada Rápida de Fourier (FFT, do inglês “*Fast Fourier Transform*”) das correntes de carga, do FAP e do alimentador para a fase A. A partir da Figura 51 é nítido que a maioria da distorção harmônica é causada pelos harmônicos de 3° e 5° que são quase não aparentes se comparados com a fundamental da corrente.

O valor eficaz da corrente que circula pela rede é de 35,57 A por fase, que gera uma perda de 151,83 W, maior em comparação com a situação sem o FAP. Contudo, é importante destacar que houve um aumento no consumo de potência ativa pela carga devido à elevação do valor eficaz da tensão na carga. Portanto, é necessário avaliar a eficiência para ambos os casos. Para o caso sem o DSTATCOM, a potência ativa gerada pelo alimentador é de 6,94 kW e a consumida pelo resistor da rede é de 145,66 W, resultando em uma perda de 2,10 %. Para o caso com o DSTATCOM, a potência ativa gerada pelo alimentador é de 7,55 kW, resultando

Figura 50 – Correntes no alimentador em comparação com a tensões no alimentador com DSTATCOM - carga não linear leve



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

em uma perda de 2,00 % de potência ativa no resistor. Embora o ganho de eficiência não seja tão alto, em sistemas que consomem altos valores de potência ativa, essa redução pode gerar impactos positivos.

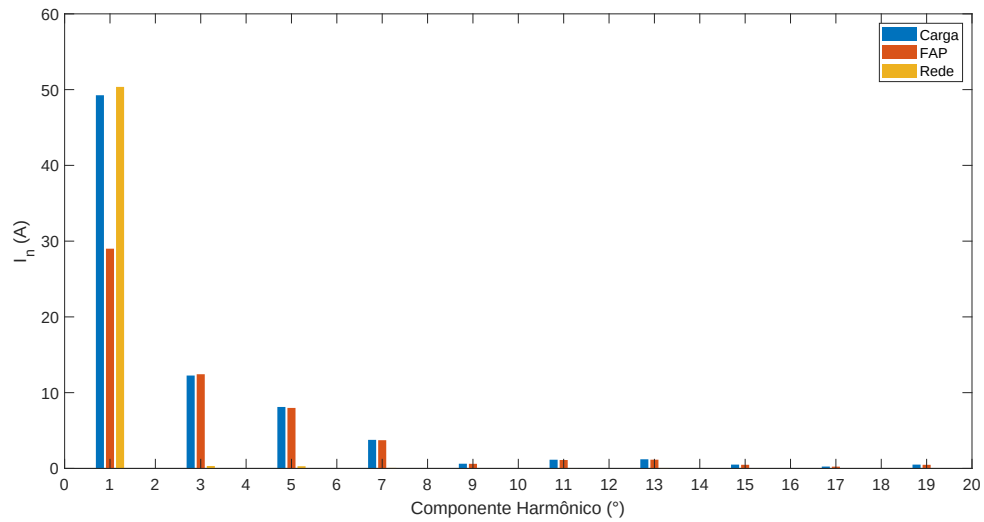
Ainda, a partir da Figura 51 é possível observar outra interpretação sobre o funcionamento DSTATCOM na correção do FP para cargas não lineares. É nítido que as amplitudes dos harmônicos do FAP coincidem com as amplitudes dos harmônicos da carga. Contudo, há outra informação de extrema relevância que é a fase de cada componente. Como cada componente harmônico da corrente de carga somada com a do FAP deve resultar nas componentes da rede, conclui-se que, para harmônicos acima do 3º, a fase das componentes do FAP são defasadas em 180º em relação às componentes de carga. Assim, uma forma de interpretar o funcionamento do FAP para harmônicos acima do 3º é que o DSTATCOM funciona como uma fonte de corrente com mesma amplitude da carga, mas com sinal oposto.

Essa conclusão é corroborada através da Figura 52 que apresenta as correntes de carga, do FAP e da rede, sendo possível observar que a corrente do conversor complementa a corrente de carga de forma que a corrente que circula pela rede seja senoidal, onde é possível apenas caso os harmônicos além da fundamental se anulem.

Ainda, segue na Figura 53 a tensão no barramento de capacitores. É nítido que houve um aumento na oscilação do barramento.

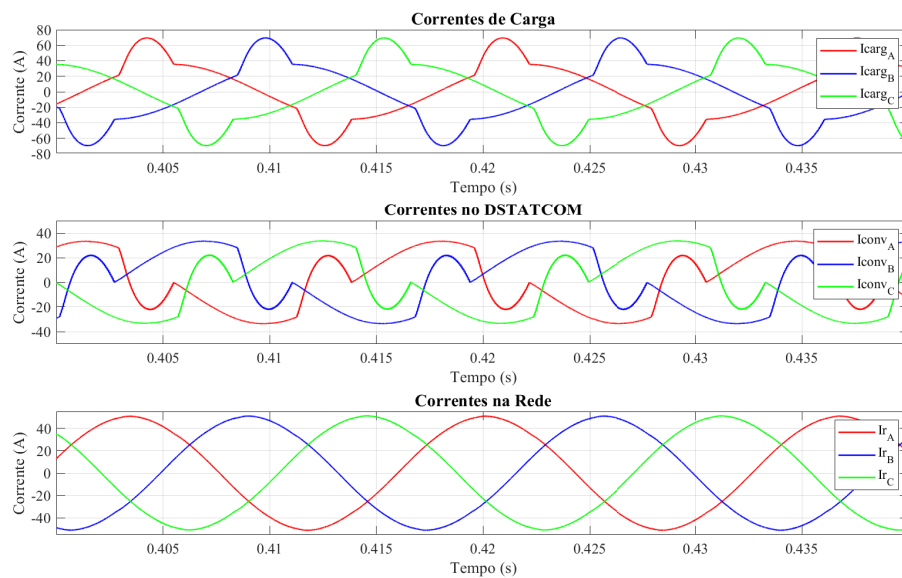
A potência aparente processada por cada fase da rede é de 7,83 kVA e ativa 7,56 kW resultando em um FP de 0,966. Se comparado à simulação sem o DSTATCOM, houve um aumento na potência ativa fornecida pelo alimentador e uma redução na potência aparente processada pela unidade geradora.

Figura 51 – FFT correntes com DSTATCOM - carga não linear leve



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Figura 52 – Comparação entre as correntes da carga, do PAC e do alimentador com DSTATCOM - carga não linear leve

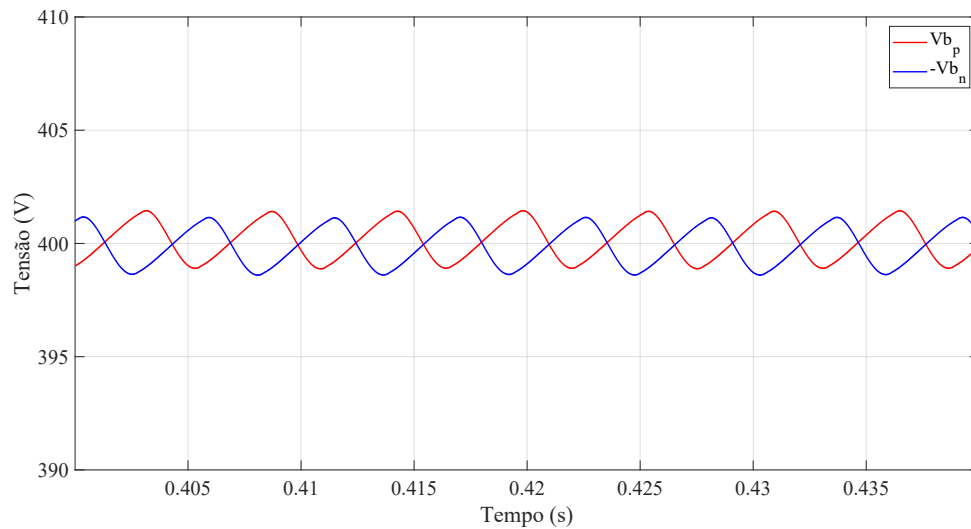


Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Isso ocorre, pois as cargas simuladas são do tipo Z constante, ou seja, são cargas em que é alterada a potência processada conforme a amplitude da tensão aplicada. Ou seja, houve um aumento na potência ativa que a carga está consumindo, sendo 7,32 kW por fase. Assim, além da melhora do fator de potência, houve uma nítida redução da potência aparente processada pela rede, que implica em uma menor corrente que flui pela rede e menos perdas nas resistências do sistema de distribuição.

Por fim, a potência aparente processada pelo conversor é de 5,09 kVA por fase e 33 W que é próximo a zero considerando a magnitude da potência aparente e está provavelmente

Figura 53 – Tensões do barramento cc - carga não linear leve



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

relacionado a uma oscilação de baixa frequência no barramento cc, a queda de tensão nas chaves e resistência de condução das chaves. Assim, a potência processada pelo conversor é apenas não ativa, para o caso de cargas equilibradas.

4.3.3 Carga mista - carga não linear pesada

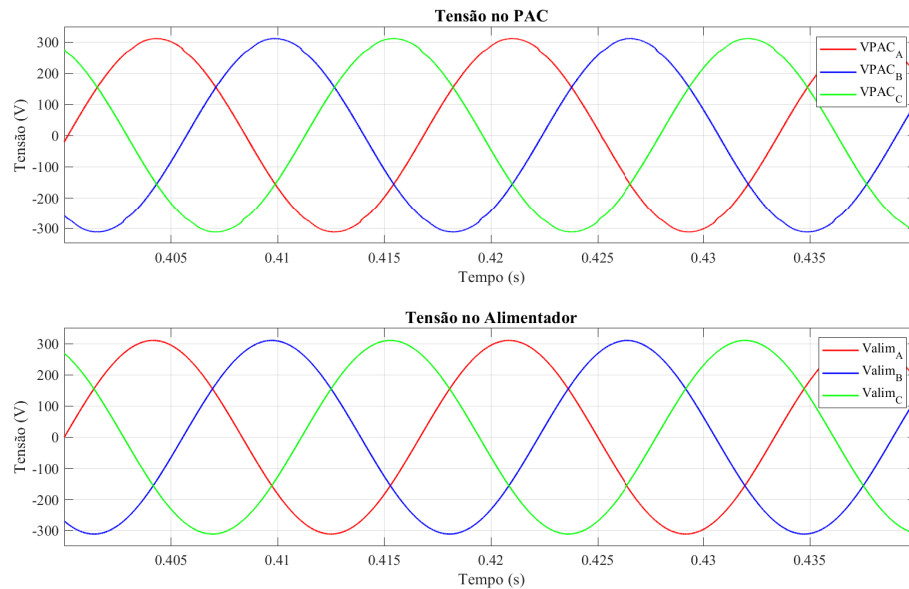
Para a carga mista pesada, as tensões no PAC comparadas às tensões na rede com o conversor conectado ao PAC estão presentes na Figura 54. A tensão eficaz para essa simulação é de 220 V. Por consequência, as potências aparentes das cargas se aproximam muito do projetado, para o retificador está sendo consumido 5,5 KVA, para a carga R 1,99 kW e para a carga RL 1,99 kVA.

Há uma pequena distorção na tensão do PAC que eleva a TDH para 0,5% que está muito abaixo dos limites impostos. A Figura 55 expõe as correntes na fonte de alimentação em comparação com a tensão do alimentador.

A TDH para a corrente, nesse caso, é de 1,5%. Conforme apresentado na Figura 56, a amplitude dos harmônicos aumentou significativamente em comparação com a carga não linear leve. Ainda, a corrente está adequada ao imposto, pois a TDH de 1,5% é devida aos primeiros harmônicos, principalmente.

Ainda, o valor eficaz da corrente que circula pela rede é de 34,81 A por fase, que gera uma perda de 145,41 W, maior em comparação com a situação sem o FAP. Contudo, é importante destacar que houve um aumento no consumo de potência ativa pela carga devido à elevação do valor eficaz da tensão na carga. Portanto, é necessário avaliar a eficiência para ambos os casos. Para o caso sem o DSTATCOM, a potência ativa gerada pelo alimentador é de 6,68 kW e a consumida pelo resistor da rede é de 142,91 W, resultando em uma perda de 2,14 % de potência ativa no resistor da rede. Para o caso com o DSTATCOM, a potência ativa gerada pelo

Figura 54 – Tensões no PAC em comparação com as tensões do alimentador com DSTATCOM- carga não linear pesada



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

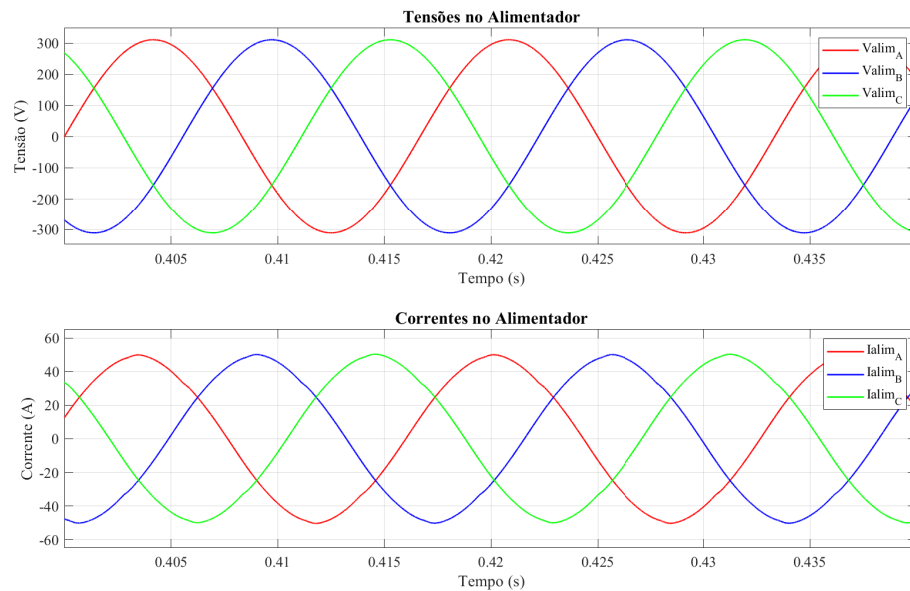
alimentador é de 7,40 kW, resultando em uma perda de 1,97 %. Novamente, embora o ganho de eficiência não seja tão alto, em sistemas que consomem altos valores de potência ativa, essa redução pode gerar impactos positivos.

Ainda, a Figura 57 apresenta as correntes de carga, do FAP e da rede e é nítido que a amplitude da corrente processada pelo FAP é maior se comparado com as correntes para carga linear leve.

Para essa situação, a potência aparente processada pela rede por fase é de 7,66 kVA e ativa 7,40 kW, resultante em um FP de 0,966, enquanto a potência aparente processada pelo conversor é de 8,33 kVA. Assim, como não houve um aumento significativo na potência ativa fornecida pela rede, isso indica que a carga com caráter mais não linear aumenta os esforços sobre o FAP. Como reflexo, há um aumento considerável na amplitude da corrente processada pelo conversor.

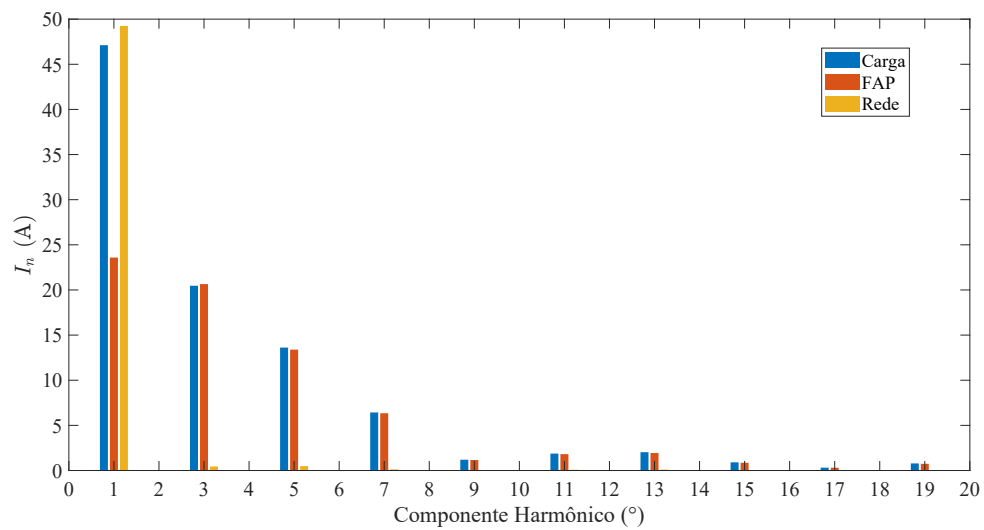
Por fim, a Figura 58 apresenta as tensões do barramento cc e observa-se uma elevação na ondulação na tensão do barramento cc em comparação ao caso com carga linear leve. Isto decorre da maior circulação de reativos pelo FAP, para compensar as componentes harmônicas não lineares mais elevadas desta condição de carga.

Figura 55 – Correntes no alimentador em comparação com as tensões no alimentador com DSTATCOM - carga não linear pesada



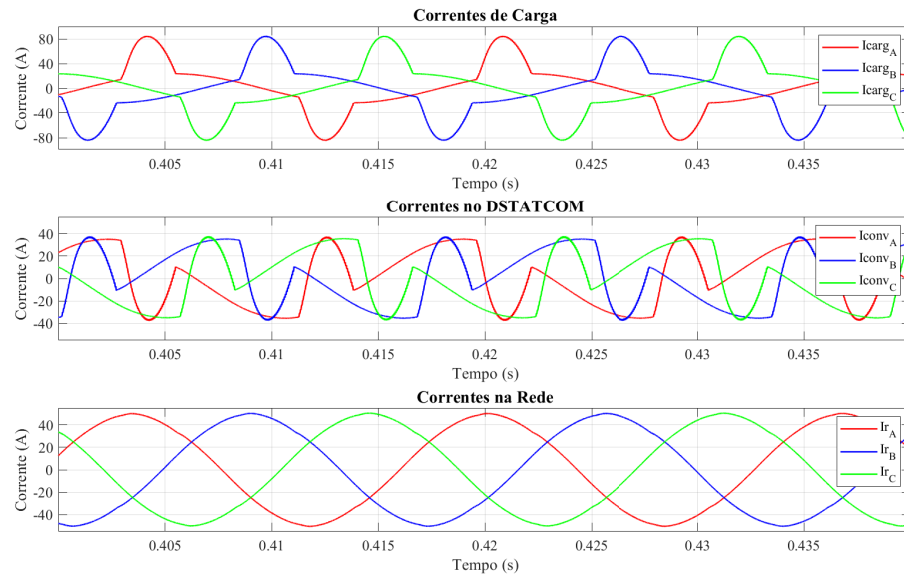
Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Figura 56 – FFT correntes com DSTATCOM - carga não linear pesada



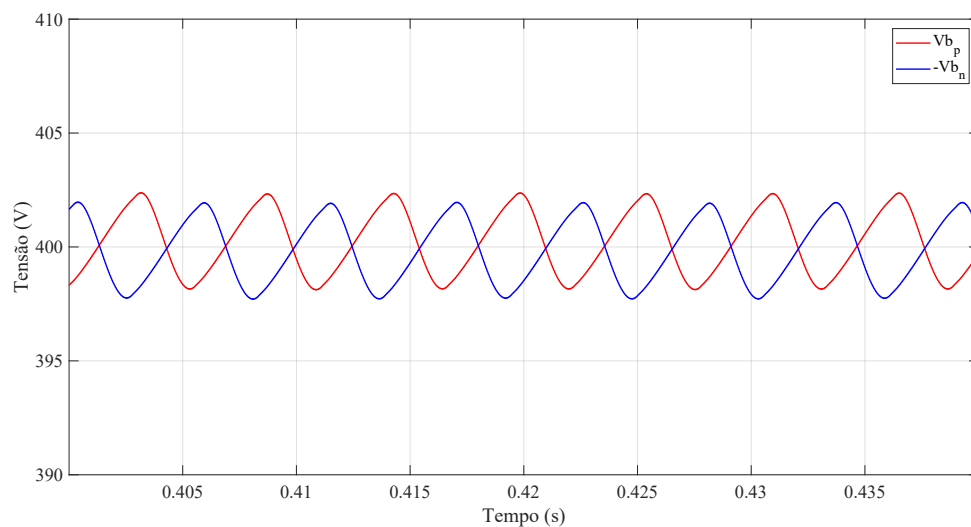
Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Figura 57 – Comparação entre as correntes da carga, do PAC e do alimentador - carga não linear pesada



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Figura 58 – Tensões do barramento cc - carga não linear pesada

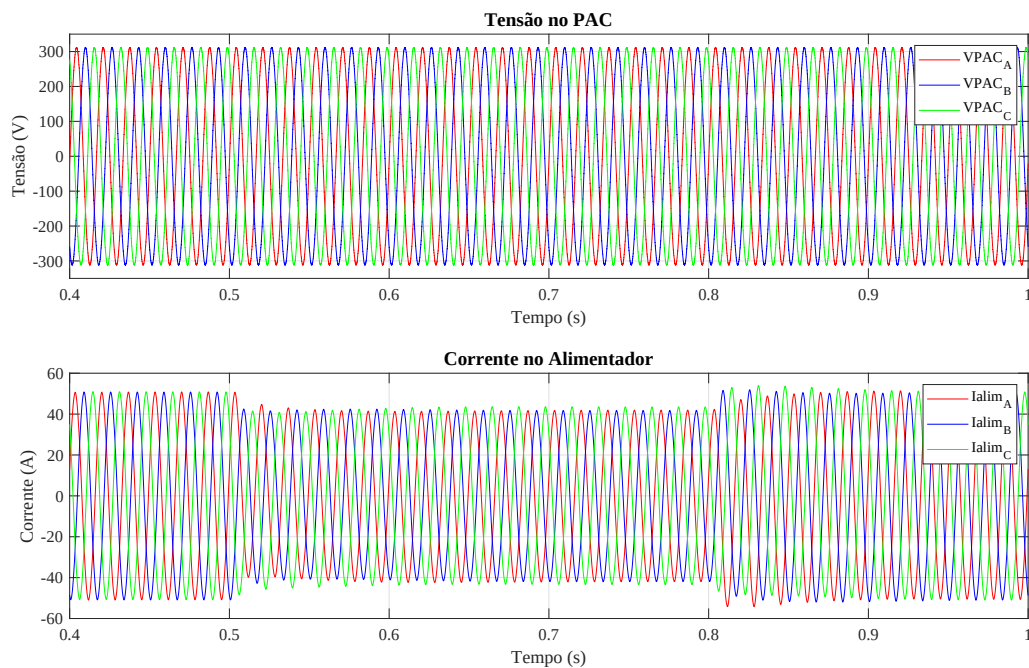


Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

4.4 ANÁLISE DA DINÂMICA DO FAP COM VARIAÇÃO E DESEQUILÍBRIO DE CARGA

Para a variação de carga, é considerado o circuito com carga não linear leve, sendo realizada uma abertura em 0,5 segundos que reduz a carga na fase A em 50%, e, em 0,8 segundos, o sistema volta à normalidade. Trata-se de uma situação análoga à ocorrência de um curto-circuito monofásico, em que é necessário desconectar metade da carga momentaneamente. A Figura 59 apresenta as tensões no PAC e as correntes que circulam pela rede.

Figura 59 – Tensões no PAC e correntes na rede - variação de carga



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Tanto para a tensão no PAC quanto para a corrente que circula pela rede, houve pouca alteração, com uma redução no valor RMS da corrente no alimentador de 35,58 A para 29,16 A.

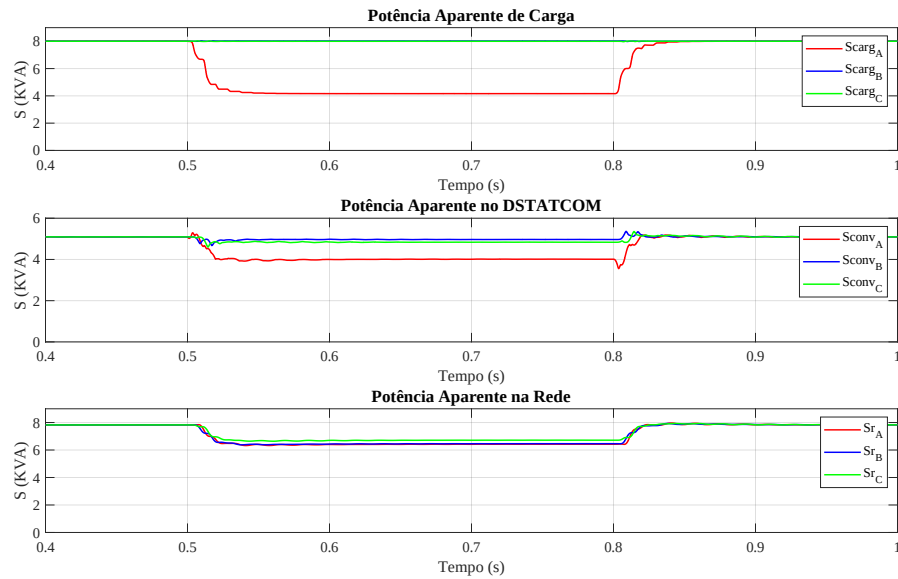
Durante todo o período, a maior distorção para a corrente foi entre 0,5 segundos e 0,8 segundos, ou seja, enquanto a carga para a fase A corresponde a 50% do nominal. Nessa situação, a TDH medida é de 1,92% para a fase C. Portanto, nesse quesito, não há impactos significativos que inviabilizem o uso do DSTATCOM.

Outra observação importante é que o DSTATCOM leva ao equilíbrio nas correntes do alimentador, ao equilibrar as potências ativas e não ativas que a rede precisa fornecer.

Esse comportamento é evidente na Figura 60, que apresenta a variação das potências aparentes durante todo o período em que houve o degrau de carga. Além disso, a Figura 61 apresenta o comportamento no tempo das potências ativas.

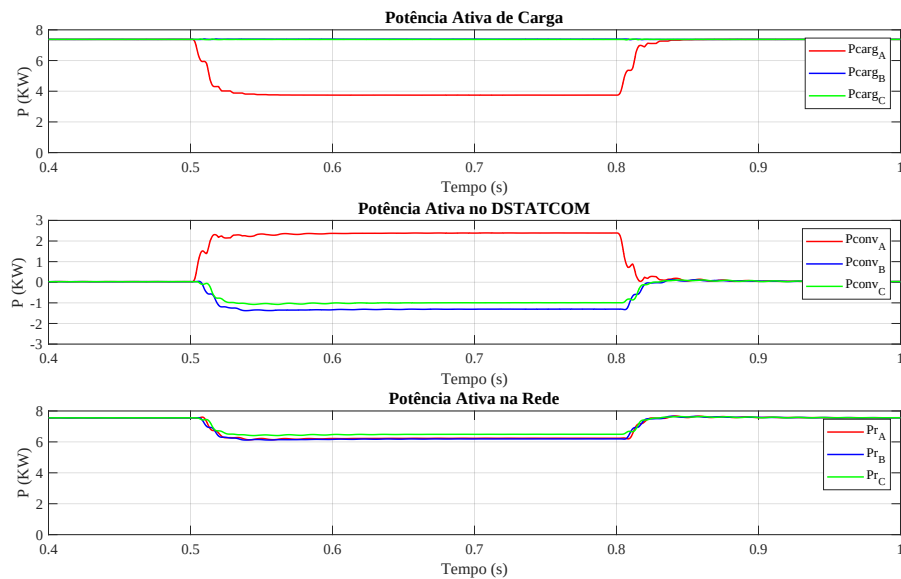
O aspecto mais importante de ser observado é que a variação de carga causa um desbalanceamento na potência processada entre as fases do DSTATCOM, bastante evidente na Figura 61.

Figura 60 – Comportamento da potência aparente - variação de carga



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Figura 61 – Comportamento da potência ativa - variação de carga



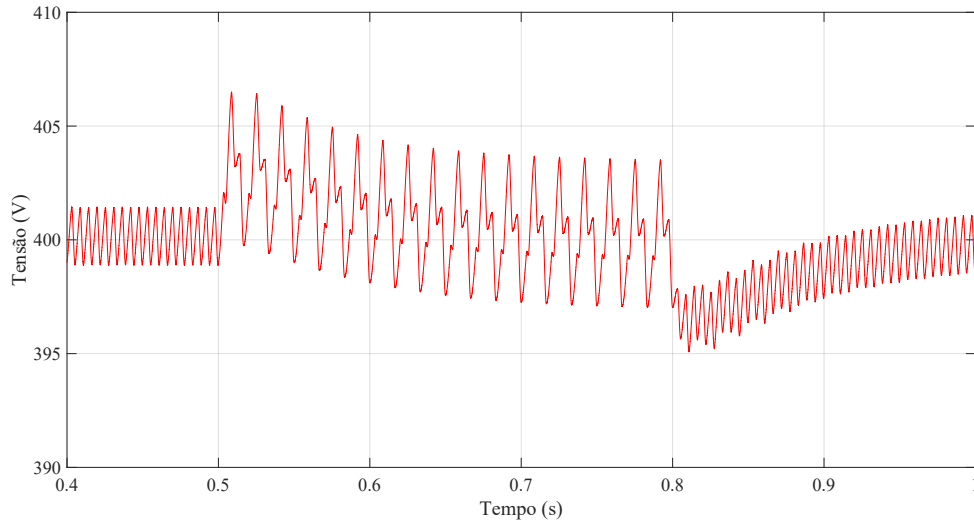
Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Durante o degrau de carga, o FAP passou a absorver energia ativa para compensar a diminuição na carga. Como consequência, as fases B e C passaram a fornecer energia ativa, para manter a potência ativa total, processada pelo conversor, nula.

Esse comportamento reflete na forma de onda da tensão do barramento cc, apresentada na Figura 62. Está apenas a tensão positiva do barramento cc para facilitar a interpretação.

É nítido que, durante a redução de carga na fase A, houve uma mudança no formato de

Figura 62 – Tensão positiva do barramento cc - variação de carga



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

onda da tensão do barramento cc, isso ocorre porque as potências processadas pelo conversor são desequilibradas, por consequência, o capacitor carrega com diferentes intensidades para cada ciclo de carga/descarga. Por consequência, também há um aumento na oscilação do barramento cc que, em certos casos, pode levar à instabilidade ou distorções significativas nas formas de onda da tensão do PAC.

Ainda, é relevante destacar que a oscilação do barramento cc não é mais 360 Hz, devido ao desbalanceamento, sendo agora de 60 Hz. Essa mudança na oscilação pode ser problemática, pois o controle foi projetado considerando uma oscilação de 360 Hz. O projeto prevê uma frequência de cruzamento por zero de 33 Hz, que pode interagir com o barramento durante o desbalanceamento, onde o controlador pode tentar corrigir as oscilações intrínsecas do barramento cc. Uma metodologia possível seria verificar a presença de desbalanceamento e, então, ajustar o controlador da malha de tensão total do barramento cc. Contudo, para as simulações apresentadas, a mudança na frequência de oscilação do barramento cc não causa problemas.

Por fim, durante todo o período de variação, o menor FP encontrado nas simulações é de 0,96. Com isso, uma variação de 50% da carga em uma das fases não inviabiliza o uso do DSTATCOM para a correção do FP.

4.5 OPERAÇÃO DO SISTEMA COM A IMPLEMENTAÇÃO DO mPPT

esta seção, estão presentes as simulações para o sistema de carga não linear pesada com a utilização do algoritmo mPPT para minimização da potência processada pelo conversor. Foi então definida uma variação na amplitude do algoritmo de mPPT de 0,01 pu e um passo de cálculo de 100 ms. Ainda, o algoritmo de mPPT começa a atuar a partir de 0,4 s.

A Figura 63 apresenta a potência aparente total processada pelo FAP e a ação de controle do mPPT em pu, considerando a tensão de base $V_r/100$ devido aos ganhos de tensão e corrente

que as adequam para operar abaixo de 3,3 V.

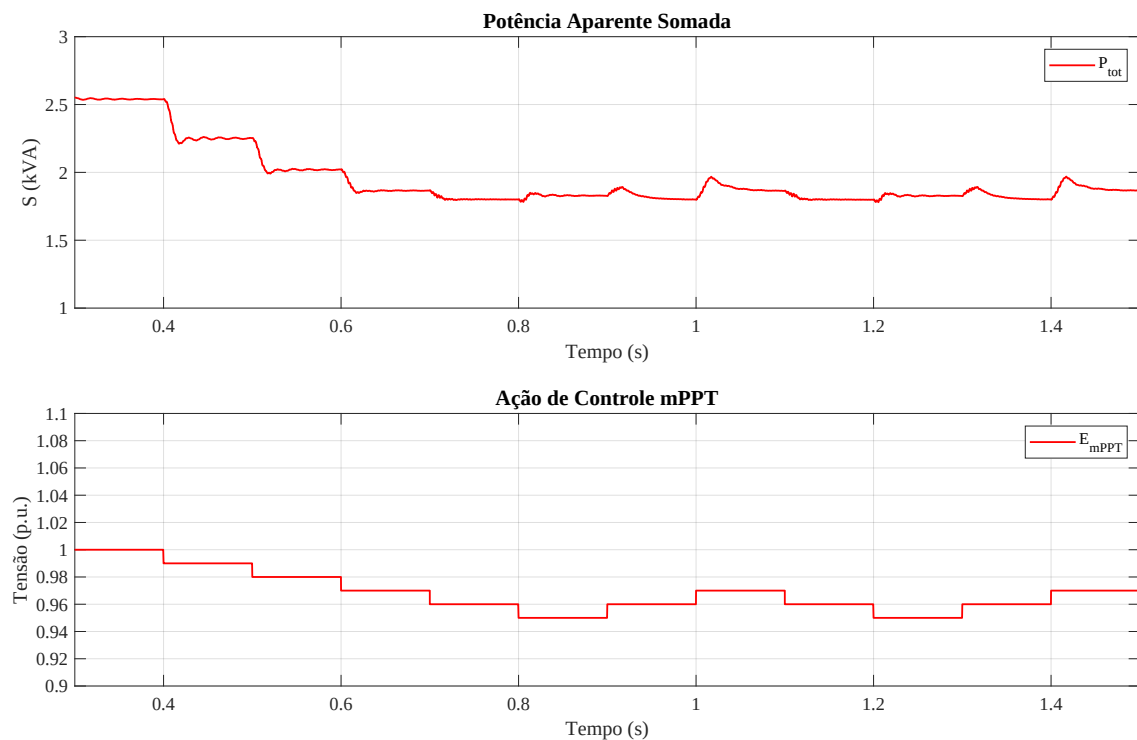
É observado a partir dessa Figura a funcionalidade do algoritmo mPPT, sendo que o mesmo cumpriu o objetivo, reduzindo a potência aparente total processada pelo DSTATCOM. Contudo, é nítido que há uma variação considerável em regime permanente. Essa variação é intrínseca do algoritmo e não há maneira de eliminar esse efeito, apenas o reduzir diminuindo a variação na amplitude do algoritmo de mPPT, contudo isso leva a um maior tempo para convergir para o ponto de mPPT.

Pode-se, também, usar métodos mais modernos de busca pelo mPPT, como o uso de algoritmos de variação de amplitude variável, ou seja, para uma grande variação da potência, a amplitude de variação é grande e, para uma pequena variação de potência, a amplitude é pequena. Contudo, este não é o objetivo deste trabalho.

Ainda, na Figura 64 está presente a tensão do barramento cc durante a atuação do algoritmo de mPPT.

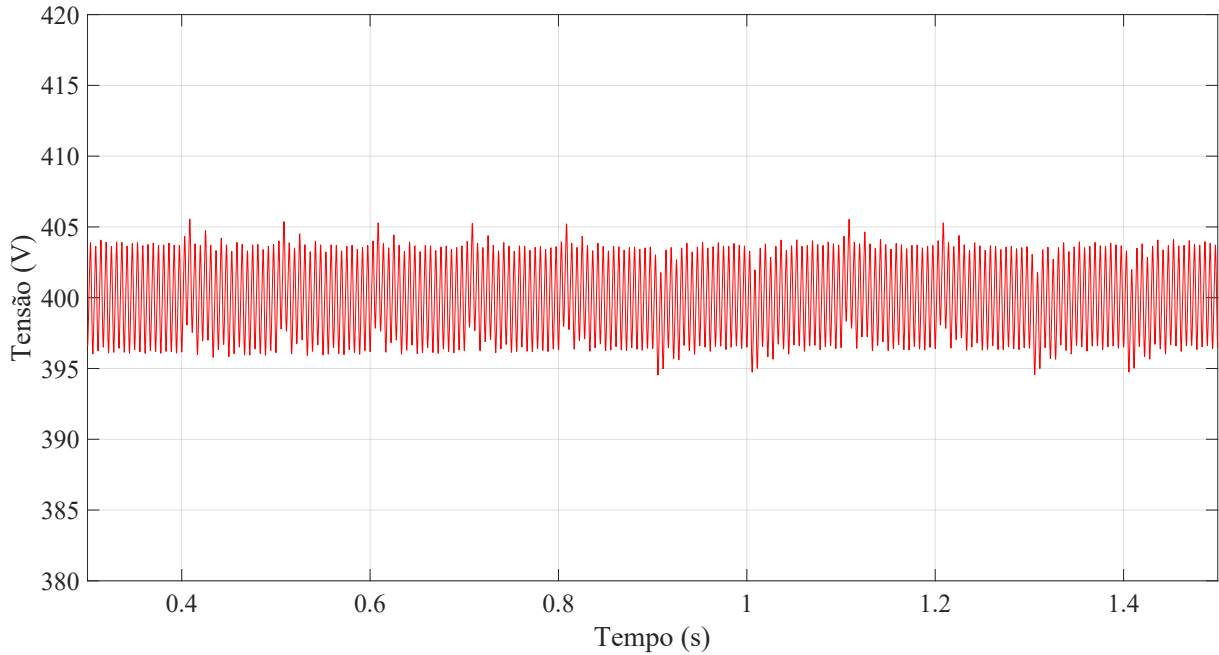
Nesse caso, não houve alterações significativas no barramento cc, há oscilações no momento em que o Algoritmo de mPPT altera a tensão aplicada ao PAC, contudo, o controle de tensão total atua rápido o suficiente para manter a estabilidade do sistema. Portanto, o algoritmo de mPPT se mostrou válido na redução da potência aparente processada pelo conversor, sendo uma opção viável caso as cargas possam conviver com essas variações.

Figura 63 – Potência aparente total processada pelo DSTATCOM e ação de controle mPPT



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Figura 64 – Tensão positiva do barramento cc durante o algoritmo de mPPT



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

4.6 OPERAÇÃO DO SISTEMA COM DSTATCOM COM CARGAS DESBALANCEADAS

Nesta seção estão abordados os resultados de simulações para o DSTATCOM com Cargas Desbalanceadas. Para carga de referência, é utilizada a carga mista com carga não linear pesada na fase A. Para a fase B é definido 33% da carga da fase A e para a fase C é definido 50% da carga da fase A. Ainda, o algoritmo de mPPT está desativado para facilitar a análise do impacto de cargas desequilibradas conectadas ao PAC isoladamente. A Figura 65 apresenta a tensão no PAC comparada à tensão do alimentador. Os valores eficazes de tensão para as três fases do PAC são aproximadamente iguais, no valor de 220 V.

A maior TDH medida para a tensão no PAC é de 0,5% para a fase A, portanto não há grande influência sobre a TDH de tensão com cargas desbalanceadas. Além disso, mesmo com potências aparentes diferentes, não há desequilíbrio de amplitude e fase para as tensões no PAC, dessa forma, o FD% continua adequado, conforme apresentado no equacionamento abaixo.

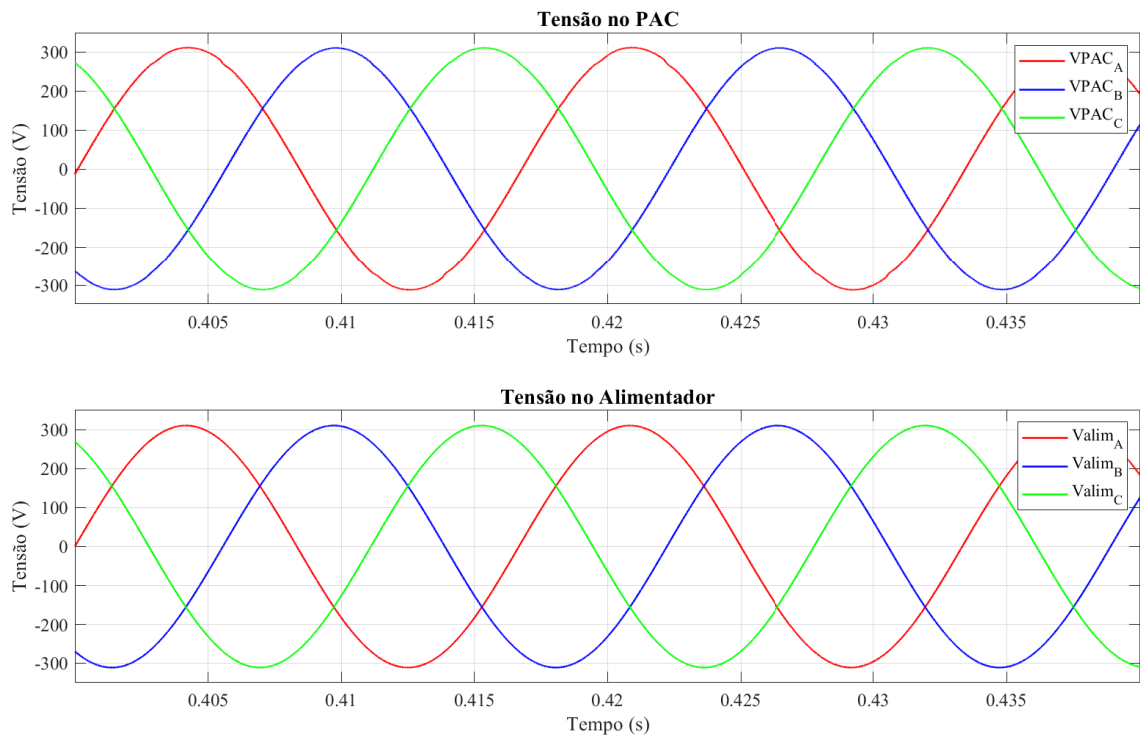
$$V^+ \approx \frac{1}{3}(V_a + aV_a\angle -120^\circ + a^2V_a\angle -240^\circ) = \frac{1}{3}(V_a + V_a + V_a) = V_a \quad (43)$$

$$V^- \approx \frac{1}{3}(V_a + a^2V_a\angle -120^\circ + aV_a\angle -240^\circ) = \frac{1}{3}(V_a + V_a\angle 120^\circ + V_a\angle -120^\circ) = 0 \quad (44)$$

$$FD\% = \frac{V^-}{V^+} \approx 0 \quad (45)$$

A Figura 66 apresenta as correntes que fluem pela rede.

Figura 65 – Tensões no PAC em comparação com as tensões do alimentador - cargas desbalanceadas



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Para as correntes no alimentador, é nítido que há um desbalanceamento na amplitude, contudo, não foi o suficiente para impactar negativamente as tensões no PAC. Para essa situação, a pior TDH medida foi de 2,95% para a fase A, que possui maior potência e amplitude de corrente. Como as tensões no PAC permanecem as mesmas, isso indica que as correntes que fluem para a carga permanecem com a mesma amplitude, assim há um desbalanceamento nas correntes processadas pelo PAC, conforme apresentado na Figura 67.

Isto sugere que as potências processadas pelo PAC também são desbalanceadas para cada fase. A Tabela 9 sintetiza visualmente as potências aparentes, ativas e não ativas na carga, no PAC e no alimentador para cada fase.

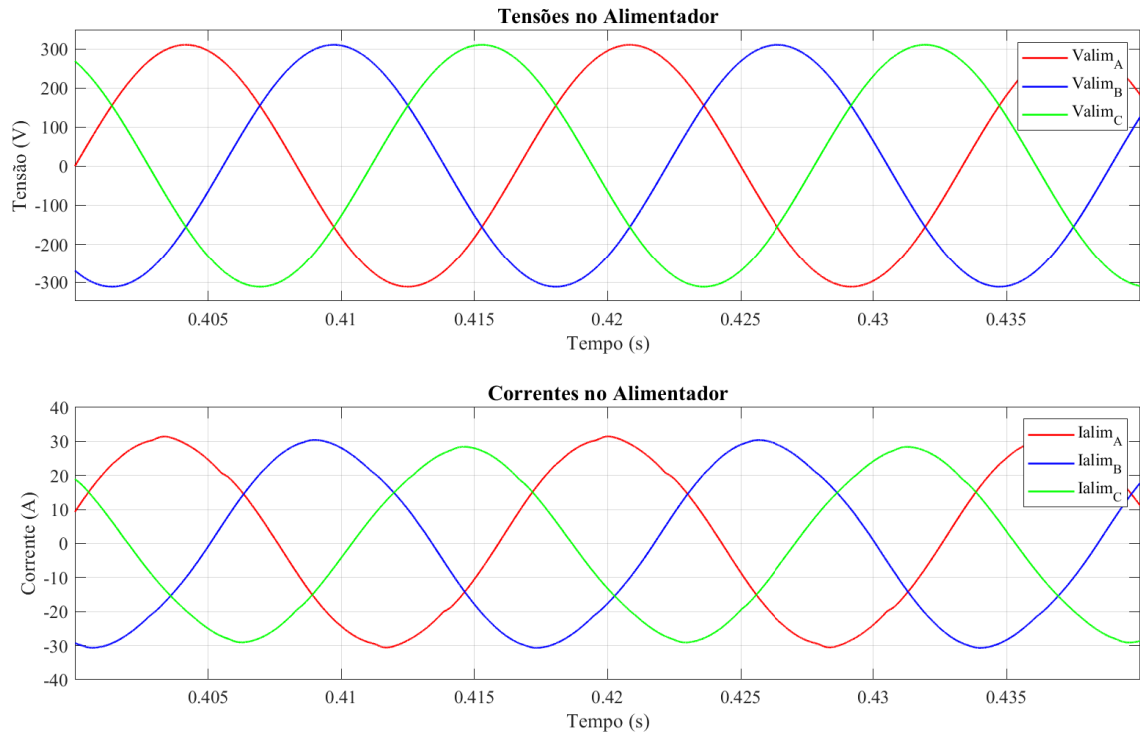
Assim, nesta situação, o desbalanceamento entre as cargas provoca desequilíbrios nas potências processadas pelo FAP em cada fase. Vale ressaltar que, para a fonte, não houve um grande desequilíbrio na potência aparente processada, com a maior diferença sendo de 10% entre as fases A e B. Isso ocorre porque o FAP equilibra a potência processada pela rede.

Ainda, a partir da Tabela 9 é possível calcular o FP para cada fase do alimentador, sendo 0,94 para a fase A, 0,99 para a fase B e 0,96 para a fase C.

Por fim, o desequilíbrio de potência processada pelo conversor causa a mudança no formato da forma de onda do barramento cc, a Figura 68 apresenta a forma de onda do barramento cc positivo. Novamente, há uma mudança na frequência de oscilação do barramento cc que passa

de 360 Hz para 60 Hz.

Figura 66 – Correntes no alimentador em comparação com as tensões do alimentador - cargas desbalanceadas



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Tabela 9 – Potências em cada subsistema do sistema e FP- cargas desbalanceadas

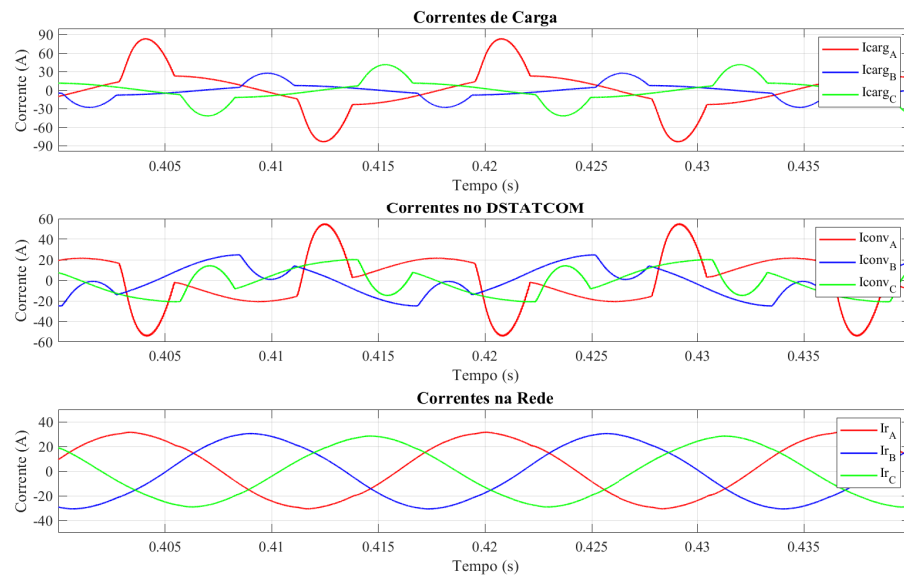
Tipo de Potência	Carga	FAP	Alimentador
S_a (kVA)	8,3	5,6	4,8
S_b (kVA)	2,7	3,0	4,7
S_c (kVA)	4,1	2,8	4,4
P_a (kW)	7,2	- 2,7	4,6
P_b (kW)	2,4	2,25	4,6
P_c (kW)	3,6	0,6	4,2
Q_a (kvar)	4,1	4,9	1,4
Q_b (kvar)	1,4	2,1	1,0
Q_c (kvar)	2,1	2,7	1,2

Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

É nítido que o nível médio de tensão do barramento cc está um pouco acima do projetado, mas isso se deve ao tempo de simulação, pois o controle de tensão diferencial é lento e continua atuando sobre a planta. Contudo, o foco é observar que o formato é devido à carga e descarga do capacitor com intensidade diferente para cada fase do FAP.

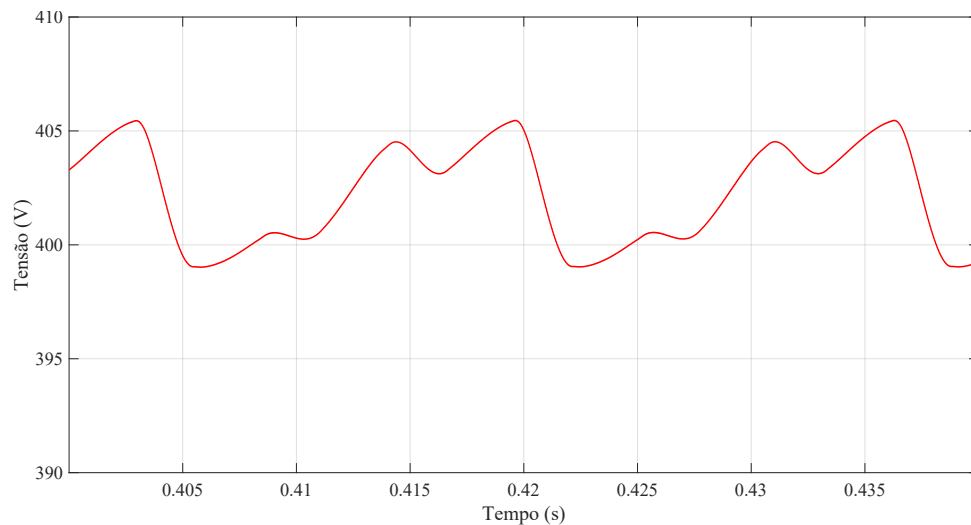
Assim, o desequilíbrio de carga entre as fases não inviabiliza o uso do FAP na situação simulada. Ainda, atendeu todos os requisitos mínimos impostos.

Figura 67 – Comparação entre as correntes da carga, do PAC e do alimentador - cargas desbalanceadas



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Figura 68 – Tensão no barramento positivo de capacitores - cargas desbalanceadas



Fonte: Elaborada pelo Autor (2024).

Assim, as simulações demonstraram resultados satisfatórios, com o DSTATCOM alcançando o objetivo de aumentar a eficiência do sistema e melhorar a qualidade da energia processada pela rede.

Além disso, o DSTATCOM apresentou uma boa resposta dinâmica para variações de carga, assim como um bom desempenho em cenários de cargas desbalanceadas.

Adicionalmente, o algoritmo de mPPT provou ser eficiente na minimização da potência processada pelo conversor, mostrando-se particularmente útil em aplicações onde a carga consegue operar adequadamente com tensões abaixo de 1 pu.

5 CONCLUSÃO E PRÓXIMOS PASSOS

A crescente demanda por energia elétrica, associada ao aumento do uso de dispositivos eletrônicos e sistemas de potência não lineares, intensifica os desafios relacionados à qualidade da energia elétrica em redes de distribuição. Este trabalho abordou essa problemática ao propor o uso do DSTATCOM, adotando a topologia FAP controlado em tensão, para corrigir o fator de potência e mitigar distorções harmônicas causadas por cargas não lineares. Ainda, este trabalho contribui para a compreensão inicial do FAP e mais aprofundada de alguns assuntos mais básicos abordados na graduação.

As análises e simulações realizadas demonstraram que a solução proposta oferece uma abordagem eficaz para a correção do FP e melhora da qualidade de energia que circula pela rede. O DSTATCOM mostrou-se capaz de regular o FP, reduzindo as correntes de energia reativa e proporcionando uma significativa melhoria na qualidade da energia fornecida. Além disso, a estratégia de controle implementada com o algoritmo de rastreamento do ponto de mPPT, possibilitou a otimização do sistema, reduzindo as perdas de energia no conversor e aumentando sua eficiência operacional.

Os resultados indicaram que o uso do DSTATCOM controlado em tensão é capaz de: reduzir a circulação de correntes harmônicas, minimizando os impactos negativos em componentes da rede, como transformadores e motores. Ajustar o fator de potência nos limites estabelecidos pela ANEEL, assegurando conformidade regulatória e evitando penalizações às concessionárias. Estabilizar os níveis de tensão no PAC, mesmo em cenários com cargas desbalanceadas ou não lineares. Contribuir para a eficiência energética do sistema, reduzindo o consumo desnecessário de recursos e o desgaste dos equipamentos.

Além disso, outro ponto importante a ser ressaltado é a adaptabilidade do DSTATCOM conforme o perfil de carga. Para diferentes perfis de carga, o DSTATCOM demonstrou eficácia na correção do fator de potência e na melhoria da qualidade de energia processada pela rede. Isso o diferencia das soluções passivas, como bancos de capacitores e filtros sintonizados, projetadas para um perfil específico de carga.

No entanto, é importante destacar que o DSTATCOM é uma solução menos robusta em comparação com essas alternativas passivas, ao possuir malhas de controle, que pode haver a necessidade de serem alteradas com mudanças nos sistemas, ser mais caro de implementar e sofrer com ruídos de interferência eletromagnética (EMI, do inglês *Electromagnetic Interference*). Além disso, as malhas de controle devem ser projetadas cuidadosamente para evitar problemas de instabilidade.

Embora os resultados obtidos nas simulações sejam favoráveis, alguns aspectos ainda precisam ser considerados:

- Validação Experimental: A implementação prática do sistema proposto em um ambiente controlado é essencial para confirmar os resultados teóricos e simulações realizadas. Fatores como ruído elétrico, tolerâncias dos componentes e atrasos nos tempos de resposta

podem afetar o desempenho do DSTATCOM.

- **Sistemas de Maiores Complexidades:** Avaliar o comportamento do DSTATCOM em redes maiores, com múltiplos pontos de acoplamento e cargas diversificadas, é necessário para determinar a viabilidade em sistemas mais complexos.
- **Condições Dinâmicas:** Testes adicionais para situações de variação brusca em cargas pulsantes intensas devem ser realizados para avaliar a robustez do controle implementado.
- **Desbalanceamento:** Embora o DSTATCOM seja eficaz para cargas desequilibradas, houve um aumento na oscilação do barramento cc. Portanto, é necessário avaliar os diversos pontos de operação do sistema para garantir sua robustez, especialmente em condições extremas. Além disso, cargas desequilibradas podem causar desequilíbrios nas potências processadas pelo conversor, o que pode exigir a desconexão do conversor, mesmo quando a potência total da carga for inferior a 30 kVA.

Este trabalho contribui significativamente para a área de qualidade de energia, propondo uma solução adequada e prática para um problema crescente. A implementação de um sistema como o DSTATCOM não só atende às exigências técnicas e regulatórias, como também promove benefícios econômicos, reduzindo perdas operacionais e custos associados a falhas de equipamentos. Adicionalmente, ao integrar técnicas de rastreamento de potência mínima no controle do DSTATCOM, este estudo avança na busca por sistemas mais eficientes, alinhando-se às demandas modernas de eficiência energética.

Por fim, como próximos passos, destaca-se a necessidade de implementação prática do DSTATCOM para validar seu funcionamento em condições reais e compreender as problemáticas adicionais associadas ao caráter experimental. Entre os desafios esperados estão as não idealidades dos semicondutores e componentes passivos, a variação da frequência da rede — que requer a integração de um PLL para referência de frequência estável — e os efeitos de EMI conduzida, gerados pelos chaveamentos. A realização desses testes experimentais permitirá ajustes no sistema e maior robustez da solução proposta.

REFERÊNCIAS

- ALVES, A. L. et al. **O TRANSFORMADOR: TEORIA, CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DO RENDIMENTO**. Sociedade Brasileira de Física, 2022. Produtos e Materiais Didáticos. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2021-0413>>. Citado na página 18.
- ANEEL. **PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL - PRODIST**. 2022. Acesso em: 17/11/2024. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2020888_prodinst_modulo_8_v11.pdf>. Citado na página 15.
- BARBI, I. **PROJETO DE FONTES CHAVEADAS - 2ª ed.** [S.l.]: Florianópolis, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 49.
- DEVASSY, S.; SINGH, B. Modified pq-theory-based control of solar-pv-integrated upqc-s. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 53, n. 5, p. 5031–5040, 2017. Citado na página 26.
- ESRAM, T.; L., Chapman P. Comparison of photovoltaic array maximum power point tracking techniques. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, 2007. Citado na página 39.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, JR. C.; UMANS, S. D. **MÁQUINAS ELÉTRICAS: COM INTRODUÇÃO À ELETRÔNICA DE POTÊNCIA - 6ª ed.** [S.l.]: Porto Alegre: Bookman, 2006. Citado na página 19.
- HOCK JÚNIOR, R. T. **REGULADOR DE TENSÃO MÓVEL CONTROLADO EM TENSÃO COM RASTREAMENTO DO PONTO DE MÍNIMA POTÊNCIA APARENTE**. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS, 2015. Disponível em: <http://www.npee.joinville.br/_publicacoes/arquivo784.pdf>. Citado 16 vezes nas páginas 17, 18, 19, 28, 30, 31, 33, 35, 38, 39, 41, 42, 45, 46, 50 e 88.
- IEA. **WORLD EENERGY OUTLOOK 2024**. [S.l.], 2024. Acesso em: 12 dez. 2024. Disponível em: <<https://iea.blob.core.windows.net/assets/efba04ce-2472-4df1-9873-fb170c055259/WorldEnergyOutlook2024.pdf>>. Citado na página 14.
- IEC62040-1-1. **UNINTERRUPTIBLE POWER SYSTEMS (UPS) - PART 1: GENERAL AND SAFETY REQUIREMENTS FOR UPS**. [S.l.: s.n.], 2019. Citado na página 60.
- LOPEZ, R. A. **QUALIDADE NA ENERGIA ELÉTRICA – 2ª ed.** [S.l.]: São Paulo: Artliber Editora, 2013. Citado 6 vezes nas páginas 15, 20, 21, 22, 23 e 24.
- MARTINENAS, S.; KNEZOVÍĆ, K. M. M. Management of power quality issues in low voltage networks using electric vehicles: Experimental validation. **IEEE Trans. Power Delivery**, v. 32, p. 971, 2017. Citado na página 15.
- NISHIOKA, J. K. **SISTEMA DE CONTROLE DIGITAL PARA RETIFICADOR TRIFÁSICO A QUATRO FIOS COM FILTRO LCL**. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 46, 47 e 48.
- NPEE, Vários autores. **CAPÍTULO 4 - CARGAS NÃO LINEARES**. 2024. Apostila "Notas de Aula", organizada pelo professor Dr. Marcello Mezaroba. Citado na página 20.

ONS. **GERAÇÃO DE ENERGIA: HISTÓRICO DA OPERAÇÃO**. 2024. Acesso em: 17 nov. 2024. Disponível em: <https://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/geracao_energia.aspx>. Citado na página 14.

SANTOS, R. J. M. dos. **CONDICIONADOR UNIFICADO DE QUALIDADE DE ENERGIA DUAL COM CONTROLE SIMPLIFICADO**. Dissertação (Mestrado) — UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 27, 28 e 32.

SINGH, B. et al. Analysis, simulation and control of DSTATCOM in three-phase, four-wire isolated distribution systems. In: IEEE. **Anais da Conferência IEEE Power India**. New Delhi, India, 2006. Citado na página 26.

UFSC. **PROJETO MEDFASEE - MONITORAMENTO DO SIN EM TEMPO REAL**. 2024. Acesso em: 27/11/2024. Disponível em: <<http://www.medfasee.ufsc.br/brasil/>>. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 41.

APÊNDICE A – IMPEDÂNCIA DO TRANSFORMADOR

O modelo adotado para o transformador consiste em uma impedância em série com uma resistência e já é o circuito equivalente de baixa tensão do transformador, para esse trabalho é 220 V. É então considerado uma impedância total de 0,1 pu com 75% correspondente a indutância e 25% a resistência.

Inicialmente, definem-se as bases primárias para o sistema (S_{base} , V_{base}) conforme abaixo, onde $S_{3\Phi}$ é a potência nominal do DSTATCOM e V_r é a tensão eficaz de entrada.

$$S_{base} = S_{3\Phi} = 30 \text{ kVA} \quad (46)$$

$$V_{base} = V_r = 220 \text{ V} \quad (47)$$

A partir das bases primárias, calcula-se a impedância de base para o sistema, conforme o equacionamento abaixo. Vale ressaltar que o cálculo deve considerar os valores monofásicos, portanto na equação é usado $P_{3\Phi}/3$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{P_{3\Phi}/3} = 3,84 \Omega \quad (48)$$

Assim, é possível calcular a impedância e resistência do transformador, conforme demonstrado abaixo.

$$X_{pu} = 0,1 \cdot 0,75 = 0,075 \text{ pu} \quad (49)$$

$$R_{pu} = 0,1 \cdot 0,25 = 0,025 \text{ pu} \quad (50)$$

Por fim, é obtido os valores em resistência no lado da rede R_r a indutância no lado da rede L_r , conforme o equacionamento abaixo.

$$X_r = X_{pu} \cdot Z_{base} = 0,363 \Omega \quad (51)$$

$$L_r = \frac{X_r}{2\pi f} = 962,9 \mu H \quad (52)$$

$$R_r = R_{pu} \cdot Z_{base} = 0,121 \Omega \quad (53)$$

APÊNDICE B – CÓDIGO DE MEDIÇÃO PARA POTÊNCIA APARENTE

O código abaixo, corresponde ao utilizado nesse trabalho no *Simplified C Block* do PSIM. É um código de média móvel adaptado para utilizar o valor quadrático de cada amostra que gera a média móvel quadrática e no final é realizado a raiz para obtenção do valor RMS.

```

1  #define arraySize 20
2  #define infLim 0.1
3
4  static double V[arraySize] = {0}, I[arraySize] = {0};
5  static int amostra = 0;
6  static double Vsqr = 0, Isqr = 0, S = 0;
7
8  Vsqr -= V[amostra];
9  V[amostra] = x1 * x1 / arraySize;
10 Vsqr += V[amostra];
11
12 Isqr -= I[amostra];
13 I[amostra] = x2 * x2 / arraySize;
14 Isqr += I[amostra];
15
16 amostra++;
17
18 if (amostra ≥ arraySize)
19     amostra = 0;
20
21 if (Vsqr < infLim) {
22     y1 = infLim;
23 } else {
24     y1 = sqrt(Vsqr) * sqrt(Isqr);
25 }
```

Código B.1 – Código para Medição de Potência Aparente

APÊNDICE C – CÓDIGO MPPT

O código utilizado está em (Hock Júnior, 2015) sendo adaptado para a implementação no PSIM pelo *Simplified C Block*. Além disso, está configurado para começar o controle a partir de 0,4 segundos.

```

1  static double S_max, S_ant, amplitude_nu, amplitude_n;
2  double del = 0.01;
3  static int i=0;
4
5  S_max = x1+x2+x3;
6
7  if (S_max > S_ant)
8  {
9      if(amplitude_n > amplitude_nu)
10     {
11         amplitude_nu = amplitude_n;
12         amplitude_n = amplitude_nu - del;
13     }
14     else
15     {
16         amplitude_nu = amplitude_n;
17         amplitude_n = amplitude_nu + del;
18     }
19 }
20 else
21 {
22     if(amplitude_n > amplitude_nu)
23     {
24         amplitude_nu = amplitude_n;
25         amplitude_n = amplitude_nu + del;
26     }
27     else
28     {
29         amplitude_nu = amplitude_n;
30         amplitude_n = amplitude_nu - del;
31     }
32 }
33 S_ant=S_max;
34
35
36 if (t<0.4)
37 {
38     amplitude_n=1;
39     amplitude_nu=1;
40 }
41

```

```
42 // Saturador
43 if(amplitude_n ≥ 1.04)
44 {
45     amplitude_n = 1.04;
46 }
47 else if(amplitude_n ≤ 0.94)
48 {
49     amplitude_n = 0.94;
50 }
51
52 // Output do bloco
53 y1 = amplitude_n;
```

Código C.1 – Código para mPPT

APÊNDICE D – CÁLCULO CARGAS

Esse apêndice é dedicado aos cálculos das cargas utilizadas nas simulações. Para todos os casos, é considerado uma tensão RMS aplicada no PAC de 220 V.

D.1 CARGA RESISTIVA

Para essa seção, é definido uma carga puramente resistiva equivalente a uma potência de 10 kV por fase.

$$R_c = \frac{V_r^2}{P_{1\Phi}} = \frac{220^2}{10000} = 4,84 \, \Omega$$

D.2 CARGA NÃO LINEAR LEVE

Para essa seção, é definido uma carga mista com 3 kVA para carga não linear, 3 kW para a carga puramente resistiva e 3 kVA para a carga RL com fator de potência 0,7.

D.2.1 Carga não linear

$$V_c = 1,22 \cdot V_r = 268,40 \, V \quad (54)$$

$$R_s = 0,04 \frac{V_c^2}{S} = 0,96 \, \Omega \quad (55)$$

$$R_{ret} = \frac{0,66 \cdot V_c^2}{S} = 36,38 \, \Omega \quad (56)$$

$$C_{ret} = \frac{7,5}{f_r \cdot R_{ret}} = 3,4 \, mF \quad (57)$$

D.2.2 Carga Resistiva

$$R_{res} = \frac{V_r^2}{S_{res}} = 16,13 \, \Omega \quad (58)$$

D.2.3 Carga RL

$$P_{rl} = S_{rl} \cdot FP = 2,1 \text{ kW} \quad (59)$$

$$Q_{rl} = \sqrt{S_{rl}^2 - P_{rl}^2} = 2,14 \text{ kvar} \quad (60)$$

$$Z_{rl} = \frac{V_r^2}{S^*} = \frac{V_r^2}{P_{rl} - jQ_{rl}} = (11,29 + j11,53)\Omega \quad (61)$$

$$R_{rl} = \text{Real}\{Z_{rl}\} = 11,29 \Omega \quad (62)$$

$$L_{rl} = \frac{\text{Imag}\{Z_{rl}\}}{2\pi f_r} = 30,6 \text{ mH} \quad (63)$$

D.3 CARGA NÃO LINEAR PESADA

O processo é análogo ao da seção anterior, portanto, está exposto abaixo apenas os valores obtidos. Vale destacar que é uma carga mista com 5 kVA de carga não linear, 2 kW de carga resistiva e 2 kVA de carga RL com fator de potência 0,7.

$$R_s = 0,58 \Omega \quad (64)$$

$$R_{ret} = 21,83 \Omega \quad (65)$$

$$C_{ret} = 5,7 \text{ mF} \quad (66)$$

$$R_{res} = 24,2 \Omega \quad (67)$$

$$R_{rl} = 16,94 \Omega \quad (68)$$

$$L_{rl} = 45,8 \text{ mH} \quad (69)$$