

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM INVERSOR CONECTADO À REDE ELÉTRICA  
OPERANDO COM TÉCNICAS DE MODULAÇÃO SVM, SPWM E HISTERESE PARA  
COMPENSAÇÃO DE VARIAÇÕES MOMENTÂNEAS DE TENSÃO E CORREÇÃO DE  
FATOR DE POTÊNCIA**

MATHEUS BERNARDES SOARES

Uberlândia

2022

MATHEUS BERNARDES SOARES

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM INVERSOR CONECTADO À REDE ELÉTRICA  
OPERANDO COM TÉCNICAS DE MODULAÇÃO SVM, SPWM E HISTERESE PARA  
COMPENSAÇÃO DE VARIAÇÕES MOMENTÂNEAS DE TENSÃO E CORREÇÃO DE  
FATOR DE POTÊNCIA**

Dissertação de mestrado submetida à Universidade Federal de Uberlândia – Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência (NUPEP), perante a banca examinadora, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de mestre em Ciências.  
Orientador: Dr. Luiz Carlos Gomes de Freitas

Banca Examinadora:

Dr. Luiz Carlos Gomes de Freitas (UFU)

Dr. Luiz Henrique Silva Colado Barreto (UFC)

Dr. Demercil de Souza Oliveira Júnior (UFC)

A bolsa de estudos para esta pesquisa foi concedida pela CAPES – Brasil.

Uberlândia

2022

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S676 2022	<p>Soares, Matheus Bernardes, 1995- Análise de desempenho de um inversor conectado à rede elétrica operando com técnicas de modulação SVM, SPWM e histerese para compensação de variações momentâneas de tensão e correção do fator de potência [recurso eletrônico] / Matheus Bernardes Soares. - 2022.</p> <p>Orientador: Luiz Carlos Gomes de Freitas. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Modo de acesso: Internet. Disponível em: <a href="http://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.76">http://doi.org/10.14393/ufu.di.2022.76</a> Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia elétrica. I. Freitas, Luiz Carlos Gomes de, 1976-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.3</p>
--------------	---

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
 Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 3N - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
 Telefone: (34) 3239-4707 - www.posgrad.feelt.ufu.br - copel@ufu.br



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 768, PPGEELT				
Data:	Vinte e oito de janeiro de dois mil e vinte dois	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	11:30
Matrícula do Discente:	11922EEL011				
Nome do Discente:	Matheus Bernardes Soares				
Título do Trabalho:	Análise de desempenho de um inversor conectado à rede elétrica operando com técnicas de modulação SVM, SPWM e histerese para compensação de variações momentâneas de tensão e correção do fator de potência				
Área de concentração:	Sistemas de energia elétrica				
Linha de pesquisa:	Eletrônica de potência				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Título do projeto: Estratégias de Controle para Conexão de Microrredes ao Sistema Elétrico Coordenador do projeto: LUIZ CARLOS GOMES DE FREITAS Agência financiadora: FAPEMIG Número do processo na agência financiadora: TEC-PPM-00485-17 Vigência do projeto: 31/03/2023				

Reuniu-se por meio de videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Luiz Henrique Silva Colado Barreto - UFC; Demercil de Souza Oliveira Oliveira Júnior - UFC; Luiz Carlos Gomes de Freitas - FEELT/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). Luiz Carlos Gomes de Freitas, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado(a).

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Carlos Gomes de Freitas, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/01/2022, às 11:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Demercil Souza Oliveira Junior, Usuário Externo**, em 28/01/2022, às 11:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Henrique Silva Colado Barreto, Usuário Externo**, em 28/01/2022, às 11:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **3334989** e o código CRC **DF7EAE9F**.

MATHEUS BERNARDES SOARES

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM INVERSOR CONECTADO À REDE ELÉTRICA  
OPERANDO COM TÉCNICAS DE MODULAÇÃO SVM, SPWM E HISTERESE PARA  
COMPENSAÇÃO DE VARIAÇÕES MOMENTÂNEAS DE TENSÃO E CORREÇÃO DE  
FATOR DE POTÊNCIA**

Dissertação de mestrado submetida à Universidade Federal de Uberlândia – Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência (NUPEP), perante a banca examinadora, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de mestre em Ciências.

---

Prof. Dr. Luiz Carlos Gomes de Freitas  
(Orientador)

Uberlândia

2022

## **Dedicatória**

*Aos meus pais Valdir e Maurisia,  
Aos meus irmãos Gustavo, Débora e Natália,  
À minha namorada Érika,  
À toda minha família e amigos.*

## **Agradecimentos**

Primeiramente agradeço a Deus por ter separado este caminho incrível para trilhar até aqui. Durante este percurso, Ele colocou pessoas e oportunidades para que eu pudesse enfrentar todas as dificuldades e chegar até neste momento.

Aos meus pais, que me educaram e ensinaram todos os valores que fundamentam a minha pessoa, não há palavras para agradecer e expressar o que vocês são para mim. Sem vocês esta jornada seria quase impossível. À minha madrasta Uleida pelo apoio.

Ao meu irmão Gustavo por estar sempre ao meu lado, me motivando nas horas mais difíceis.

À minha namorada Érika pela compreensão da necessidade de dedicação para com este trabalho.

Ao professor Luiz Carlos Gomes de Freitas, que além de orientador, se tornou um grande amigo. A você agradeço pela confiança, paciência, apoio e pelos inúmeros conselhos, que sem dúvida, contribuíram para formar o profissional que aqui escreve.

Aos professores Ernane por compartilhar seu extenso conhecimento na área de eletrônica de potência.

À toda minha família e amigos, que indiretamente contribuíram com palavras e incentivos para seguir com o mestrado.

Aos amigos do núcleo de pesquisa e demais professores, Antônio, Vitor Andrade, Ênio, Marcus, Pedro Augusto, Henrique, Joaquim, Ana Lúcia, Vitor Barbosa, Gustavo, Osmar, que além de ajudarem muito com as soluções técnicas, proporcionaram momentos ímpares que tornaram o dia a dia mais leve e divertido, renovando as forças para seguir firmemente com os trabalhos.

A CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa de mestrado.

*“Lança o teu pão sobre as águas,  
porque depois de muitos dias o acharás.”*

***Eclesiastes 11:1***

## Resumo

Este trabalho tem o objetivo de solucionar problemas que são frequentes no sistema elétrico, como baixo fator de potência e variações momentâneas de tensão, fazendo uso de inversores conectados à rede. Aqui é proposto um algoritmo que utiliza os valores de tensão e corrente no ponto de conexão para definir um valor de potência reativa que realiza a correção do fator de potência e a compensação da tensão. Resultados práticos evidenciam os bons resultados desta estratégia, visto que eleva o fator de potência local para próximo da unidade e reduz as variações momentâneas de tensão em aproximadamente 3%.

**Palavras chaves:** Inversores trifásicos, inversores conectados à rede, correção ativa do fator de potência, compensação de tensão, compensação de potência reativa, geração distribuída.

## **Abstract**

This work aims to solve problems that are frequent in the electrical system, such as low power and momentary voltage variations, using grid connection inverters. Here, a factor is proposed that uses the voltage and voltage values at the connection point to define a reactive power value that performs power correction and voltage measurement. Practical results show the good results of this strategy, since it raises the local power factor to close to unity and reduces momentary voltage variations by approximately 3%.

**Keywords:** Three-Phase Inverters, grid connected inverters, active power factor correction, voltage compensation, reactive power compensation, distributed generation.

## Lista de ilustrações

FIGURA 1.1 – SISTEMA PROPOSTO.....	21
FIGURA 2.1 – TRIÂNGULO DE POTÊNCIA COM POTÊNCIA REATIVA POSITIVA.....	123
FIGURA 2.2 – TRIÂNGULO DE POTÊNCIA NA PRESENÇA DE HARMÔNICOS.....	124
FIGURA 2.3 – DIAGRAMA UNIFILAR DE UM SISTEMA ELÉTRICO RADIAL.....	126
FIGURA 2.4 – DIAGRAMA FASORIAL DO SISTEMA SEM CORREÇÃO DE FP-S1 ABERTA.....	126
FIGURA 2.5 – DIAGRAMA FASORIAL DAS TENSÕES PARA CARGA INDUTIVA.....	127
FIGURA 2.6 – TRIÂNGULO DE POTÊNCIA CONSIDERANDO A CORREÇÃO DE FP.....	25
FIGURA 2.7 – GRÁFICO DA VARIAÇÃO DE IMPEDÂNCIA DO FILTRO EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA.....	28
FIGURA 2.8 – DIAGRAMA UNIFILAR DO SISTEMA COM FILTRO.....	29
FIGURA 2.9 – TÉCNICAS DE CORREÇÃO ATRAVÉS DE VARIAÇÃO DE IMPEDÂNCIA.....	33
FIGURA 2.10 – FORMA DE ONDA DA TENSÃO DA REDE E DA TENSÃO NO REATOR.....	33
FIGURA 2.11 – VARIAÇÃO DA TENSÃO EFICAZ EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE DISPARO.....	35
FIGURA 2.12 – VARIAÇÃO DA POTÊNCIA REATIVA EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DE DISPARO.....	36
FIGURA 2.13 – DIAGRAMA UNIFILAR STATCOM REALIZANDO A CORREÇÃO DO FP.....	37
FIGURA 2.14 – ESTRATÉGIA DE CONTROLE STATCOM.....	38
FIGURA 2.15 – SISTEMA DE GERAÇÃO.....	39
FIGURA 2.16 – TRIÂNGULO DE POTÊNCIA ANTERIOR E APÓS A INSERÇÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO.....	40
FIGURA 2.17 – CONFIGURAÇÃO BÁSICA DE UMA UPS.....	41
FIGURA 2.18 – CONFIGURAÇÃO DA UPS COM CHAVE DE TRANSFERÊNCIA.....	41
FIGURA 2.19 – CONFIGURAÇÃO DO DVR.....	42
FIGURA 3.1 – INVERSOR TRIFÁSICO A DOIS NÍVEIS – VSC 2L.....	46
FIGURA 3.2 – CIRCUITO “VISTO” PELA FONTE CC.....	48
FIGURA 3.3 – CIRCUITOS EQUIVALENTES PARA CADA ESTADO DE OPERAÇÃO DO INVERSOR.....	49
FIGURA 3.4 – FORMAS DE ONDA DA MODULADORA, PORTADORA E SINAL DE ACIONAMENTO DA CHAVE.....	51
FIGURA 3.5 – PLANO ALFA BETA COM OS VETORES POSICIONADOS.....	55
FIGURA 3.6 – ALGORITMO PARA IDENTIFICAÇÃO DO SETOR.....	56
FIGURA 3.7 – GRÁFICO COMPARATIVO DA TENSÃO DE SAÍDA EM FUNÇÃO DO ÍNDICE DE MODULAÇÃO (SVM E SPWM).....	57
FIGURA 3.8 – FORMAS DE ONDA MODULADORA DA SVM.....	58
FIGURA 3.9 – CONFIGURAÇÃO DO FILTRO LCL.....	59
FIGURA 3.10 – RESPOSTA EM FREQUÊNCIA DO FILTRO LCL PARA DIFERENTES VALORES DE $R_F$ .....	63
FIGURA 3.11 – DIAGRAMA SRF-PLL.....	66
FIGURA 3.12 – CÁLCULO DAS POTÊNCIAS ATIVA E REATIVA DO INVERSOR E DA CARGA.....	68
FIGURA 3.13 – MALHA DE CONTROLE DE CORRENTE.....	69
FIGURA 3.14 – MALHA ABERTA DE CORRENTE.....	69
FIGURA 4.1 – PROPOSTA DE ALGORITMO CFPCT.....	72
FIGURA 4.2 – ALGORITMO PARA CORREÇÃO DO FP E COMPENSAÇÃO DE TENSÃO (CFPCT).....	72
FIGURA 4.3 – GRÁFICO DA POTÊNCIA REATIVA REMANESCENTE EM FUNÇÃO DA POTÊNCIA ATIVA.....	74

FIGURA 4.4 – DIAGRAMA UNIFILAR DE UMA CARGA ALIMENTADA POR UMA LINHA INDUTIVA.....	75
FIGURA 4.5 – DIAGRAMA FASORIAL DA FIGURA 4.4.....	75
FIGURA 4.6 – PROCEDIMENTO PARA CÁLCULO DO NÍVEL DE CURTO.....	78
FIGURA 5.1 – DIAGRAMA DE BODE DO FILTRO PROJETADO.....	84
FIGURA 5.2 – DIAGRAMA DE BODE DE MALHA ABERTA.....	85
FIGURA 6.1 – SISTEMA DE POTÊNCIA E CONTROLE PARA A SIMULAÇÃO DA PROPOSTA.....	86
FIGURA 6.2– RESULTADO COMPUTACIONAL DA PROPOSTA NA CONDIÇÃO DE AUSÊNCIA DE CARGA..	88
FIGURA 6.3 – COMPORTAMENTO DO INVERSOR NA PRESENÇA DE CARGA INDUTIVA.....	89
FIGURA 6.4 – COMPORTAMENTO DO INVERSOR NA PRESENÇA DE CARGA CAPACITIVA.....	89
FIGURA 6.5–COMPORTAMENTO DO INVERSOR COM CARGA ACIMA DA SUA CAPACIDADE.....	90
FIGURA 6.6 – CÁLCULO DO NÍVEL DE CURTO DA BARRA.....	91
FIGURA 6.7 – OPERAÇÃO FRENTE A SAG E SWELL EQUILIBRADOS.....	92
FIGURA 6.8 – PROTÓTIPO 3KVA.....	93
FIGURA 6.9 – INVERSOR TRIFÁSICO.....	94
FIGURA 6.10 –EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO PROTÓTIPO.....	95
FIGURA 6.11.A–FORMA DE ONDA DA FASE A .....	98
FIGURA 6.11.B–THD DE CORRENTE DA FASE A.....	98
FIGURA 6.11.C–MEDIÇÃO DE POTÊNCIAS COM INVERSOR CONECTADO À REDE COM INVERSOR INJETANDO 1,5KW E FP = 0,9966.....	98
FIGURA 6.12 – RESPOSTA DE REGIME TRANSITÓRIO FRENTE A DEGRAU DE CARGA DE 250W PARA 750W.....	99
FIGURA 6.13.A–FORMAS DE ONDA DE CORRENTE, TENSÃO E POTÊNCIAS DO INVERSOR ANTES DA OPERAÇÃO DO CFPCT.....	101
FIGURA 6.13.B–FORMAS DE ONDA DE CORRENTE, TENSÃO E POTÊNCIAS DA REDE ANTES DA OPERAÇÃO DO CFPCT.....	101
FIGURA 6.13.C–FORMAS DE ONDA DE CORRENTE, TENSÃO E POTÊNCIAS DA CARGA ANTES DA OPERAÇÃO DO CFPCT.....	101
FIGURA 6.13.D –MEDIÇÕES DE POTÊNCIA ATIVA, REATIVA E FATOR DE POTÊNCIA NA REDE ANTES DA OPERAÇÃO DO CFPCT.....	101
FIGURA 6.14.A–FORMAS DE ONDA DE CORRENTE, TENSÃO E POTÊNCIAS DO INVERSOR APÓS A OPERAÇÃO DO CFPCT.....	102
FIGURA 6.14.B – FORMAS DE ONDA DE CORRENTE, TENSÃO E POTÊNCIAS DA REDE APÓS DA OPERAÇÃO DO CFPCT.....	102
FIGURA 6.14.C –FORMAS DE ONDA DE CORRENTE, TENSÃO E POTÊNCIAS DA CARGA APÓS A OPERAÇÃO DO CFPCT.....	103
FIGURA 6.14.D –MEDIÇÕES DE POTÊNCIA ATIVA, REATIVA E FATOR DE POTÊNCIA NA REDE APÓS A OPERAÇÃO DO CFPCT.....	103
FIGURA 6.15 –FORMAS DE ONDA DA TENSÃO DO PAC, CORRENTE DE FASE DA REDE E DO INVERSOR ANTES DA OPERAÇÃO DO CFPCT.....	104

FIGURA 6.16 –FORMAS DE ONDA DA TENSÃO DO PAC, CORRENTE DE FASE DA REDE E DO INVERSOR DURANTE O INÍCIO DA OPERAÇÃO DO CFPCT.....	104
FIGURA 6.17 –FORMAS DE ONDA DA TENSÃO DO PAC, CORRENTE DE FASE DA REDE E DO INVERSOR APÓS O INÍCIO DA OPERAÇÃO DO CFPCT.....	105
FIGURA 6.18 –MEDIÇÕES DA TENSÃO DA REDE ANTES E APÓS A INJEÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA – VALOR INICIAL DE 140V.....	106
FIGURA 6.19 –MEDIÇÕES DE TENSÃO DA REDE ANTES E APÓS A INJEÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA – VALOR INICIAL DE 220V.....	106
FIGURA 6.20 – JANELA DE TEMPO DURANTE O <i>SAG</i> – SEM A ATUAÇÃO DO CFPCT.....	108
FIGURA 6.21 – JANELA DE TEMPO DURANTE O <i>SAG</i> – COM A ATUAÇÃO DO CFPCT.....	109
FIGURA 6.22 – JANELA DE TEMPO APÓS O <i>SAG</i> – SEM A ATUAÇÃO DO CFPCT.....	110
FIGURA 6.23 – JANELA DE TEMPO APÓS O <i>SAG</i> – COM A ATUAÇÃO DO CFPCT.....	110
FIGURA 6.24 – JANELA DE TEMPO DURANTE O <i>SWEEL</i> – SEM A ATUAÇÃO DO CFPCT.....	111
FIGURA 6.25 – JANELA DE TEMPO DURANTE O <i>SWEEL</i> – COM A ATUAÇÃO DO CFPCT.....	112
FIGURA 6.26 – JANELA DE TEMPO APÓS O <i>SWEEL</i> – SEM A ATUAÇÃO DO CFPCT.....	113
FIGURA 6.27 – JANELA DE TEMPO APÓS O <i>SWEEL</i> – COM A ATUAÇÃO DO CFPCT.....	113

## **Lista de tabelas**

TABELA 2.1 – CLASSIFICAÇÃO DAS VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO SEGUNDO PRODIST (VTCD'S)

TABELA 2.2 – CLASSIFICAÇÃO DAS VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO SEGUNDO IEEE-1159.

TABELA 2.3 – PRINCIPAIS CAUSAS DE VTCD'S.

TABELA 2.4 – PRINCIPAIS EFEITOS CAUSADOS PELOS VTCD'S.

TABELA 3.1 – CONJUNTO DE CHAVES QUE PODEM SER ACIONADAS NO MESMO INSTANTE.

TABELA 3.2 – TENSÕES DE LINHA E DE FASE DE ACORDO COM OS ESTADOS DAS CHAVES.

TABELA 3.3 – VETORES REFERENTES AOS ESTADOS DAS CHAVES.

TABELA 3.4 – SEQUÊNCIA DE CHAVEAMENTO PARA CADA SETOR.

TABELA 5.1 – VALORES DE PROJETO DO PROTÓTIPO.

TABELA 5.2 – PARÂMETROS DO DISPOSITIVO SKM50GB12T4.

TABELA 5.3 – VALORES DE PROJETO PARA ESPECIFICAÇÃO DO FILTRO.

TABELA 5.4 – VALORES CALCULADOS PARA SUPORTABILIDADE DO FILTRO.

TABELA 6.1 – ESPECIFICAÇÃO DOS COMPONENTES DO INVERSOR.

TABELA 6.2 – CONDIÇÕES PARA O TESTE DE MALHA ABERTA.

TABELA 6.3 – CONDIÇÕES PARA OS TESTES DO INVERSOR CONECTADO À REDE.

## Lista de abreviaturas e símbolos

A	Ampère, unidade de corrente elétrica
ABSOLAR	Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica
BT	Baixa tensão
CA	Corrente alternada
Cb	Capacitância de base do filtro
Cf	Capacitância do filtro
Cn,p	Número de grupos formados por p elementos em um conjunto de n elementos
Ccap	Capacitância do banco de capacitores
CC	Corrente contínua
D	Potência de distorção
DVR	<i>Dynamic voltage restorer</i> , Restaurador dinâmico de tensão
E	Tensão terminal da fonte
R1	Resistência do indutor L1
R2	Resistência do indutor L2
RP	Regime permanente
Rf	Resistência série da capacitância Cf.
Rfp	Resistência do filtro passivo.
RL	Resistência de Thévenin da fonte.
RLC	Configuração do filtro passivo sintonizado – Resistência – indutância – capacitância
Rc	Resistência da carga
Rs	Resistência da rede
f	Frequência
F	Farad, unidade de capacitância
FC-TCR	Reator controlado a tiristor com capacitor fixo
Ff	Frequência fundamental
Fr	Frequência de ressonância
Fref	Frequência do sinal de referência do inversor
Fres	Frequência de ressonância em hz
Fs	Frequência de chaveamento
FP	Fator de potência
FPmax.	Fator de potência máximo de conversores com reator no link CC
h	Ordem harmônica
H	Henry, unidade de indutância
Icd	Corrente da carga de eixo direto
Icq	Corrente da carga de eixo em quadratura
Icf	Corrente no capacitor do filtro
Ih	Corrente de ordem harmônica h
Icc	Corrente do barramento CC
If	Corrente eficaz na frequência fundamental
Ii	Corrente no indutor L1
Ig	Corrente no indutor L2.
Is	Corrente drenada da rede
Isa	Projeção do vetor de corrente Is no vetor de tensão terminal (Parcela ativa da corrente)
Isr	Projeção do vetor de corrente Is no vetor ortogonal ao vetor de tensão terminal (Parcela reativa da corrente)
Ic	Corrente da carga
Icd	Corrente da carga de eixo direto
Icq	Corrente da carga de eixo em quadratura
Igd	Corrente da rede de eixo direto
Igq	Corrente da rede de eixo em quadratura
Icap	Corrente no banco de capacitores
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>

IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
Id*	Corrente de referência de eixo direto
Iq*	Corrente de referência de eixo em quadratura
k	Kilo, equivalente a mil
K	Variável que identifica o setor em que o vetor de referência se encontra
Ka	Fator de atenuação do filtro
L	Indutância do filtro passivo RLC
L1	Indutância do lado do conversor
L2	Indutância do lado da rede
LCL	Configuração de filtro passivo indutor-capacitor-indutor
ma	Índice de modulação
M	Mega, equivalente a um milhão
MC	Modo corrente
MT	Modo tensão
MIT	Motor de indução trifásico
n	Número de elementos em cada grupo
p	Número de pulsos do conversor
Q	Potência reativa
Qc	Potência reativa da carga
Qn	Potência reativa após a correção.
Qcap	Potência reativa do banco de capacitores
Qnf	Potência reativa do filtro após aumentar a tensão nominal
Qst	Potência reativa absorvida ou fornecida pelo STATCOM
Qrem	Potência reativa remanescente.
Q*	Potência reativa de referência
to	Instante em que é feita a leitura da tensão inicial para o cálculo de Scc
ton	Tempo em que a chave fica fechada durante um período de chaveamento
toff	Tempo em que a chave fica aberta durante um período de chaveamento
tf	Instante em que é feita a leitura da tensão final para o cálculo de Scc
Ta	Tempo em que o vetor estático anterior ao de referência fica ativo
Tb	Tempo em que o vetor estático posterior ao de referência fica ativo
Ts	Período de chaveamento
TCR	<i>Thyristor-Controlled Reactor</i>
TSR	<i>Thyristor-Switched Reactor</i>
TSC	<i>Thyristor-Switched Capacitor</i>
TSC-TCR	<i>Thyristor-Switched Capacitor- Thyristor-Controlled Reactor</i>
THDi	Taxa de distorção harmônica de corrente
THDv	Taxa de distorção harmônica de tensão
p	Número total de elementos
P	Potência ativa
Pc	Potência ativa da carga.
Pjfpa	Perdas joulicas com fator de potência antigo
Pjfpn	Perdas joulicas com fator de potência novo
Pmppt	Potência ativa máxima extraída da fonte primária
Psg	Potência ativa gerada pelo sistema de geração
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PLL	<i>Pulse Locked Loop</i>
PI	Compensador proporcional integral
p.u.	Por unidade
Pb	Potência ativa injetada na rede
S1	Chave superior do braço da fase A
S2	Chave inferior do braço da fase C
S3	Chave superior do braço da fase B
S4	Chave inferior do braço da fase A
S5	Chave superior do braço da fase C

S6	Chave inferior do braço da fase B
S	Potência aparente
Sa	Potência aparente antiga
Scc	Potência de curto circuito
Sn	Potência aparente nova
Sni	Potência aparente nominal do inversor
Sf	Potência aparente do filtro
Sni	Potência aparente nominal do inversor
SVCs	<i>Static Var Copensators</i>
SVM	<i>Space vector modulation</i>
STATCOM	Compensador estático
SPWM	<i>Sinusoidal Pulse Width Modulation</i>
Un	Tensão nominal
Unf	Nova tensão nominal do filtro, após realizar a mudança da tensão nominal.
UPS	<i>Uninterruptible Power Supplies</i> , Fonte ininterrupta de energia
V	Volt, unidade de tensão
Va	Tensão da fase A
Vb	Tensão da fase B
Vc	Tensão da fase C
Vab	Tensão entre as fases A e B
Vbc	Tensão ente as fases B e C
Vca	Tensão entre as fases C e A
Vcc	Tensão do barramento CC
Vt	Tensão terminal da carga
Vm	Tensão de pico da rede
Vh	Tensão harmônica de ordem h
Vtf	Tensão terminal da carga após a variação de potência reativa
Vto	Tensão terminal da carga antes da variação de potência reativa
VA	Volt-Ampère, unidade de potência aparente
VSC	<i>Voltage Source Converter</i> , Conversor fonte de tensão
Vf	Valor eficaz da tensão fundamental
Vi	Tensão terminal do inversor
Vp	Tensão instantânea aplicada sobre o elemento passivo
Vj	Tensão na barra j
Vk	Tensão na barra k
Vg	Tensão da rede
Vgd	Tensão de eixo direto da rede.
Vgq	Tensão de eixo em quadratura da rede.
Vcc	Tensão do barramento CC
VTCD	Variação de tensão de curta duração
$V\alpha$	Tensão de referência referenciada no eixo alfa
$V\beta$	Tensão de referência referenciada no eixo beta
VMr	Valor médio da tensão de referência
VMs	Valor médio do pulso aplicado na chave
Va(t)	Tensão instantânea de referência da fase A
Vb(t)	Tensão instantânea de referência da fase B
Vc(t)	Tensão instantânea de referência da fase C
Vx	Projeção do vetor de referência no vetor estático imediatamente anterior
Vx+1	Projeção do vetor de referência no vetor estático imediatamente posterior
VpLLref	Pico da tensão de linha de referência
Xc	Reatância da carga
Xcap	Reatância do banco de capacitores
Xcf	Reatância do banco de capacitores na frequência fundamental
Xcc	Reatância de curto circuito da rede

$X_{jk}$	Reatância entre a barra j e a barra k
$X_L$	Reatância da linha que alimenta a carga
$X_f$	Reatância do filtro
$W$	Watt, unidade de potência ativa
$Z_b$	Impedância de base do filtro
$Z_f$	Impedância do filtro
$ V^* $	Módulo do vetor da tensão de referência no plano alfa beta.
$\Delta V_{p.u.}$	Variação de tensão por unidade
$\Delta V$	Variação de tensão
$\Delta I_{L \max}$	Máxima oscilação de corrente no indutor L1.
$\alpha$	Ângulo de disparo
$\Phi_{fp}$	Ângulo do fator de potência
$\Phi_{fpa}$	Ângulo do fator de potência antes da correção
$\Phi_{fpn}$	Ângulo do fator de potência depois da correção
$\theta_j$	Ângulo da tensão na barra j
$\theta_k$	Ângulo da tensão na barra k
$\theta'$	Ângulo entre o vetor de referência e o vetor estático imediatamente anterior.
$\Omega$	Ohm, unidade de resistência elétrica
$\delta$	Ângulo de potência ou de carga.
$\omega_s$	Frequência de chaveamento em rd/s.
$\omega_{res}$	Frequência de ressonância em rd/s.

## Sumário

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>20</b>
1.1 – Considerações iniciais .....	20
1.2 – Contribuições da dissertação .....	21
1.3 – Estrutura da dissertação.....	23
<b>CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>25</b>
2.1 – Considerações iniciais .....	25
2.2 – Fator de potência e técnicas de correção .....	25
2.2.1 – Técnicas de correção passiva .....	25
2.2.2 – Técnicas de correção ativa .....	31
2.3 – Variações de tensão e técnicas de correção.....	40
2.4 – Motivação da pesquisa e trabalhos relacionados à proposta .....	42
<b>CAPÍTULO 3 – INVERSOR TRIFÁSICO.....</b>	<b>46</b>
3.1 – Considerações iniciais .....	46
3.2 – Princípio de funcionamento .....	46
3.3 – Técnica de modulação .....	50
3.4 – Filtro LCL .....	59
3.5 – Sincronismo com a rede (PLL – <i>Phase Locked Loop</i> ).....	65
3.6 – Estratégia de controle .....	66
<b>CAPÍTULO 4 – PROPOSTA PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA E COMPENSAÇÃO DE TENSÃO (CFPCT) .....</b>	<b>71</b>
4.1 – Considerações iniciais .....	71
4.2 – Correção do fator de potência .....	73
4.3 – Regulação de tensão .....	75
<b>CAPÍTULO 5 – PROJETO .....</b>	<b>79</b>
5.1 – Considerações iniciais].....	79
5.2 – Especificação da tensão do barramento CC .....	79
5.3 – Chaves semicondutoras .....	80
5.4 – Projeto do filtro LCL.....	81

<b>CAPÍTULO 6 – RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>86</b>
6.1 – Considerações iniciais .....	86
6.2 – Resultados de simulação .....	86
6.2.1- Operação com ausência de carga .....	87
6.2.2- Operação com correção do FP da carga.....	88
6.2.3- Operação com carga reativa superior a capacidade do inversor .....	89
6.2.4- Cálculo do nível de curto da barra .....	90
6.2.5- Compensação de tensão frente a SAG e SWELL tipo A.....	91
6.3 – Resultados experimentais.....	92
6.3.1 - Operação conectada à rede sem carga no PAC.....	96
6.3.3- Operação com correção do FP da carga.....	99
6.3.3.1 – Procedimento de teste.....	99
6.3.3.1 – Regime permanente.....	100
6.3.3.1 – Regime transitório .....	103
6.3.4 - Cálculo do nível de curto da barra .....	105
6.3.5 - Compensação de tensão frente a SAG e SWELL equilibrados.....	107
6.3.5.1 – Procedimento de teste.....	107
6.3.5.2 – Afundamento de tensão (SAG).....	107
6.3.5.3 – Elevação de tensão (SWEEL) .....	111
<b>CAPÍTULO 7 – CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>114</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>117</b>
<b>ANEXO I – Síntese de trabalho comparativo entre as técnicas de modulação.....</b>	<b>121</b>
<b>ANEXO II – Definições de fator de potencia.....</b>	<b>123</b>
<b>ANEXO III – Definições de variações momentâneas de tensão.....</b>	<b>129</b>
<b>ANEXO IV -- Declaração de autoria própria.....</b>	<b>131</b>



## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

### 1.1 – Considerações iniciais

Acompanhando o crescimento e o desenvolvimento da tecnologia, sabe-se que a energia elétrica é fundamental para a sociedade como um todo. Utiliza-se esse insumo a todo momento, não apenas para fins econômicos. Mas também para finalidades pessoais, que objetivam trazer conforto para as pessoas, por exemplo; utilização de tecnologias de comunicação, aquecimento e/ou resfriamento de ambientes e transporte de pessoas.

Acompanhando a crescente demanda por energia elétrica, é necessário que o número de usinas geradoras também aumente. Entretanto, a escolha da forma de geração deve ser feita com muita cautela, levando em consideração alguns aspectos, como; tipo de fonte (intermitente ou não intermitente), impacto ambiental, eficiência, custo, retorno de investimento, estudos climáticos da região em que será construída a usina, dentre outros.

As fontes alternativas de energia, principalmente solar e eólica, estão em um cenário mundial otimista, com expectativa de crescimento de até 50% até 2024 (The Guardian, 2019). Não distante desse cenário, o Brasil está acompanhando este crescimento, principalmente em relação às que foram citadas anteriormente. O país com características climáticas favoráveis conta com mais de 2000 megawatts (MW) de geração fotovoltaica centralizada em operação e mais de 1500 MW em construção, com início de operação previsto para 2022 (ABSOLAR, 2019). Em relação a geração de energia eólica, atingiu-se 15 gigawatts (GW) em capacidade instalada, com mais de 600 parques e uma perspectiva de geração para 2024 de 19 GW (Canal Energia, 2019).

Para que a energia destas fontes não despacháveis seja injetada na rede elétrica é necessário fazer uso de dispositivos inversores. Além de executar a conversão de energia renovável em energia elétrica, os inversores também devem seguir alguns critérios de qualidade da energia, seja conectado em outro sistema ou isolado, obedecendo os requisitos normativos para tal finalidade. Para isso, estes inversores contam com diversos sistemas de controle, cada um com suas particularidades para dada aplicação. Com estes sistemas de controle, é possível de uma maneira ativa, rápida e eficiente, de controlar diversas grandezas, como; corrente, tensão, frequência, potência ativa e reativa, por exemplo.

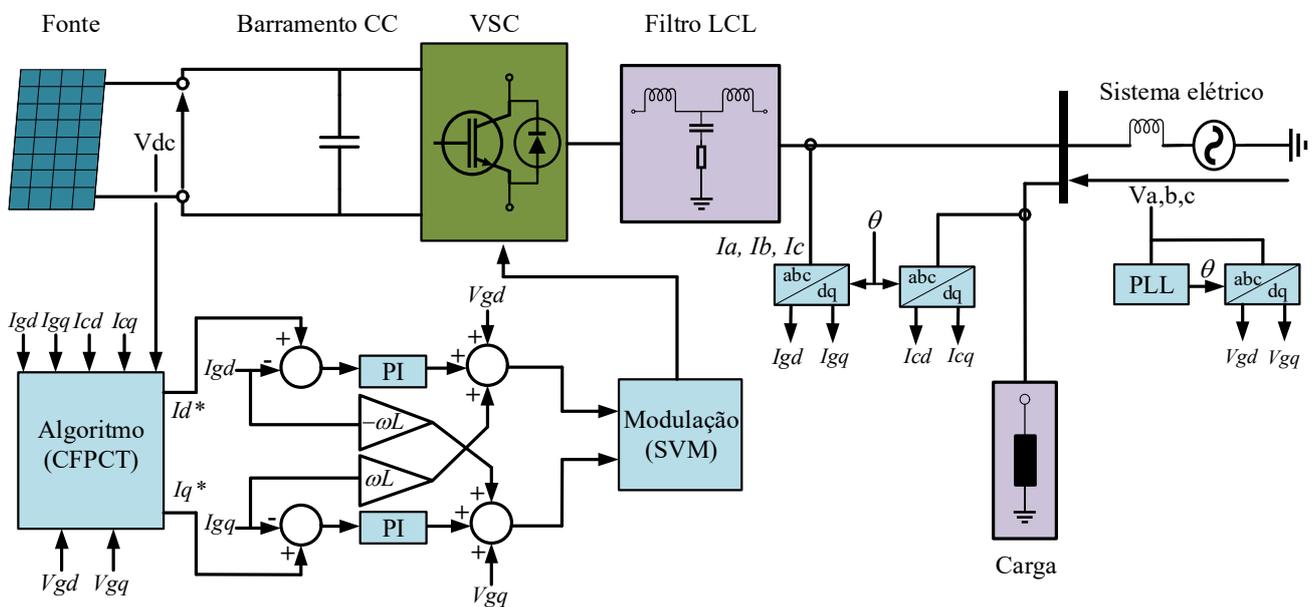
Através deste universo de possibilidades de controle viabilizado pela revolução da eletrônica de potência, finalmente pode-se utilizar dos conversores eletrônicos para solucionar problemas que são frequentes em qualquer sistema elétrico; harmônicos, variação de tensão, fator de potência, desequilíbrio, armazenamento de energia, dentre outros.

Neste trabalho é proposta uma forma de solução de dois dos problemas mencionados anteriormente, correção do fator de potência e variações equilibradas de tensão. Para tanto, será utilizado um inversor trifásico a dois níveis *full-bridge*, que por sua vez já são largamente utilizados para conexão de fontes intermitentes no sistema elétrico. Ou seja, através da contribuição desse trabalho, pode-se utilizar desse tipo de geração limpa não só para injetar energia na rede, mas também para corrigir o fator de potência de uma carga e/ou ao mesmo tempo, protegê-la contra variações equilibradas de tensão, que são frequentes em um sistema elétrico, principalmente os industriais.

## 1.2 – Contribuições da dissertação

A ideia principal apresentada nesse trabalho é a criação e validação de um algoritmo de correção de fator de potência e compensação de tensão frente a variações equilibradas. Tais variações de tensão geralmente são ocasionadas por curto circuitos trifásicos, partida de MIT, entrada e saída de grandes cargas equilibradas, dentre outros fenômenos. Para realizar esse propósito, o trabalho em questão utiliza um sistema inversor fonte de tensão controlado em modo corrente (Figura 1.1). As contribuições do trabalho estão listadas abaixo.

Figura 1.1: Sistema proposto.



Fonte: Dados do próprio autor.

### Correção ativa do fator de potência local da instalação

Utiliza-se da potência remanescente dos inversores empregados em fontes alternativas e intermitentes de energia, para correção do fator de potência local da instalação. Isso aproveita o

potencial remanescente dos inversores, que na maioria do tempo não opera em sua capacidade nominal, para solucionar um problema que é comum, principalmente em sistemas elétricos industriais.

O uso dos inversores para tal finalidade traz benefícios tanto para a unidade consumidora quanto para a concessionária de energia. Para o consumidor é vantajoso pois evita a ocorrência de multa tanto após da instalação do sistema fotovoltaico, quanto devido a quantidade de potência reativa das cargas locais. Para a concessionária é interessante devido a redução da corrente que circula pela rede, reduzindo as perdas técnicas e aumento a eficiência da rede.

### **Compensação de tensão em malha aberta frente a variações equilibradas**

Visando a proteção das cargas frente a variações de tensão do tipo A, o algoritmo proposto realiza a detecção da variação da tensão e, caso a potência remanescente dos inversores seja suficiente para corrigi-la, realiza a compensação, adequando-a para os valores aceitáveis. No ambiente industrial, essa função é interessante principalmente para cargas eletrônicas, que são altamente sensíveis a variações de tensão. Em sistemas de distribuição, essa função é interessante para os indicadores de qualidade da energia que contabilizam tais variações na tensão.

No tocante a estratégia de controle para compensação de tensão, essa é feita em malha aberta e dispensa a necessidade de modelagem da planta e a especificação de compensadores.

### **Validação da proposta através de resultados experimentais**

Para comprovar a funcionalidade da proposta, é feito a implementação prática de um sistema inversor trifásico conectado à rede que executa o algoritmo proposto.

### **Utilização e implementação de conceitos avançados de eletrônica de potência**

Além da implementação das funções adicionais propostas, utiliza-se de diversos conceitos avançados de eletrônica de potência, que além de serem importantes do ponto de vista técnico, também contribuem do ponto de vista pedagógico. Os conceitos mencionados estão listados abaixo.

- Sincronismo com a rede através de PLL (*Phase Locked Loop*).
- Transformação de coordenadas alternadas em contínuas, através da transformada de Park (dq0);
- Utilização de filtros passivos de terceira ordem, através da configuração LCL.
- Controle de corrente em malha fechada.
- Controle de potência ativa e reativa.
- Implementação digital do sistema de controle utilizando o controlador TMS320F28335 da *Texas Instruments*.

- Utilização da modulação vetorial convencional – SVM (*Space Vector Modulation*) em inversores conectados à rede.

### **1.3 – Estrutura da dissertação**

Este trabalho foi estruturado da seguinte maneira:

#### **Capítulo 1 – Introdução**

Neste capítulo foi apresentado uma breve introdução sobre a importância da energia elétrica para a sociedade, ilustrou-se também a possibilidade de utilizar fontes de energia que utilizam inversores para solucionar problemas que são recorrentes em um sistema elétrico. As contribuições presentes neste trabalho também estão presentes nesse capítulo.

#### **Capítulo 2 – Estado da arte**

Este capítulo ilustra as formas clássicas de correção e compensação de tensão, junto com o cenário atual dos trabalhos científicos que estão relacionados com o tema deste trabalho. Apresentando, principalmente, as técnicas existentes para correção de fator de potência e regulação de tensão. Também é realizado uma revisão dos trabalhos que envolvem o controle de potência reativa em inversores que conectam fontes fotovoltaicas com a rede elétrica.

#### **Capítulo 3 – Inversor trifásico**

Este capítulo apresenta o funcionamento do inversor trifásico conectado à rede. Abordando os conceitos que são base para o funcionamento deste dispositivo, como; princípio de funcionamento, técnica de modulação, filtro de saída, sincronismo com a rede, estratégia de controle de corrente.

#### **Capítulo 4 – Proposta de correção do FP e regulação de tensão**

Este capítulo apresenta de fato, a contribuição deste trabalho. Ilustrando o funcionamento detalhado do algoritmo para correção do fator de potência, detecção de variações de tensão e regulação de tensão.

#### **Capítulo 5 – Projeto**

Este capítulo apresenta a etapa de projeto e especificação dos componentes do sistema como um todo, como; tensão do barramento CC, semicondutores e filtro.

**Capítulo 6 – Resultados de simulação e experimentais**

Neste momento primeiramente é apresentado os resultados de simulação. Em seguida, é apresentado os detalhes construtivos do protótipo utilizado para realização dos ensaios e por fim, os resultados práticos obtidos em bancada.

**Capítulo 7 – Conclusão e considerações finais**

Por fim, por meio dos resultados computacionais e práticos, este capítulo discorre sobre a conclusão do trabalho em geral. Pontuando as contribuições e as sugestões para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE

### 2.1 – Considerações iniciais

Neste momento, para introduzir o tema juntamente com as técnicas utilizadas, serão apresentados os conceitos de fator de potência e variação de tensão (Anexos II e III). Após a explicação das formas clássicas de corrigir estes fenômenos, serão apresentados trabalhos recentes que estão relacionados com o tema desta dissertação, abordando de forma crítica as principais vantagens e oportunidades.

### 2.2 – Fator de potência e técnicas de correção

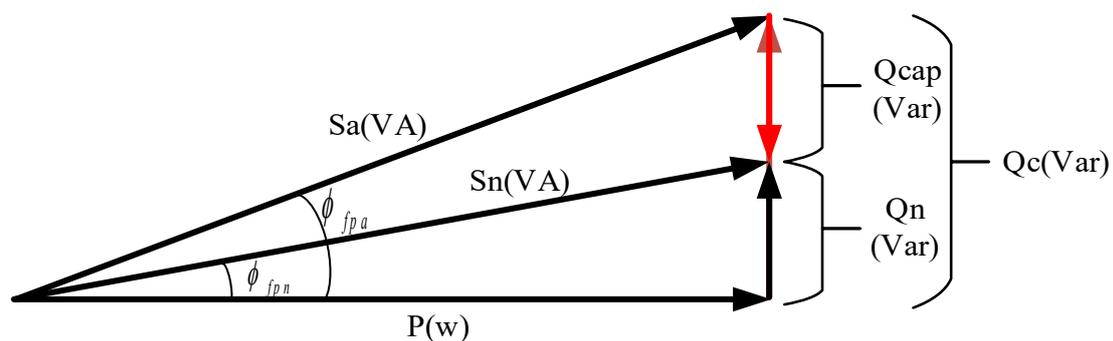
#### 2.2.1 – Técnicas de correção passiva

A correção do FP por meio de técnicas passivas é feita pela inserção de capacitores ou indutores em paralelo com a carga. Também pode-se fazer uso de máquinas síncronas operando como compensador síncrono, fornecendo ou absorvendo potência reativa.

#### Instalação de capacitores *shunt*

Considerando um sistema em que não há harmônicos, seja de tensão e/ou de corrente, consiste basicamente em determinar a potência reativa da carga e compensar através da instalação de um banco de capacitores em paralelo, Figura 2.3.

Figura 2.6: Triângulo de potência considerando a correção de FP.



Fonte: Dados do próprio autor.

Em que :

Sa : Potência aparente antiga [VA];

Sn : Potência aparente nova [VA];

Qcap : Potência reativa do banco de capacitores [Var];

Qc : Potência reativa antes da correção do FP [Var];

Qn : Potência reativa após a correção [Var];

$\phi_{fpn}$  : Ângulo do fator de potência novo [Grau ou Radiano];

$\phi_{fpa}$  : Ângulo do fator de potência antigo [Grau ou Radiano];

A especificação do banco de capacitores é feita por meio da tensão nominal, potência ativa, FPa e FPn. Através dessas informações e seguindo a metodologia apresentada abaixo, é possível calcular a capacitância do banco de capacitores necessário para corrigir o fator de potência.

$$Q_c = P \cdot \sqrt{\frac{1}{FP_A} - 1} \quad (2.7)$$

$$Q_n = P \cdot \sqrt{\frac{1}{FP_N} - 1} \quad (2.8)$$

$$Q_{cap} = Q_c - Q_n \quad (2.9)$$

$$C_{cap} = \frac{Q_{cap}}{2\pi \cdot f \cdot U_n^2} \quad (2.10)$$

Em que :

FPa : Fator de potência antigo;

FPn : Fator de potência novo;

Ccap : Capacitância do banco de capacitores [F];

f : Frequência [Hz];

Un : Tensão nominal [V].

Um detalhe interessante de mencionar neste momento é sobre a necessidade de verificar se a presença de harmônicos na rede em que o banco de capacitores será instalado. A iteração dos harmô-

nicos com o banco de capacitores, quando não especificados para suportar tal iteração, pode provocar ressonância e levar a destruição do banco. A especificação de banco de capacitores para redes que possuem um conteúdo harmônico significativo será apresentada a seguir por meio da estratégia de especificação do filtro passivo.

### Filtro passivo para correção do FP

Em sistemas elétricos que possuem baixo FP e considerável THDI ou THDV, deve-se adotar uma estratégia de correção de FP diferente da apresentada no tópico anterior, pois é necessário considerar a presença desses harmônicos na especificação dos componentes. Nesse sentido, a solução mais prudente a ser adotada é a instalação de filtros passivos ou ativos.

O filtro passivo consiste em configurar indutores, capacitores e resistores para reduzir determinado conteúdo harmônico, seja de tensão e/ou corrente. A configuração série é comumente utilizada em conversores eletrônicos para reduzir o conteúdo harmônico em altas frequências, com a finalidade de adequar o conteúdo harmônico às normas vigentes. A configuração paralela utiliza do fenômeno da ressonância para proporcionar um caminho de menor impedância para a corrente, evitando que correntes com alto conteúdo harmônico circule pelo sistema elétrico e cause problemas como; aumento das perdas nos condutores, distorção das tensões, mau funcionamento de determinados equipamentos. Nesse item será apresentado a utilização do filtro passivo na configuração paralela, visto que o intuito da abordagem da correção do FP possui um viés corretivo.

Este trabalho fará referência a configuração resistor indutor capacitor (RLC) Figura 2.8. A impedância desse filtro é apresentada em 2.11 e o gráfico em função da frequência é ilustrado na Figura 2.7. Nota-se que, além da vantagem de filtrar as correntes harmônicas que possuem frequências próximas da frequência de ressonância, quando especificado de forma correta, o filtro passivo paralelo pode realizar a correção do fator de potência da instalação, visto que na frequência fundamental (anterior a de ressonância) possui carácter capacitivo. Essa característica pode ser observada na Figura 2.7.

$$Z_{fp} = R_{fp} + jX_{Lf} - jX_{Cf} = R_{fp} + j \left( \omega L_f - \frac{1}{\omega C_f} \right) \quad (2.11)$$

Em que :

$Z_{fp}$  : Impedância do filtro [ $\Omega$ ];

$R_{fp}$  : Resistência do filtro [ $\Omega$ ];

$X_{LF}$  : Reatância indutiva [ $\Omega$ ];

$X_{CF}$  : Reatância capacitiva [ $\Omega$ ];

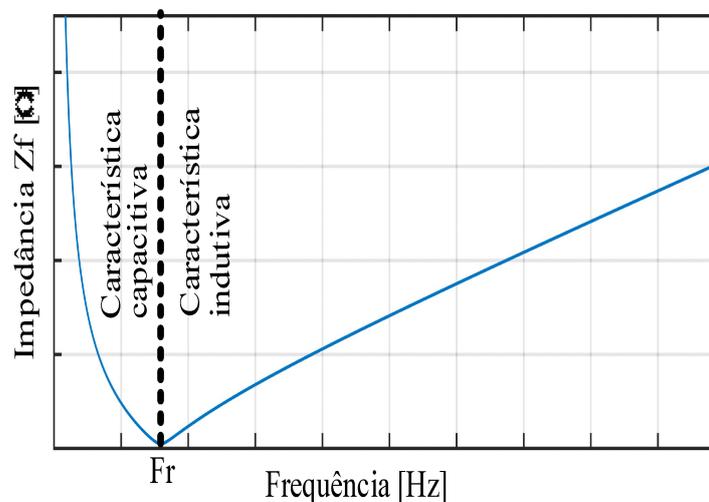
$L_f$  : Indutância do filtro [H];

$C_f$  : Capacitância do filtro [F];

Na Figura 2.8, quando a chave  $s_1$  está fechada e o filtro em operação, devido ao caminho de menor impedância, as correntes harmônicas  $I_h$  com frequência próxima a de ressonância, passam a circular pelo filtro, evitando os problemas que causam quando circulam pelo sistema elétrico. Referente ao local da instalação, recomenda-se instalar o mais próximo possível da fonte de harmônicos. Outro ponto a ser destacado é a verificação da frequência de ressonância série e paralela do filtro com a rede. Deve-se verificar se não há correntes harmônicas com frequência muito próxima das frequências de ressonância citadas. Caso exista, deve-se refazer o projeto para distanciar as frequências de ressonância dessas correntes harmônicas.

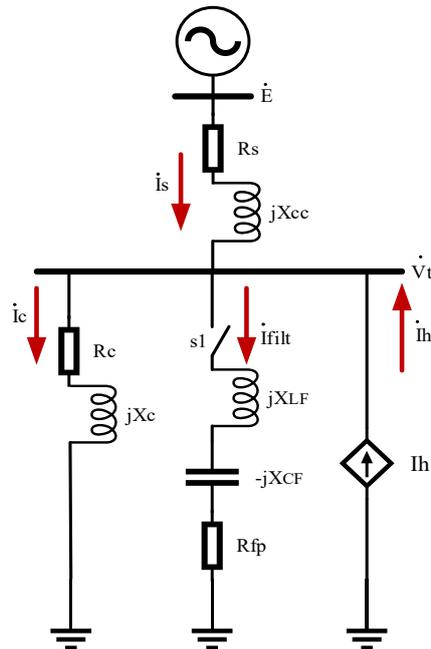
Neste trabalho não será apresentado o projeto do filtro por completo, visto que o objetivo aqui é o FP. Porém, serão mostrados os pontos mais importantes para determinação do banco de capacitores que fornecerá a potência reativa necessária para corrigir o FP. A especificação do filtro é apresentada de forma detalhada em (SINGH; CHANDRA; AL-HADDAD, 2015).

Figura 2.7: Gráfico da variação da impedância do filtro em função da frequência.



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 2.8: Diagrama unificar do sistema com filtro.



Fonte: Dados do próprio autor.

Os pontos mais importantes na especificação do banco de capacitores para o filtro, juntamente com a metodologia de cálculo estão apresentados abaixo.

➤ **Potência reativa**

A determinação da potência reativa do banco de capacitores é feita da mesma forma que foi apresentada em 2.9. Sendo que a reatância do banco depende da ordem harmônica em que o filtro será sintonizado e a reatância do filtro na frequência fundamental. Ambas podem ser calculadas através de 2.12 e 2.13.

$$X_f = \frac{V_t^2}{S_f} = \frac{V_t^2}{Q_{capf}} \tag{2.12}$$

Em que :

$X_f$  : Reatância do filtro [ $\Omega$ ];

$S_f$  : Potência aparente do filtro [VA];

$Q_{capf}$  : Potência reativa do banco de capacitores [VAr];

$$X_{cf} = \frac{h^2 \cdot X_f}{h^2 - 1} \tag{2.13}$$

Em que :

$X_{cf}$  : Reatância capacitiva do filtro [ $\Omega$ ];

$h$  : Ordem harmônica;

Após realizar o cálculo da reatância do banco de capacitores, deve-se verificar os valores comerciais disponíveis e refazer os cálculos de acordo com esses valores, com o objetivo de verificar se os valores comerciais estão dentro dos de projeto.

#### ➤ **Determinação do reator**

Para determinar o reator adequado para a sintonia do filtro na frequência especificada, utiliza-se 2.14.

$$L_f = \frac{X_{capf}}{h^2 \cdot 2\pi f_f} \quad (2.14)$$

Em que :

$f_f$  : Frequência fundamental [Hz];

#### ➤ **Cálculo dos valores nominais**

Nesse momento deve ser feito o cálculo dos valores eficazes da corrente, tensão, potência e tensão de pico do filtro. Esses cálculos são importantes para garantir a suportabilidade do banco de capacitores na presença de correntes harmônicas.

$$I_{f-RMS} = \sum_{h=0}^{\infty} \sqrt{I_h^2} \quad (2.15)$$

Em que :

$I_{f-rms}$  : Corrente eficaz do filtro considerando as harmônicas [A];

$I_h$  : Corrente harmônica de ordem  $h$ .

O valor eficaz calculado em 2.15, deve ser inferior a 30% de sobrecorrente (WEG, 2009).

$$V_{f-RMS} = \sum_{h=0}^{\infty} \sqrt{V_h^2} \quad (2.16)$$

Em que :

$V_{f-rms}$  : Tensão eficaz do filtro considerando os harmônicos [V];

$V_h$  : Tensão harmônica de ordem  $h$ .

O valor eficaz calculado em 2.16, por norma, deve ser inferior a 10% de sobretensão (WEG, 2009).

$$S_f = \sqrt{3} \cdot V_{f-RMS} \cdot I_{f-RMS} \quad (2.17)$$

Em que :

$S_f$  : Potência aparente do filtro considerando os harmônicos [VA];

Caso algum dos valores acima não atenda aos critérios mencionados, deve-se adotar um banco de capacitores para tensão imediatamente superior a especificada anteriormente. Para não alterar os cálculos do filtro, esse novo banco deve possuir a mesma reatância para tensão nominal anterior. Para isso, adota-se 2.18.

$$Q_{nf} = \frac{U_{nf}^2}{U_{f-RMS}^2} / Q_{capf} \quad (2.18)$$

Em que :

$Q_{nf}$  : Potência reativa do filtro após a correção de tensão [Var];

$U_{nf}$  : Nova tensão nominal do filtro [V];

### Compensador síncrono

Essa técnica de correção consiste na operação de um motor síncrono a vazio. Através do controle da corrente de excitação, a máquina possui três estados de operação, que estão diretamente vinculados com o fator de potência (TABATABAEI; AGHBOLAGHI; BIZON; BLAABJERG, 2017).

- **Sub-excitada:** Nesse estado, a corrente de excitação produz pouco fluxo no entreferro. Isso faz com que seja necessário drenar potência reativa da rede para manter a magnetização nominal da máquina.
- **Sobre-excitada:** Nesse estado, a corrente de excitação produz fluxo em excesso. Isso faz com que seja necessário fornecer potência reativa para a rede com o objetivo de reduzir o fluxo no entreferro da máquina.
- **Excitação normal:** Nesse estado a corrente excitação produz o fluxo nominal no entreferro da máquina. Isso possibilita a operação com FP unitário.

#### 2.2.2 – Técnicas de correção ativa

A correção ativa do FP é feita através de dispositivos eletrônicos, que utilizam semicondutores para realizar o controle de circuitos de potência. Nesse sentido, isso pode ser feito de duas formas;

correção através da variação de impedância ou utilizando conversores (retificadores e inversores). Por meio de sistemas de controle, esses dispositivos controlam a potência reativa absorvida ou fornecida e, conseqüentemente, o fator de potência.

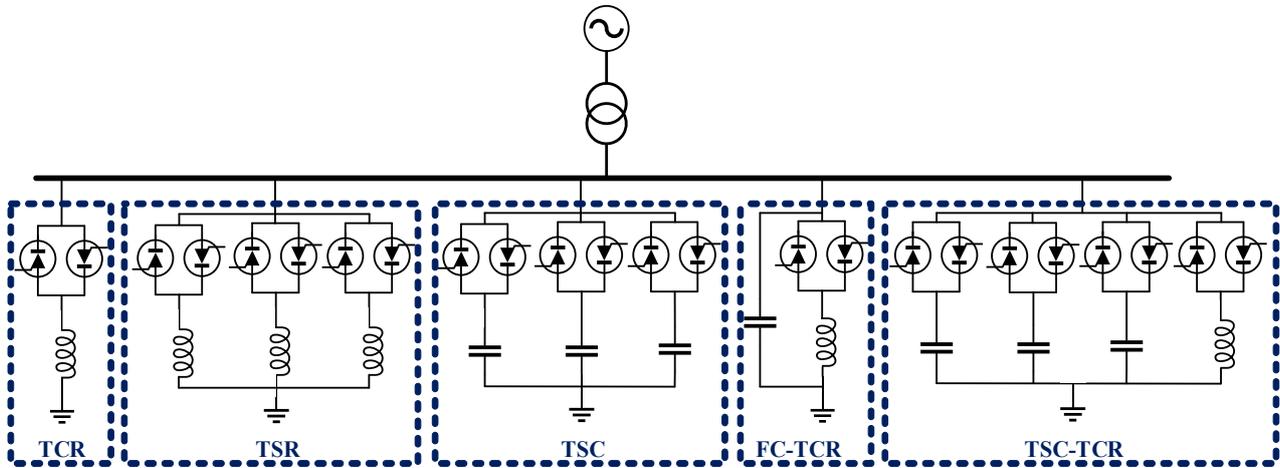
### **Correção através da variação de impedância**

A correção através da variação de impedância é feita com a utilização de tiristores associados a elementos passivos (Figura 2.9). Por meio da variação do ângulo de disparo da chave eletrônica, há a variação da tensão aplicada ao elemento passivo e, conseqüentemente, da potência reativa absorvida ou fornecida para rede. Esse é o princípio de funcionamento das técnicas de correção através de variação de impedância citadas abaixo. potência (TABATABAEI; AGHBOLAGHI; BIZON; BLAABJERG, 2017).

- **TCR:** Reator controlado a tiristor (*Thyristor-Controlled Reactor*).
- **TSR:** Reator chaveado a tiristor (*Thyristor-Switched Reactor*).
- **TSC:** Capacitor chaveado a tiristor (*Thyristor-Switched Capacitor*).
- **FC-TCR:** Capacitor fixo e reator controlado (*Fixed Capacitor Thyristor-Controlled Reactor*)
- **TSC-TCR:** Capacitor chaveado a tiristor (*Thyristor-Switched Capacitor*) reator controlado a tiristor (*Thyristor-Controlled Reactor*).

As duas últimas técnicas pertencem a família dos SVCs - Static Var Copensators, devido a característica de absorver ou fornecer potência reativa.

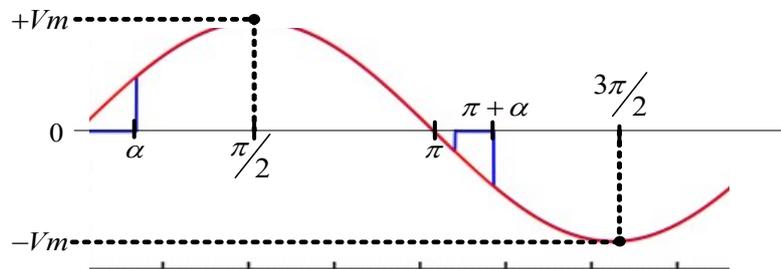
Figura 2.9: Técnicas de correção através de variação de impedância.



Fonte: Adaptado de (SHAHNIA; RAJAKARUNA; GHOSG, 2015).

A Figura 2.10 ilustra da tensão da rede e a tensão que é aplicada no elemento passivo, considerando o disparo das chaves em um ângulo alfa. Através disso é possível variar a tensão eficaz que é aplicada nos elementos passivos.

Figura 2.10: Forma de onda da tensão da rede e da tensão no reator



Fonte: Dados do próprio autor.

Em 2.20, nota-se que a potência reativa depende diretamente da tensão eficaz. Assim, é possível relacionar a potência reativa com o ângulo de disparo das chaves, que é uma variável que pode ser controlada de acordo com a potência reativa desejada.

$$Q = \frac{V_t^2}{X} \tag{2.20}$$

Em que:

X : Reatância do elemento passivo [ $\Omega$ ];

A demonstração matemática da relação entre o valor eficaz da tensão e o ângulo de disparo das chaves é apresentada nas equações 2.21 até 2.31.

A definição de tensão eficaz é apresentada em 2.21.

$$V_t = \sqrt{\frac{1}{T_p} \cdot \int_0^{T_p} V_p^2(t) \cdot dt} \quad (2.21)$$

Em que:

$V_p$  : Tensão instantâneo aplicada sobre o elemento passivo [V];

$T_p$  : Período da tensão aplicada sobre o elemento passivo [Segundos];

Observando a Figura 2.10, pode-se dividir a integral de 2.21 de acordo com 2.22.

$$V_t = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \left[ \int_0^{\alpha} V_p^2(t) \cdot dt + \int_{\alpha}^{\pi} V_p^2(t) \cdot dt + \int_{\pi}^{\alpha+\pi} V_p^2(t) \cdot dt + \int_{\alpha+\pi}^{2\pi} V_p^2(t) \cdot dt \right]} \quad (2.22)$$

Nos períodos apresentados em 2.23 e 2.24 o valor da tensão nos elementos passivos é nulo.

$$\int_0^{\alpha} V_p^2(t) \cdot dt = 0 \quad (2.23)$$

$$\int_{\pi}^{\pi+\alpha} V_p^2(t) \cdot dt = 0 \quad (2.24)$$

Considerando que a tensão aplicada  $V_p$  é puramente senoidal, temos que;

$$V_p(t) = V_m \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (2.25)$$

Aplicando (2.24) e (2.25) em (2.22);

$$V_t = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \left[ 0 + \int_{\alpha}^{\pi} V_m^2 \text{sen}^2(\omega t) \cdot dt + 0 + \int_{\alpha+\pi}^{2\pi} V_m^2 \text{sen}^2(\omega t) \cdot dt \right]} \quad (2.26)$$

Os resultados das integrais presentes em (2.26) é mostrado em (2.27) e (2.28);

$$\int_{\alpha}^{\pi} V_m^2 \text{sen}^2(\omega t) \cdot dt = V_m^2 \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{4} \right) \quad (2.27)$$

$$\int_{\alpha+\pi}^{2\pi} Vm^2 \text{sen}^2(\omega t).dt = Vm^2 \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{4} \right) \quad (2.28)$$

Aplicando (2.27) e (2.28) em (2.26) e simplificando;

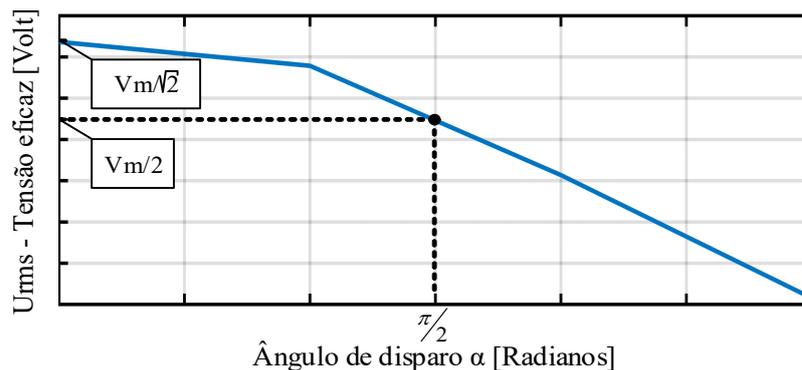
$$Vt = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \left[ Vm^2 \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{4} \right) + Vm^2 \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{4} \right) \right]} \quad (2.29)$$

$$Vt = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \left[ 2Vm^2 \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\alpha}{2} + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{4} \right) \right]} \quad (2.30)$$

$$Vt = Vm \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{\text{sen}(2\alpha)}{4\pi}} \quad (2.31)$$

Em (2.31) fica evidente a relação da tensão eficaz com o ângulo de disparo das chaves. Para verificar a coerência matemática dessa equação, é interessante considerar o ângulo de disparo nulo. Pois, nesse caso, a relação da tensão de eficaz e a de pico seria raiz de dois. É importante destacar que na prática não seria possível acionar uma chave do tipo tiristor com tensão nula. Porém, essa observação é importante para validar a equação 2.31. Na Figura 2.11 é apresentado o gráfico da variação da tensão eficaz aplicada ao elemento passivo em função da variação do ângulo disparo alfa.

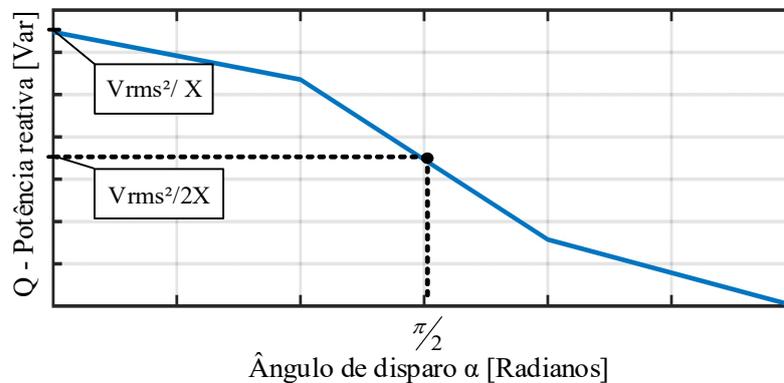
Figura 2.11: Variação da tensão eficaz em função do ângulo de disparo.



Fonte: Dados do próprio autor.

Na Figura 2.12 é apresentado o gráfico da variação da potência reativa do elemento passivo em função da variação do ângulo disparo alfa.

Figura 2.12: Variação da potência reativa em função do ângulo de disparo.



Fonte: Dados do próprio autor.

Através da possibilidade de variação da potência reativa indutiva e capacitiva, é possível realizar a correção do fator de potência de forma ativa, adequando a compensação de potência reativa da carga por meio do ajuste do ângulo de disparo das chaves. Apesar desse benefício, todas essas topologias citadas possuem o inconveniente de injeção de correntes harmônicas. O desempenho harmônico dessas topologias não será discutido nesse trabalho. Todavia, em (ACHA; AGELIDIS; LARA; MILLER, 2002) é apresentado tal discussão.

### Correção através de conversores

No caso dos retificadores, a “correção” é feita apenas na própria carga. Isso significa que um retificador que possui correção ativa corrige apenas o seu próprio FP. Essa característica é importante para reduzir o consumo de potência reativa em cargas não lineares. Entretanto, não se pode utilizar esse dispositivo para corrigir o FP local de uma instalação. Por esse motivo, esse trabalho irá focar apenas na correção ativa de FP através de inversores.

No caso dos inversores, para realizar o controle de potência reativa, utiliza-se do controle da tensão terminal do dispositivo (TABATABAEI; AGHBOLAGHI; BIZON; BLAABJERG, 2017). Em aplicações de compensação paralela é possível fazer uso de duas técnicas.

#### ➤ Compensador estático (STATCOM - *Static Compensator*)

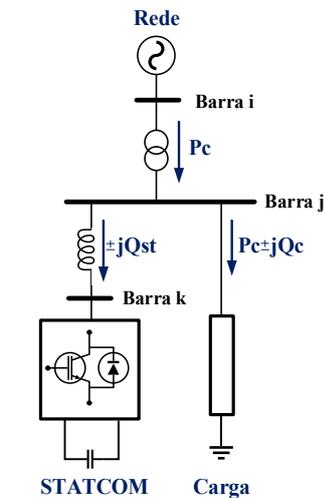
Utiliza-se em aplicações em que não há injeção de potência ativa. Isto é, não há fonte externa de energia.

O SATCOM é um compensador de potência reativa conectado em paralelo o sistema em corrente alternada, seja de transmissão ou de distribuição (SHAHNIA; RAJAKARUNA; GHOSH, 2015). Consiste em um conversor que possui as mesmas características de um compensador síncrono. Entretanto, sua resposta é mais rápida, por ser um dispositivo estático. Também possui as mesmas características que os SVC's. Porém, não possuem o inconveniente de não poder operar com baixos valores de tensão (ACHA; AGELIDIS; LARA; MILLER, 2002).

Além da compensação do FP ser consequência do controle de potência reativa, esse dispositivo apresenta outras vantagens, como; controle dinâmico da tensão, atenuação de oscilações de potência, estabilidade durante transitórios, controle de afundamentos e elevações de tensão. Outra característica interessante, é que o STATCOM substitui os SVC's em sistemas de distribuição (TABATABAEI; AGHBOLAGHI; BIZON; BLAABJERG, 2017), (SHAHNIA; RAJAKARUNA; GHOSH, 2015).

A Figura 2.13 ilustra o diagrama unifilar de um STATCOM compensando a potência reativa de uma carga, para que a rede forneça apenas potência ativa.

Figura 2.13: Diagrama unifilar STATCOM realizando a correção do FP.



Fonte: Dados do próprio autor.

A potência reativa fornecida ou absorvida pelo STATCOM pode ser calculada através de (2.32).

$$Q_{st} = \frac{|V_j|}{X_{jk}} - \frac{|V_j||V_K|}{X_{jk}} \cdot \cos(\theta_j - \theta_K) = \frac{|V_j|^2 - |V_j||V_K|}{X_{jk}} \quad (2.32)$$

Em que:

$Q_{st}$  : Potência reativa absorvida ou fornecida pelo STATCOM [Var];

$V_j$  : Tensão na barra j [V];

$V_k$  : Tensão na barra k [V];

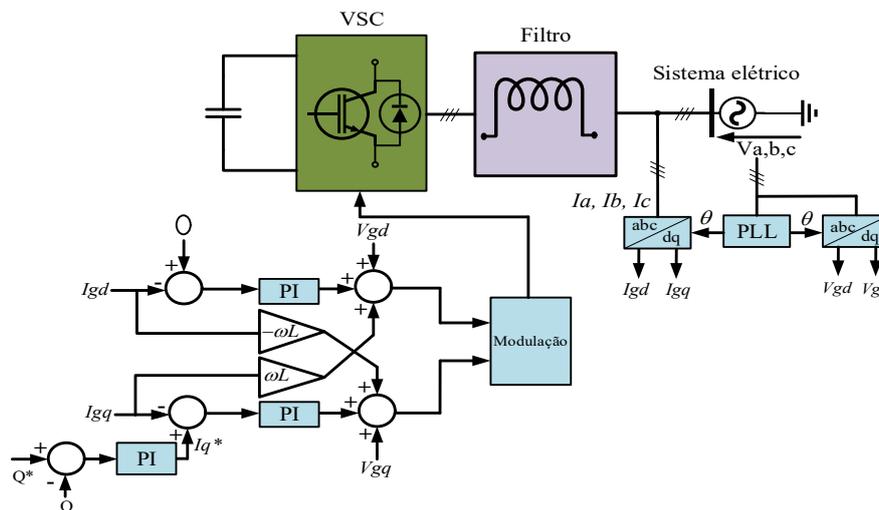
$X_{jk}$  : Reatância entre a barra j e k [ $\Omega$ ];

$\theta_j$  : Ângulo da tensão da barra j [ $^\circ$ ];

$\theta_k$  : Ângulo da tensão da barra k [ $^\circ$ ];

Para realizar a variação da potência reativa, o STATCOM atua diretamente no controle do módulo  $|V_k|$  e ângulo  $\theta_k$  da tensão terminal (barra k). Isso é possível através de estratégias de controle, uma delas é apresentada na Figura 2.14 (YAZDANI; IRAVANI, 2010). Analisando essa figura, nota-se que a potência ativa de referência é nula, isso devido ao STATCOM não processar potência ativa. Entretanto, na prática existe uma pequena dissipação de potência ativa nas resistências do conversor.

Figura 2.14: Estratégia de controle STATCOM.

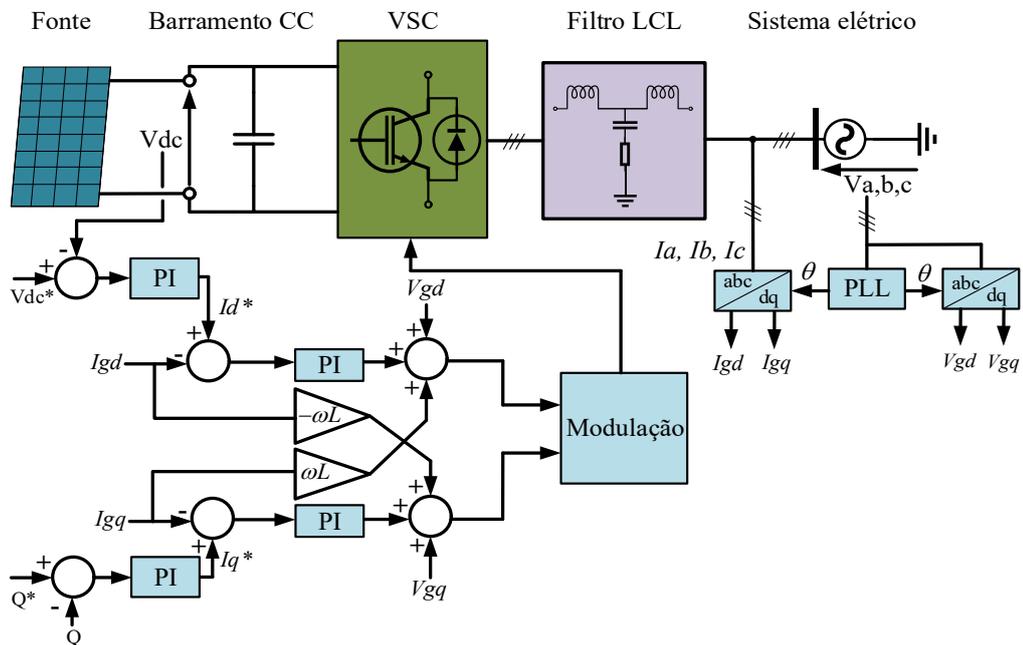


Fonte: Dados do próprio autor.

### ➤ Sistema de geração através de inversores

Utiliza-se em aplicações em que há injeção de potência ativa. Isto é, possui fonte externa de energia, como; sistemas fotovoltaicos, eólicos e etc. Os sistemas de geração que utilizam inversores para realizar a conexão da fonte com a rede possuem um modelo de circuito de potência e controle muito parecido com STATCOM. As diferenças nesse caso estão relacionadas a injeção de potência ativa, que são a presença da fonte externa no circuito de potência e a estratégia de extração de potência dos painéis no sistema de controle.

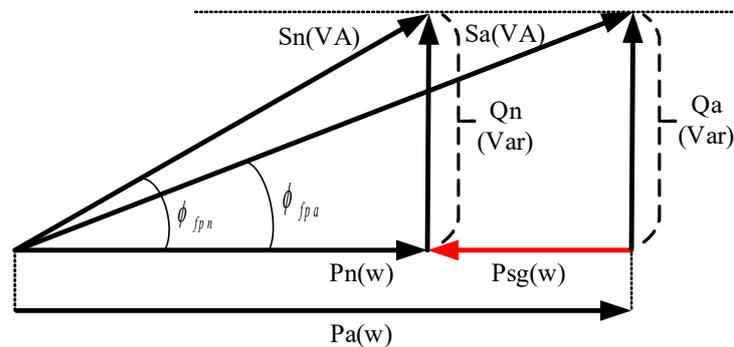
Figura 2.15: Sistema de geração.



Fonte: Dados do próprio autor.

Em redes de distribuição, na maioria das vezes, esses sistemas de geração através de inversores são programados para operar com fator de potência próximo do unitário, visto que as concessionárias de energia contabilizam apenas a potência ativa fornecida. Nesses casos, principalmente em consumidores que possuem uma carga de característica indutiva, a utilização desse tipo de geração de energia pode piorar o FP, devido a redução da potência ativa consumida da rede e a constância da potência reativa consumida da rede Figura 2.16. Sendo assim, uma forma de solucionar esse problema seria atuar na referência de potência reativa do próprio inversor, porém, quando disponível, essa variável é alterada de forma discreta. Isto é, o FP do inversor não se ajusta de acordo com a demanda de reativo da carga. Essa característica é uma das que estimulam a proposta desse trabalho em relação a correção do fator de potência da carga.

Figura 2.16: Triângulo de potência anterior e após a inserção do sistema de geração.



Fonte: Dados do próprio autor.

Em sistemas de transmissão, onde a tendência é aproximar o comportamento das fontes de geração conectadas através de inversores, do comportamento das máquinas síncronas, já é feita a utilização da característica de injeção de reativo do inversor (TEODORESCU; LISERRE; RODRÍGUEZ, 2011). Isso com a finalidade de controle de tensão e fator de potência.

## 2.3 – Variações de tensão e técnicas de correção

### 2.3.2 – Técnicas de compensação de VTCD

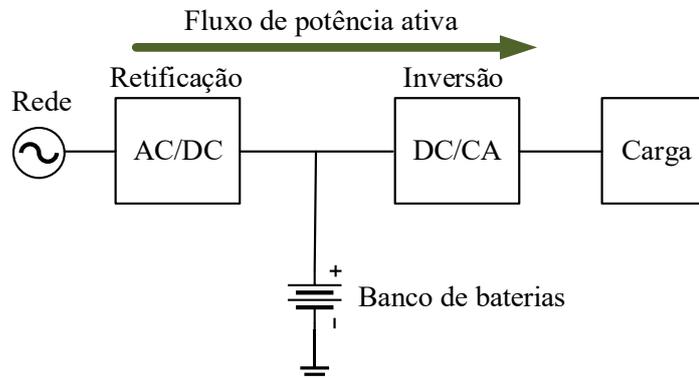
Algumas cargas, como: equipamentos hospitalares, servidores, sistemas de informação, sistemas governamentais e militares, necessitam de fontes de energia com alta confiabilidade (ACHA; AGELIDIS; LARA; MILLER, 2002). Isto é, essas cargas não podem estar sujeitas aos distúrbios que acontecem na rede elétrica, como os VTCDs.

Com a finalidade de aumentar a confiabilidade do sistema de alimentação, existem algumas soluções baseadas em sistemas eletrônicas que tonam a alimentação desses equipamentos imunes a distúrbios na rede de alimentação. Algumas dessas estão apresentadas abaixo.

#### Fonte ininterrupta de energia (*Uninterruptible Power Supplies – UPS*)

A topologia UPS é baseada na configuração back to back, um estágio de retificação (CA-CC) e outro de inversão (CC-CA), e um banco de baterias no barramento CC. A Figura 2.17 ilustra a configuração básica desse dispositivo. Nesse caso, o fluxo de potência em condições normais necessariamente passa pelos conversores, que apesar de possuir alto rendimento, acrescentam um pequeno consumo de potência ativa em regime permanente.

Figura 2.17: Configuração básica de uma UPS.

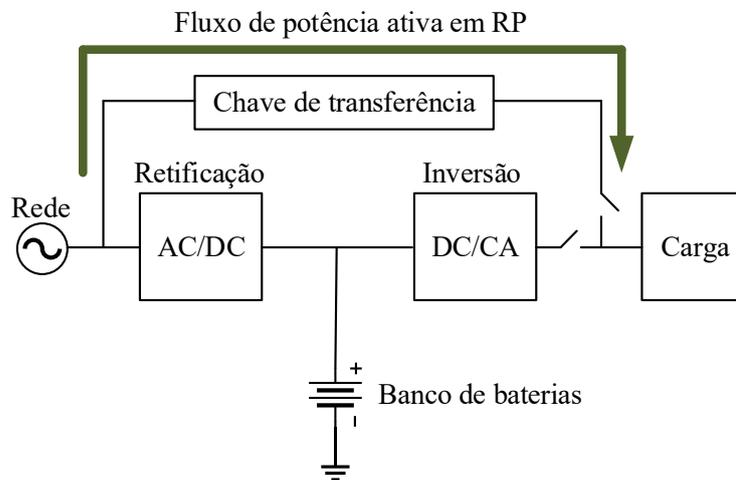


Fonte: Adaptado de (ACHA; AGELIDIS; LARA; MILLER, 2002).

Para evitar a utilização dos conversores em momentos que a rede está com os parâmetros de qualidade da energia aceitáveis, utiliza-se de uma chave de transferência, conforme Figura 2.18. Nesse caso, os conversores eletrônicos atuam apenas nos momentos que de fato são necessários.

Para aumentar mais ainda a confiabilidade do fornecimento de energia, pode-se configurar vários sistemas UPS's em paralelo, fazendo uso da mesma chave de transferência e banco de baterias.

Figura 2. 18: Configuração da UPS com chave de transferência



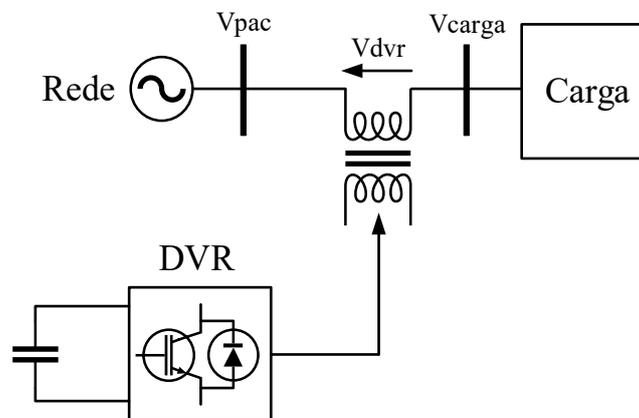
Fonte: Adaptado de (ACHA; AGELIDIS; LARA; MILLER, 2002).

A utilização do banco de baterias no barramento CC faz com que seja possível alimentar a carga em momentos de interrupção do fornecimento de energia pela rede. Além disso, também é possível associar outros tipos de fontes nesse mesmo barramento, como sistemas fotovoltaicos e eólicos, por exemplo.

### Restaurador dinâmico de tensão (*Dynamic Voltage Restorer – DVR*)

O DVR é um conversor do tipo VSC que, juntamente com transformador de acoplado em série com a rede, realiza a compensação da tensão (ACHA; AGELIDIS; LARA; MILLER, 2002). Esse equipamento possui uma ótima performance na presença de VTCD, propiciando uma alta confiabilidade nessas situações. A Figura 2.19 ilustra a configuração do DVR. Em condições normais da rede, o DVR não impõe tensão e o transformador se comporta como um curto-circuito no lado primário. Em condições anormais da rede, o DVR impõe a tensão de compensação série de forma que a soma das tensões na carga seja um valor dentro dos limites de qualidade.

Figura 2.19: Configuração do DVR.



Fonte: Adaptado de (ACHA; AGELIDIS; LARA; MILLER, 2002).

### 2.4 – Motivação da pesquisa e trabalhos relacionados à proposta

As técnicas mencionadas acima, tanto para correção do fator de potência quanto compensação de tensão, em essência, todas fazem uso do controle de potência reativa para cumprir com a sua finalidade. Em (DIXON; MORÁN; RODRIGUEZ; DOMKE, 2005) é feito uma ampla revisão dos compensadores estáticos, desde os compensadores síncronos até compensadores estáticos por comutação forçada. Neste mesmo trabalho, também são apresentados as vantagens e desvantagens de cada topologia. Entretanto, este trabalho não introduz a possibilidade de inversores utilizados em geração distribuída operarem com fator de potência variável.

Em (CARVALHO; CORREIA; FERREIRA, 2008) é apresentado o problema da elevação de tensão em sistema de distribuição que possuem alto valor de penetração de geração distribuída. Neste trabalho, apesar de não possuir como estratégia a regulação de tensão, apresenta uma forma de controle de potência reativa que garante que a tensão da rede não irá sofrer uma alta elevação devido a injeção de potência ativa. Apesar do trabalho possuir uma grande contribuição para a operação do sistema elétrico, visto que realiza o “desacoplamento” da potência ativa injetada com a variação de tensão na

rede, e também, começar a trabalhar com a possibilidade de fator de potência variável na geração distribuída, não há uma estratégia de correção do fator de potência local da instalação, apenas a possibilidade de variação do fator de potência dos inversores para correção da variação de tensão causada pela potência ativa injetada.

Em contraste com (CARVALHO; CORREIA; FERREIRA, 2008) que não possui como objetivo a regulação de tensão da rede em regime permanente e sim garantir que a injeção de potência ativa não irá causar elevações de tensão, em (TURITSYN; SULC; BACKHAUS; CHERTKOV, 2011) é apresentado estratégias de regulação de tensão e otimização das perdas na rede de distribuição. Neste último, a variação de potência reativa é tratada de forma distribuída, considerando várias fontes em um sistema com vários nós. Analisando este trabalho, notou-se uma contribuição muito importante, no sentido de mostrar o vínculo entre regulação de tensão e otimização das perdas em uma rede. Isto é, não é possível otimizar as perdas de uma rede e ao mesmo tempo realizar a regulação de tensão. Devido a isso, foi proposto uma estratégia que possibilita um ponto de equilíbrio entre a otimização de perdas e regulação de tensão em regime permanente. Entretanto, notou-se uma carência de como é feita a relação da quantidade de potência reativa injetada/absorvida frente a elevação/redução da tensão. Motivo pelo qual às referências de potência reativa utilizada foram os valores máximos e mínimos do inversor. Sendo assim, não foi notado uma relação linear entre a variação de tensão e a variação de potência ativa para um ponto de acoplamento genérico. De forma similar, em (DEMIROK; GONZÁLEZ; FREDERIKSEN; SERA; RODRIGUEZ; TEODORESCU, 2011) também é feito uma proposta de controle de potência reativa em redes de distribuição, entretanto, comparando duas técnicas que apresentadas em normas e propondo uma combinação das duas.

Em uma linha de investigação similar a (CARVALHO; CORREIA; FERREIRA, 2008), recentemente em (REINALDO; DUPCZAK; NETO, 2020) é feito uma análise do impacto da penetração da geração distribuída de até uma rede de distribuição. Neste trabalho, fica evidente que com o aumento do fator de penetração de geração distribuída nos sistemas de distribuição podem impactar de forma negativa nos indicadores de qualidade, principalmente aos limites de tensão. Além disso, também é apresentado a redução do fator de potência visto pela rede quando há o incremento da potência ativa injetada pela geração distribuída. Uma das conclusões mencionada neste mesmo artigo, sugere que as unidades de geração distribuída fotovoltaica operem com fator de potência variável, com a intenção de realizar a compensação de tensão. Sendo assim, isso evidencia que o tema deste trabalho está em linha com os desafios existentes no setor elétrico.

Em geral, nota-se que os trabalhos citados acima possuem um foco em realizar uma estratégia para que possa ser definido um valor de potência reativa que possa mitigar os efeitos causados pela geração distribuída na rede de distribuição, seja sobretensões e/ou perdas técnicas. Em (MIRANDA; BAÑUELOS; PUC; RIVERA; CATALÁN, 2019) é proposta uma estratégia mais focada no controle dos próprios inversores. A proposta realiza a compensação das componentes harmônicas e potência reativa de uma determinada carga, por meio da leitura das correntes drenadas. Assim, realiza a compensação por meio de um sistema de controle em referência síncrona. Entretanto, este trabalho carece de apresentar a operação do inversor em situações em que a carga é superior a capacidade do inversor.

Apesar dos trabalhos acima utilizarem a potência reativa como base para seus objetivos, nenhum deles leva em consideração a capacidade de reativo do sistema fotovoltaico em função das condições de irradiância, temperatura e tensão terminal. Esta análise é feita em (YANG; WANG; LIU; XIN; LIU BLAABJERG, 2017). Neste trabalho, é mostrado que para calcular a potência reativa remanescente do inversor, deve-se levar em consideração a desclassificação de potência devido a temperatura ambiente e a tensão terminal. Pois, para determinados valores de temperatura ambiente e/ou tensão terminal, a potência reativa do inversor é reduzida. Neste caso, em situações em que isso não é levado em consideração, o operador pode vir a solicitar um valor de potência reativo que não é suportado pelo dispositivo. Apesar deste trabalho possuir uma abordagem prática interessante, carece de uma explicação dos valores de coeficiente do controle *droop*, que relaciona a potência reativa injetada/absorvida com a variação de tensão terminal. Isto é, a relação quantitativa entre a potência reativa e a tensão terminal.

Um trabalho bastante relacionado com esta proposta é apresentado por (VARMA; SIAVASHI, 2018). Neste artigo, a proposta realiza a correção do fator de potência e a compensação de tensão. Entretanto, notou-se algumas oportunidades em ambas as soluções. Em relação ao fator de potência, o mesmo é feito com a injeção da potência reativa remanescente ou zero. Com isso, não é feito uma leitura da quantidade de reativo demandado pela carga, para que seja feito a compensação com o valor adequado. Em relação a compensação de tensão, a mesma é feita em malha fechada. Isso pode ser algo crítico em situações em que há mais de um inversor com a mesma estratégia no mesmo ponto de acoplamento. Outro ponto não foi explanado com detalhes foi a relação entre a potência reativa e a variação de tensão da rede. Na ausência desta relação, não há como garantir que o inversor será capaz de compensar a tensão, principalmente em situações em que o inversor possui baixa potência e o ponto de acoplamento alto nível de curto-circuito.

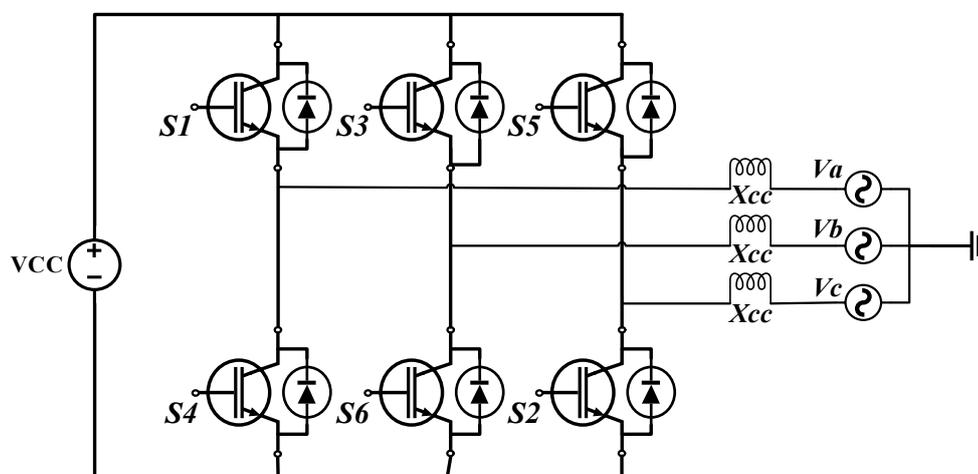
Frente a esta oportunidade, o tema desta dissertação trata desta oportunidade, no sentido de estabelecer uma relação de um ponto de conexão genérico com a potência reativa injetada para compensar um determinado percentual de tensão.

## CAPÍTULO 3 – INVERSOR TRIFÁSICO

### 3.1 – Considerações iniciais

Para realizar a interface entre as fontes intermitentes de energia e a rede, utiliza-se dos inversores (VSC-Voltage Source Converter). Existem diversas topologias de VSC's, cada uma com suas vantagens e desvantagens, sendo as características particulares de cada aplicação o fator determinante para escolha da topologia adequada. Nesse trabalho, será utilizado o inversor a dois níveis (VSC 2L – Voltage Source Converter Two Levels), que consiste em um conversor full-bridge, Figura 3.1.

Figura 3.1: Inversor trifásico a dois níveis – VSC 2L.



Fonte: Dados do próprio autor.

Apesar desse inversor ser do tipo fonte de tensão, nesse trabalho ele será operado em modo corrente (MC), em que a potência ativa e reativa é controlada através do módulo e ângulo das correntes impostas à rede. Essa estratégia de controle, como pode ser observada na Figura 4.1, é mais complexa em relação ao controle de modo tensão (MT), onde a potência ativa e reativa é controlada através do módulo e ângulo da tensão. Entretanto, apesar destes pontos, no MC é possível realizar a proteção contra sobrecorrente de forma rápida e precisa.

### 3.2 – Princípio de funcionamento

Para compreender o funcionamento do VSC é necessário estabelecer dois critérios básicos, que estão diretamente relacionados com o intertravamento das chaves de um mesmo braço e a defasagem da tensão desejada na saída, respectivamente (YARAMASU; WU, 2017). Esses critérios estão listados abaixo.

- Os sinais de acionamento das chaves de uma mesma fase devem estar defasados de  $180^\circ$ . Isso com o objetivo de evitar curto circuitos no barramento CC devido ao acionamento das chaves no

mesmo instante. Para garantir esse intertravamento, os *gate drivers* possuem um “tempo morto” que consiste em um tempo de espera para a chave que está acionada sair de operação.

- As chaves S1, S3 e S5 devem ser acionadas de forma que fiquem defasadas em 120°. Ou seja, se S1 é acionada em 0°, s3 deve ser acionada em 120° e s5 em 240°. O acionamento das chaves inferiores obedece a mesma relação. Porém, somando 180° para seguir o primeiro critério.

Estabelecidos os critérios básicos para acionar as chaves do VSC, é possível e necessário verificar quantas possibilidades existem de acionamento das chaves do VSC. Para isso utiliza-se de uma ferramenta matemática básica que verifica a quantidade de grupos que é possível formar em um conjunto de elementos (3.1). A utilização de combinações é justificada pelo fato da ordem de acionamento das chaves não ser relevante, isto é, exemplificando, acionar as chaves s1 s6 s5 produz o mesmo resultado que acionar s5 s6 e s1.

$$C_{n,p} = \frac{n!}{(n-p)!p!} \quad (3.1)$$

Onde :

$C_{n,p}$  : Número de grupos formados por p elementos em um conjunto de n elementos.

n : Número de elementos em cada grupo.

p : Número total de elementos.

Levando em conta o primeiro critério, nota-se que em cada fase deve ser acionada uma chave de cada vez. Isto é, cada etapa deve ter três chaves em condução, uma em cada fase. Aplicando esse critério em (3.1), verifica-se que é possível calcular a quantidade de grupos de três chaves a ser acionadas em um total de seis chaves (3.2).

$$C_{6,3} = \frac{6!}{(6-3)!3!} = 20 \text{ possibilidades} \quad (3.2)$$

Portanto, em (3.2) conclui-se que em um inversor com 6 chaves é possível acionar 3 ao mesmo tempo de 20 formas diferentes. Entretanto, é necessário desconsiderar as possibilidades que não atendem o primeiro critério. Ou seja, considerando que das seis chaves, as duas de uma mesma fase estão acionadas, as possibilidades de acionamento da terceira chave pode ser calculada (3.3).

$$C_{4,1} = \frac{4!}{(4-1)!1!} = 4 \text{ possibilidades} \quad (3.3)$$

Em (3.3) conclui-se que, por fase, existe 4 combinações em que as chaves de um mesmo braço estão fechadas. Isto é, existe um total de 12 combinações em que as chaves de um mesmo braço estão

em condução. Assim, resta apenas 8 combinações de 6 chaves que de fato não provocam curto no barramento CC. Essas combinações estão ilustradas na Tabela 3.1.

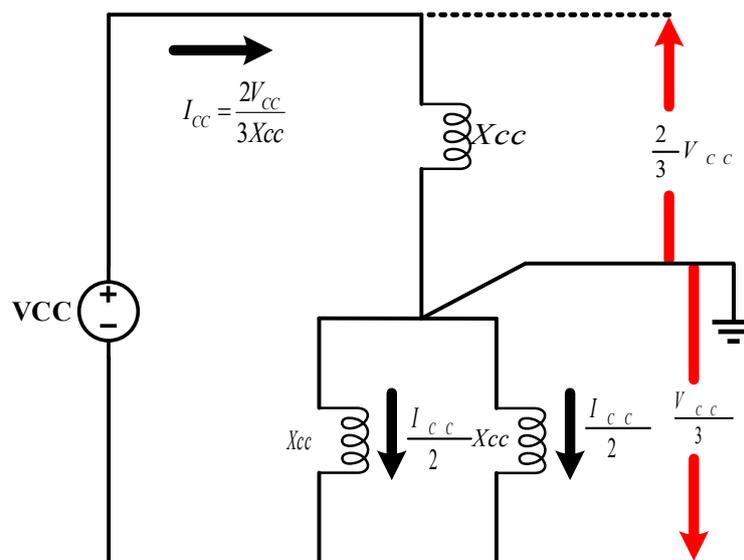
Tabela 3.1: Conjuntos de chaves que podem ser acionadas no mesmo instante.

s1, s6, s2
s1, s3, s2
s4, s3, s2
s4, s3, s5
s4, s6, s5
s1, s6, s5
s1, s3, s5
s4, s6, s2

Fonte: Dados do próprio autor.

As tensões de linha e de fase que são impostas nos terminais do inversor ao utilizar os estados apresentados na Tabela 3.1 são mostrados na Tabela 3.2. Os valores das tensões de fase e de linha são facilmente perceptíveis quando é feito por meio da análise do circuito apresentado na Figura 3.2, que ilustra o circuito equivalente visto pela fonte CC e a distribuição das correntes. Esse circuito é recorrente nas etapas de operação, com exceção das etapas não ativas, isto é, as três chaves inferiores ou superiores acionadas. Apesar da representação das tensões utilizada na Tabela 3.2, sabe-se que alguns autores optam por utilizar a representação por meio das tensões de polo.

Figura 3.2: Circuito “visto” pela fonte CC.



Fonte: Dados do próprio autor.

Tabela 3.2: Tensões de linha e de fase de acordo com os estados das chaves.

s1	s3	s5	Va(.Vcc)	Vb(.Vcc)	Vc(.Vcc)	Vab	Vbc	Vca
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	2/3	-1/3	-1/3	Vcc	0	-Vcc
1	1	0	1/3	1/3	-2/3	0	Vcc	-Vcc
0	1	0	-1/3	2/3	-1/3	-Vcc	Vcc	0
0	1	1	-2/3	1/3	1/3	-Vcc	0	Vcc
0	0	1	-1/3	-1/3	2/3	0	-Vcc	Vcc
1	0	1	1/3	-2/3	1/3	Vcc	-Vcc	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0

Fonte: Dados do próprio autor.

Onde :

Vcc : Tensão do barramento CC[V];

Icc : Corrente do barramento CC[A];

Va : Tensão da fase a [V];

Vb : Tensão da fase b [V];

Vc : Tensão da fase c [V];

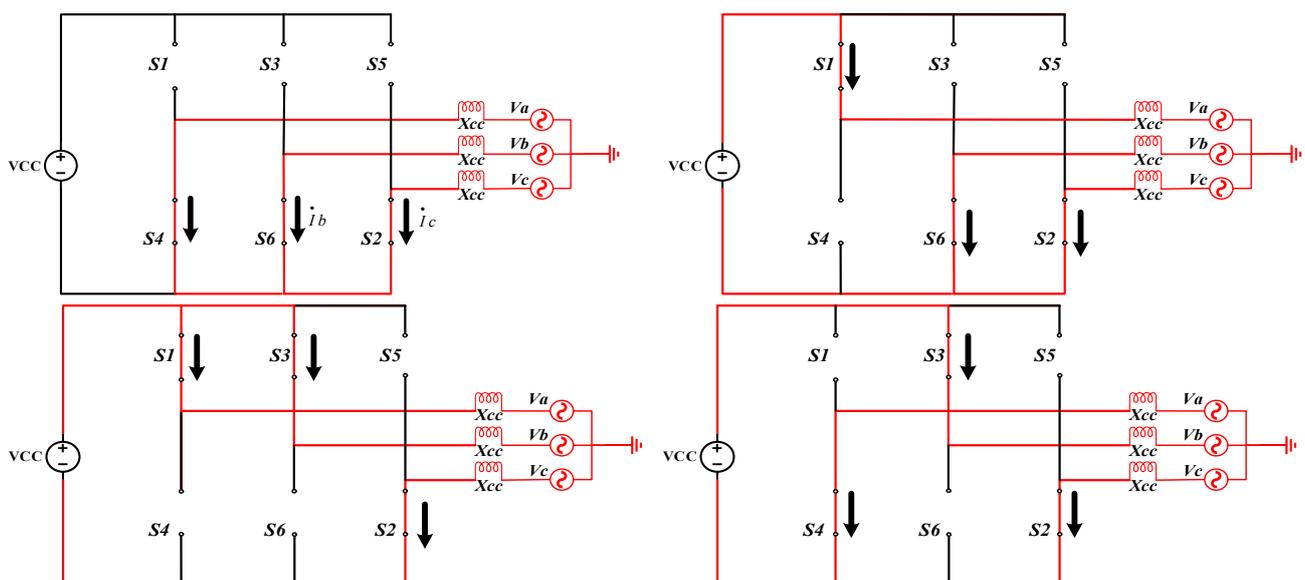
Vab : Tensão entre as fases a e b [V];

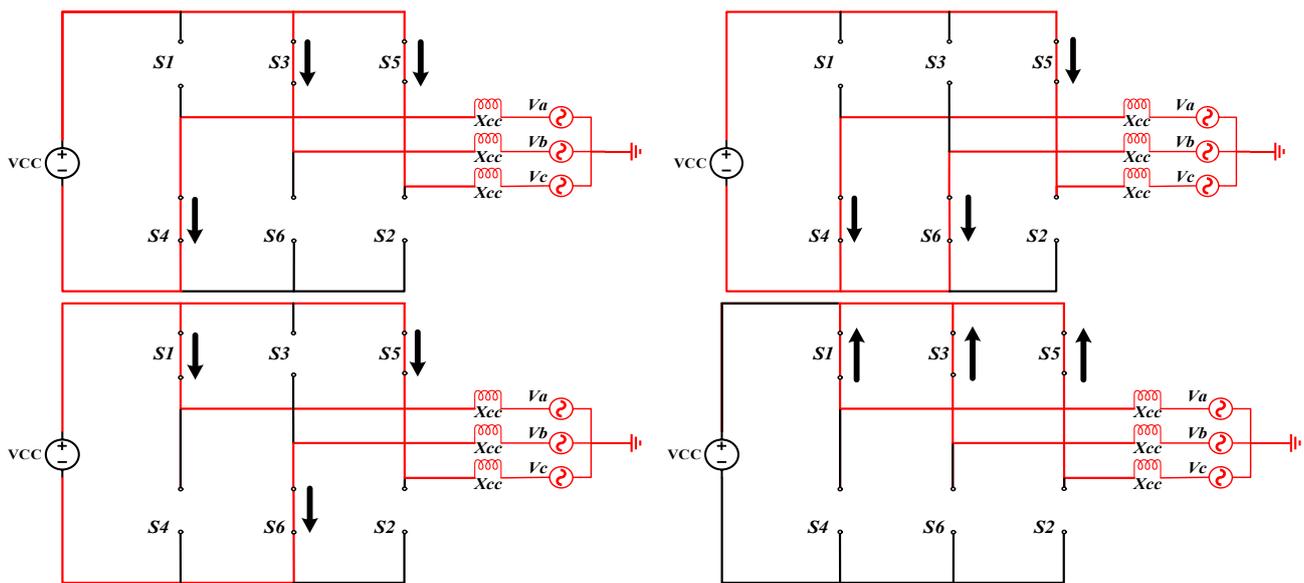
Vbc : Tensão entre as fases b e c [V];

Vca : Tensão entre as fases c e a [V].

Cada estado de operação apresentado na tabela 3.2 possui o respectivo circuito equivalente ilustrado nas figuras 3.4.

Figura 3.3: Circuitos equivalentes para cada estado de operação do inversor.





Fonte: Dados do próprio autor.

Desta forma, nota-se que através da lógica de acionamento das chaves é possível aplicar tensões positivas e negativas nos terminais do inversor, caracterizando uma tensão alternada. Além disso, é necessário estabelecer uma técnica de modulação que faz o acionamento das chaves de tal forma que a tensão de saída do inversor seja compatível com o sistema elétrico em que está conectado. Isto é, no caso de inversores conectados à rede, possuir a mesma frequência e atender os critérios de qualidade da energia. Para cumprir com essas exigências, pode-se fazer uso de diversas técnicas de modulação e controle.

### 3.3 – Técnica de modulação

Como mencionado anteriormente, a principal função das técnicas de modulação é propiciar os sinais de acionamento das chaves do VSC de tal forma que o valor médio da tensão de saída seja próximo do valor médio da tensão de referência (HOLMES; LIPO, 2003). Além disso, a técnica de modulação empregada também influencia em dois pontos muito importantes para aplicações de inversores conectados à rede, que são; conteúdo harmônico e rendimento. Por esse motivo é interessante avaliar qual técnica de modulação é mais viável para dada aplicação.

Nesse trabalho não será feito a comparação das técnicas de modulação, visto que não é o foco. Entretanto, em (SOARES, COELHO, FREITAS, LIMA, 2020) é feito uma comparação das estratégias convencionais de modulação em VSC conectados à rede no modo corrente, em (ZHAO; HARI; NARAYANAN; AYYANAR, 2010) é proposto uma técnica para redução do conteúdo harmônico e

das perdas para aplicações em motores de indução e em (ZHOU; WANG, 2002) é feito uma analogia entre a modulação vetorial e a SPWM. No Anexo I também é apresentado os critérios utilizados para definição da técnica de modulação utilizada.

A estratégia adotada aqui será a modulação vetorial convencional, visto que, além de ser uma técnica amplamente utilizada no controle digital de inversores a dois níveis (WU; LANG; ZARGARI; KOURO, 2011) (YARAMASU; WU, 2017) e (SOARES, COELHO, FREITAS, LIMA, 2020) possui melhor desempenho para a aplicação em questão, quando comparada com as técnicas convencionais (SPWM e histerese). Ademais, também possui um melhor aproveitamento do barramento CC, quando comparada com a modulação SPWM convencional (WU, 2005) e menor conteúdo harmônico.

Antes de apresentar o funcionamento da modulação vetorial, é importante demonstrar a relação entre o valor médio da tensão de saída do inversor e o tempo em que as chaves ficam fechadas em um período de chaveamento  $T_s$ . Isso com a finalidade de provar que é possível controlar a tensão de saída do VSC por meio do tempo da razão cíclica aplicada nas chaves semicondutoras.

Para que a tensão média de saída seja igual a de referência, o valor médio da tensão de referência deve ser igual ao valor médio do pulso aplicado na chave (3.4)

$$V_{Mr} = V_{ms} \quad (3.4)$$

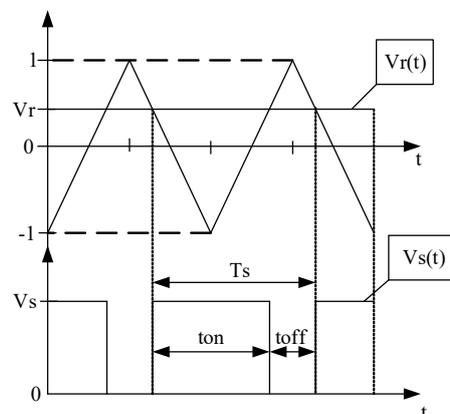
Onde :

$V_{Mr}$  : Valor médio da tensão de referência [V];

$V_{Ms}$  : Valor médio do pulso aplicado na chave [V];

Considerando que a tensão de referência praticamente não varia durante um período de chaveamento  $T_s$ , podemos considerar que os sinais da moduladora, portadora e de acionamento da respectiva chave se comportam conforme a Figura 3.4.

Figura 3.4: Formas de onda da moduladora, portadora e sinal de acionamento da chave.



Fonte: Dados do próprio autor.

Integralizando o sinal de referência e o sinal de acionamento da chave, tem-se (3.5).

$$\frac{1}{T} \int_0^{T_s} V_r(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{T_s} V_s(t) dt \quad (3.5)$$

Onde :

$V_r(t)$  : Valor instantâneo da tensão de referência [V];

$V_s(t)$  : Valor instantâneo do pulso aplicado na chave [V];

$T_s$  : Período de chaveamento [Seg].

Dividindo as integrais e os seus limites de integração de acordo com os sinais da Figura 3.4, tem-se (3.6).

$$\frac{1}{T_s} \cdot V_r \cdot [T_s - 0] = \frac{1}{T_s} \left[ \int_0^{toff} V_s(t) dt + \int_{toff}^{T_s} V_s(t) dt \right] \quad (3.6)$$

Resolvendo (3.6), obtêm-se (3.7) e (3.8).

$$V_r = \frac{1}{T_s} [0 + V_s \cdot (T_s - toff)] \quad (3.7)$$

$$T_s - toff = ton \quad (3.8)$$

$$V_r = V_s \cdot \frac{ton}{T_s} \quad (3.9)$$

Em (3.9) nota-se a relação linear entre a tensão de saída e o tempo em que a chave permanece fechada durante um período de chaveamento  $T_s$ . Isto prova que, em condições que a frequência de chaveamento  $F_s$  é consideravelmente maior que a frequência do sinal de referência  $F_{ref}$ , a tensão de saída pode ser controlada pela razão cíclica da chave.

### Modulação vetorial convencional

O princípio de funcionamento da modulação vetorial convencional está vinculado com as possibilidades de chaveamento do inversor apresentadas na Tabela 3.1, onde cada possibilidade é vista como um vetor estacionário (Tabela 3.3).

Tabela 3.3: Vetores referentes aos estados das chaves.

Chaves acionadas	Vetor
s1, s6, s2	V1=[100]
s1, s3, s2	V2=[110]
s4, s3, s2	V3=[010]
s4, s3, s5	V4=[011]
s4, s6, s5	V5=[001]
s1, s6, s5	V6=[101]
s1, s3, s5	V7=[111]
s4, s6, s2	V0=[000]

Fonte: Dados do próprio autor.

Considerando que cada vetor realiza uma parcela da modulação da tensão de saída, é necessário adotar uma sequência que module uma forma de onda próximo de uma senoide nos terminais do inversor. Nesse sentido, através da Tabela 3.3 é possível notar que das oito possibilidades, duas aplicam tensão nula (V0 e V7). Isto é, apenas seis possibilidades podem ser utilizadas, de fato, para modular a tensão.

Sendo assim, utilizando o plano alfa beta como referência e distribuindo os seis vetores ativos de forma simétrica, tem-se a distribuição apresentada na Figura 3.5. Nessa distribuição, a alocação de cada vetor é feita de forma estratégica, isto é, o vetor V1 deve ser posto na referência porque é o estado que modula os primeiros 60 graus da tensão de saída, por exemplo.

A utilização do plano alfa beta é feita para simplificar os três vetores de tensão em apenas um, reduzindo o número de operações matemáticas, peso computacional e facilitando a compreensão desta técnica. Para isso, faz-se uso da transformada de Clark (3.10).

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha}(t) \\ V_{\beta}(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Va(t) \\ Vb(t) \\ Vc(t) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Onde :

$V_{\alpha}$  : Tensão de referência referenciada no eixo alfa [V];

$V_{\beta}$  : Tensão de referência referenciada no eixo beta [V];

Va(t) : Tensão instantânea de referência da fase A [V];

Vb(t) : Tensão instantânea de referência da fase B [V];

Vc(t) : Tensão instantânea de referência da fase C [V];

$$V^* = V_{\alpha} + jV_{\beta} \quad (3.11)$$

Onde :

$V^*$  : Vetor da tensão de referência no plano alfa beta [V];

$$|V^*| = \sqrt{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \quad (3.12)$$

Onde :

$|V^*|$  : Módulo do vetor da tensão de referência no plano alfa beta [V];

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{V_\beta}{V_\alpha} \right) \quad (3.13)$$

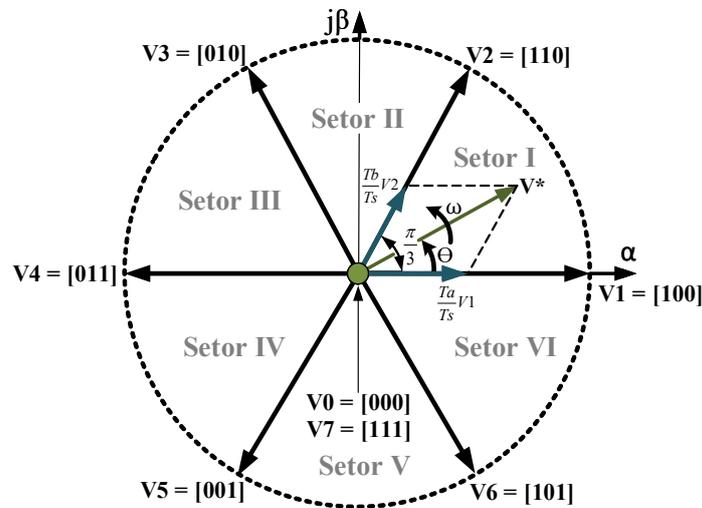
Onde :

$\theta$  : Ângulo do vetor de referência [ $^\circ$ ];

Aplicando o vetor de referência  $V^*$  no plano da Figura 3.5, é possível perceber que durante um período na frequência da rede, esse vetor percorre seis setores, onde cada setor é delimitado pelos vetores adjacentes. Dessa forma, fazendo uso de (3.9), que diz que a tensão de saída é proporcional ao tempo em que as chaves ficam fechadas, pode-se concluir que o vetor de referência pode ser representado pelos vetores do respectivo setor juntamente com o tempo em que são aplicados. Vetorialmente, significa que o vetor de referência é o resultado da soma vetorial dos vetores de cada setor, onde, o módulo do vetor de referência é determinado pelos módulos dos vetores adjacentes, que são os tempos em que ficam acionados.

Neste trabalho o vetor de referência foi representado pelos vetores adjacentes do respectivo setor, pois está sendo utilizado a técnica convencional. Entretanto, existem diversas possibilidades de representação desse vetor utilizando os outros vetores estacionários, essa característica abre um grande leque de possibilidades desta técnica para diferentes aplicações. É importante destacar que, caso fosse utilizado mais de dois vetores para representar o vetor de referência as perdas por comutação seriam maiores, reduzindo a eficiência do VSC (ZHOU; WANG, 2002).

Figura 3.5: Plano alfa beta com os vetores posicionados.



Fonte: Dados do próprio autor.

Matematicamente, a representação do vetor de referência através dos vetores adjacentes pode ser feita por meio de (3.14). Destaque para a semelhança de (3.14) e (3.9).

$$Vr = \frac{1}{T_s} (T_a V_x + T_b V_{x+1}) \quad (3.14)$$

Onde :

$V_x$  : Projeção do vetor de referência no vetor estático imediatamente anterior [V];

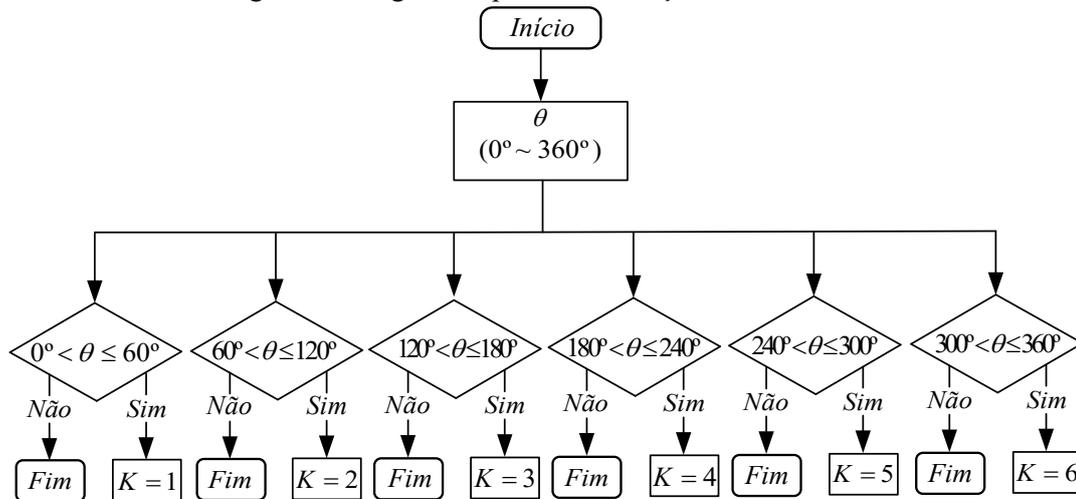
$V_{x+1}$  : Projeção do vetor de referência no vetor estático imediatamente posterior [V];

$T_a$  : Tempo em que o vetor  $V_x$  fica ativo[S];

$T_b$  : Tempo em que o vetor  $V_{x+1}$  fica ativo [S];

Para identificar o setor em que o vetor de referência se encontra, basta utilizar o ângulo do vetor de referência, Figura 3.6. A localização do setor é de suma importância para identificação dos vetores adjacentes e também para facilitar os cálculos dos valores de  $T_a$  e  $T_b$ . Considerando que a referência de tensão é simétrica e equilibrada, cada setor deve permanecer ativo por 60° graus.

Figura 3.6: Algoritmo para identificação do setor.



Fonte: Dados do próprio autor.

Visto que o tempo em que os vetores adjacentes permanecem ativos nada mais é que a projeção do vetor de referência nos respectivos vetores, Figura 3.5. Conclui-se que, o tempo  $T_a$  e  $T_b$  irão se repetir em cada setor. Dessa forma, com a finalidade facilitar os cálculos dos tempos  $T_a$  e  $T_b$ , por meio de  $K$  e do ângulo do vetor de referência, utiliza-se de (3.15).

$$\theta' = \theta - \frac{\pi}{3}(k-1) \quad (3.15)$$

Onde:

$\theta'$  : Ângulo entre o vetor de referência e o vetor estático imediatamente anterior [°];

$K$  : Setor;

É importante notar que o ângulo calculado em (3.15) varia de  $0^\circ$  a  $60^\circ$ , repetindo a cada setor. Esse comportamento que traz a facilidade do cálculo de  $T_a$  e  $T_b$  utilizando a identificação dos setores. Caso contrário, seria necessário considerar os valores positivos e negativos assumidos pelas funções seno e cosseno em um período de  $360^\circ$ , tornando os cálculos de  $T_a$  e  $T_b$  mais complexos.

Outro ponto muito importante antes de calcular  $T_a$  e  $T_b$ , é a relação entre os módulos dos vetores. Isto é, o módulo do vetor de referência e o módulo dos vetores adjacentes. O módulo do vetor de referência é o valor de pico da tensão de referência entre fases, e o módulo dos vetores adjacentes é a tensão imposta pelo inversor nas fases quando o vetor está ativo  $V_{cc}$ . Sendo assim, para compatibilizar o valor da tensão de referência com a tensão do barramento CC, define-se o índice de modulação (3.16).

$$ma = \frac{V_{pLLref}}{V_{dc}} = \frac{\sqrt{2}|V^*|}{V_{dc}} \quad (3.16)$$

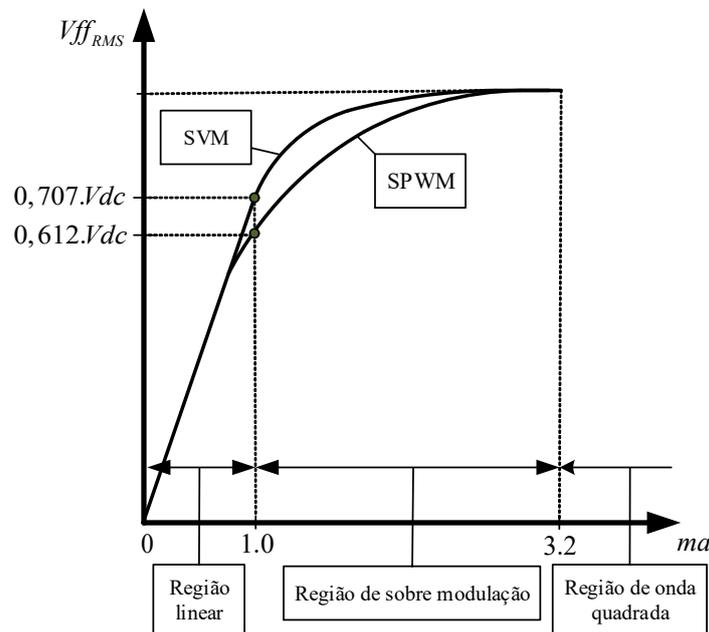
Onde :

$ma$  : Índice de modulação;

$V_{pLLref}$  : Tensão de referência, de pico, entre fases [V];

O índice de modulação  $ma$  é uma variável importante para quantificar a utilização do barramento CC. Devido a possibilidade de variação do valor da tensão de referência, o vetor de referência pode assumir valor superior a tensão disponível no barramento CC, causando uma espécie de “saturação” do barramento e aumentando o conteúdo harmônico da tensão terminal devido a operação na região de onda quadrada do inversor. A Figura 3.7 ilustra o comportamento da tensão de saída em função do índice de modulação, comparando com uma técnica tradicional que é a modulação SPWM. Nota-se que para um índice de modulação unitário, a modulação vetorial é capaz de impor uma tensão de saída 10% superior à da modulação SPWM (WU; LANG; ZARGARI; KOURO, 2011) (YARAMASU; WU, 2017) (WU, 2005). Isso evidencia que a modulação SVM consegue impor tensões superiores a SPWM com índices de modulação inferiores.

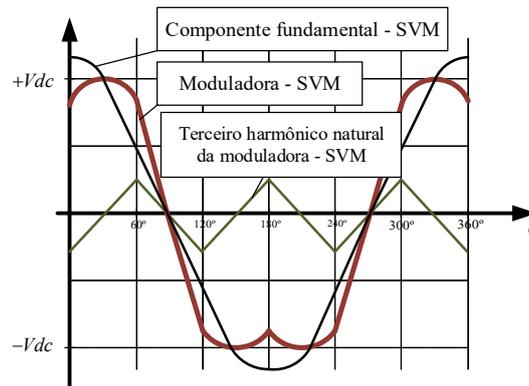
Figura 3.7: Gráfico comparativo da tensão de saída em função do índice de modulação (SVM e SPWM).



Fonte: Dados do próprio autor.

Uma forma de verificar o porquê desta vantagem da SVM em relação a SPWM é analisando a Figura 3.8. Nesta ilustração nota-se que a SVM possui uma característica natural de injeção de terceiro harmônico (HOLMES; LIPO, 2003), visto a presença dessa componente na onda moduladora. Isso faz com que o pico da onda moduladora seja reduzido, possibilitando a operação com valores fundamentais de tensão um pouco superiores a tensão do barramento CC.

Figura 3.8: Formas de onda moduladora da SVM.



Fonte: Adaptado de [30].

Finalmente, calcula-se os tempos  $T_a$ ,  $T_b$  e  $T_o$  por meio de (3.17), (3.18) e (3.19).

$$T_a = T_s \cdot ma \cdot \text{sen}\left(\frac{\pi}{3} - \theta'\right) \quad (3.17)$$

$$T_b = T_s \cdot ma \cdot \text{sen}(\theta') \quad (3.18)$$

$$T_o = T_s - T_a - T_b \quad (3.19)$$

Onde :

$ma$  : Índice de modulação;

$V_{pLLref}$  : Valor de pico da tensão de linha de referência [V].

Por meio dos tempos calculados em (3.17), (3.18) e (3.19) é possível acionar as chaves seguindo as seqüências apresentadas na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Sequência de chaveamento para cada setor.

Setor	Sequência de chaveamento						
<b>I</b>	V0	V1	V2	V7	V2	V1	V0
<b>II</b>	V0	V3	V2	V7	V2	V3	V0
<b>III</b>	V0	V3	V4	V7	V4	V3	V0
<b>IV</b>	V0	V5	V4	V7	V4	V5	V0
<b>V</b>	V0	V5	V6	V7	V6	V5	V0
<b>VI</b>	V0	V1	V6	V7	V6	V1	V0
<b>VI</b>	V0	V1	V6	V7	V6	V1	V0
<b>Tempo</b>	$T_o/4$	$T_a/2$	$T_b/2$	$T_o/2$	$T_b/2$	$T_a/2$	$T_o/2$

←  $T_s$  →

Fonte: Dados próprio autor.

### 3.4 – Filtro LCL

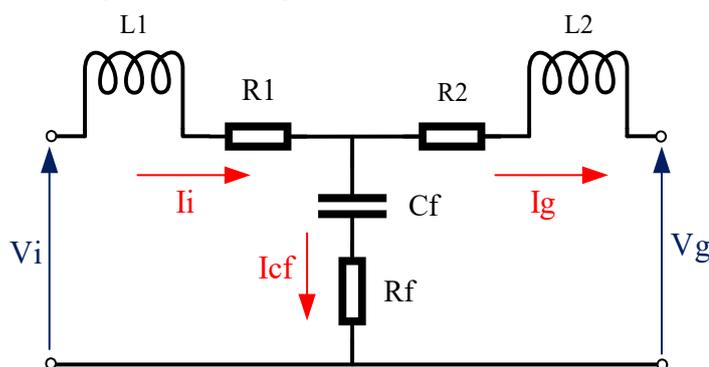
Devido a tensão terminal do VSC ser resultado de uma sequência de chaveamentos, em que se altera de forma quase instantânea o valor da tensão, o conteúdo harmônico de tensão é alto. Por consequência, o conteúdo harmônico das correntes serão um reflexo do conteúdo harmônico da tensão. Para limitar o THDI a valores normativamente aceitáveis, faz-se uso de filtros. Segundo (TEODORESCU; LISERRE; RODRÍGUEZ, 2011), os filtros especificados para VSC's devem obedecer a duas premissas básicas, que são;

- Comportamento predominantemente indutivo, com a finalidade de controlar a potência ativa e reativa através do módulo e ângulo da tensão, assim como nas máquinas síncronas.
- Atenuação da frequência de chaveamento, com a finalidade de evitar o mau funcionamento de equipamentos e reduzir as perdas causadas pela circulação de correntes harmônicas.

No que se refere a escolha do filtro LCL como modelo a ser adota nesse trabalho (Figura 3.9), sabe-se que essa configuração apresenta diversas vantagens em relação aos modelos clássicos, L e LC (REZNIK; SIMOES; DURRA; MUYYEEN, 2013).

- Maior índice de atenuação após a frequência de ressonância (60db/década).
- Menores valores de indutores e capacitores, principalmente em aplicações acima de 100kW. Essa característica ainda pode ser otimizada, de tal forma que a soma das indutâncias seja mínima, como apresentado em (SEN; YENDURI; SENSARMA, 2014).
- Bom desempenho em relação ao conteúdo harmônico de corrente com o VSC operando com baixa frequência de chaveamento.

Figura 3.9: Configuração do filtro LCL.



Fonte: Adaptado de [32].

Onde:

L1 : Indutância do lado do inversor [H];

R1 : Resistência do indutor L1 [ $\Omega$ ];

- $L2$  : Indutância do lado da rede [H];  
 $R2$  : Resistência do indutor  $L2$  [ $\Omega$ ];  
 $Cf$  : Capacitância do filtro [H];  
 $Rf$  : Resistência série da capacitância  $Cf$  [ $\Omega$ ];  
 $Ii$  : Corrente no indutor  $L1$  [A];  
 $Ig$  : Corrente no indutor  $L2$  ou imposta na rede [A];  
 $Icf$  : Corrente no capacitor  $Cf$  [A];  
 $Vi$  : Tensão terminal do inversor [V];  
 $Vg$  : Tensão da rede [V];

Nesse momento será apresentado a metodologia para especificação do filtro, seguindo o procedimento apresentado em (REZNIK; SIMOES; DURRA; MUYEEN, 2013). Vale destacar que os cálculos de projeto do filtro não serão apresentados neste momento, isso será feito no próximo capítulo, juntamente com as especificações de todos os outros componentes utilizados.

Para especificar o filtro, pode-se seguir as etapas abaixo;

### 1º) Determinação dos valores de entrada

Nessa etapa define os valores das seguintes variáveis;

- $Pb$  : Potência ativa injetada [W];  
 $Ff$  : Frequência fundamental [Hz];  
 $Fs$  : Frequência de chaveamento [Hz];  
 $Vcc$  : Tensão do barramento CC [V];  
 $Vg$  : Tensão da rede [V];

### 2º) Cálculo dos valores de base

O cálculo da impedância e capacitância de base podem ser feitos por meio de (3.20) e (3.21), respectivamente. Em (3.20) a potência aparente de torna igual a potência ativa pois considera a operação com fator de potência unitário.

$$Zb = \frac{Vg^2}{Sn} = \frac{Vg^2}{Pn} \quad (3.20)$$

Onde:

- $Zb$  : Impedância de base [ $\Omega$ ];

$$Cb = \frac{1}{\omega_g \cdot Zb} \quad (3.21)$$

Onde:

$C_b$  : Capacitância de base [F];

### 3º) Cálculo do capacitor e da indutância do lado do inversor - L1

O capacitor do filtro é especificado utilizando (3.22). O valor da capacitância está diretamente relacionado com a variação do fator de potência. Isto é, para uma variação do fator de potência de 100%, a capacitância deve ser igual a de base, para uma variação de 50%, a capacitância deve ser a metade da capacitância de base.

$$C_f = 0,7.C_b \quad (3.22)$$

Onde:

$C_f$  : Capacitância do filtro [F];

O valor da indutância de L1 pode ser calculada através de (3.23).

$$L_1 = \frac{V_{dc}}{6.F_s.\Delta I_{L \max}} \quad (3.23)$$

Onde:

$\Delta I_{L \max}$  : Oscilação máxima de corrente [A];

### 4º) Determinação do fator de atenuação

O fator de atenuação é a relação entre a corrente injetada na rede e a injetada pelo inversor, em uma certa frequência harmônica (3.24). Isto é, exemplificando, se o inversor injeta 10 A em uma frequência h na entrada do filtro e o filtro possui um fator de atenuação de 0,5, a rede irá receber 5 A dessa corrente.

$$K_a = \frac{I_g(h)}{I_i(h)} \quad (3.24)$$

Onde:

$K_a$  : Fator de atenuação do filtro.

$I_g$  : Corrente de ordem h injetada na rede [A];

$I_i$  : Corrente de ordem h injetada no filtro pelo inversor [A];

### 5º) Determinação do indutor do lado da rede - L2

A indutância de L2 pode ser calculada por meio de (3.25).

$$L_2 = \frac{\sqrt{\frac{1}{K_a^2} + 1}}{C_f.\omega_s^2} \quad (3.25)$$

Onde:

$\omega_s$  : Frequência de chaveamento [Rad/s].

### 6º) Verificação da frequência de ressonância

O cálculo da frequência de ressonância é feito utilizando os valores dos componentes passivos que foram especificados (3.26). Esse valor é importante para verificar se o filtro não entrará em ressonância em uma frequência próxima a da rede ou da frequência de chaveamento (3.27).

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{L1 + L2}{L1.L2.Cf}} \quad (3.26)$$

Onde:

$\omega_{res}$  : Frequência de ressonância [Rad/s].

$$10F_g < F_{res} < 0,5F_s \quad (3.27)$$

Onde:

$F_{res}$  : Frequência de ressonância [Hz].

É importante destacar que o critério apresentado em (3.27) (ARAÚJO, 2012) considera apenas o inversor como fonte de harmônicos. Todavia, em alguns barramentos tensão da rede também possui componentes harmônicas. Nesses casos, o ideal seria verificar as ordens harmônicas presentes na tensão da rede e verificar se não estão próximas da frequência de ressonância.

### 7º) Cálculo da resistência série do capacitor.

O cálculo da resistência série com o capacitor pode ser feito por meio de (3.28).

$$Rf = \frac{1}{3.\omega_{res}.Cf} \quad (3.28)$$

A principal função desse elemento é reduzir o ganho do filtro na frequência de ressonância, Figura 4.11. Entretanto, a utilização de uma resistência faz com que o rendimento do filtro caia, devido a dissipação de potência ativa. No caso de aplicações em que não é necessário a correção do FP, esse inconveniente pode não ter um peso significativo, visto que a capacitância é menor e a impedância maior. Entretanto, aplicações em que é necessário correção do FP implicam em capacitâncias maiores, isto é, reatâncias menores, drenando uma corrente significativa na resistência série e reduzindo ainda mais o rendimento. Nesse contexto, recomenda-se a utilização de técnicas ativas para o amortecimento

do ganho na frequência de ressonância, isso soluciona o problema do rendimento e elimina um elemento passivo do filtro.

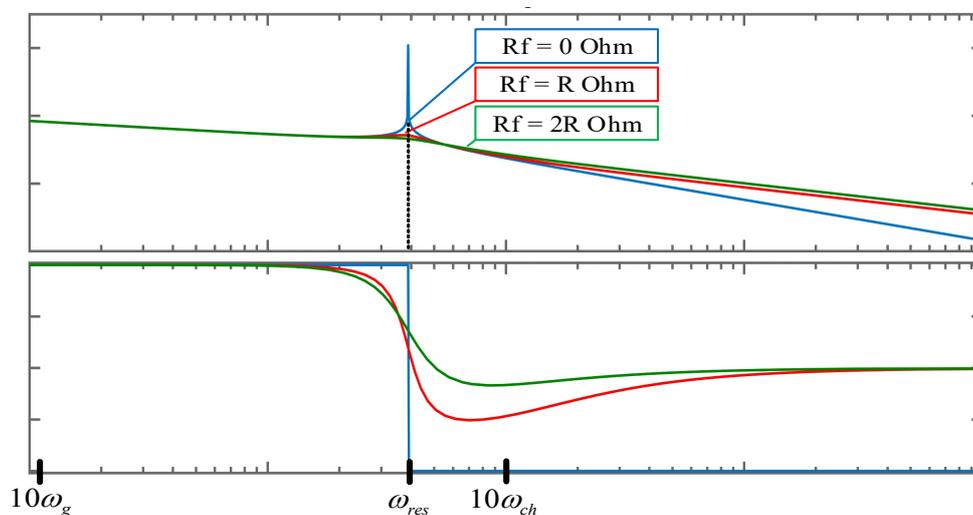
### 8º) Verificação da resposta em frequência do filtro

Após a especificação dos elementos passivos é necessário realizar a plotagem da resposta em frequência. Isso para verificar a atenuação do filtro nas respectivas ordens harmônicas e para verificar o critério apresentado em (3.27). Para isso, faz uso da função de transferência do filtro (3.29), (REZNIK; SIMOES; DURRA; MUYEEN, 2013).

$$Hd_{LCL}(s) = \frac{I_g}{V_i} = \frac{C_f \cdot R_f \cdot s + 1}{L1 \cdot C_f \cdot L2 \cdot s^3 + C_f \cdot (L1 + L2) \cdot R_f \cdot s^2 + (L1 + L2) \cdot s} \quad (3.29)$$

A figura 3.10 ilustra a resposta em frequência do filtro LCL para diferentes valores de  $R_f$ . Nessa figura nota-se a característica de atenuação de 60db/década desse filtro após a frequência de ressonância, característica fundamental para atenuação da frequência de chaveamento.

Figura 3.10: Resposta em frequência do filtro LCL para diferentes valores de  $R_f$ .



Fontes: Dados do próprio autor.

### 9º) Verificação da suportabilidade térmica e dielétrica do banco de capacitores

Apesar do êxito na especificação do filtro do ponto de vista harmônico, é importantíssimo verificar a suportabilidade do banco quando submetido ao processo de filtragem. Isto é, verificação da tensão, corrente e potência eficaz que o banco de capacitores irá operar em condições normais. Isso com a finalidade de garantir que o mesmo irá suportar os efeitos causados pela drenagem das correntes harmônicas, e, no caso, correção do fator de potência. O cálculo dos verdadeiros valores eficazes da

corrente, tensão e potência do capacitor são apresentados abaixo, juntamente com a verificação normativa.

### Corrente eficaz

Conforme mencionado no capítulo 2, a corrente eficaz pode ser calculada por meio de (2.15). Após esse cálculo deve-se comparar o resultado com a sobrecarga admissível nos bancos de capacitores, que deve ser no máximo 30% (WEG, 2009).

$$I_{RMS} = \sum_{h=0}^{\infty} \sqrt{I_h^2} \quad (2.15)$$

### Tensão eficaz

A tensão eficaz no banco de capacitores é calculada por meio de (2.16). Com essa grandeza deve-se tomar um cuidado especial, visto que os capacitores, devido a relação quadrática entre a energia armazenada e a tensão, são altamente sensíveis a tensão. Essa característica faz com que seja admitido apenas 10% de sobretensão nesses dispositivos (WEG, 2009).

$$V_{RMS} = \sum_{h=0}^{\infty} \sqrt{V_h^2} \quad (2.16)$$

Apesar de se esperar que as componentes harmônicas de tensão no capacitor serem consequência das correntes harmônicas de (2.15), provenientes do inversor, é importante verificar o THD da tensão do ponto de acoplamento. Em situações em que esse ponto de conexão está “poluído”, fatalmente o banco será um caminho de menor impedância para as componentes harmônicas da rede, causando um esforço dielétrico e térmico não esperado no banco de capacitores.

### Potência reativa eficaz

A potência eficaz considerando as harmônicas pode ser calculada por meio do uso dos resultados de (2.15) e (2.16), conforme (3.30).

$$Q_{RMS} = I_{RMS} \cdot V_{RMS} \cdot \text{sen}(\theta) \quad (3.30)$$

### Tensão de pico

O valor da tensão de pico é calculado por meio de (3.31). Nota-se que esse é um critério pessimista, pois considera que os picos das tensões harmônicas estão em fase, que apesar de ser o pior caso, nem sempre é verdade. O limite admitido é de 20% superior ao valor nominal.

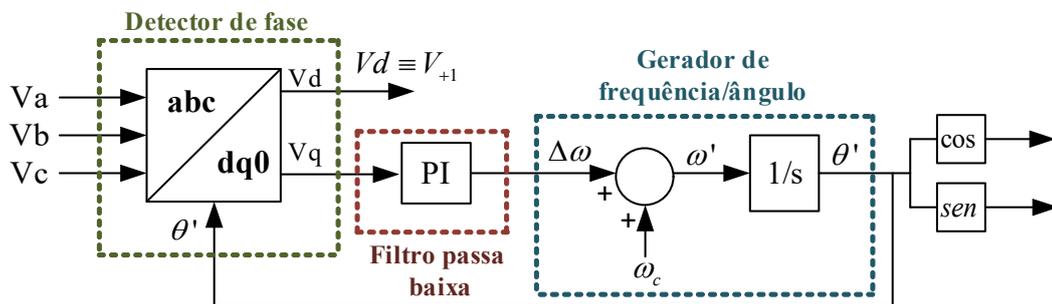
$$V_{RMS} = \sqrt{2} \cdot \sum_{h=0}^{\infty} V_h \quad (3.31)$$

### 3.5 – Sincronismo com a rede (PLL – *Phase Locked Loop*)

Com a finalidade de garantir a sintonia entre o inversor e a rede, a estratégia de sincronismo monitora de forma instantânea a magnitude e ângulo da tensão do ponto de acoplamento comum (PAC), utilizando-os para a correta operação do inversor frente as possíveis variações das condições do PAC. Além disso, viabiliza a transformação de eixo síncrono, possibilitando a conversão de variáveis senoidais em contínuas. Isso torna possibilitando a utilização do compensador do tipo proporcional integral nas malhas de controle.

Dentre diversas técnicas de sincronismo com a rede, devido ao foco do trabalho estar concentrado na compensação de potência reativa, optou-se por utilizar o SRF-PLL (*Synchronous Reference Frame PLL*) por ser simples e uma das técnicas mais utilizadas (TEODORESCU; LISERRE; RODRÍGUEZ, 2011). Por meio da Figura 3.11 é possível verificar que a detecção de fase é feita por meio da transformada Park em eixo de referência síncrona, que realiza a conversão dos sinais de tensão do sistema trifásico em sinais com contínuos no tempo. Entretanto, com as oscilações de 120Hz que ocorrem devido a não idealidade dos sinais e do sistema de filtragem (RESENDE, 2020). É interessante notar que a malha de realimentação utiliza o eixo em quadratura da transformada, justamente para obter a defasagem de 90° necessária para realizar o sincronismo. Após a transformada Park, o sinal de erro, que representa a assincronia entre o PLL e os sinais de referência, passa por um filtro passa baixa, representado por um compensador do tipo proporcional integral, que atua na intenção de reduzir a assincronia impondo uma variação de frequência. Por fim, o resultado da variação de frequência somado com a frequência central de sincronismo passa por um integrador que determina o ângulo para realizar a realimentação da malha.

Figura 3.11-Diagrama SRF-PLL.



Fonte: Adaptado de (TEODORESCU; LISERRE; RODRÍGUEZ, 2011).

A função de transferência do compensador proporcional integral está representada na equação 3.32. Neste trabalho, os valores dos ganhos filtro passa baixa que mais se apresentaram melhor resposta do sincronismo em bancada, foi com ganho proporcional de 10 e ganho integral de 0,01.

$$FT_{PLL} = Kp_{PLL} \cdot \frac{\left[ S + \frac{1}{Ti_{PLL}} \right]}{S} \quad (3.32)$$

Onde:

$FT_{PLL}$  : Função de transferência do PLL;

$Kp_{PLL}$  : Ganho proporcional do PLL;

$Ti_{PLL}$  : Ganho integral do PLL

Analisando este PLL de forma crítica e prática, nota-se que, além de possuir uma oscilação de 120 Hz, o mesmo é sensível a presença de desequilíbrios da rede. Pois, apesar da atenuação do filtro, as componentes de sequência negativa irão oscilar a frequência de saída do PLL e conseqüentemente, mostrar seus efeitos nas malhas de controle de corrente que utilizam este ângulo como base para as transformações de Park. Sendo assim, recomenda-se que, em sistemas em que há desequilíbrio de tensão no ponto de conexão, que utilize de estratégias de sincronismo mais avançadas, como; DDSRF-PLL (*Double Synchronous Reference Frame*), por exemplo.

### 3.6 – Estratégia de controle

Como a topologia de inversor trifásico utilizada, em essência, é do tipo fonte de tensão, e o controle para fontes não despacháveis geralmente é feito em MC, faz-se necessário utilizar uma malha de controle de corrente. Nesta linha de raciocínio, sabe-se que existe diversas formas de realizar a im-

posição de corrente, sendo que essas se dividem em dois grupos, controle clássico (Histerese e PID) e controle avançado (Preditivo) (YARAMASU; WU, 2017).

Neste trabalho optou-se pelo controle clássico por meio de compensadores do tipo proporcional integral, que atuam na intenção de zerar o erro proveniente da subtração de um sinal de referência e um sinal real medido. No tema aqui proposto, a estratégia de controle é dividida em dois sistemas em cascata., sendo que o primeiro é o algoritmo CFPCT (Correção de FP e Compensação de Tensão) criado para gerar as referências de corrente, por meio da potência ativa e reativa equivalentes, e o segundo o controle de imposição em um sistema de referência síncrona dq0.

### 3.6.1 – Algoritmo CFPCT (Correção de Fator de Potência e Compensação de Tensão)

O algoritmo CFPCT tem como função principal, utilizando os valores de tensão e corrente que são medidos no PAC e na carga, realizar cálculos necessários para que seja feita a correção do fator de potência da carga visto pela rede e a compensação de tensão do PAC. Para isso é utilizado as equações (3.33) e (3.34), que por meio da transformada de Park, realizam o cálculo da potência ativa e reativa em um sistema de referência síncrona (YAZDANI; IRAVANI, 2010).

$$P_s(t) = \frac{3}{2} \cdot V_d(t) \cdot i_d(t) \quad (3.33)$$

$$Q_s(t) = -\frac{3}{2} \cdot V_d(t) \cdot i_q(t) \quad (3.34)$$

Onde:

$P_s(t)$ : Potência ativa;

$Q_s(t)$ : Potência reativa;

$V_d(t)$ : Tensão de eixo direto;

$i_d(t)$ : Corrente de eixo direto;

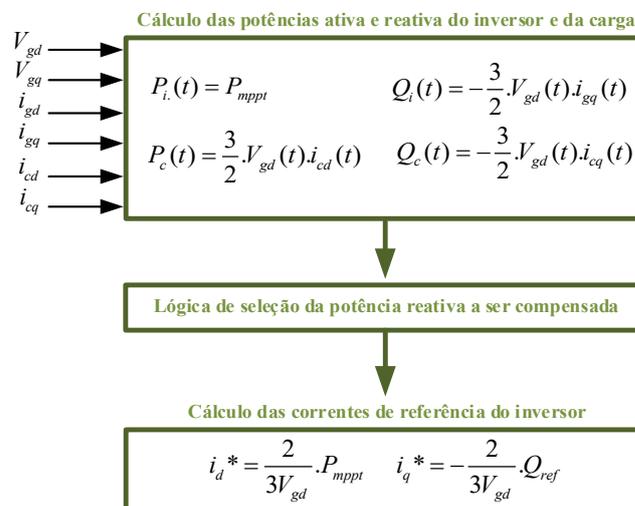
$i_q(t)$ : Corrente de eixo em quadratura.

Aplicando os valores de tensão e corrente do inversor e carga nas equações de um sistema de referência síncrona é possível realizar o cálculo das potências ativa e reativa da carga e inversor. Em relação a potência ativa do inversor, esta será dada pelo valor de potência disponível pelo algoritmo de extração de máxima potência, que é feito por meio do controle de tensão do barramento CC. A Figura 3.12 ilustra os cálculos que são feitos e o fluxo de informações. Nesta figura, nota-se que, após

realizar os cálculos das respectivas potências, é aplicado a lógica de seleção do valor de potência reativa de referência do inversor para que possa ser feita a correção do fator de potência e a compensação de tensão.

O algoritmo mencionado será apresentado no capítulo dedicado à explicação da proposta (Capítulo 4). Os valores de potência ativa e reativa de referência são convertidos em correntes de referência para a malha de controle de corrente, que por sua vez, realiza a imposição de corrente na saída do inversor de tal forma a compensar a potência reativa da carga e/ou regular a tensão do PAC.

Figura 3.12: Cálculo das potências ativa e reativa do inversor e da carga.

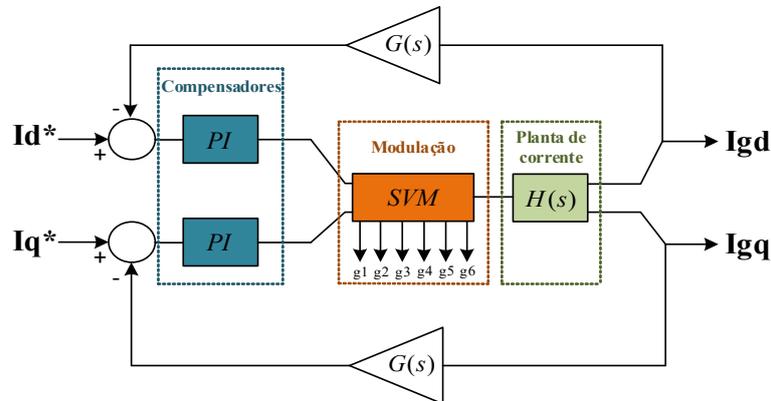


Fonte: Dados do próprio autor.

### 3.6.2 – Malhas de controle de corrente

A imposição de corrente na saída do inversor é feita por meio de uma técnica clássica, que faz o uso de compensadores do tipo proporcional integral (PI) para zerar o erro entre a referência e o valor medido. Proveniente do algoritmo CFPCT, os valores de corrente de eixo direto e em quadratura são referenciados para a malha de controle, que por sua vez, faz a subtração destes sinais com os valores de corrente medidos na saída do inversor. Com isso, os compensadores atuam na tentativa de zerar o erro entre o sinal de referência e o sinal medido, impondo um valor de tensão de referência na entrada da modulação. Sendo assim, a planta de potência modula os valores de tensão referenciados pelos compensados nos terminais do inversor. Esses valores de tensão, quando aplicados sobre o filtro LCL, em condições de estabilidade, produzem as correntes semelhantes as que foram referenciadas pelo algoritmo CFPCT.

Figura 3.13: Malha de controle de corrente.

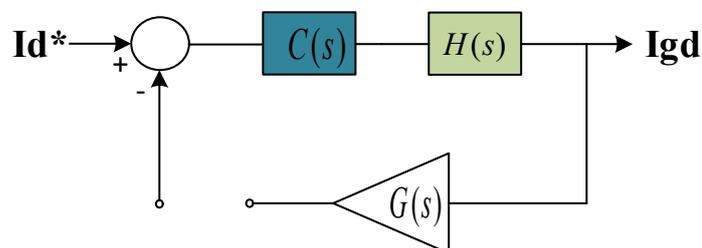


Fonte: Dados do próprio autor.

Conforme citado no parágrafo anterior, para que as correntes na saída do filtro sejam semelhantes as que foram referenciadas, é necessário atingir a estabilidade do controle. Para isso, é necessário realizar a modelagem da planta de corrente para saber como que a mesma irá se comportar frente as imposições do controle. Isto é, modelar o filtro LCL para verificar como será a resposta da corrente de saída frente as variações de tensão na entrada do filtro (Equação 3.29).

Para verificar se o sistema atingiu a estabilidade, é necessário realizar a análise do diagrama de Bode do sistema em malha aberta, verificando os critérios de margem de ganho e margem de fase. Sendo assim, o sistema é considerado estável se o ganho da planta é menor que um (0dB) (NISE, 2011) quando a fase atinge  $180^\circ$ . Em outras palavras, observando a Figura 3.14, nota-se que, quando a fase do sinal de saída estiver em  $-180^\circ$  o ganho deve ser negativo, garantindo que seja feito a realimentação negativa dos sinais. Pois, caso contrário, ocorreria uma realimentação positiva, levando o sistema para instabilidade.

Figura 3.14 – Malha aberta de corrente.



Fonte: Dados do próprio autor.

$$FT_{ma} = C(s).H(s).G(s) \quad (3.35)$$

Para verificar a estabilidade da malha do sistema proposto é necessário realizar a aplicação dos valores dos componentes passivos do filtro LCL  $H(s)$ , dos ganhos dos sensores  $G(s)$  e dos compensadores  $C(s)$  na equação (3.35) e fazer uso do diagrama de Bode. Por este motivo, o diagrama de Bode do sistema será ilustrado no capítulo 5 na etapa de projeto dos compensadores.

## CAPÍTULO 4 – PROPOSTA PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA E COMPENSAÇÃO DE TENSÃO (CFPCT)

### 4.1 – Considerações iniciais

Frente ao crescimento das fontes alternativas de energia e dos inversores conectados à rede elétrica, nota-se que existe uma grande oportunidade para utilizar esses dispositivos para solucionar problemas como o VTCD e a correção do fator de potência. Nesse cenário, este trabalho propõe um algoritmo para solucionar os problemas citados anteriormente utilizando os sistemas inversores conectados à rede.

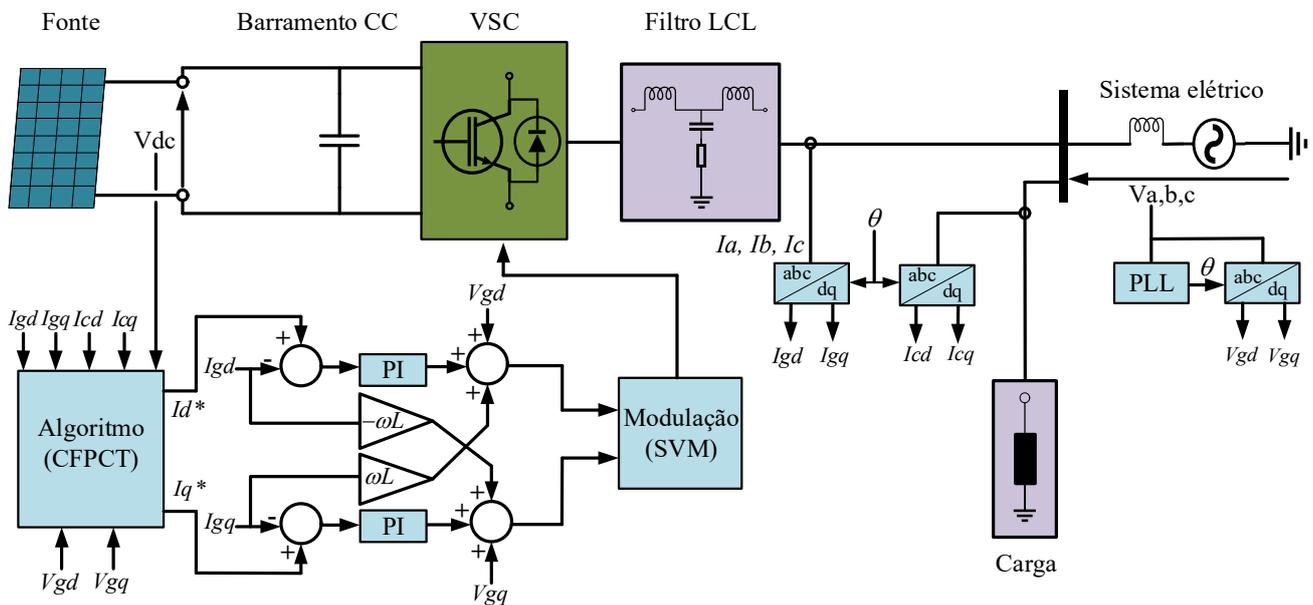
No que tange ao fator de potência, devido a intermitências das fontes renováveis, sabe-se que os inversores trabalham na maioria do tempo fora da capacidade nominal, e que em grande parte do dia, os mesmos se encontram com baixo fator de utilização. Por meio dessa característica, principalmente em redes industriais que operam 24 horas por dia, é vantajoso utilizar esses equipamentos inteligentes para correção do fator de potência. Isso também abre uma grande oportunidade de investimento para esses consumidores, visto que os inversores poderão substituir os bancos de capacitores que são recorrentemente utilizados para correção do FP.

Referente a compensação paralela de tensão, através dessa nova estratégia, o sistema também assume o papel de “proteção” das cargas que estão conectadas no mesmo PAC, frente a VTCD. Essa característica aumenta a confiabilidade do fornecimento de energia, acrescentando ao sistema de geração solar ou eólica, as características do DVR. O que pode tornar o investimento em fontes alternativas de energia uma opção interessante quando existe a necessidade de utilização de DVR para proteção de determinadas cargas.

Um ponto importante a ser destacado nesse momento, é sobre a compatibilidade de potência dos inversores com a potência da carga e do nível de curto da barra. Será apresentado adiante que o algoritmo calcula a potência reativa da carga e o nível de curto da barra, isso para verificar se os inversores possuem potência disponível suficiente para realizar a correção do fator de potência ou a compensação de tensão. Caso a potência disponível não seja suficiente para realizar a correção do FP ou compensação do VTCD, o sistema trabalha com FP unitário.

A Figura 4.1 ilustra o circuito de potência, juntamente com a malha de controle de corrente e o algoritmo proposto.

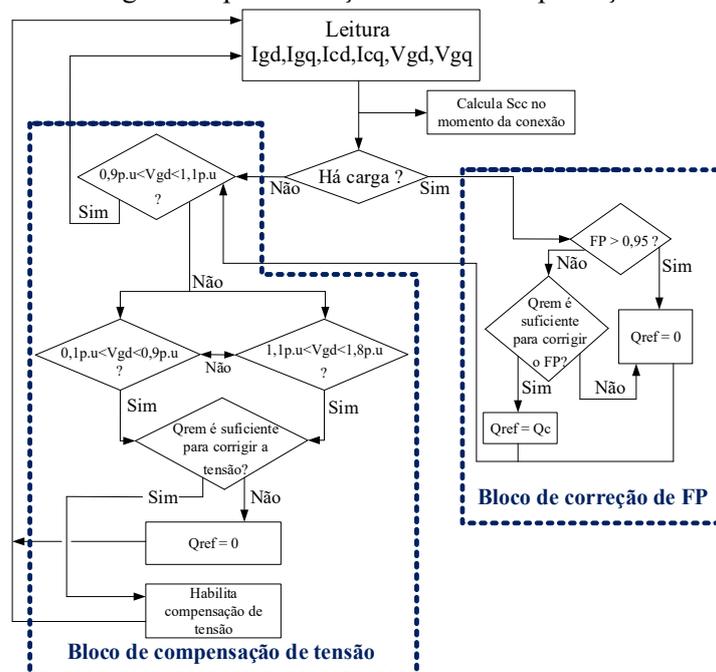
Figura 4.1: Sistema proposto.



Fonte: Dados do próprio autor.

A Figura 4.2 ilustra a lógica da proposta para realizar a correção do FP e compensação da tensão. Note que o sistema apenas corrige o FP e compensa a tensão em situações que a potência remanescente é suficiente para tal função. Cada bloco apresentado será explicado de forma detalhada nos tópicos a seguir.

Figura 4.2: Algoritmo para correção do FP e compensação de tensão.



Fonte: Dados do próprio autor.

Nesse trabalho, não serão abordadas as técnicas de extração de máxima potência da fonte primária, visto que o foco é correção do fator de potência e compensação de tensão, que estão relacionadas com a potência reativa. Entretanto, em (PIRES, 2019) é proposto uma nova técnica para rastreamento global de máxima potência, juntamente com a análise das técnicas clássicas.

#### 4.2 – Correção do fator de potência

Por meio da leitura das correntes da carga, através de (4.1) e (4.2) é possível calcular as potências ativa e reativa da carga em referência síncrona, respectivamente (YAZDANI; IRAVANI, 2010). Destaca-se que as equações abaixo não são válidas em condições em que o sincronismo com a rede não é efetivo.

$$P_c = \frac{3}{2} V_{gd} \cdot I_{cd} \quad (4.1)$$

Onde:

$P_c$  : Potência ativa da carga [W];

$V_{gd}$  : Tensão da rede de eixo direto [V];

$I_{cd}$  : Corrente da carga de eixo direto [A];

$$Q_c = -\frac{3}{2} V_{gd} \cdot I_{cq} \quad (4.2)$$

Onde:

$Q_c$  : Potência reativa da carga [Var];

$I_{cq}$  : Corrente da carga de eixo em quadratura [A];

Uma vez conhecidas às potências da carga é possível calcular o FP através de (2.1). Isso com o objetivo de verificar se o mesmo está dentro dos limites estabelecidos por norma. Caso o FP já esteja dentro da faixa permissível, não há necessidade de realizar a correção e a potência reativa de referência do inversor é nula. Caso o FP não esteja dentro da faixa permissível, a correção deve ser feita. Entretanto, primeiramente é necessário verificar a compatibilidade de potência reativa dos inversores com a demanda de reativo da carga. Isso é feito por meio de uma simples comparação entre a potência reativa da carga e a potência remanescente dos inversores. Sendo a potência remanescente calculada por meio de (4.3).

$$Q_{rem} = \sqrt{S_{NI}^2 - P_{MPPT}^2} \quad (4.3)$$

Onde:

$Q_{rem}$  : Potência reativa remanescente [Var];

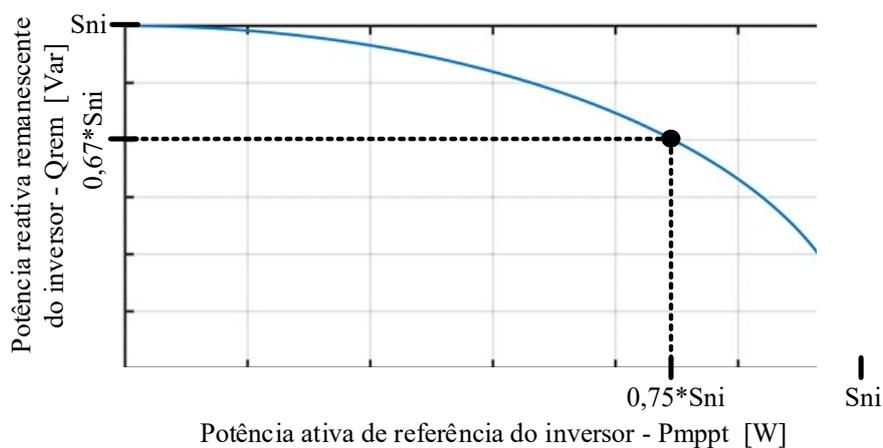
$S_{ni}$  : Potência nominal do inversor [VA];

$P_{mppt}$  : Potência ativa de referência do inversor [W];

Quando a potência remanescente é suficiente para compensar a demanda de reativo da carga, a referência de potência reativa do inversor é a própria demanda da carga. Isso garante que o inversor forneça reativo para carga sem ultrapassar sua capacidade nominal. Na situação em que a potência remanescente não é suficiente para correção do FP, o inversor não injeta reativo, visto que a injeção não será suficiente para elevar o FP para valores aceitáveis. Um dos diferenciais deste trabalho está na quantificação da potência reativa quase instantânea da carga e sua respectiva compensação. Tem-se notado que nos trabalhos que tratam deste tema, geralmente é feito a injeção/absorção da potência remanescente do inversor, não garantindo a compensação exata da carga.

A Figura 4.3 apresenta uma informação interessante sobre potência reativa remanescente em função da variação da potência ativa, considerando a potência aparente constante. Revelando uma grande capacidade do inversor para fornecimento de potência reativa mesmo com valores de potência ativa próximos do nominal. Exemplificando, para injeção de potência ativa de 75% da capacidade nominal, ainda é possível injetar 67% de potência reativa. Isso devido a não linearidade da equação (4.3). Apesar desta característica ser bastante interessante, do ponto de vista prático, é comum que inversores comerciais possibilitem a variação de apenas 5% do FP. Aqui é importante ressaltar que neste trabalho não foi avaliado o impacto da operação com baixo fator de potência do inversor nos diodos de corpo dos IGBT's.

Figura 4.3: Gráfico da potência reativa remanescente em função da potência ativa.

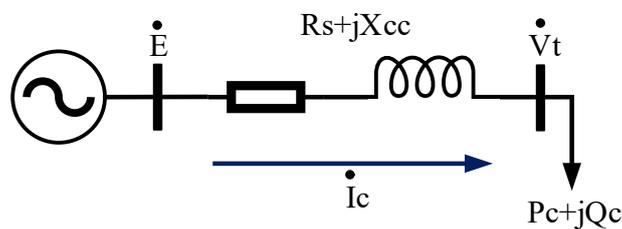


Fonte: Dados do próprio autor.

### 4.3 – Regulação de tensão

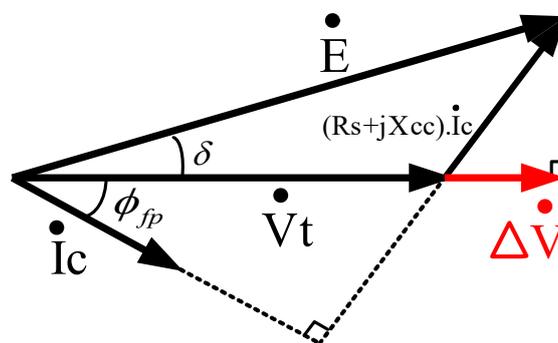
Em condições normais de operação, o inversor monitora a tensão do barramento em que está conectado. Isso com a finalidade de detectar possíveis VTCD's e, quando possível, compensá-los. Para verificar se a planta realmente possui robustez para compensar a tensão, primeiramente é necessário realizar o cálculo do nível de curto circuito do barramento. A metodologia utilizada para alcançar esse objetivo está explicada abaixo.

Figura 4.4: Diagrama unifilar de uma carga alimentada por uma linha indutiva.



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 4.5: Diagrama fasorial da Figura 4.4.



Fonte: Dados do próprio autor.

Visto que a tensão na barra de carga  $V_t$  se encontra na referência, verifica-se que essa se altera de acordo com a variação da corrente drenada pela carga (Figura 4.5). A variação de tensão na barra da carga é a parte real da queda de tensão na linha (4.4).

$$\Delta V_{p.u} = \frac{\Delta V}{V_t} = \frac{\text{Re}\{\dot{I}_c \cdot (R_s + jX_{cc})\}}{V_t} \quad (4.4)$$

Onde :

$\Delta V_{p.u}$  : Variação de tensão por unidade;

$\Delta V$  : Variação de tensão [V];

$V_t$  : Tensão na barra de carga [V];

$I_c$  : Corrente absorvida pela carga [A];

Substituindo a forma fasorial da corrente pela forma complexa, tem-se que;

$$\Delta V_{p.u} = \frac{\text{Re}\{(I_c \cos \phi_{fp} + jI_c \text{sen} \phi_{fp}) \cdot (Rs + jXcc)\}}{V_t} \quad (4.5)$$

Desenvolvendo (4.5);

$$\Delta V_{p.u} = \frac{\text{Re}\{Rs \cdot I_c \cdot \cos \phi_{fp} + jRs \cdot I_c \cdot \text{sen} \phi_{fp} + jXcc \cdot I_c \cdot \cos \phi_{fp} + j^2 \cdot Xcc \cdot I_c \cdot \text{sen} \phi_{fp}\}}{V_t} \quad (4.6)$$

Considerando apenas a parte real de (4.6);

$$\Delta V_{p.u} = \frac{Rs \cdot I_c \cdot \cos \phi_{fp} - Xcc \cdot I_c \cdot \text{sen} \phi_{fp}}{V_t} \quad (4.7)$$

A potência ativa e reativa da carga é dada por (4.8) e (4.9);

$$I_c \cdot \cos \phi_{fp} = \frac{Pc}{V_t} \quad (4.8)$$

$$I_c \cdot \text{sen} \phi_{fp} = \frac{Qc}{V_t} \quad (4.9)$$

Substituindo (4.8) e (4.9) em (4.7), tem-se que;

$$\Delta V_{p.u} = \frac{Rs \cdot Pc - Xcc \cdot Qc}{V_t^2} \quad (4.10)$$

Considerando que a resistência dos condutores é muito pequena em relação a reatância;

$$\Delta V_{p.u} = - \frac{Xcc \cdot Qc}{V_t^2} \quad (4.11)$$

Considerando que em condições normais a tensão terminal da carga possui valor muito próximo da tensão de circuito aberto;

$$S_{cc} = \frac{E^2}{Xcc} \approx \frac{V_t^2}{Xcc} \quad (4.12)$$

Onde :

E : Tensão terminal da fonte ou tensão de circuito aberto [V];

S<sub>cc</sub> : Potência de curto circuito [VA];

Substituindo (4.12) em (4.11);

$$\frac{V_t^2}{Xcc} = - \frac{Qc}{\Delta V_{p.u}} = S_{cc} \quad (4.13)$$

Em (4.14) observa-se que a variação de tensão na barra de carga está diretamente relacionada com a potência reativa drenada pela barra.

$$\Delta V = -\frac{Qc}{Scc} \quad (4.14)$$

Analisando (4.14) nota-se que para variações crescentes do consumo de reativo, aumento de cargas indutivas, a variação de tensão na barra tende a ser cada vez mais negativa. Isso faz com que a tensão pós aumento de carga seja menor que a tensão antes do aumento de carga, (4.15). Essa análise também pode ser feita para cargas capacitivas, que em barra de carga fornece reativo, isto é, torna a variação de tensão na barra positiva, aumento da tensão (4.15).

$$V_{tf} = V_{to} + \Delta V \quad (4.15)$$

Onde :

$V_{tf}$  : Tensão terminal da carga após a variação de potência reativa [V];

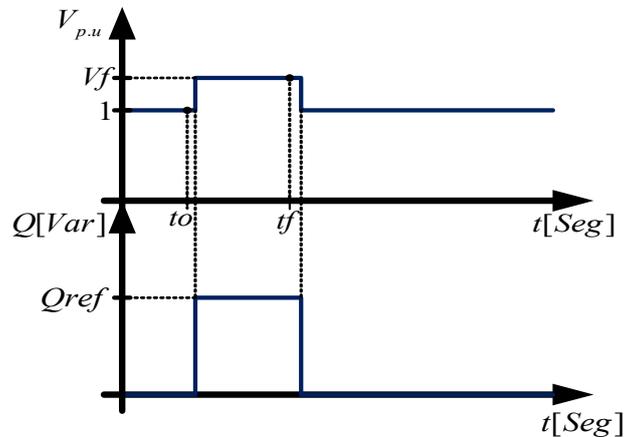
$V_{to}$  : Tensão terminal da carga antes da variação de potência reativa [V];

Uma observação extremamente importante para compreensão da variação de tensão na barra com a variação da corrente da carga é a respeito dos tipos de barra de geração e de consumo. Geralmente, barramentos de geração são do tipo potência e tensão constantes, e barramentos de carga são do tipo potência ativa e reativa constantes. Nessas condições, é importante notar que a tensão E do diagrama fasorial (Figura 4.5) permanece constante frente a variações da corrente de carga, isso devido a característica de tensão constante da barra de geração.

A relação entre potência reativa e tensão da barra apresentada em (4.14) é base para o desenvolvimento da estratégia de compensação proposta aqui. Através de (4.14) é possível calcular o nível de curto circuito do barramento em que o inversor está conectado, informação essa que é importantíssimo para verificar se é possível realizar a compensação de tensão.

A Figura 4.6 apresenta o procedimento utilizado para o cálculo do nível de curto da barra em que o inversor está conectado. Após a conexão do inversor, em um determinado tempo, é iniciado o teste de cálculo do nível de curto, que basicamente é injetar reativo na barra por um intervalo de tempo, ler a tensão antes e depois dessa injeção, aplicar os valores medidos em 4.14 e calcular o nível de curto. Destaca-se que, em uma ocorrência periódica do teste para cálculo do nível de curto, pode ocorrer iterações com os algoritmos de anti-ilhamento de inversores conectados no mesmo PAC.

Figura 4.6: Procedimento para cálculo do nível de curto.



Fonte: Dados do próprio autor.

Em situações de VTCD, é necessário verificar se a potência reativa remanescente do inversor é suficiente para realizar a compensação. Em (4.14) é possível perceber que a variação de tensão na barra é igual ao percentual de potência reativa em relação ao nível de curto circuito. Isto é, exemplificando, para elevar a tensão em 10% é necessário injetar, de reativo, 10% da potência de curto circuito.

Sendo assim, em VTCDs de 10% o inversor deve possuir uma potência remanescente maior ou igual a 10% da potência de curto circuito da barra, para realizar a compensação. Isso é feito de forma digital através de uma simples comparação. Em situações em que é possível realizar a compensação, a função de compensação de tensão é habilitada e a tensão é restaurada para os limites estabelecidos. Em situações em que não é possível realizar a compensação, o inversor injeta apenas potência ativa.

Destaca-se que a compensação de tensão não é feita em malha fechada, isto é, não faz uso de compensadores. Isso torna essa estratégia tanto quanto interessante, pois não necessita de dados da planta para equacionar a função de transferência e ajustar ganhos.

Outro ponto importante a ser destacado é que esta metodologia se torna precisa em situações em que a resistência da rede é consideravelmente menor que a reatância de curto circuito, fato comumente notado em redes de média e alta tensão.

## CAPÍTULO 5 – PROJETO

### 5.1 – Considerações iniciais

Neste momento será apresentado a especificação dos principais elementos do protótipo, que são; determinação da tensão do barramento CC, chaves semicondutores e filtro. Os valores de projeto são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Valores de projeto do protótipo.

<b>Grandeza</b>	<b>Valor</b>
Tensão de fase da rede - $V_g$	127 V
Frequência da rede $F_g$	60 Hz
Frequência de comutação - $F_s$	10 kHz
Potência nominal do inversor - $S_n$	3 kVA
Tensão do barramento CC - $V_{dc}$	300 V
Percentual de ondulação de corrente em L1	15%
Percentual de variação do fator de potência	15%

Fonte: Dados do próprio autor.

### 5.2 – Especificação da tensão do barramento CC

Em (SOARES, COELHO, FREITAS, LIMA, JUNIOR, 2020) nota-se que a tensão do barramento CC está intimamente relacionada com a taxa de distorção harmônica da corrente. Desta maneira, deve-se levar isso em consideração na fase de projeto, visto que é neste momento que será determinado a tensão do barramento.

Nesse sentido, em (SOARES, COELHO, FREITAS, LIMA, JUNIOR, 2020) é evidenciado que, para a modulação vetorial convencional, a taxa de distorção harmônica de corrente mínima ocorre quando o índice de modulação é próximo do unitário. Sendo assim, por meio da equação (3.16) calcula-se a tensão do barramento CC.

$$V_{CC} = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{1,04} \cong 300V$$

O valor calculado acima evidencia uma das vantagens dessa modulação, pois quanto menor a tensão do barramento CC, menor será os esforços de tensão nas chaves, conseqüentemente, possibilita a utilização de chaves com custo menor.

Nota-se também que foi utilizado um índice de modulação unitário. Isso considerando uma situação em que o inversor está no limiar da região linear antes da saturação (Figura 3.7). Caso seja

necessário garantir uma ampla faixa de operação linear para a atuação do controle, deve-se trabalhar com valores de índice de modulação menores.

### 5.3 – Chaves semicondutoras

A especificação das chaves semicondutoras deve ser feita obedecendo a suportabilidade térmica e os esforços de tensão que as mesmas estarão sujeitas em condições normais de operação. Isto é, especificar um dispositivo que possua uma corrente nominal e suportabilidade de tensão superiores aos valores de projeto, na frequência de chaveamento.

Através dos valores mencionados na Tabela 5.1, é possível calcular a corrente máxima do inversor utilizando (2.17).

$$I_{MAX} = \frac{3 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220} \cong 8A$$

$$V_{CCMin} = 300V$$

Obedecendo os valores apresentados acima e utilizando os semicondutores disponíveis no laboratório, escolheu-se três módulos que possuem dois IGBT's em série cada, modelo SKM50GB12T4, cuja as características estão detalhadas na Tabela 5.2. Como este módulo possui uma corrente nominal muito acima da corrente de projeto, e também ser próprio para frequências de chaveamento superiores a 12kHz, verifica-se que este dispositivo suporta os esforços de corrente e tensão. Ressalta-se que do ponto de vista de otimização, poderia ser utilizado semicondutores com características inferiores ao modelo escolhido. Entretanto, neste trabalho, utilizou-se o modelo SKM50GB12T4 com a finalidade de buscar robustez em detrimento dos custos.

Tabela 5.2: Parâmetros do dispositivo SKM50GB12T4.

Descrição	Valor
Tensão coletor emissor-VCES	1200V
Corrente máxima no coletor em 25°C - IC @ TC = 25°C	81A
Corrente máxima no coletor em 100°C - IC @ TC = 100°C	62A
Pico de corrente no coletor - ICM	150A
Tensão gate emissor-VGE	+/-20V
Range de temperatura-TJ	-40°C a 125°C
Tensão CA máxima suportada durante 1 minuto-VISOL	4000V

Fonte: Datasheet do dispositivo.

Na Tabela 5.2, fica claro que o módulo utilizado está consideravelmente superdimensionado. Do ponto de vista comercial, o ideal é realizar uma análise financeira do custo benefício de cada módulo

com a intenção de otimizar o custo do inversor como um todo. Isso, levando em consideração não só o valor dos semicondutores em relação a suportabilidade dos parâmetros elétricos, mas também, a vida útil para tipo de semicondutor, visto que isso influencia na garantia do equipamento e, conseqüentemente, em estudo de viabilidade financeiro da usina como um todo.

Em condições de otimização dos semicondutores, deve-se notar a desclassificação de corrente apresentada no *datasheet* devido ao aumento da frequência de chaveamento. Outro ponto importante, refere-se as proteções contra sobretensões transitórias, que devem ser feitas por meio de circuitos *snubber* e respeitar os limites citados no *datasheet*. Neste trabalho, foi utilizado um capacitor de snubber no barramento CC de 1uF, 1000V. Conforme recomendações do fabricante do dispositivo.

#### 5.4 – Projeto do filtro LCL

Conforme apresentado no capítulo 4, a especificação do filtro LCL possui nove etapas. Destas nove etapas, as oito primeiras seguem a metodologia apresentada em (REZNIK; SIMOES; DURRA; MUYEEN, 2013). A última etapa é feita para verificar a suportabilidade de capacitores quando submetidos a correntes harmônicas.

##### 1º) Determinação dos valores de entrada

Tabela 5.3: Valores de projeto para especificação do filtro.

Grandeza	Valor
Tensão de fase da rede - Vg	127 V
Frequência da rede Fg	60 Hz
Frequência de comutação - Fch	10 kHz
Máxima potência ativa injetada - Pb	3 kW
Tensão do barramento CC - Vdc	300 V

Fonte: Dados do próprio autor.

##### 2º) Cálculo dos valores de base

Utilizando (3.20) e (3.21), calcula-se a impedância e capacitância de base.

$$Z_b = \frac{220^2}{3000} = 16,13\Omega$$

$$C_b = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot 16,13} = 164,4162\mu F$$

### 3º) Cálculo do capacitor e da indutância do lado do inversor – L1

Conforme mencionado do capítulo 4, o valor da capacitância está diretamente relacionado com a possibilidade de variação do fator de potência. Sendo assim, neste caso, a capacitância do filtro deve possuir um valor coerente para fornecer a potência reativa tanto para correção do FP da carga, quanto compensar a tensão em situações de VTCD.

Neste trabalho será considerado que o fator de potência do inversor pode variar na ordem de 15%.

Desta forma, a capacitância do filtro pode ser calculada por meio de (3.22).

$$C_f = 0,15.(164,4162.10^{-6}) = 24,66\mu F$$

O valor comercial mais próximo encontrado, foi de 20uF.

Através de (3.23) pode-se calcular a indutância L1;

$$L1 = \frac{300}{6.10.10^3.0,11.8} = 5,5mH$$

O valor comercial mais próximo encontrado foi de 6mH. Portanto, este foi o valor utilizado no trabalho.

### 4º) Determinação do fator de atenuação

O fator de atenuação do filtro é dado pela razão da corrente injetada na rede e a corrente fornecida no indutor L1, em uma dada frequência harmônica. Esse valor é um dado de projeto, que será chave para o cálculo da indutância L2 que, em conjunto com L1 e Cf, produzirá a atenuação desejada. Aqui será adotado um fator de atenuação de 20%.

### 5º) Determinação do indutor do lado da rede - L2

Utilizando (3.25) e adotando um fator de atenuação de 20%, calcula-se o valor de L2.

$$L2 = \frac{\sqrt{\frac{1}{0,2^2} + 1}}{24,66.10^{-6} \cdot (2\pi \cdot 10 \cdot 10^3)^2} = 61,63\mu H$$

### 6º) Verificação da frequência de ressonância

Utilizando os valores dos elementos passivos do filtro, calcula-se a frequência de ressonância por meio de (3.26).

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{5,5 \cdot 10^{-3} + 61,63 \cdot 10^{-6}}{5,5 \cdot 10^{-3} \cdot 61,63 \cdot 10^{-6} \cdot 24,66 \cdot 10^{-6}}} = 25,79krd / s$$

$$F_{res} = 4,105kHz$$

Desta forma, para garantir que a frequência de ressonância não está próxima da frequência de chaveamento e nem da frequência da rede, utiliza-se do critério mencionado em (3.27).

$$600\text{Hz} < 4105\text{Hz} < 5000\text{Hz} - \text{Critério atendido}$$

Um ponto importante a ser mencionado nesse momento é a verificação da frequência de ressonância da rede com o capacitor Cf. Essa verificação é importante, pois, caso essa frequência de ressonância seja próxima de uma ordem harmônica de tensão presente no PAC, o capacitor irá absorver tal corrente, porém, proveniente da rede.

Nas simulações foi utilizado um PAC com nível de curto de 25 kVA, o que equivale a uma indutância de 5mH e uma frequência de ressonância rede-capacitor de aproximadamente 214 Hz (ordem harmônica 3,5). Como a implementação será feita através de uma fonte de tensão que não possui componentes harmônicas, por mais que a indutância da rede esteja em ressonância com o capacitor em uma ordem próxima da terceira, não existe a possibilidade de circulação de corrente, visto que não existe tensão de terceiro harmônico na fonte. Todavia, na prática, é extremamente importante verificar as ordens harmônicas de tensão presentes no PAC, isso com o objetivo de evitar a ressonância da rede com o capacitor do filtro LCL. Nesta mesma linha, sabe-se que na prática é comum que haja componentes harmônicas de tensão na rede, fazendo com que as correntes medidas na saída do filtro sejam prejudicadas do ponto de vista harmônico, pois além dos harmônicos provenientes do inversor, também existe os provenientes da rede.

### 7º) Cálculo da resistência série do capacitor

A resistência série do capacitor é calculada por meio de (3.28).

$$R_f = \frac{1}{3 \cdot (2579) \cdot (24,66 \cdot 10^{-6})} = 5,24\Omega$$

Neste momento é importante verificar a ordem da resistência calculada. Isto é, nesse caso, o valor da resistência é relativamente pequeno e, dependendo da ligação, pode ser representada pelo próprio parâmetro do próprio cabo ou barra que faz a ligação do banco de capacitores. Isso faz com que não seja necessário a introdução de um novo componente no circuito. Porém, caso essa grandeza tivesse um valor relativamente alto, a ponto de ser necessário introduzir uma resistência em série com o banco de capacitor, deve-se verificar a possibilidade de utilização de técnicas ativas de amortecimento, isso com o objetivo de não comprometer o rendimento do sistema.

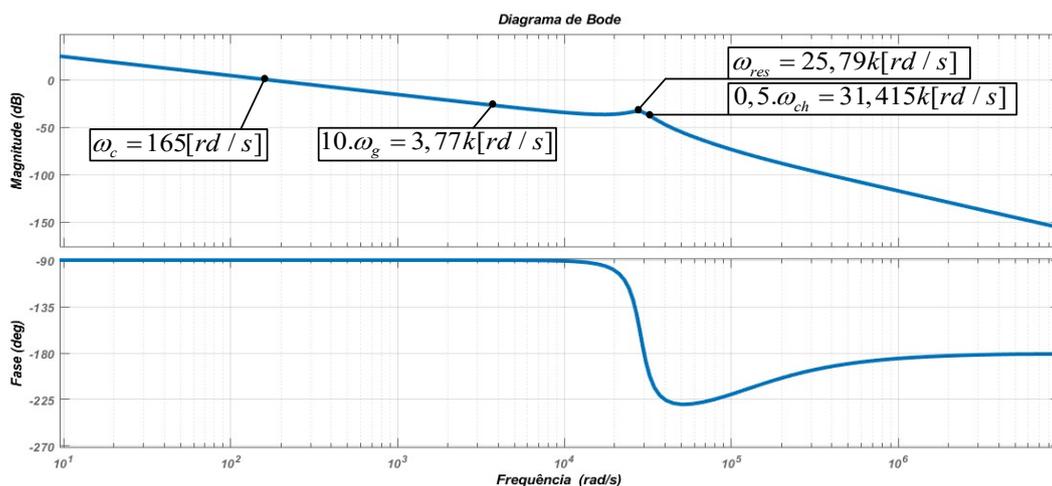
Na prática, verificou-se que o amortecimento da ressonância é altamente sensível à resistência série do banco de capacitores e que pequenos valores de resistência já realizam um amortecimento

significativo. Com isso, para evitar reduzir a eficiência do filtro, optou-se por utilizar a própria resistência do circuito de 1 Ohm.

### 8º) Verificação da resposta em frequência do filtro

A resposta em frequência do filtro projetado é ilustrada na Figura 5.1. Mais uma vez, agora de forma gráfica, percebe-se que o filtro atendeu o critério exposto em 3.26. Além disso, também é evidente o efeito de amortecimento da amplitude na frequência de ressonância, provocado pela presença da resistência série ao capacitor. Percebe-se também que a amplitude na frequência de ressonância é altamente sensível a resistência série ao capacitor. Isto é, mesmo para pequenos valores desta grandeza, ocorre um amortecimento significativo, tornando o efeito da ressonância uma observação um pouco teórica, visto que na prática sempre existe resistência série.

Figura 5.1: Diagrama de Bode do filtro projetado.



Fonte: Dados do próprio autor.

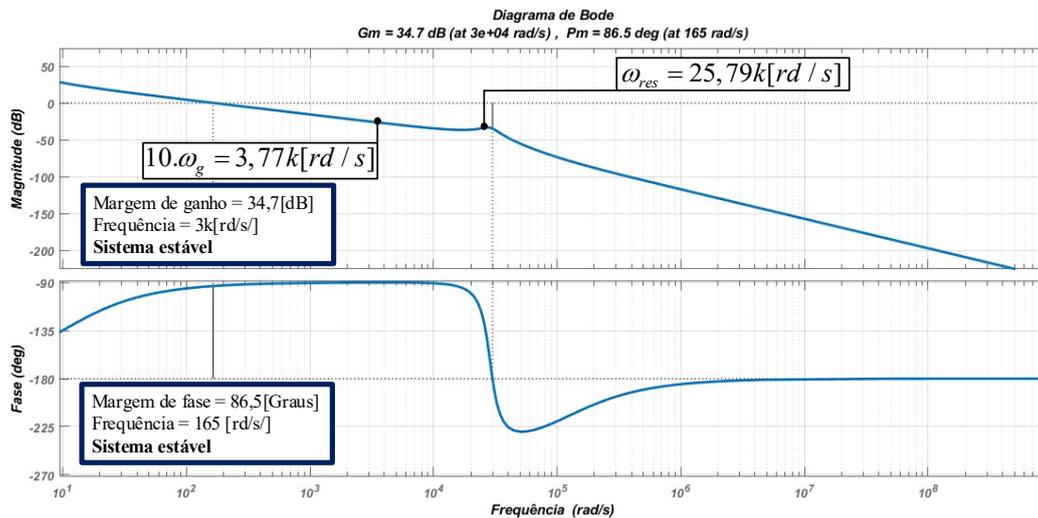
Conforme citado no item 4.6.2, para verificar a estabilidade do sistema é necessário realizar a análise do diagrama de Bode em malha aberta considerando o compensador proporcional integral e a função de transferência do filtro. Aplicando os valores calculados acima, temos a seguinte função de transferência do sistema.

$$FT_{ma} = C(s).H(s).G(s)$$

$$FT_{ma} = \left[ \frac{1.(s+10)}{s} \right] \cdot \left[ \frac{10 \cdot 10^{-6} s + 1}{7,356 \cdot 10^{-12} s^3 + 60,616 \cdot 10^{-9} s^2 + 6,0616 s} \right] \cdot 1$$

O diagrama de Bode de malha aberta do sistema é apresentado por meio da Figura 5.2. Observando essa figura, percebe-se que o sistema atende os critérios de margem de ganho e margem de fase e é caracterizado como estável.

Figura 5.2: Diagrama de Bode de malha aberta.



Fonte: Dados do próprio autor.

### 9º) Verificação da suportabilidade térmica e dielétrica do banco de capacitores

Essa etapa é importante para verificar os valores mínimos de tensão e corrente do banco de capacitores que irá fazê-lo suportar os efeitos térmico e dielétrico provocados pela circulação de correntes harmônicas e, conseqüentemente, tensões harmônicas nos seus terminais. Conforme mencionado no capítulo 4, os capacitores devem suportar uma sobrecarga de no máximo 30%, sobretensão de no máximo 10%. Utilizou-se as formas de onda de tensão e corrente do banco de capacitores, obtidas através de simulações computacionais feitas no software PSIM. Sendo tais valores 6A e 138V. Os valores eficazes de tensão e corrente por fase, considerando as componentes harmônicas, calculados pelo software são apresentados abaixo.

Tabela 5.4: Valores calculados para suportabilidade do filtro.

Grandeza	Valor
Corrente eficaz - Irms	6A
Tensão eficaz - Vrms	138V
Potência reativa - Qrms	828Var
Tensão de pico - Vpico	195,16V

Fonte: Dados do próprio autor.

## CAPÍTULO 6 – RESULTADOS DE SIMULAÇÃO E EXPERIMENTAIS

### 6.1 – Considerações iniciais

Com a intenção de comprovar a proposta, utilizou-se o software PSIM para realizar as simulações computacionais. A simulação possui seus valores em linha com os valores práticos do protótipo. Isto é, não será necessário adotar nenhum fator de escala para adequar a simulação aos resultados práticos. É evidente que a simulação computacional é um ambiente ideal e não consegue cobrir todos os efeitos físicos, visto que grande parte desses são, fatalmente, práticos. Sendo assim, para concretizar o trabalho em um ambiente real, foi construído um protótipo que reproduz a proposta e as condições de operação.

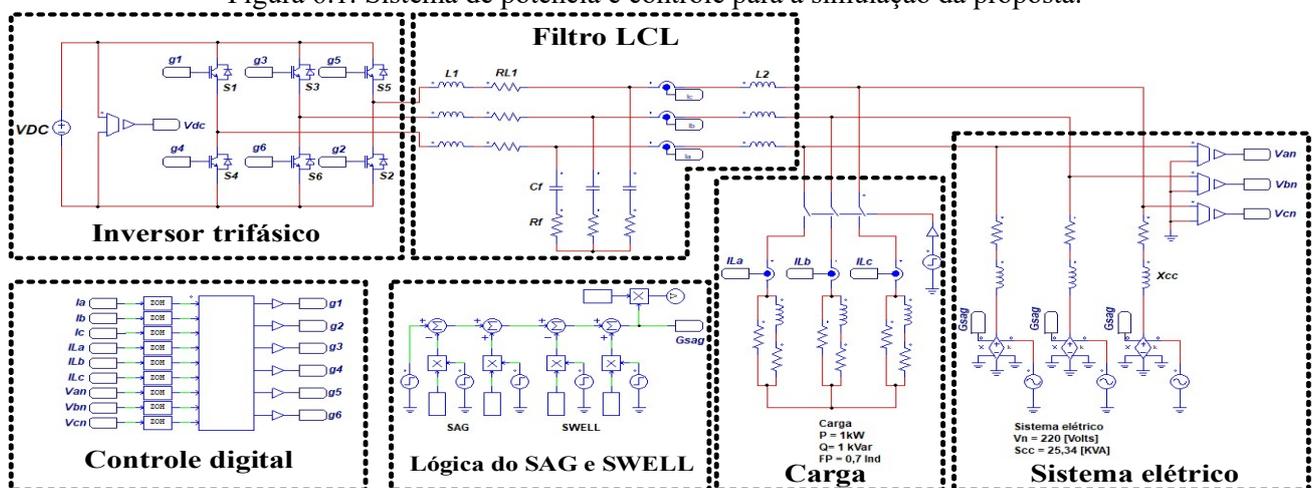
Nesse capítulo será abordado os resultados obtidos, sendo que, primeiramente será apresentado os resultados computacionais e posteriormente, juntamente com as características do protótipo, os resultados práticos.

### 6.2 – Resultados de simulação

A Figura 6.1 ilustra a montagem de todos os elementos do circuito de potência e a lógica de implementação do controle. Os valores de projeto do inversor estão ilustrados na Tabela 5.3 e os dados da carga e do sistema elétrico estão ilustrados na própria figura. Para realizar a compensação de tensão durante afundamentos ou elevações de tensão, foi necessário reduzir o nível de curto do ponto de acoplamento, visto a baixa potência do protótipo.

Referente a escolha do software PSIM, se deu pela facilidade de simulação de circuitos de eletrônica de potência, simples interface de programação em linguagem C e comunicação com a plataforma TMS320F28335, que é amplamente utilizada no laboratório de pesquisa. Todas as simulações foram feitas com passo de 0,000001 segundos.

Figura 6.1: Sistema de potência e controle para a simulação da proposta.



Fonte: Dados do próprio autor.

Observando a Figura 4.2, que ilustra a estratégia proposta, nota-se que o inversor pode operar sob quatro condições, sendo: ausência de carga, presença de carga com correção do FP, presença de carga sem a correção do FP ou durante afundamentos (SAG) ou elevações (SWELL) tipo equilibrados. Nesse sentido, a metodologia adotada para verificar os resultados irá considerar essas quatro possibilidades, levando em consideração os aspectos dinâmicos e os harmônicos de corrente imposta na rede em cada condição.

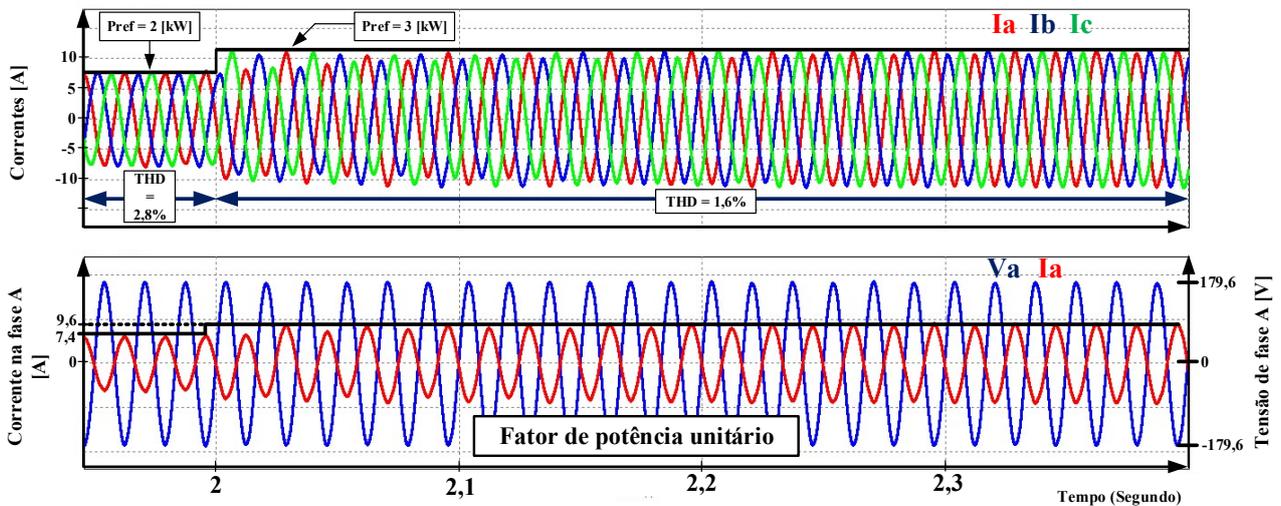
### 6.2.1- Operação com ausência de carga

Apesar deste trabalho estar mais relacionado com a potência reativa, é importantíssimo verificar a condição de operação com fator de potência próximo da unidade. Isso devido a possibilidade do usuário utilizar esse sistema apenas com fornecedor de potência ativa, não desfrutando das outras funções disponíveis no dispositivo.

Sendo assim, sabe-se que a referência de potência ativa do inversor é proveniente da estratégia de extração de máxima potência da fonte primária. Objetivando injetar essa potência na rede da melhor maneira possível, o inversor deve possuir uma resposta transitória e de regime permanente satisfatória. Para verificar a resposta transitória, será simulado uma variação de 1kW. Além de verificar a resposta transitória, será verificado o fator de potência e a taxa de distorção harmônica de corrente.

A Figura 6.2 ilustra as formas de onda das correntes e da tensão na fase A frente ao degrau de potência ativa em 2 segundos. O primeiro gráfico mostra o comportamento das correntes impostas na rede antes e depois do degrau de potência, observa-se uma resposta transitória satisfatória, visto que o sistema manteve a estabilidade e não apresentou nenhum comportamento irregular. Nesse mesmo gráfico está o conteúdo harmônico das correntes, que possuem valores abaixo dos 5% estabelecido por IEEE 1547/2008. O THD de corrente ilustrado no gráfico é o THD da fase com maior distorção. Essa análise pessimista foi feita com a finalidade de evitar poluir a figura. O segundo gráfico ilustra o fator de potência, que se mantém unitário antes e depois do degrau de potência.

Figura 6.2: Resultado computacional da proposta na condição de ausência de carga.



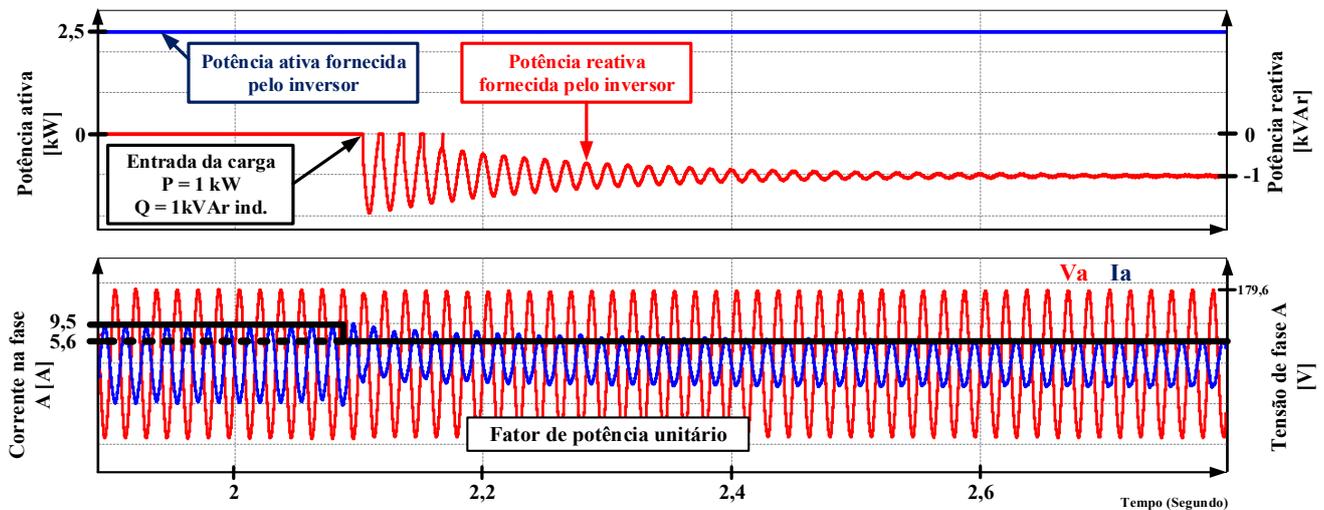
Fonte: Dados do próprio autor.

### 6.2.2- Operação com correção do FP da carga

Conforme ilustrado nas Figuras 4.1 e 4.2, a correção do fator de potência é feita por meio da leitura das correntes da carga. Caso o FP esteja fora dos limites estabelecidos, o algoritmo verifica se a potência remanescente é suficiente para realizar a correção, caso seja, é feito a correção. Caso contrário, ocorre apenas a injeção de potência ativa. Desta forma, a potência ativa gerada é sempre injetada na rede e a capacidade sobressalente do inversor pode ser utilizada para processar potência reativa.

Para evidenciar essa função do inversor, simulou-se uma situação em que o inversor está operando sem carga e em determinado momento ocorre a entrada da carga. Na Figura 6.3 é apresentado a entrada de uma carga indutiva em 2,1 segundos, cuja potência reativa é capaz de ser compensada pelo inversor. O primeiro gráfico ilustra a potência ativa e reativa fornecidas pelo inversor, onde é perceptível a constância da potência ativa e a rápida mudança de potência reativa fornecida quando ocorre a entrada da carga. Também é notável a oscilação de reativo devido ao transitório de energização da carga. No segundo gráfico é mostrado a corrente e a tensão da rede antes e depois da entrada da carga. Nota-se que o fator de potência manteve a unidade, devido a compensação de reativo feita pelo inversor. Além disso ocorreu uma redução da corrente injetada na rede, visto que uma parcela de potência ativa do inversor foi consumida pela carga. Outra observação é em relação ao THD de corrente e a potência da carga quando ocorre a correção do FP. Nota-se que quando o inversor inicia a compensação de reativo, o índice de modulação foge do ponto ótimo em direção a saturação, com a intenção de aumentar a tensão terminal, provocando um aumento das componentes harmônicas de quinta e sétima ordem.

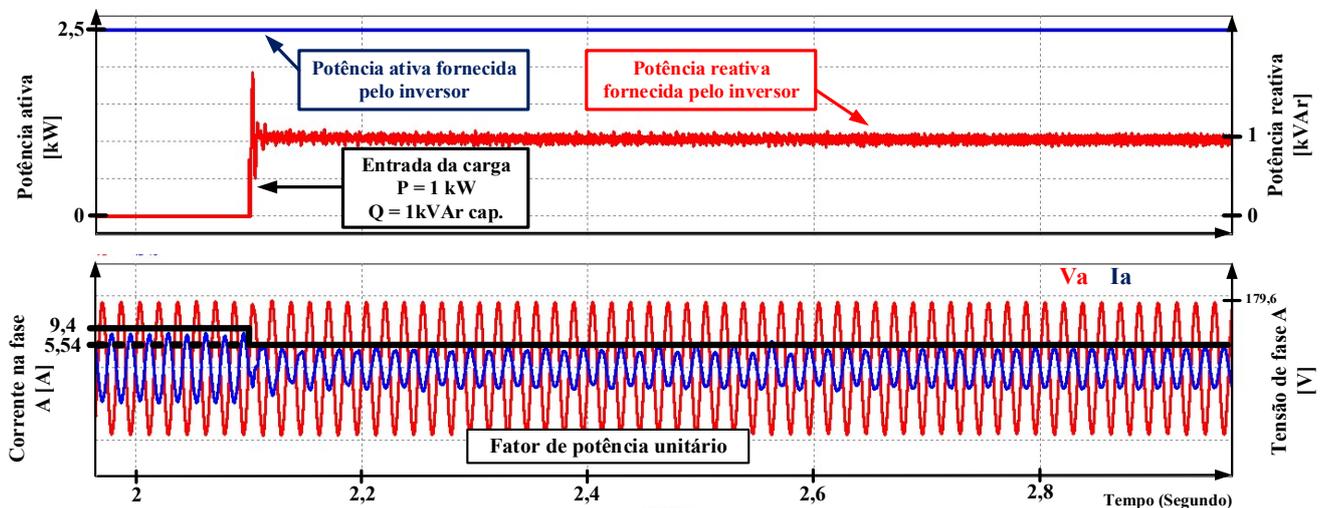
Figura 6.3: Comportamento do inversor na presença de carga indutiva.



Fonte: Dados do próprio autor.

Na Figura 6.4 é apresentado a potência ativa e reativa do inversor antes e depois da entrada de uma carga capacitiva. Reciprocamente ao caso da carga indutiva, o inversor compensa a potência reativa da carga por meio da leitura das correntes e mantém o fator de potência unitário. Também ocorre a redução da corrente injetada na rede, devido ao consumo de potência ativa da carga. Nesse caso, o THD de corrente é reduzido, pois a própria carga se comporta como filtro.

Figura 6.4: Comportamento do inversor na presença de carga capacitiva.



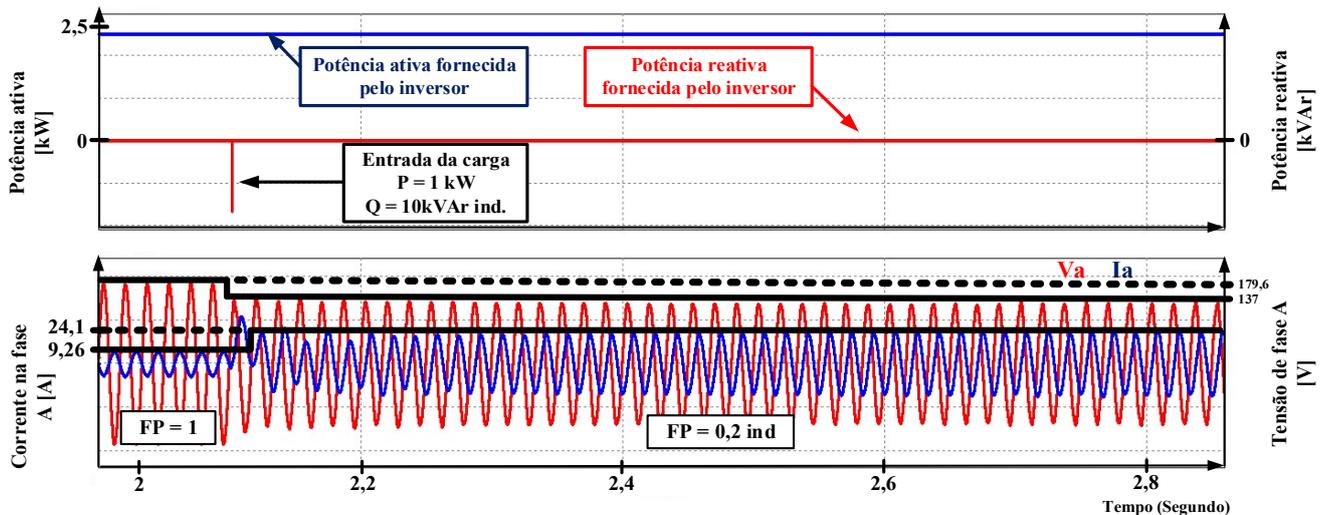
Fonte: Dados do próprio autor.

### 6.2.3- Operação com carga reativa superior a capacidade do inversor

Considerando que a “carga” pode ser representada por um conjunto de alimentadores e não necessariamente por uma única carga fixa, é evidente que as potências demandadas são valores intermitentes, que variam a todo momento de acordo com as características de utilização das cargas

alimentadas. Nesse sentido, caso a potência reativa da carga seja superior a capacidade do inversor, não ocorre compensação e o inversor opera com fator de potência unitário. A Figura 6.5 ilustra essa situação, em que em 2,1 segundos ocorre a entrada da carga. Antes desse tempo, o fator de potência é unitário, porém, após a entrada da carga o inversor verifica que não é capaz de realizar a compensação e opera com fator de potência unitário. Conseqüentemente, o fator de potência é reduzido para próximo do FP da carga. A redução da tensão do PAC ocorre devido ao baixo nível de curto da barra.

Figura 6.5: Comportamento do inversor com carga acima da sua capacidade.

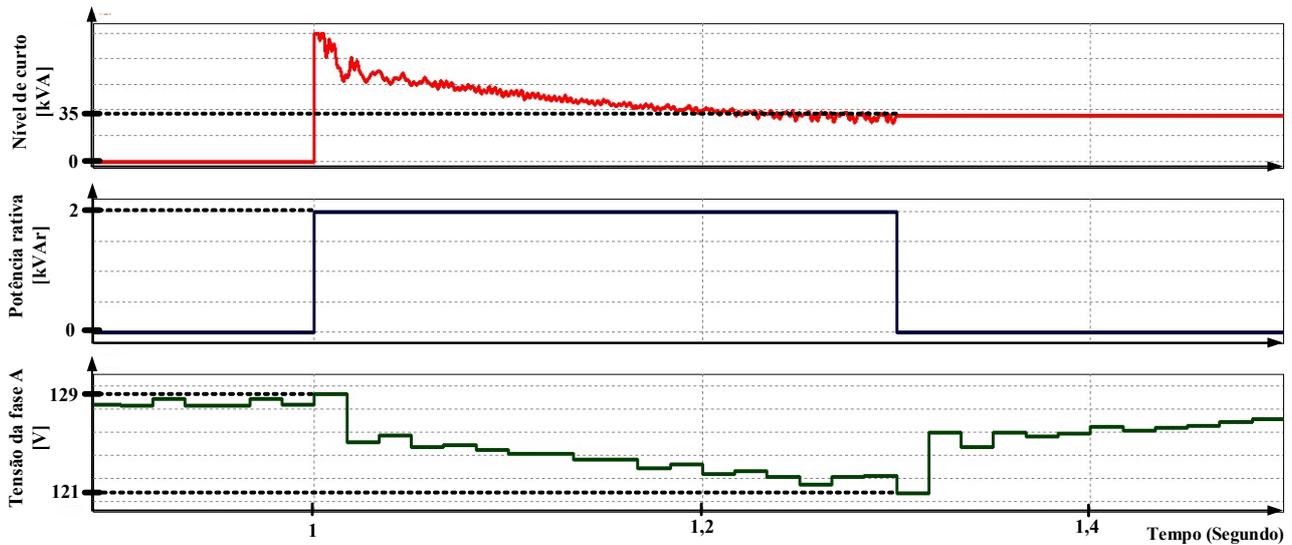


Fonte: Dados do próprio autor.

#### 6.2.4- Cálculo do nível de curto da barra

Conforme apresentado no capítulo três, para que a compensação de tensão ocorra de forma efetiva é fundamental o conhecimento do nível de curto da barra. Para realizar o cálculo do nível de curto da barra, no momento da conexão o inversor faz a leitura da tensão, depois injeta uma pequena quantidade de potência reativa e faz a leitura da tensão novamente. Por meio de 3.14 calcula-se o valor aproximado do nível de curto. A Figura 6.6 ilustra esse procedimento.

Figura 6.6: Cálculo do nível de curto da barra.



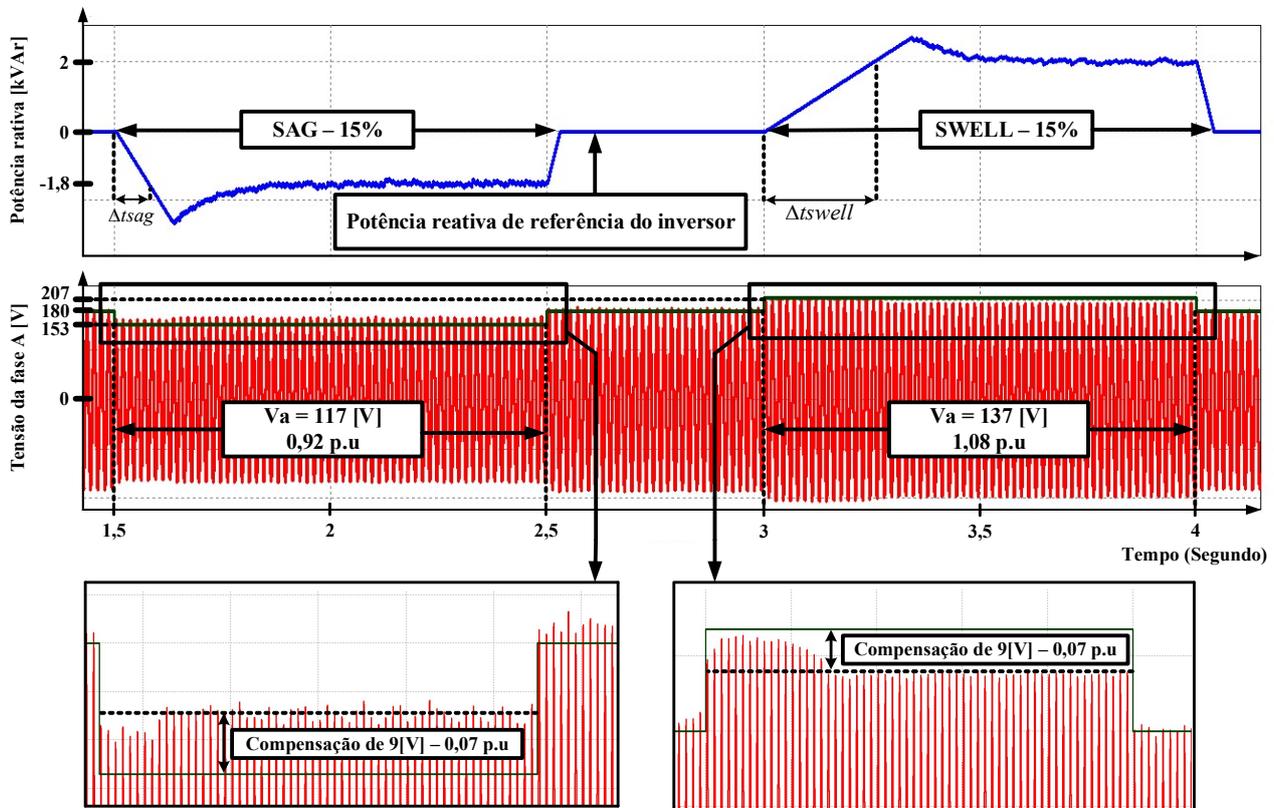
Fonte: Dados do próprio autor.

### 6.2.5- Compensação de tensão frente a SAG e SWELL tipo A

Após o conhecimento do nível de curto circuito, caso ocorra algum tipo de afundamento ou elevação equilibrados, por meio da relação entre a potência reativa remanescente e a de curto circuito da barra, o inversor verifica se consegue ou não compensar a tensão. Para verificar essa função simulou-se um SAG e SWELL de 15%, sendo esse valor escolhido para não ultrapassar a capacidade nominal do inversor.

Na Figura 6.7 nota-se que quando ocorre o SAG e SWELL, o inversor inicia, respectivamente, a injeção e/ou absorção de reativo. Quando a tensão se enquadra entre 0,9 p.u e 1,1 p.u ocorre a estabilização da referência de reativo do inversor, visto que a tensão já está dentro dos limites. Um ponto interessante a ser destaca é o tempo que o algoritmo leva para compensar a tensão, que no caso do SAG é de aproximadamente 83 ms e do SWELL 250 ms. Esses valores são bastante satisfatórios, considerando que para afundamentos acima de 15% a tensão deva ser reestabelecida em no máximo 1,2 segundos, e que o algoritmo de compensação de tensão não utiliza compensadores.

Figura 6.7: Operação frente a SAG e SWELL tipo A.



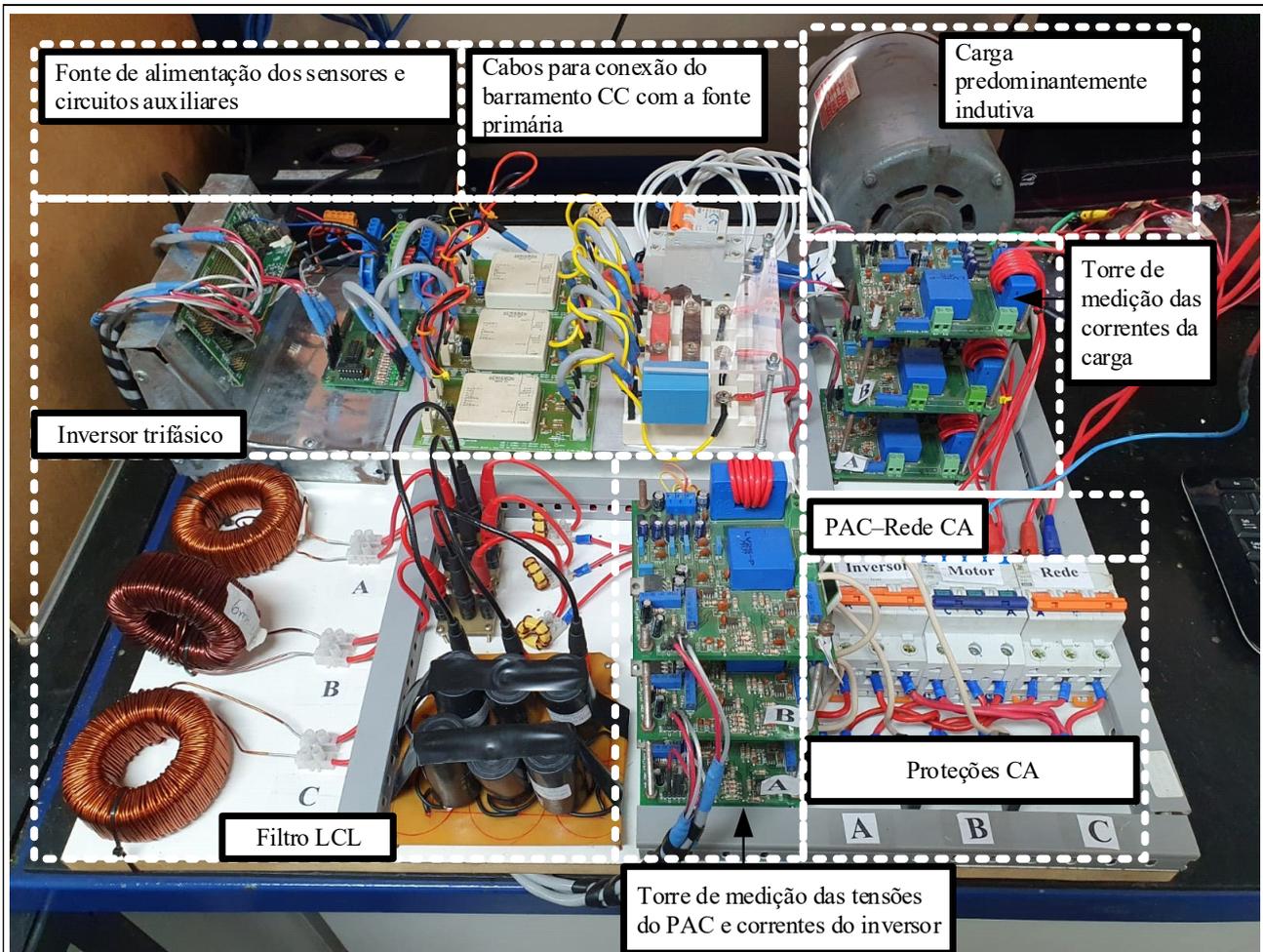
Fonte: Dados do próprio autor.

### 6.3 – Resultados experimentais

Para realizar os testes e retirar os resultados práticos, foi projetado e montado um protótipo para operar com potência de 3kVA. Sendo que, apesar dos dispositivos semicondutores possuírem uma capacidade de operação com potência superior a determinada, os indutores do filtro possuem corrente nominal de 8 A, limitando a potência do equipamento.

A Figura 6.8 apresenta o protótipo como um todo. Nota-se nesta imagem que a conexão com a fonte primária é feita por meio dos cabos de entrada do disjuntor do barramento CC. Neste caso, como o trabalho está predominantemente relacionado com a potência reativa, utilizou-se uma fonte de tensão ajustável como fonte primária e operou-se com uma referência de potência ativa constante.

Figura 6.8: Protótipo 3kVA.



Fonte: Dados do próprio autor.

Para realizar a inversão de corrente contínua para corrente alternada, foi feito a montagem do inversor apresentado na Figura 6.9. Nota-se que, para efeito de proteção dos dispositivos semicondutores, que são significativamente caros, fez-se o uso das proteções contra sobrecorrente presentes dos *gate drivers*. Além disso, também foi utilizado um circuito *snubber* para proteção contra sobretensão, projetado e instalado conforme orientações do fabricante dos módulos semicondutores (SEMIKRON, 2017).

Apesar de possuir a limitação de potência do protótipo dada pelos indutores do filtro, a montagem do inversor em si teve como objetivo a possibilidade de trabalhar com valores elevados de potência. Para isso, optou-se para realizar a ligação do barramento CC, barramentos de cobre com capacidade de condução de corrente superior a corrente nominal dos semicondutores. Outro ponto interessante é a respeito das conexões, optou-se em utilizar parafusos e terminais olhais, com a finalidade de agilizar

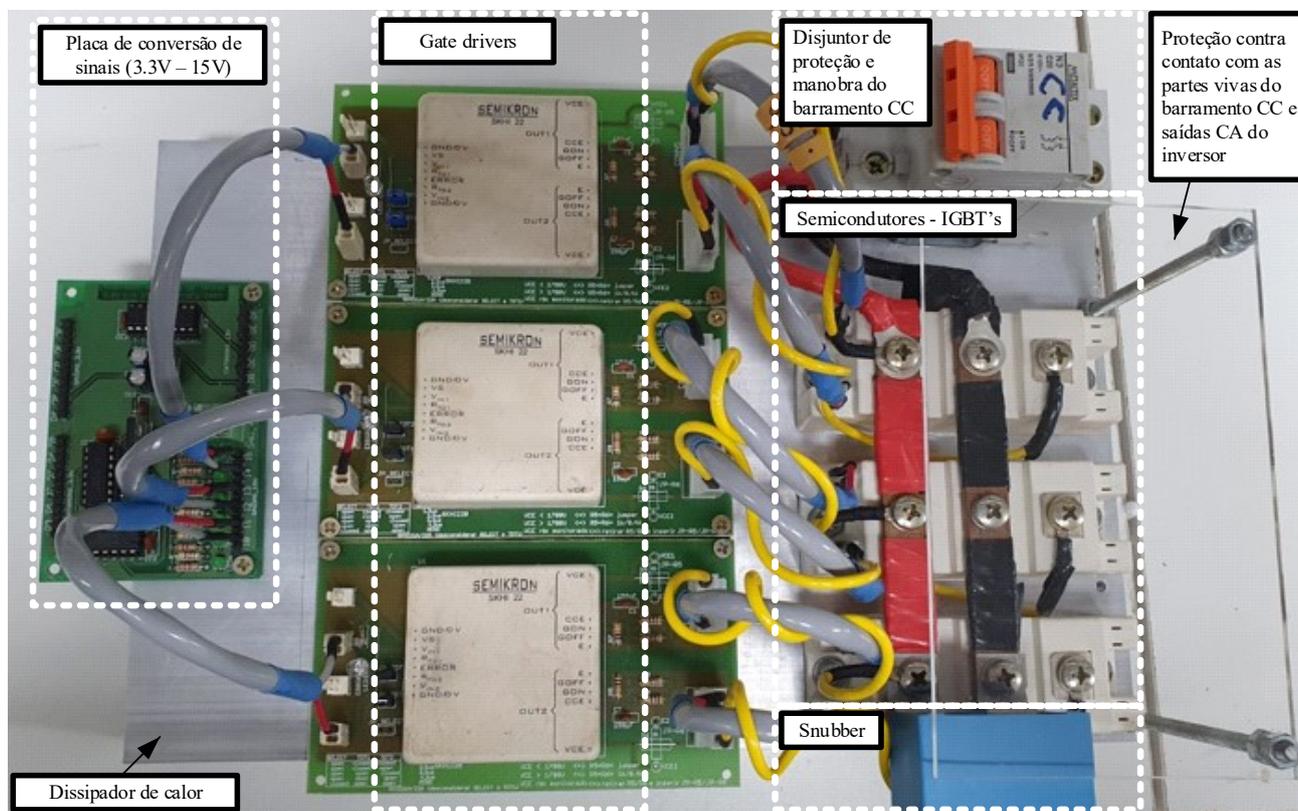
a desmontagem para possíveis manutenções e/ou troca de equipamentos. Os cabos para ligação *gate* e emissor da placa de conversão de sinais e os *gate* drivers e, entre *gate* drivers e semicondutores, são todos blindados, para evitar qualquer tipo de interferência eletromagnética. Nota-se também na Figura 6.9, que os condutores de coletor, em amarelo, estão separados dos condutores de *gate* e emissor, isso para aumentar a isolamento entre os mesmos, uma vez que nestes terminais ocorre a presença da tensão do barramento CC.

Tabela 6.1: Especificação dos componentes do inversor.

Componente	Especificação	
<b>Inversor</b>	Semicondutores	SKM50GB12T4 - 50A - 1200 V
	Capacitor snubber	EPCOS - 1uF - 1kV
	Barramentos	1/2 x 1/8 - 97 A
<b>Proteção e manobra do barramento CC</b>	Disjuntor	METALTEX - 20A - 415 V

Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 6.9: Inversor trifásico.



Fonte: Dados do próprio autor.

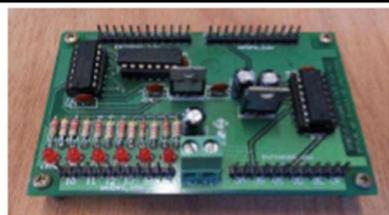
Além dos dispositivos citados acima, também foi necessário fazer uso de microprocessadores, sensores, fontes de alimentação dos circuitos auxiliares, autotransformador trifásico e medidor de potência. Em relação ao microprocessador utilizado, fez-se o uso da plataforma da *Texas Instruments DSP TMS320 F28335*, que recebe os dados proveniente dos sensores, implementa toda lógica de controle e envia os sinais de acionamento dos semicondutores de potência em um nível de 3,3V. Como este nível de tensão não é o suficiente para acionar os gate-drivers, utilizou-se o circuito conversor de sinais desenvolvido no próprio laboratório (NUPEP), que eleva a tensão de 3,3 V para um valor aceitável pelos gate drivers, no caso 15V. Com os sinais de acionamento das chaves em 15V, utilizou-se os gate drivers SKHI do fabricante SEMIKRON, que fazem a isolação entre o sistema de controle e o sistema de potência. Estes mesmos dispositivos realizam o intertravamento das chaves de cada braço por meio do tempo morto, evitando que ocorra curto-circuito no barramento CC. Em relação a medição dos valores de tensão e corrente do circuito de potência, também utilizou-se um circuito desenvolvido no próprio laboratório de pesquisa NUPEP, em que é feito a aquisição dos sinais de tensão e corrente e enviados em um nível de 0 a 3,3 V para o DSP. Para a conexão com a rede elétrica da concessionária, foi utilizado um autotransformador trifásico variável, que possibilita trabalhar com vários níveis de tensão. Por fim, para realizar as medições de potência ativa e reativa injetada ou absorvida pelo inversor na rede, fez-se o uso do medidor de potência digita WT230 do fabricante YOKOGAWA. Todos estes equipamentos, juntamente com as suas principais características, serão apresentados abaixo.

Figura 6.10: Equipamentos utilizados no protótipo.

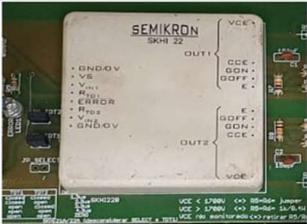
Especificações do DSP TMS320F28335	
Arquitetura de ponto flutuante de 32 bits	
Velocidade do conversor analógico/digital	80 ns
Memória Flash	512 KB
Memória RAM	68 KB
Frequência de Clock	150 MHz
Quantidade de pinos de entrada e saída	176

Especificações do circuito conversor dos sinais de 3,3V para 15V	
Portas de entrada	12
Faixa de tensão dos sinais de entrada	0 a 3,3 V
Portas de saída	12
Faixa de tensão dos sinais de saída	0 a 15 V



Especificações do gate-driver SKHI22

	Frequência máxima de chaveamento	50kHz
	Tensão de gatinho para estado ligado	15V
	Tensão de gatinho para estado desligado	-7V
	Máxima tensão detectável entre coletor e emissor	1200V

Especificações do medidor digital de potência WT230

	Máxima corrente de entrada	26A
	Faixa de frequência de medição	0,5 Hz a 100 kHz
	Velocidade de leitura	10 medições por segundo

Especificações da fonte CC utilizada como fonte primária

	Tensão de saída	0 a 300V
	Corrente nominal	10 A
	Ajuste de tensão	Sim
	Ajuste de corrente de curto circuito	Sim

Fonte: Dados do próprio autor.

### 6.3.1 - Operação conectada à rede sem carga no PAC

Este ensaio tem como finalidade mostrar a operação do protótipo em situações em que o usuário não tem a intenção de utilizar as funções de correção de fator de potência. Sendo assim, o inversor opera de forma semelhante as inversores convencionais *on-grid*, com fator de potência unitário.

Durante este ensaio, foi utilizado os valores mencionados na Tabela 6.3. O valor da tensão do barramento CC utilizado foi o valor máximo em que a fonte primária suportava. Por motivos de segurança, o valor da tensão da rede foi determinado de tal forma que o índice de modulação não ficasse tão próximo da unidade, evitando a possibilidade do controle operar em uma região não linear e possibilitar algum tipo de instabilidade no sistema.

Tabela 6.3: Condições para os testes do inversor conectado à rede.

Componente	Especificação
Tensão do barramento CC	285 V
Tensão da rede	140 V
Índice de modulação	0,7

Fonte: Dados do próprio autor.

### 6.3.2.1 – Procedimento de teste

O procedimento de teste realizado para avaliar o desempenho do inversor nesta situação ocorreu na seguinte ordem.

**1º -Fonte primária:** Ajustar a corrente de curto para 1A e a tensão de saída em 100V;

**2º -Autotransformador variador de tensão (PAC):** Ajustar a tensão de saída do “varivolt” em 20V;

**3º -Dispositivos de seccionamento e proteção:** Fechar os disjuntores da rede, barramento CC, inversor, respectivamente;

**4º -DSP:** Acionar o início do código por meio do *Code Composer*;

**5º - Ajuste para as tensões nominais:** Após a estabilização do controle, elevar gradativamente a tensão do barramento CC, tensão CA e potência de operação do inversor até chegarem nos valores citados na Tabela 6.3.

Com a finalidade de apresentar resultados com imagens mais claras e menos poluídas, todos os resultados foram retirados considerando apenas uma fase do inversor. Ou seja, os valores de potência mostrados devem ser multiplicados por três.

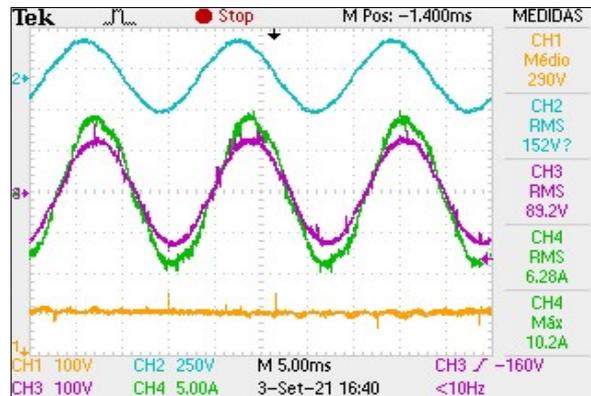
### 6.3.2.2 – Resultados de regime permanente

Por meio da Figura 6.11.A é apresentado a forma de onda da corrente injetada na rede (Verde), tensão de fase do PAC (Roxo), tensão de linha do PAC (Azul), tensão do barramento CC (Amarelo) quando o inversor opera com 1500W e fator de potência unitário (Figura 6.11.C). Nesta mesma figura, é perceptível a forma de onda corrente em fase com a tensão, evidenciando o fator de potência unitário.

A Figura 6.11.B ilustra a taxa de distorção harmônica da corrente, ficando próximo dos 5% estabelecido por norma. Neste ponto é importante destacar que, apesar do foco do trabalho não ser avaliar a distorção harmônica de corrente, cabe destacar algumas questões que impactam no valor de 5,63% do THD de corrente, como; distorção harmônica de tensão da rede, redução do valor da capacitância do filtro LCL devido ao percentual de variação do FP, ausência de compensação ativa de componentes harmônicas.

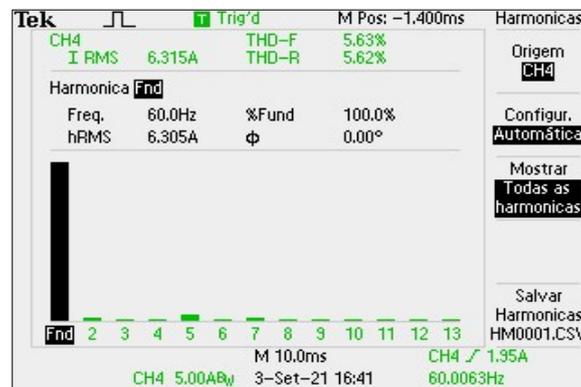
A Figura 6.11.C evidencia as medições de potência reativa, fator de potência e potência ativa, respectivamente de cima para baixo. Nesta é possível verificar por meio de uma medição direta que fato o inversor está injetando apenas potência ativa na rede.

Figura 6.11.A: Forma de onda da fase A.



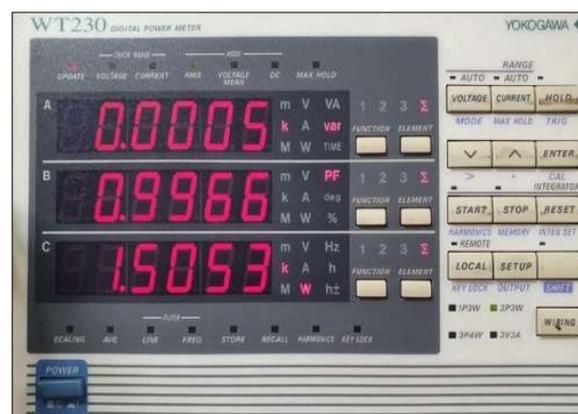
Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 6.11.B: THD de corrente.



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 6.11.C: Medição de potências com inversor conectado à rede injetando 1,5kW e FP = 0,9966



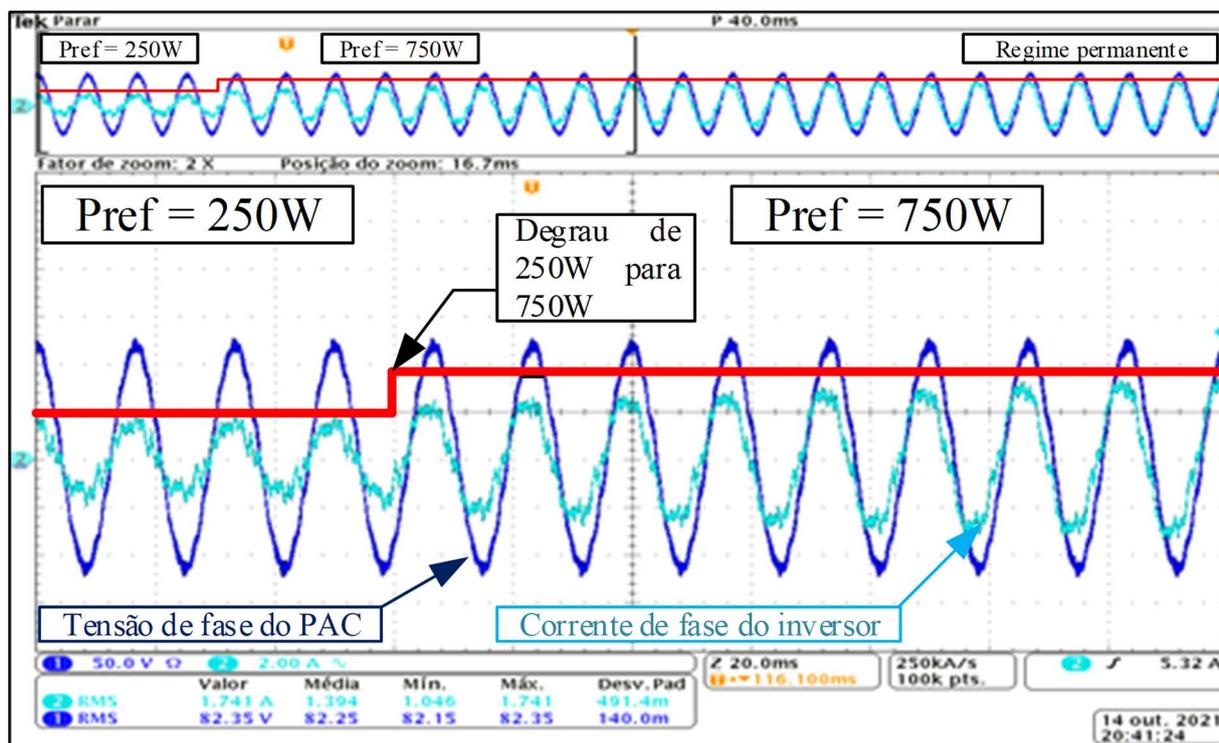
Fonte: Dados do próprio autor.

### 6.3.2.2 – Resultados de regime transitório

Para verificar a estabilidade do controle frente variações de carga, foi feito uma variação brusca de potência ativa a ser injetada na rede. Na Figura 6.12 é apresentado o comportamento transitório da

corrente injetada na rede frente a variação de referência de potência de 250W para 750W. Nota-se que o sistema se manteve estável e com o fator de potência unitário. Isso mostra a robustez do controle frente a grandes variações de potência ativa de referência.

Figura 6.12: Resposta de regime transitório da fase A frente a degrau de carga de 250W para 750W.



Fonte: Dados do próprio autor.

### 6.3.3- Operação com correção do FP da carga

Na presença de uma carga de fator de potência abaixo dos limites normativos, a proposta deste inversor é realizar a compensação da potência reativa drenada ou injetada pela carga. Por meio desta estratégia, o fator de potência “visto” pela rede é próximo do unitário.

Os valores utilizados para realizar os testes foram os mesmos apresentados na Tabela 6.3.

#### 6.3.3.1 – Procedimento de teste

O procedimento de teste para este ensaio é parecido com o anterior, entretanto, acrescentando algumas etapas.

- 1º -**Fonte primária:** Ajustar a corrente de curto para 1A e a tensão de saída em 100V;
- 2º -**Autotransformador variador de tensão (PAC):** Ajustar a tensão de saída do “varivolt” em 20V;
- 3º -**Dispositivos de seccionamento e proteção:** Fechar os disjuntores da rede, barramento CC, inversor, respectivamente;

4º -**DSP**: Acionar o início do código por meio do *Code Composer*;

5º -**Ajuste para as tensões nominais**: Após a estabilização do controle, elevar gradativamente a tensão do barramento CC, tensão CA e potência de operação do inversor até chegarem nos valores citados na Tabela 6.3.

6º - **Ligar a carga predominantemente indutiva (Motor a vazio)**: Com o sistema operando nas condições iniciais, partir o motor e retirar salvar as formas de onda e medições de potência da rede e inversor.

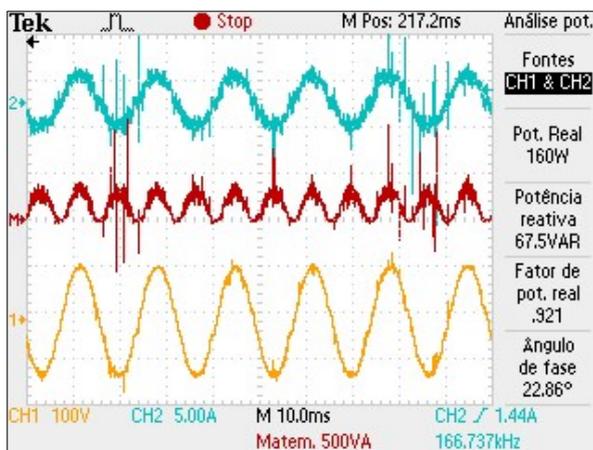
7º - **Habilitar o algoritmo de CFPCT**: Com o motor ligado, habilitar o algoritmo de correção ativa do fator de potência e salvar as formas de onda e medições de potência da rede e inversor com a potência ativa de referência. Nestes ensaios, utilizou-se 500W de potência ativa de referência.

### 6.3.3.1 – Regime permanente

Neste contexto, para ilustrar a atuação automática da correção ativa do fator de potência por meio do inversor, foi retirado resultados da planta operando com carga indutiva em regime permanente antes e após a compensação de competência reativa.

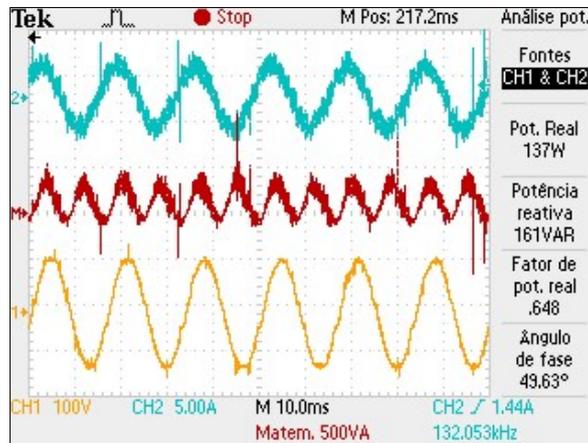
As Figuras 6.13.A, 6.13.B e 6.13.C ilustram os valores de potência ativa, reativa e fator de potência do inversor, rede e carga antes de habilitar o algoritmo de CFPCT. Nota-se claramente o equilíbrio de potências, sendo injetado 480W pelo inversor (20W de perdas), 82W consumidos pela carga e 411W líquidos injetados na rede. A mesma análise pode ser feita para potência reativa, nota-se o consumo de 327 VAR pela carga, 202,5 VAR pelo inversor e a rede alimentando ambos com 483VAR.

Figura 6.13.A: Formas de onda de corrente, tensão e potências do INVERSOR antes da operação do CFPCT.



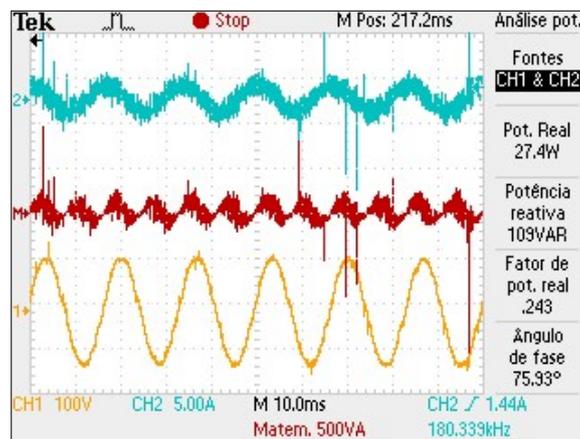
Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 6.13.B: Formas de onda de corrente, tensão e potências da REDE antes da operação do CFPCT.



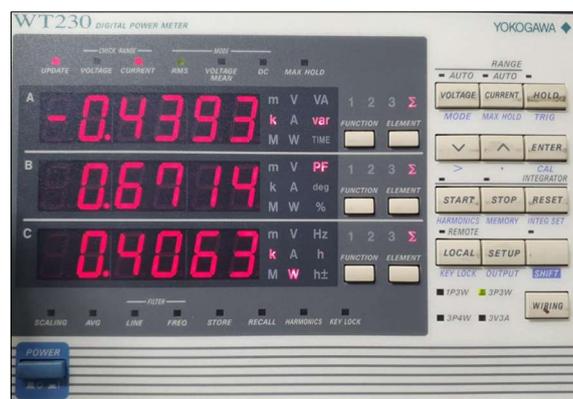
Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 6.13.C: Formas de onda de corrente, tensão e potências da CARGA antes da operação do CFPCT.



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 6.13.D: Medições de potência ativa, reativa e fator de potência na REDE antes da operação do CFPCT.

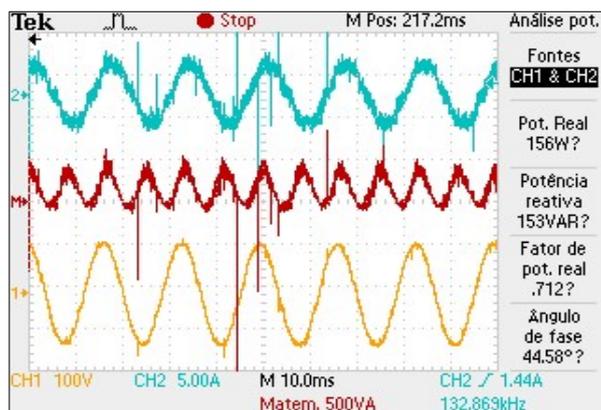


Fonte: Dados do próprio autor.

As Figuras 6.14.A, 6.14.B, 6.14.C mostram as mesmas formas de onda. Entretanto, após a compensação automática de potência reativa realizada pelo algoritmo CFPCT. Desta vez, devido a

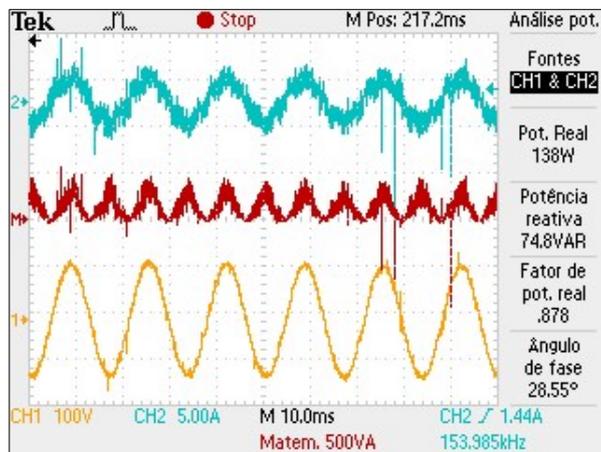
injeção de potência reativa, nota-se que o fator de potência do inversor reduziu (Figura 6.14.A), compensando a potência reativa consumida pela carga (Figura 6.14.C). Consequentemente, ocorre a redução da potência reativa fornecida pela rede e a elevação do fator de potência visto pelo PAC (Figura 6.14.D).

Figura 6.14.A: Formas de onda de corrente, tensão e potências do INVERSOR após a operação do CFPCT.



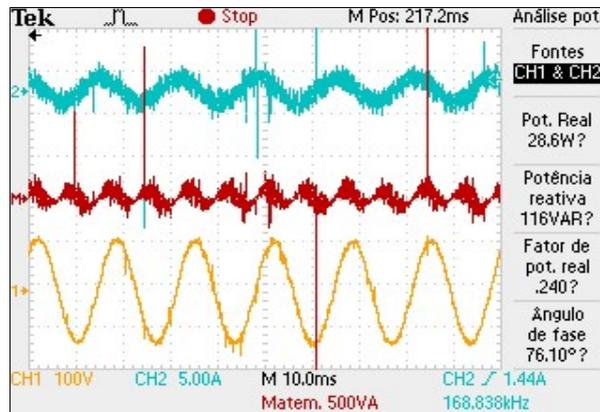
Fonte: Dados do próprio autor

Figura 6.14.B: Formas de onda de corrente, tensão e potências da REDE após a operação do CFPCT.



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 6.14.C: Formas de onda de corrente, tensão e potências da CARGA após da operação do CFPCT.



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 6.14.D: Medições de potência ativa, reativa e fator de potência da REDE após a operação do CFPCT.

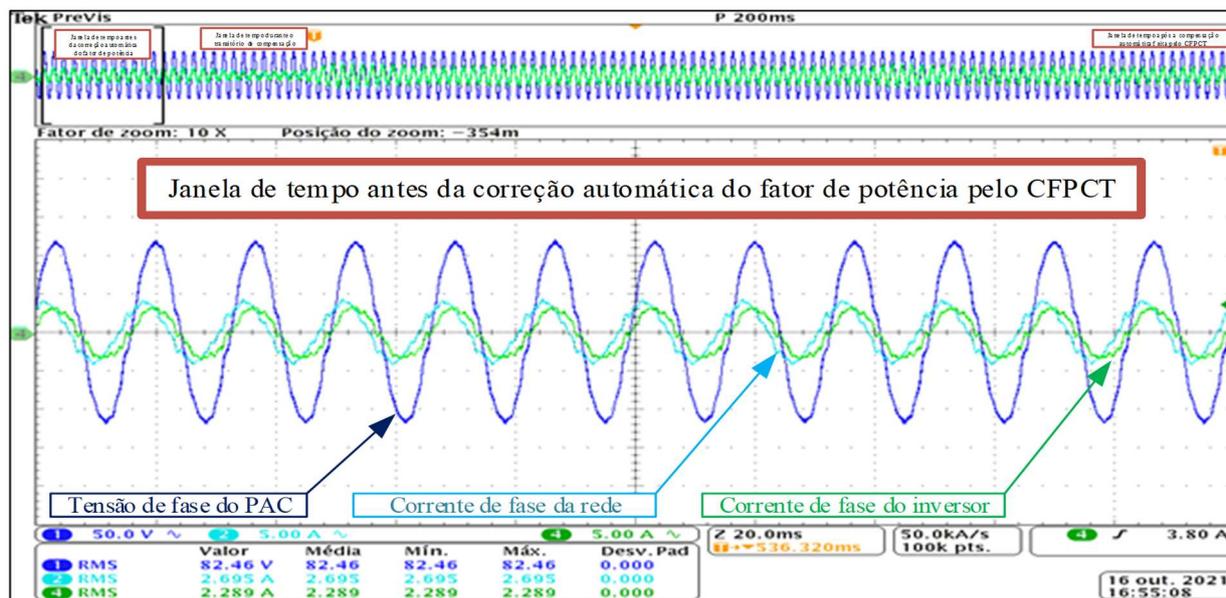


Fonte: Dados do próprio autor.

### 6.3.3.1 – Regime transitório

Para verificar o comportamento transitório do CFPCT após a correção do fator de potência, foi verificado as formas de onda antes, durante e após a atuação do CFPCT. A Figura 6.15 apresenta as formas de onda de tensão de fase da rede, corrente de fase do inversor e corrente de fase da rede antes da atuação do CFPCT. Por isso, conforme o esperado, a corrente do inversor (verde) está em fase com a tensão da rede (azul escuro) e a corrente da rede (azul claro) defasada devido a presença da carga indutiva.

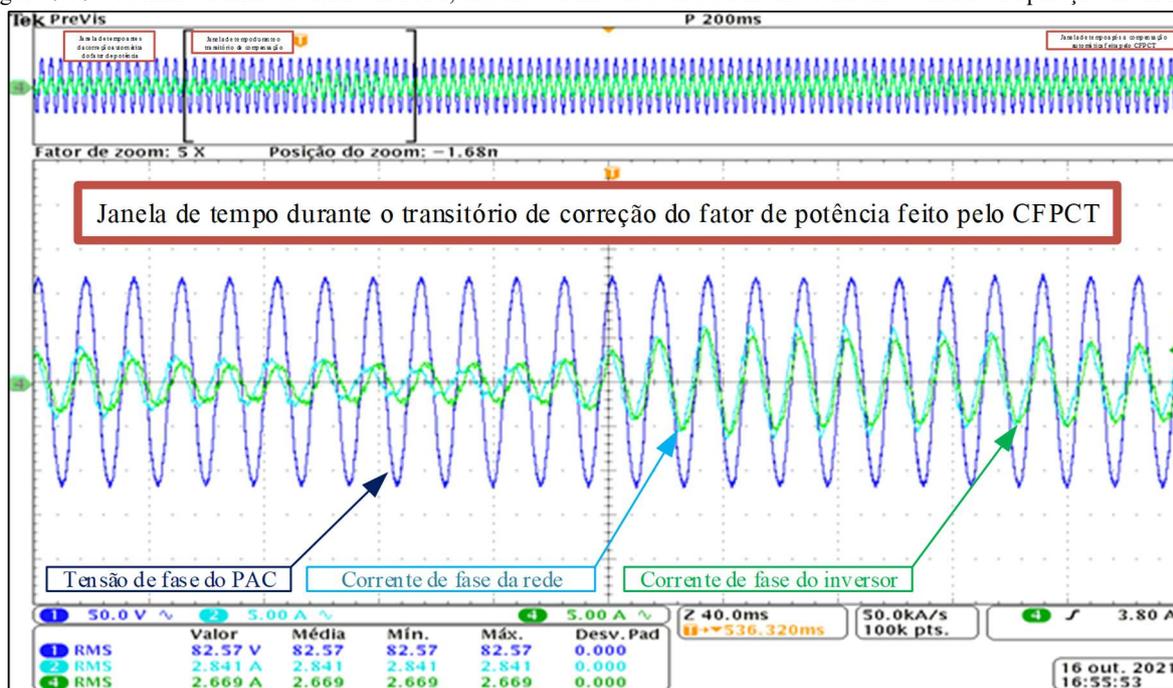
Figura 6.15: Formas de onda da tensão do PAC, corrente de fase da rede e do inversor antes da operação do CFPCT.



Fonte: Dados do próprio autor.

Para conseguir observar o transitório, foi utilizado o *trigger* em amplitude do osciloscópio para salvar o instante em que ocorresse o início da compensação. A figura 6.16 apresenta este momento e grava as primeiras oscilações da corrente na tentativa variar o ângulo da corrente do inversor para colocar a corrente da rede em fase com a tensão.

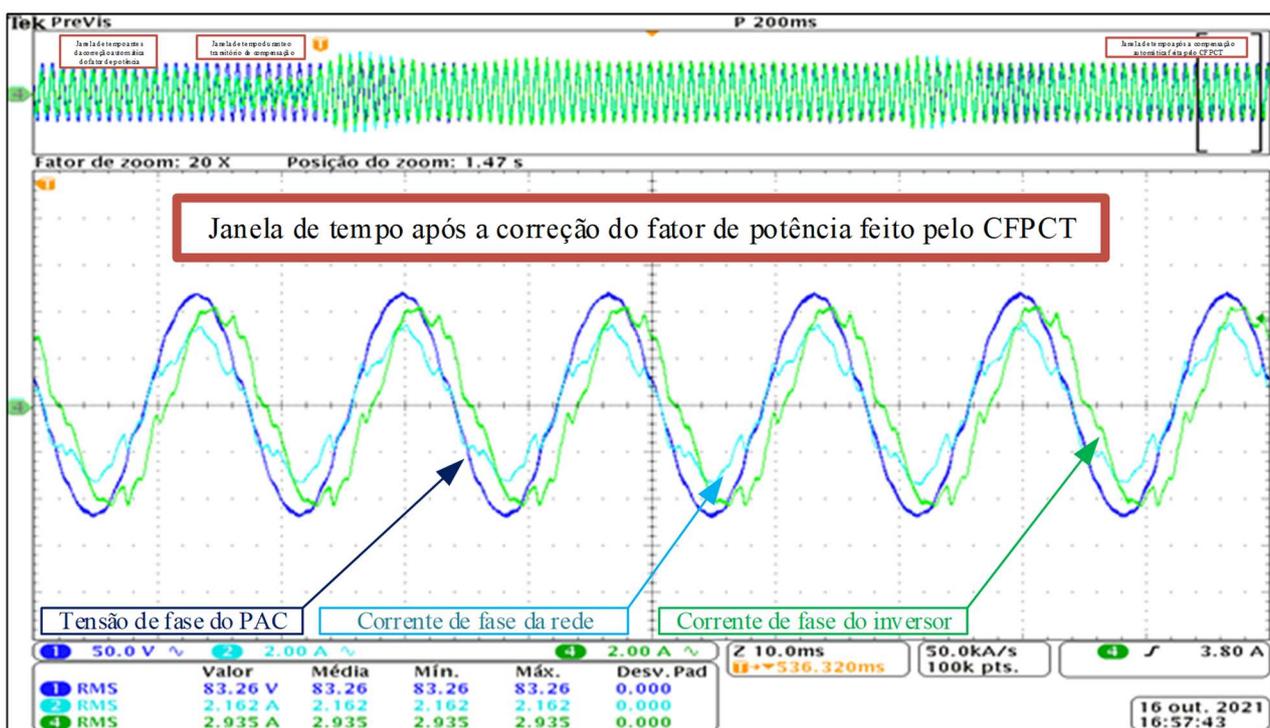
Figura 6.16 – Formas de onda da tensão do PAC, corrente de fase da rede e do inversor durante o início da operação do CFPCT.



Fonte: Dados do próprio autor.

Vários ciclos ocorridos após o *trigger*, por meio da Figura 6.17 é feita a apresentação das formas de onda citadas acima em regime permanente. Nota-se que o algoritmo de CFPCT foi efetivo, pois a corrente de fase da rede (azul claro) agora está em fase com a tensão (azul escuro) e a corrente do inversor (verde) deslocou para o ângulo equivalente a potência reativa demandada pela carga. Isto é, o inversor está compensando a potência reativa da carga.

Figura 6.17 – Formas de onda da tensão do PAC, corrente de fase da rede e do inversor após o início da operação do CFPCT.



Fonte: Dados do próprio autor.

### 6.3.4 - Cálculo do nível de curto da barra

Para realizar o cálculo do nível de curto circuito do ponto de acoplamento em que o inversor está conectado, primeiramente foi feito um ensaio utilizando apenas o banco de capacitores do filtro LCL. Desta maneira, faz-se as medições da tensão e da potência reativa antes e depois de ligar o banco. Após essas leituras, por meio de (3.14) é feito o cálculo da potência de curto circuito da barra.

Desta forma, como o inversor desenvolvido foi conectado na barra por meio de autotransformador trifásico, sabe-se que este equipamento varia a reatância de acordo com a tensão selecionada. Por esse motivo, foi feito o cálculo do nível de curto com o autotransformador operando em 140V, tensão em que os ensaios foram realizados. Os resultados encontrados estão ilustrados nas Figura 6.18. As medições apresentadas no medidor de potência, de cima para baixo são, potencia reativa, tensão entre fases e potencia ativa.

Figura 6.18 – Medições da tensão da rede antes e após a injeção de potência reativa – Valor inicial de 140V.



Fonte: Dados do próprio autor.

Aplicando os valores de medidos em (3.14), é possível calcular o nível de curto circuito do ponto de acoplamento do inversor com o autotransformador com uma tensão de 140 V.

$$S_{cc} = -\frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{179,3-0}{147,08-146,64} = 407,4VA$$

Para efeito de comparação, o mesmo ensaio foi feito com o autotransformador em 220 V, situação em que o inversor estaria conectado direto na rede elétrica. Os resultados são apresentados nas Figuras 6.19.

Figura 6.19 – Medições de tensão da rede antes e após a injeção de potência reativa – Valor inicial de 220V.



Fonte: Dados do próprio autor.

$$S_{cc} = -\frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{389,1-0}{220,38-220,18} = 1945,5VA$$

### 6.3.5 - Compensação de tensão frente a *SAG* e *SWELL* equilibrados

Para realizar a verificação da eficácia do algoritmo CFPCT frente a *SAG* e *SWELL*, foi realizado o procedimento de teste descrito abaixo.

#### 6.3.5.1 – Procedimento de teste

1º -**Fonte primária:** Ajustar a corrente de curto para 1A e a tensão de saída em 100V;

2º -**Autotransformador variador de tensão (PAC):** Ajustar a tensão de saída do “varivolt” em 20V;

3º -**Dispositivos de seccionamento e proteção:** Fechar os disjuntores da rede, barramento CC, inversor, respectivamente;

4º -**DSP:** Acionar o início do código por meio do *Code Composer*;

5º -**Ajuste para as tensões nominais:** Após a estabilização do controle, elevar gradativamente a tensão do barramento CC, tensão CA e potência de operação do inversor até chegarem nos valores citados na Tabela 6.3.

6º - **Realizar o *SAG* e *SWELL* com o algoritmo de CFPCT desabilitado:** Por meio de uma rápida variação de tensão feita no próprio autotransformafor variador de tensão, por meio de valores anteriormente marcados neste equipamento, é realizado *SAG* e *SWEEL*.

7º - **Realizar o *SAG* e *SWEEL* com o algoritmo de CFPCT habilitado:** É realizado o mesmo procedimento da etapa anterior. Entretanto, com o algoritmo habilitado.

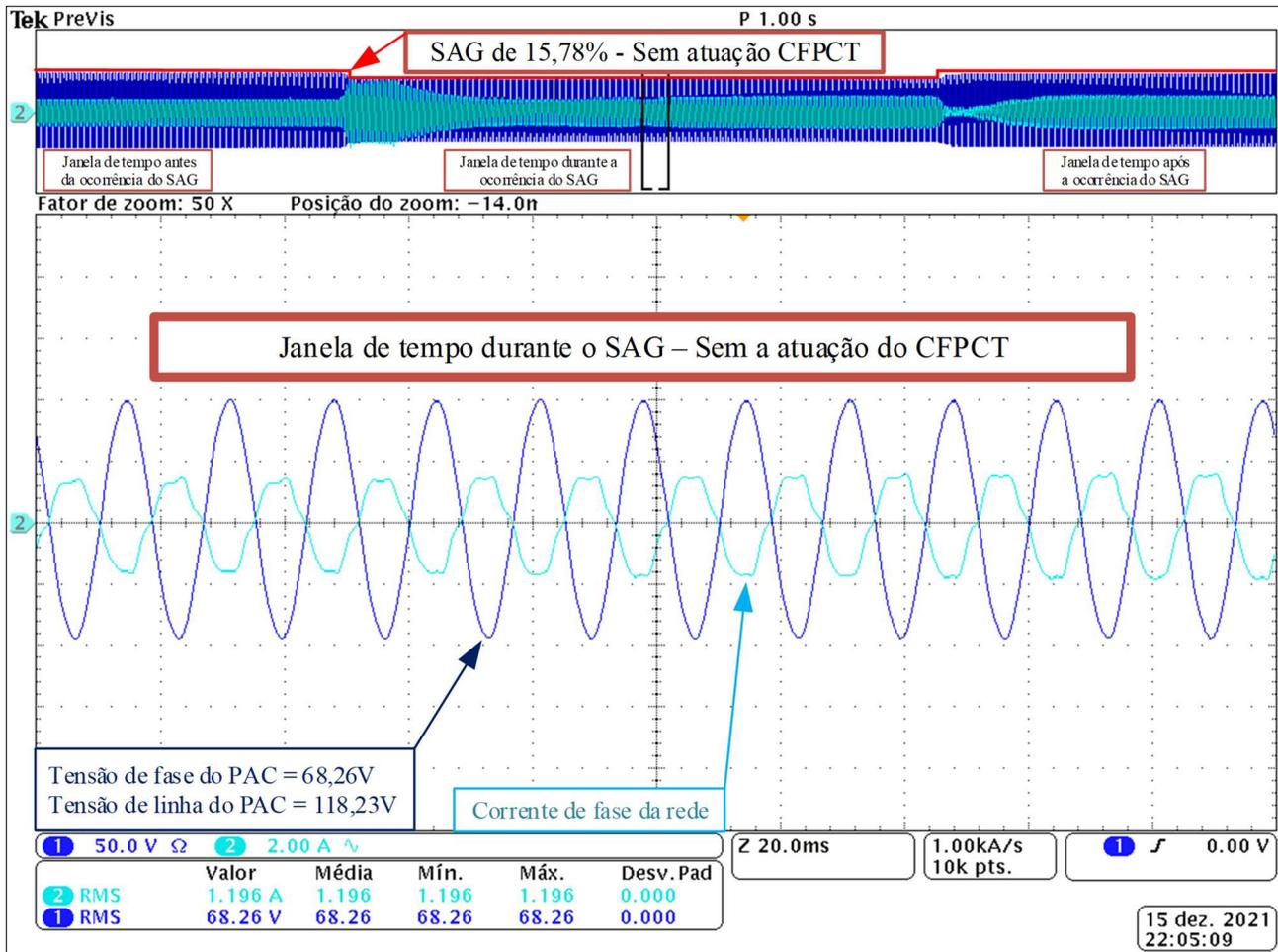
#### 6.3.5.2 – Afundamento de tensão (*SAG*)

Para efeito de comparação, foi realizado a medição da tensão durante e depois dos afundamentos de tensão sem e com a atuação do CFPCT.

As Figuras 6.20 e 6.21 ilustram as formas de onda durante o afundamento de tensão sem e com a atuação do CFPCT, respectivamente.

A Figura 6.20 mostra uma situação convencional, em que não há nenhum tipo de compensação de tensão frente ao afundamento de tensão (15,78%). Desta forma, como o inversor é uma fonte de corrente que injetada a potência disponível da fonte primária na rede, como o esperado, percebe-se um leve aumento da corrente injetada pelo inversor durante o afundamento, visto que o inversor atua para manter a potência constante frente a redução da tensão. Percebe-se também que, apesar deste leve aumento da amplitude da corrente, o ângulo de fase continua o mesmo. Ou seja, não há injeção ou absorção de potência reativa.

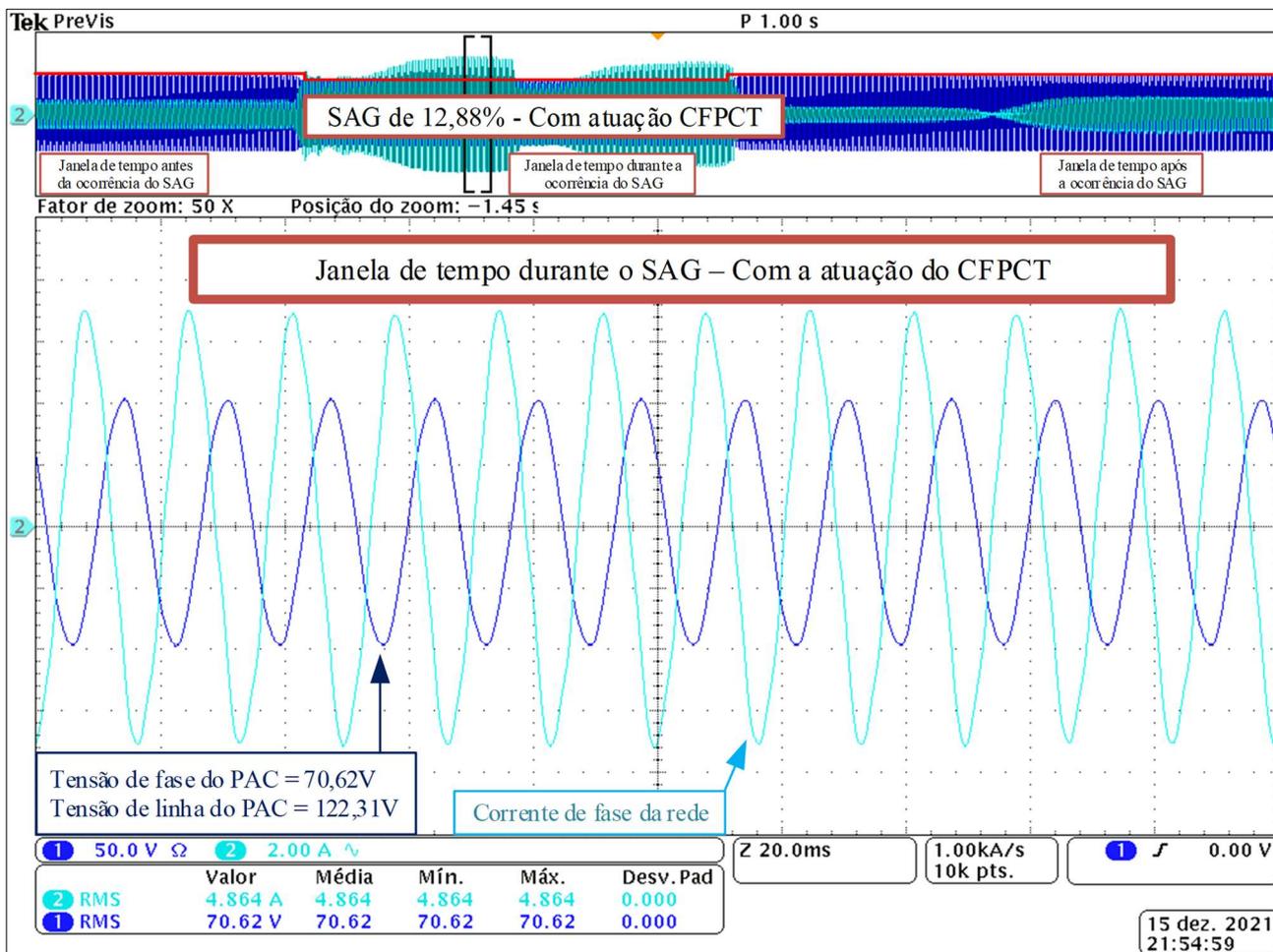
Figura 6.20: Janela de tempo durante o SAG – Sem a atuação do CFPCT.



Fonte: Dados do próprio autor.

A Figura 6.21 mostra a janela de tempo do afundamento de tensão com a atuação do CFPCT. Desta vez, percebe-se que o afundamento reduziu para 12,88%. Nesta mesma figura, nota-se a atuação do CFPCT, causando um ganho de 2,9%. Nesta janela de tempo é possível verificar a defasagem entre a tensão e a corrente causada pela forte presença da potência reativa, fundamental para a compensação da tensão neste intervalo.

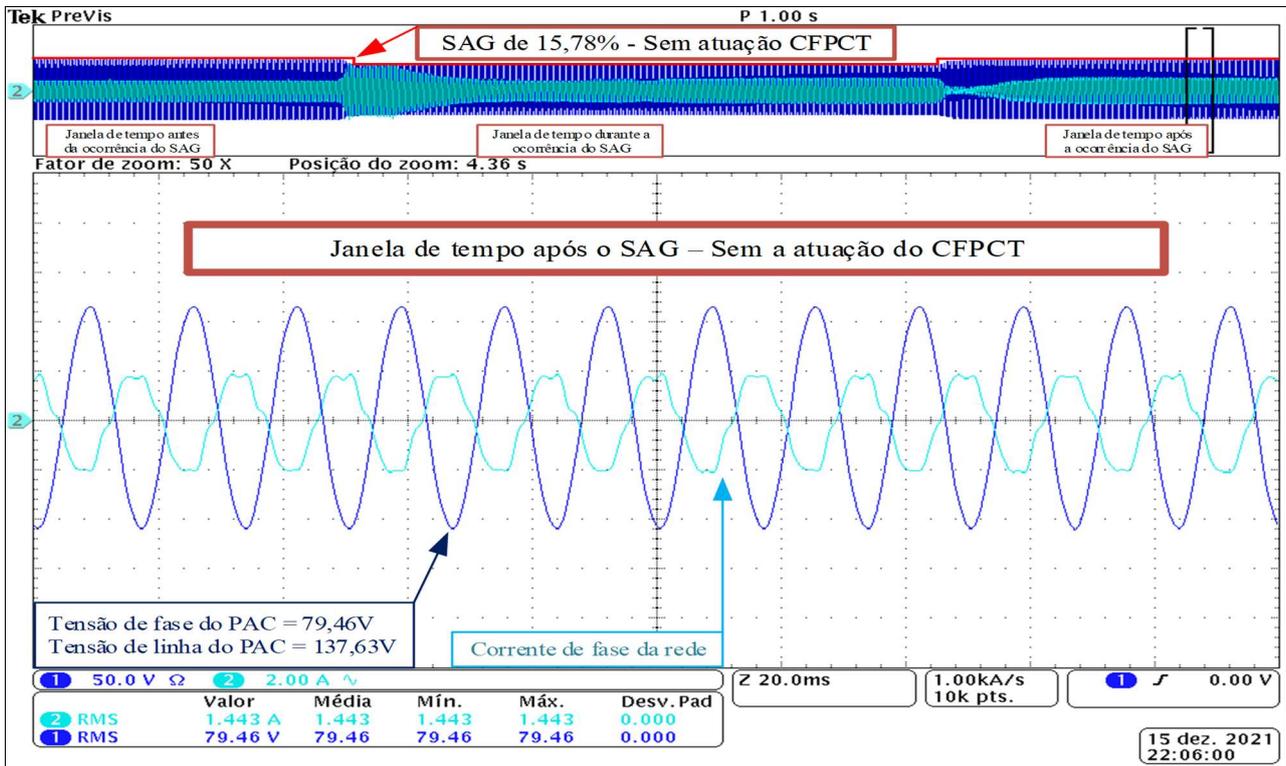
Figura 6.21: Janela de tempo durante o SAG – Com a atuação do CFPCT.



Fonte: Dados do próprio autor.

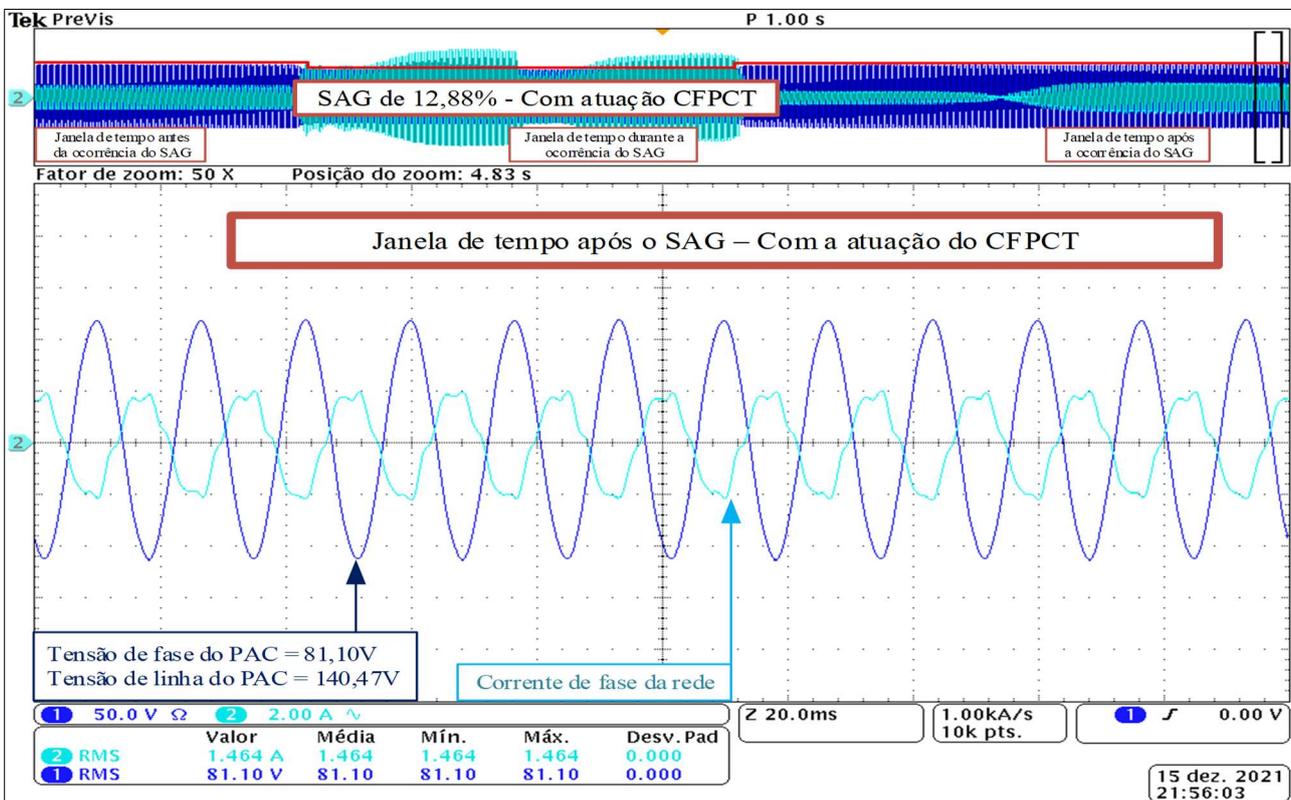
As Figuras 6.22 e 6.23 mostram o comportamento após a ocorrência do afundamento com e sem o CFPCT. Em ambas as situações nota - se que houve a retomada para operação com fator de potência unitário, validando a operação com potência reativa apenas em momentos que ocorrem as variações de tensão ou correção de FP de uma dada carga.

Figura 6.22: Janela de tempo após o SAG – Sem a atuação do CFPCT.



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 6.23: Janela de tempo após o SAG – Com a atuação do CFPCT.



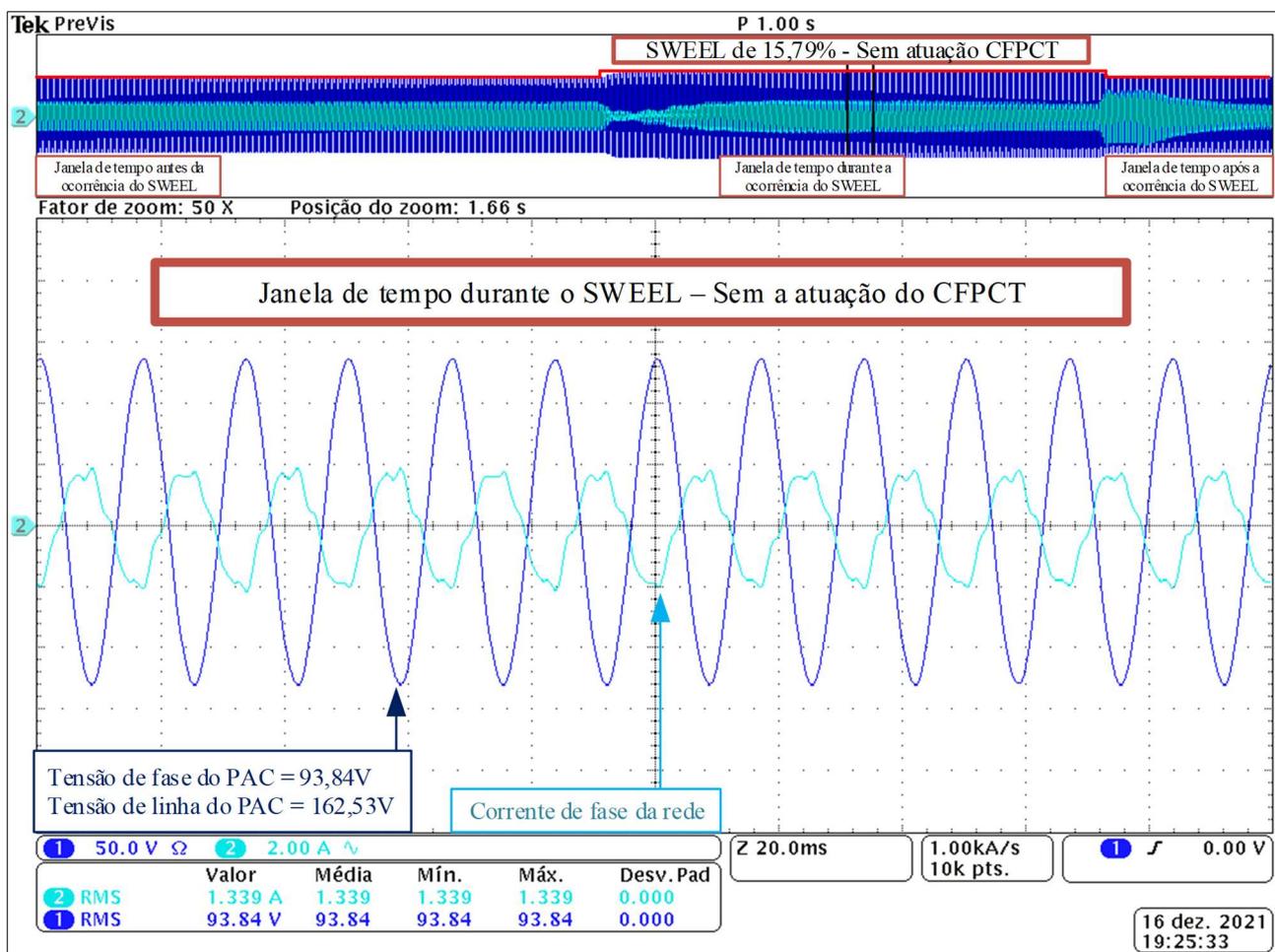
Fonte: Dados do próprio autor.

### 6.3.5.3 – Elevação de tensão (SWEEL)

Para verificar o comportamento frente a elevações de tensão foi adotado um procedimento análogo ao mencionado no tópico anterior. Desta forma, nota-se o mesmo comportamento da tensão e corrente em um momento anterior a elevação de tensão.

Como esperado, na Figura 6.24, nota-se que de forma recíproca, a amplitude da corrente sofre uma leve redução frente a elevação de tensão (15,79%), para que a potência reativa continue constante. O fator de potência se manteve unitário, visto que não há potência reativa.

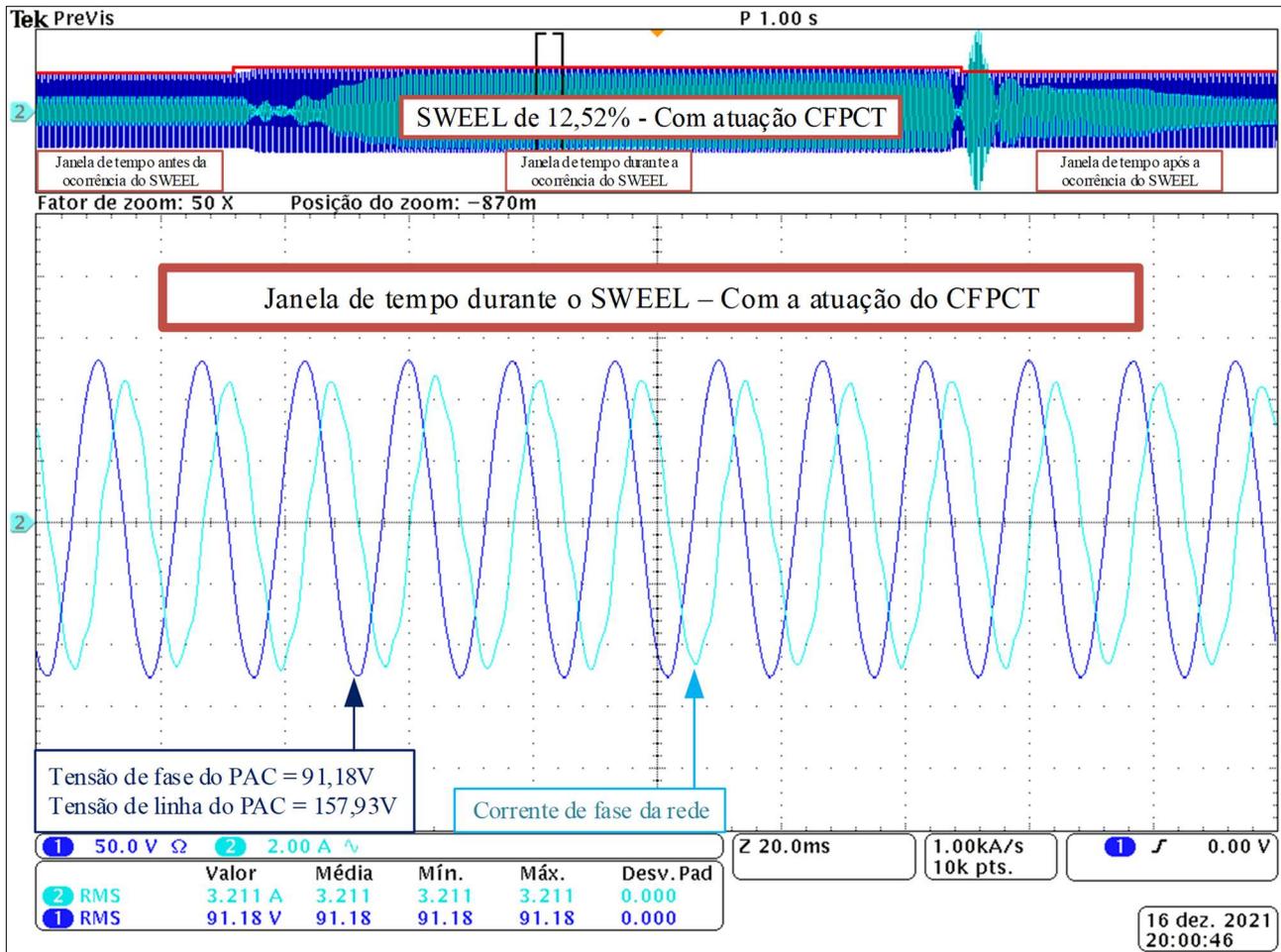
Figura 6.24: Janela de tempo durante o SWEEL – Sem a atuação do CFPCT.



Fonte: Dados do próprio autor.

Na Figura 6.25 é apresentado a janela de tempo com a atuação do CFPCT durante a elevação de tensão. Mais uma vez, notou-se que a presença de potência reativa reduziu a amplitude da elevação para 12,52%, ocasionando um ganho de 3,27%.

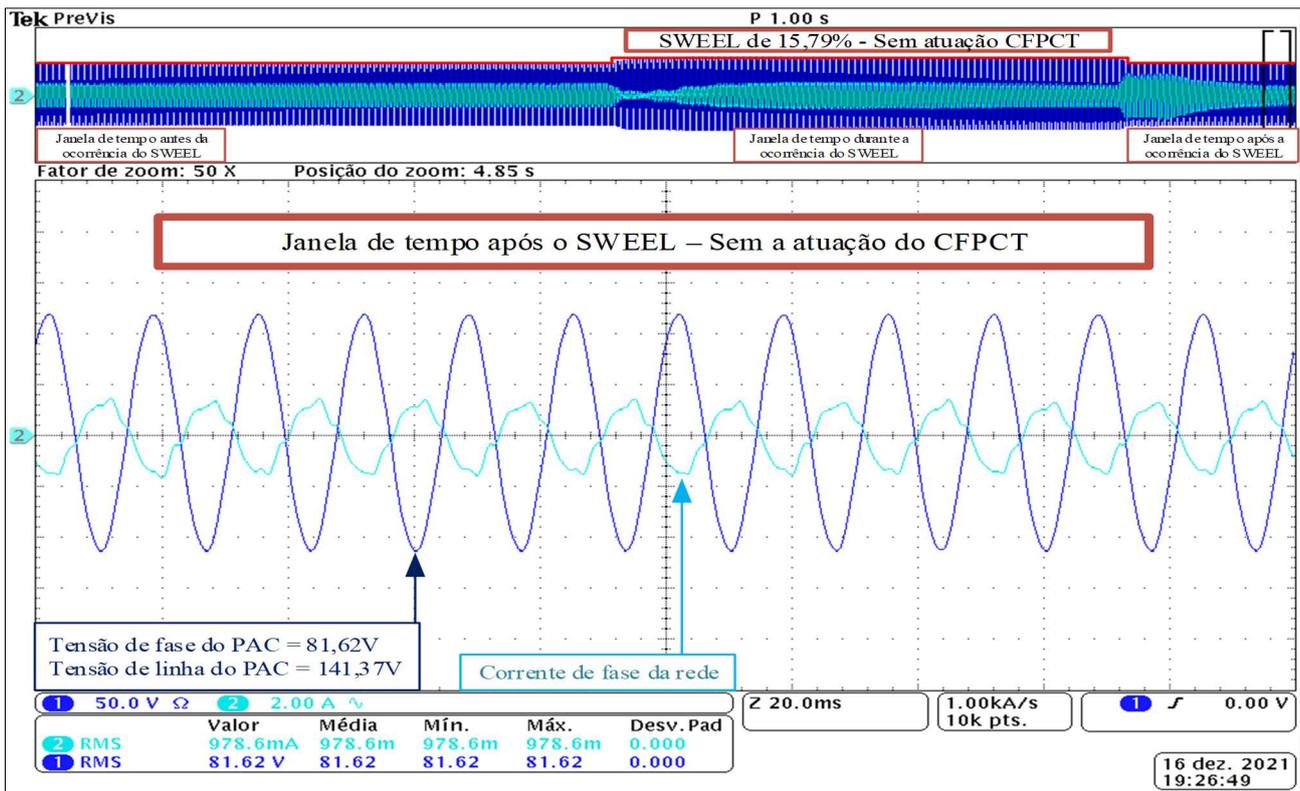
Figura 6.25: Janela de tempo durante o SWEEL – Com a atuação do CFPCT.



Fonte: Dados do próprio autor.

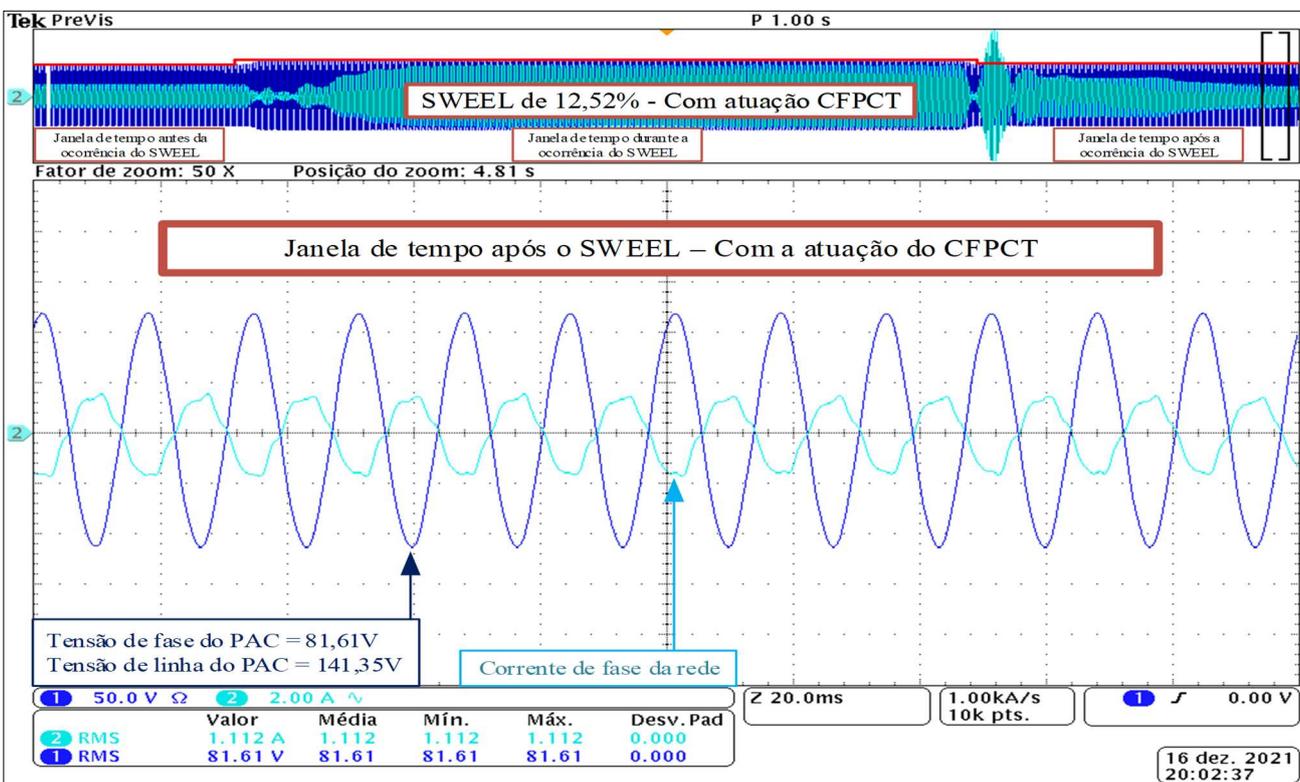
As Figuras 6.26 e 6.27 mostram o comportamento após a ocorrência da elevação de tensão, mostrando a retomada do CFPCT para operação com FP unitário. Com isso, verifica-se que neste caso também ocorre a operação com potência reativa apenas quando ocorre tais distúrbios.

Figura 6.26: Janela de tempo após o SWEEL – Sem a atuação do CFPCT.



Fonte: Dados do próprio autor.

Figura 6.27: Janela de tempo após o SWEEL – Com a atuação do CFPCT.



Fonte: Dados do próprio autor.

## CAPÍTULO 7 – CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a realização deste trabalho, de forma geral e sintetizada, nota-se que houve contribuições e oportunidades. Em relação às contribuições, nota-se que houve uma contribuição técnica relacionada à correção ativa do fator de potência e compensação da tensão. Mas também, uma contribuição científica, em que foi proposto uma nova estratégia de controle de potência reativa para operação de inversores utilizados para conexão de fontes intermitentes com a rede da concessionária. No que tange as oportunidades relacionadas ao funcionamento básico do inversor, verificou-se alguns pontos de melhoria podem ser feitos para otimizar o funcionamento da proposta, como; utilização de malhas de controle para compensação das componentes harmônicas de corrente, utilização de estratégias de sincronismo com a rede mais avançadas.

Referente a parte da proposta que trata da correção do fator de potência da carga, nota-se que alguns trabalhos já idealizaram isso. Mas, nos trabalhos que melhor detalharam essa estratégia, não realiza a compensação com a potência reativa igual a da carga, apenas injeta/absorve a potência reativa remanescente do inversor. Por meio da prática em bancada realizada neste trabalho, notou-se que isso é um problema. Pois, em determinadas situações, a potência remanescente pode piorar o valor do fator de potência visto pela rede, ou mesmo reduzir a vida útil dos inversores sem cumprir com o seu propósito.

No que tange a compensação de tensão frente a variações equilibradas, notou-se que os trabalhos relacionados a compensação de tensão realizam a regulação em regime permanente em malha fechada. Sendo que os trabalhos que cumprem com essa finalidade em malha aberta, fazem uso da potência remanescente como um todo. Isto é, a potência reativa não é quantificada em um determinado valor para compensar o respectivo percentual de tensão. Sendo assim, neste trabalho, além de regular a tensão em malha aberta, foi apresentado uma forma de quantificar a potência reativa necessária para realizar a compensação de tensão de um determinado PAC. Também foi notado que existe uma oportunidade para o desenvolvimento a fundo da técnica de cálculo do nível de curto da rede. Neste trabalho, percebeu-se que este parâmetro sobre variações a cada instante e que seria interessante o desenvolvimento de uma técnica que realiza tal cálculo de forma quase instantânea.

Concluindo esta dissertação, percebe-se que os objetivos principais foram cumpridos e que a estratégia proposta apresentou bons resultados experimentais, viabilizando a utilização da estratégia em situações reais. Apesar disso, ao longo deste trabalho, também foi identificado diversas oportunidades de otimização que podem e devem ser

utilizadas em trabalhos futuros, contribuindo com o desenvolvimento tecnológico e com o avanço da ciência. Sendo que, a solução aqui proposta seria de grande valia principalmente em ambientes industriais.

### **Sugestões para trabalhos futuros**

- Realizar a análise do comportamento desta estratégia em regime permanente e com vários inversores conectados no mesmo PAC, fazendo uso da mesma estratégia.
- Realizar o cálculo do nível de curto utilizando variações de potência reativa e ativa.
- Avaliar o desempenho desta proposta utilizando sistema estacionário. Fazendo uso do compensador proporcional ressonante.
- Implementar esta estratégia para um sistema monofásico, desacoplando as fases e realizando as compensações por fase.
- Verificar o comportamento da proposta considerando a dinâmica de variação de potência ativa dos painéis fotovoltaicos.

## LISTA DE PUBLICAÇÕES E PROJETOS DE PESQUISA ASSOCIADO

### Publicações

- **SOARES, M., B.;** COELHO, E. A. A.; FREITAS, L. C. G.; LIMA, G. B.; JUNIOR, J. B. V. *Análise do desempenho das técnicas de modulação SVM, SPWM, Histerese no conteúdo harmônico de corrente e potência de operação de inversores conectados à rede.* In: IEEE/IAS International Conference on Industry Applications – INDUSCON, 2021. São Paulo – SP, p. 1-6.
- **SOARES, M., B.;** FREITAS, L. C. G.; *Análise de desempenho de um inversor conectado à rede elétrica operando com modulação SVM para compensação de variações momentâneas de tensão e correção de fator de potência* (Em fase de submissão).

### Projetos de Pesquisa

- *Título: Análise e avaliação do desempenho das técnicas de modulação SVM, SPWM, Histerese no conteúdo harmônico de corrente e potência de operação de inversores conectados à rede. Investigação de Estratégias de Controle para Conexão de Microrredes ao Sistema Elétrico. Estudo e Implementação de um Método Anti-Ilhamento Híbrido Baseado em Realimentação Positiva de Frequência Parametrizada Dinamicamente por Algoritmo de Lógica Fuzzy* (Aguardando apoio financeiro vinculado ao Processo TEC - PPM-00485-17). Coordenador: Luiz Carlos Gomes de Freitas.

## REFERÊNCIAS

The Guardian, **Renewable energy to expand by 50% in next five years** – report, 2019. Disponível em: <<https://www.theguardian.com/environment/2019/oct/21/renewable-energy-to-expand-by-50-in-next-five-years-report>>. Acesso em: 01 Maio 2020.

ABSOLAR, **Perspectivas para a Geração Centralizada Solar Fotovoltaica no Brasil** info, 2019. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/artigos/perspectivas-para-a-geracao-centralizada-solar-fotovoltaica-no-brasil/>>. Acesso em: 01 Maio 2020.

ACHA, E.; AGELIDIS, V. G.; LARA, O. A.; MILLER, T. J. E., **Power Electronic Control in Electrical Systems**: Newnes Power Engineering Series, 2002. <https://doi.org/10.1016/B978-075065126-4/50006-7>

ARAÚJO, R. D. **Projeto e Simulação de Filtros L e LCL para interconexão de Inversor NPC trifásico à Rede**, Fortaleza: [s.n], 2012.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2013. Disponível em: <[https://www.aneel.gov.br/consultas-publicas?p\\_p\\_id=participacaopublica\\_WAR\\_participacaopublicaportlet&p\\_p\\_lifecycle=2&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_cacheability=cacheLevelPage&p\\_p\\_col\\_id=column-2&p\\_p\\_col\\_pos=1&p\\_p\\_col\\_count=2&participacaopublica\\_WAR\\_participacaopublicaportlet\\_idDocumento=43369&participacaopublica\\_WAR\\_participacaopublicaportlet\\_tipoFaseReuniao=fase&participacaopublica\\_WAR\\_participacaopublicaportlet\\_jspPage=%2Fhtml%2Fpp%2Fvisualizar.jsp](https://www.aneel.gov.br/consultas-publicas?p_p_id=participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet&p_p_lifecycle=2&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_cacheability=cacheLevelPage&p_p_col_id=column-2&p_p_col_pos=1&p_p_col_count=2&participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_idDocumento=43369&participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_tipoFaseReuniao=fase&participacaopublica_WAR_participacaopublicaportlet_jspPage=%2Fhtml%2Fpp%2Fvisualizar.jsp)>. Acesso em: 10 Maio 2020.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional**, 2021. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/prodist>> Acesso em: 10 Mar. 2021.

Canal Energia, **Energia eólica atinge 15 GW em capacidade instalada no Brasil** info, 2019. Disponível em: <<https://www.canalenergia.com.br/noticias/53096013/energia-eolica-atinge-15-gw-em-capacidade-instalada-no-brasil>>. Acesso em: 02 Maio 2020.

CARVALHO, P. M. S.; CORREIA, P. F. C; FERREIRA, L. A. F. M. **Distributed Reactive Power Generation Control for Voltage Rise Mitigation in Distribution Networks**. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 23, no. 2, pp. 766-772, May. 2008. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.919203>

DIXON, J.; MORAN, L.; RODRIGUEZ, J.; DOMKE, R. **Reactive power compensation technologies: State-of-the-art review**. Proc. IEEE, vol. 93, no. 12, pp. 2144–2164, Dec. 2005. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2005.859937>

DEMIROK, E.; GONZÁLEZ, P. C.; FREDERIKSEN, K. H. B.; SERA, D.; RODRIGUEZ, P.; TEODORESCU, R. **Local Reactive Power Control Methods for Overvoltage Prevention of Distributed Solar Inverters in Low-Voltage Grids**. IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 1, no. 2, pp. 174-182, Dec. 2011. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2011.2174821>

FREITAS, P. A. R. **Proposta de um compensador série de tensão de elevada dinâmica para a correção da tensão instantânea da carga diante de afundamentos ou elevações da tensão da rede elétrica**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, v. única, 2014.

HOLMES, D. G.; LIPO, T. A. **Pulse Width Modulation for Power Converters**: IEEE, 2003. <https://doi.org/10.1109/9780470546284>

IEEE. IEEE Standard 519 **Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**, 2014.

IEEE. IEEE Standard 1547 **for interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems**, 2008.

MIRANDA, M. R.; BAÑUELOS, M. F.; PUC, F. C.; RIVERA, V. R.; CATALÁN, D. P. A **Hybrid Control Technique for Harmonic Elimination, Power Factor Correction, and Night Operation of a Grid-Connected PV Inverter**. IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 10, no. 2, pp. 664-675, Jul. 2019. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2961600>

NISE, N. S. **Control Systems Engineering**: John Wiley & Sons, 2011.

PIRES, L. P. **Proposta de uma nova técnica para extração global de máxima potência de módulos fotovoltaicos sem sensoriamento da corrente e da tensão provenientes da fileira fotovoltaica**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, v. Único, 2019.

REINALDO, P. M.; DUPCZAK, B. S.; NETO, E. A. C. A. **Análise do impacto da geração distribuída fotovoltaica na rede de baixa tensão da CELESC**. Revista Eletrônica de Potência (SOBRAEP), vol. 25, no. 3, pp. 316-325, Ago. 2020. <https://doi.org/10.18618/REP.2020.3.0013>

REZNIK, A.; SIMÕES, M. G.; AL-DURRA, A. **LCL Filter Design and Performance Analysis for Grid Interconnected Systems**. IEEE Transactions on Industrial Applications, vol. 50, no. 2, pp. 1225-1232, Mar. 2014. <https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2274612>

RESENDE, Ê. C. **Estudo comparativo e implementação de métodos de anti-ilhamento para sistemas de geração distribuída com fonte solar**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, v. Único, 2020.

SHAHNIA, F.; RAJAKARUNA, S.; GHOSH, A., **Static Compensators (STATCOMs) in Power Systems**: Springer, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-981-287-281-4>

SOARES, M. B.; COELHO, E. A.; FREITAS, L. C. G.; LIMA, G. B.; JUNIOR, J. B. V. **Análise do desempenho das técnicas de modulação SVM, SPWM, Histerese no conteúdo harmônico de corrente e potência de operação de inversores conectados à rede.** 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), p. 8, 2021. <https://doi.org/10.1109/INDUSCON51756.2021.9529920>

SEN, S.; YENDURI, K.; SENSARMA, P. **Step-by-step Design and Control of LCL filter based Three Phase Grid-connected Inverter.** IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), p. 6, 2014. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2014.6894991>

SEMIKRON. **IGBT Peak Voltage Measurement and Snubber Capacitor Specification:** SEMIKRON, 2017.

SHAHNIA, F.; RAJAKARUNA, S.; GHOSH, A. **Static Compensators (STATCOMs) in Power Systems:** Springer, 2015. <https://doi.org/10.1007/978-981-287-281-4>

SINGH, B.; CHANDRA, A.; AL-HADDAD, K. **Power Quality: Problems and Mitigations Techniques:** John Wiley & Sons, 2015. <https://doi.org/10.1002/9781118922064>

TABATABAEI, N. M.; AGHBOLAGHI, A. J.; BIZON, N.; BLAABJERG, F., **Reactive Power Control in AC Power Systems:** Springer, 2017

TURITSYN, K.; SULC, P.; BACKHAUS, S.; CHERTKOV, M. **Options for Control of Reactive Power by Distributed Photovoltaic Generators.** Proc. IEEE, vol. 99, no. 6, pp. 1063-1073, Jun. 2011. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2116750>

TEODORESCU, R.; LISERRE, M. L.; RODRIGUEZ, P. **Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems:** John Wiley & Sons, 2011. <https://doi.org/10.1002/9780470667057>

VARMA, R. K.; SIAVASHI, E. M. **PV-STATCOM: A New Smart Inverter for Voltage Control in Distribution Systems.** IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 9, no. 4, pp. 1681-1691, Oct. 2018. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2018.2808601>

WEG Automação S.A., 2009. **Manual para Correção do Fator de Potência.** Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hea/h8b/WEG-correcao-do-fator-de-potencia-958-manual-portugues-br.pdf>. Acesso em: 15 Maio 2020.

. WU. B.; LANG, Y.; ZARGARI, N.; KOURO, S. **Power Conversion and Control of Wind Energy Susters:** John Wiley & Sons, 2011. <https://doi.org/10.1002/9781118029008>

WU, B. **High Power Converters and AC Drivers:** John Wiley & Sons, 2005. <https://doi.org/10.1002/0471773719>

YAZDANI, A.; IRAVANI, R., **Voltage-Sourced Converters in Power Systems Modeling, Control, and Applications:** Wiley & Sons, 2010. <https://doi.org/10.1002/9780470551578>

YANG, D.; WANG, X.; LIU, F.; XIN, K.; LIU, Y.; BLAABJERG, F. **Adaptive Reactive Power Control of PV Power Plants for Improved Power Transfer Capability under Ultra-Weak Grid Conditions**. IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, no. 2, pp. 1269-1279, 2017.

<https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2762332>

YARAMASU, V.; WU, B. **Model predictive control of wind energy conversion systems**: Wiley & Sons, 2017. <https://doi.org/10.1002/9781119082989>

ZHAO, D.; HARI, V. S. S. P. K.; NARAYANAN, G.; AYYANAR, R. **Space-Vector-Based Hybrid Pulsewidth Modulation Techniques for Reduced Harmonic Distortion and Switching Loss**. IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 25, no. 3, Mar. 2010.

<https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2030200>

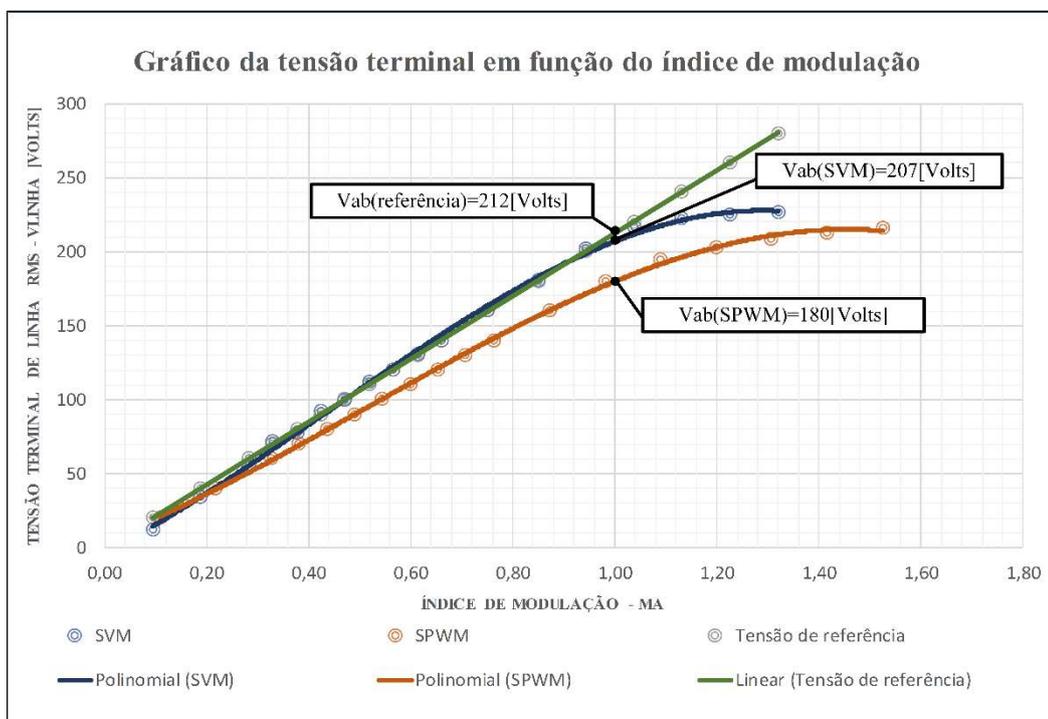
ZHOU, K.; WANG, D. **Relationship Between Space-Vector Modulation and Three-Phase Carried-Based PWM: A Comprehensive Analysis**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 49, no. 1, Fev. 2002. <https://doi.org/10.1109/41.982262>

## Anexo I – Síntese de trabalho comparativo entre as técnicas de modulação

Durante a implementação deste trabalho, notou-se algumas oportunidades de investigação referentes à assuntos que podem trazer contribuições no sentido de complementar temas pouco tratados pela academia nos últimos anos. Nesta linha, frente as diversas técnicas de modulação existentes para acionar chaves semicondutoras, notou-se a necessidade de alguns critérios para seleção da técnica utilizada para dada aplicação.

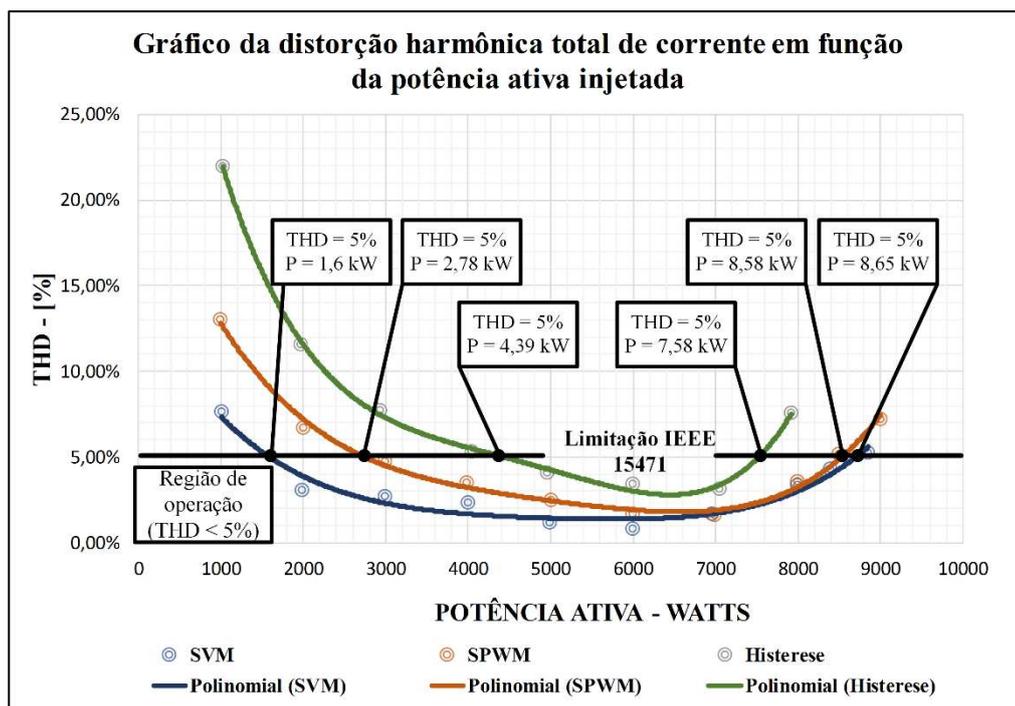
Sendo assim, visando a aplicação em inversores conectados a rede elétrica, definiu-se dois critérios/assuntos a serem investigados a nível de artigo científico, que posteriormente teria o seu resultado aplicado nos resultados desta dissertação. De forma sintetizada, foi realizado a comparação de três técnicas de modulação clássicas (SVM, SPWM e Histerese) por uma ótica dos dois critérios estabelecidos, que foram conteúdo harmônico de corrente injetada na rede e aproveitamento do barramento CC.

Para avaliar o aproveitamento do barramento CC, isto é, para uma tensão fixa no barramento CC, qual é a técnica que consegue impor o maior valor de tensão de saída no lado CA, foi realizado o ensaio em malha aberta do inversor de forma isolada. Os resultados estão apresentados de forma gráfica na figura abaixo.



Observando a figura anterior, nota-se que a modulação vetorial possui um resultado melhor do ponto de vista de aproveitamento do barramento CC. Sendo a técnica mais apropriada conforme o critério de aproveitamento da tensão do barramento CC.

Para avaliar o critério de corrente harmônica injetada, foi retirado resultados com o inversor conectado à rede operando com diferentes níveis de potência. Com isso, observou-se a taxa de distorção harmônica de corrente para o respectivo nível de potência. Os resultados estão apresentados de forma gráfica na figura abaixo.



Por meio da figura acima, mais uma vez a modulação vetorial se destacou, mostrando que possui um conteúdo harmônico de corrente menor que a das outras duas técnicas citadas. Essa característica torna essa técnica atrativa para inversores *on-grid*, visto que estes equipamentos devem possuir baixo conteúdo harmônico de corrente.

Concluindo, verificou-se por meio dos dois critérios estabelecidos que a modulação vetorial é a mais vantajosa para ser utilizada neste trabalho.

Mais detalhes desta abordagem podem ser verificados por meio de (SOARES, COELHO, FREITAS, LIMA, 2020).

## Anexo II – Definições de fator de potência

O fator de potência é uma grandeza muito importante em uma instalação elétrica. Essa grandeza, quando na ausência de harmônicos de corrente e/ou tensão, é definida na literatura como a relação entre a potência ativa e a potência aparente (SINGH; CHANDRA; AL-HADDAD, 2015), (ACHA; AGELIDIS; LARA; MILLER, 2002).

Em relação as normas nacionais e internacionais que definem esse conceito, podemos citar;

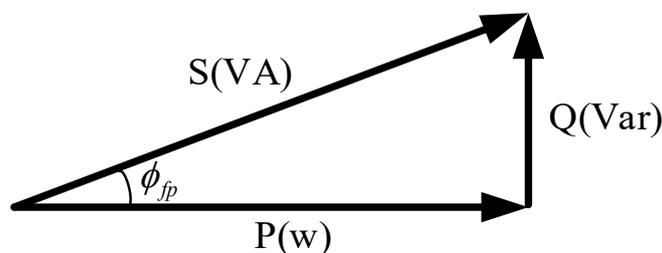
- **PRODIST:** Define o fator de potência como a razão entre a energia elétrica ativa e a raiz quadrada da soma dos quadrados das energias elétricas ativa e reativa, consumidas em um mesmo período especificado. Aqui não se faz referência ao fator de potência considerando os componentes harmônicos. Essa questão ainda está em discussão no Brasil.
- **IEEE 1459-2010:** Esta norma define o fator de potência de forma mais detalhada, considerando as condições senoidais e não senoidais.

**Condições senoidais:** Define o fator de potência como a razão entre a energia transmitida para carga e a máxima energia que poderia ser transmitida para esta carga. Considerando as perdas constantes. Também menciona que a máxima utilização do alimentador ocorre quando a potência ativa é igual a aparente.

**Condições não senoidais:** Nessas condições, devido a presença de correntes e/ou tensões harmônicas, o fator de potência é definido como a razão entre a soma das potências ativas fundamental e harmônicas, e a raiz quadrada da soma dos quadrados das potências aparentes fundamental e harmônicas.

Neste trabalho o fator de potência indutivo será tomado como exemplo, visto que é um caso mais frequente. Porém, todas as observações aqui apresentadas possuem a recíproca verdadeira para fator de potência capacitivo.

Figura 2.1: Triângulo de potência com potência reativa positiva.



Fonte: Dados do próprio autor

$$FP = \frac{P(W)}{S(VA)} = \cos(\phi_{fp}) \quad (2.1)$$

$$\phi_{fp} = \text{tg}^{-1} \left( \frac{Q}{P} \right) \quad (2.2)$$

Em que:

FP : Fator de potência;

$\phi_{fp}$  : Ângulo do fator de potência [°].

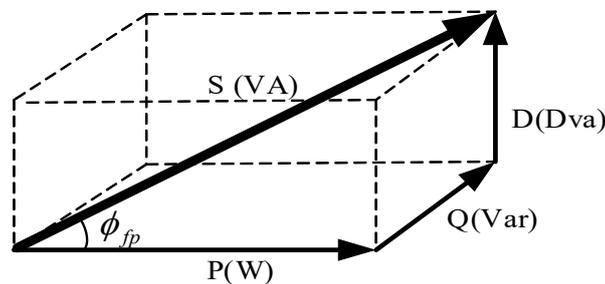
P : Potência ativa [W];

Q : Potência reativa [VAr];

S : Potência aparente [VA];

Em redes que possuem cargas não lineares, devido a presença de correntes harmônicas, o fator de potência segue o triângulo de potência da Figura 2.2 e a equação (2.3).

Figura 2.2: Triângulo de potência em redes com tensões e/ou correntes harmônicas.



Fonte: Dados do próprio autor.

Em que:

D : Potência de distorção [DVA]

$$FP = \frac{P(W)}{\left[ Vf \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{THD_v}{100} \right)^2} \right] \cdot \left[ If \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{THD_i}{100} \right)^2} \right]} \quad (2.3)$$

Em que:

Vf : Tensão eficaz na frequência fundamental [V];

If : Corrente eficaz na frequência fundamental [A];

THDv : Taxa de distorção harmônica de tensão [%];

THDi : Taxa de distorção harmônica de corrente [%].

Segundo (IEEE-519, 2014), o fator de potência máximo de conversores com reator no link CC é função do número de pulsos e pode ser calculado através de (2.4).

$$FP_{\max.} = \frac{q}{\pi} \cdot \text{sen} \left( \frac{\pi}{q} \right) \quad (2.4)$$

Em que:

FPmax : Fator de potência máximo;

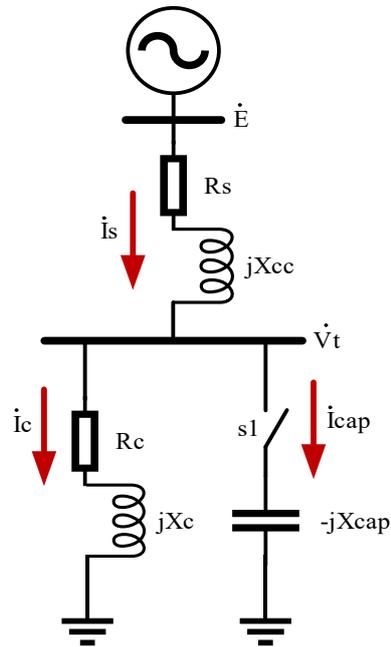
q : Número de pulsos do conversor.

A legislação brasileira, através de (ANEEL, 2013), estabeleceu como 0,92 o valor mínimo para o fator de potência em consumidores conectados à rede em tensão superior a 2,3kV. Esse valor é válido para fator de potência com característica indutiva e capacitiva, sendo indutivo das seis da manhã até meia noite e capacitivo da meia noite até as seis da manhã.

Considerando que a energia drenada de um sistema pode ser ativa e/ou reativa, e que apenas a primeira realiza trabalho, pode-se dizer que o fator de potência indica a eficiência do uso da energia (WEG, 2009). Isto é, para valores próximos a unidade, o sistema é considerado eficiente, uma vez que a maioria da potência drenada da fonte é convertida em trabalho. No caso de valores baixos, a ineficiência é causada pelo fato da energia necessária para suprir os campos magnéticos e/ou elétricos dos elementos dos circuitos ser proveniente da fonte de alimentação, causando o aumento da corrente que circula da fonte para as cargas e acarretando alguns problemas na instalação elétrica. Os principais problemas são citados abaixo.

- **Aumento das perdas:** Através das Figuras 2.3 e 2.4, nota-se que com a parcela de potência reativa da carga sendo suprida pela fonte (chave s1 aberta), o valor eficaz da corrente  $I_s$  é maior que o valor da mesma caso a fonte suprisse apenas a potência ativa da carga  $I_{sa}$  (chave s1 fechada). Isso faz com que as perdas por efeito joule, que são proporcionais ao quadrado da corrente (2.5) e (2.6), sejam maiores quando não há a correção do FP próximo a carga (s1 aberta).

Figura 2.3: Diagrama unifilar de um sistema elétrico radial.



Fonte: Dados do próprio autor.

Em que:

$V_t$  : Tensão terminal [V];

$E$  : Tensão de circuito aberto da fonte[V];

$I_s$  : Corrente drenada da rede [A];

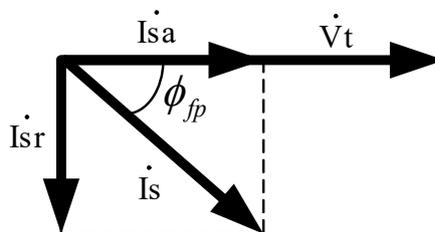
$I_c$  : Corrente da carga [A];

$I_{cap}$  : Corrente do banco de capacitores [A];

$X_c$  : Reatância da carga [ $\Omega$ ];

$X_{cap}$  : Reatância do banco de capacitores [ $\Omega$ ];

Figura 2.4: Diagrama fasorial do sistema sem correção de FP-S1 aberta



Fonte: Dados do próprio autor.

- **Perdas joulicas sem a correção do FP – S1 aberta**

Neste caso, a corrente da carga é igual a corrente da fonte.

$$P_{j_{fpa}} = R_s \cdot (I_s^2) \quad (2.5)$$

Em que:

$P_{j_{fpa}}$  : Perdas joulicas com o FP antigo [W].

- **Perdas joulicas com a correção do FP – S1 fechada**

Neste caso, a fonte supri apenas a parcela ativa da corrente da carga  $I_{sa}$ . A parcela reativa ( $I_{sr}$ ) é suprida pelo banco de capacitores em paralelo.

$$P_{j_{fpa}} = R_s \cdot (I_{sa}^2) \quad (2.6)$$

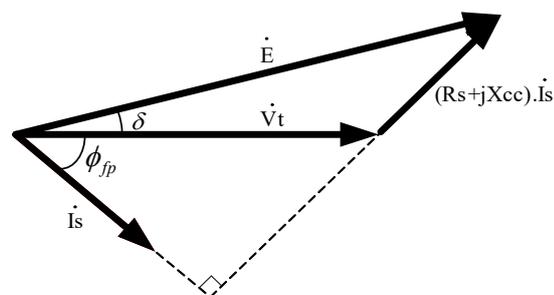
Em que:

$P_{j_{fpa}}$  : Perdas joulicas com o FP novo[W];

$I_{sa}$  : Parcela ativa da corrente  $I_s$  [A].

- **Quedas de tensão acima dos valores aceitáveis:** Por consequência do alto valor de  $I_s$ , a queda de tensão na impedância da rede também será alta. Através da Figura 2.5, nota-se que cargas de natureza indutiva tendem a reduzir a tensão terminal, uma vez a tensão terminal da carga é menor que a tensão terminal da rede. A recíproca é verdadeira para cargas capacitivas.

Figura 2.5: Diagrama fasorial das tensões para carga indutiva.



Fonte: Dados do próprio autor.

Em que:

$\delta$  : Ângulo de potência ou de carga [Grau ou Radiano].

- **Subutilização da capacidade nominal da instalação:** Como a potência reativa da carga ocupa uma parte significativa da capacidade nominal dos condutores, a instalação passa a ser subutilizada, visto que essa parcela poderia ser ocupada por potência ativa.

Com o objetivo de evitar todos esses problemas nas instalações com baixo FP, as principais técnicas se dividem em dois grupos, correção passiva e ativa. Independente da técnica utilizada, pode-

se fazer a correção do FP de quatro maneiras diferentes, de acordo com o local em que o dispositivo de correção será instalado (WEG, 2009).

- **Correção na entrada do lado de alta tensão:** Geralmente é feita em situações que é necessário apenas corrigir o FP visto pela concessionária de energia. Possui custo elevado, devido aos equipamentos serem para alta tensão. Não possui o opcional de chaveamento, devido a ligação ser em alta tensão. Apresenta o inconveniente de não solucionar a ineficiência interna da instalação, visto que as correntes internas permanecem as mesmas. Maior probabilidade da instalação se tornar capacitiva e dificuldade de manutenção.
- **Correção na entrada do lado de baixa tensão:** Também é feita com o objetivo de corrigir o FP visto pela concessionária. Porém, nesse caso é possível realizar o chaveamento dos bancos de capacitores, devido a operação ser em BT. Isso possibilita a adequação da potência reativa fornecida de acordo com a demanda de reativo das cargas. Todavia, apresenta o mesmo inconveniente de não solucionar a ineficiência interna da instalação.
- **Correção por grupos de cargas:** Essa maneira de correção é feita quando se deseja corrigir o FP de uma instalação específica, como de um quadro de distribuição de um setor específico de uma indústria, por exemplo. A vantagem é o alívio das correntes que percorrem os condutores que estão ente a fonte e o quadro. Entretanto, as correntes que estão entre o quadro e as cargas continuam as mesmas.
- **Correção localizada:** Do ponto de vista técnico, essa solução é melhor, pois a correção é feita o mais próximo possível da carga. Isso reduz as correntes que circulam entre a fonte e a carga, aliviando os condutores e aumento a eficiência da instalação.

### Anexo III – Definições de variações momentâneas de tensão

Diante de diversos problemas que são recorrentes em um sistema elétrico, alguns são causados pela carga e outros na própria rede (SINGH; CHANDRA; AL-HADDAD, 2015). Alguns problemas que nascem na carga são: harmônicos, componente contínua, desequilíbrio (em alguns casos), dentre outros. Alguns problemas que se originam na rede são: desequilíbrio, desvio de frequência, *flicker*, afundamentos e elevações de tensão.

Diante de todos esses inconvenientes citados acima, sabe-se que as variações de tensão de curta duração (VTCD's) representam 92% dos problemas de qualidade da energia para os consumidores industriais (FREITAS, 2014). Sendo assim, é evidente a necessidade de uma solução eficiente, visto que são causadores de grandes prejuízos.

Algumas normas que definem e classificam as variações de tensão são citadas abaixo.

- **PRODIST:** Define as variações de tensão de curta duração como desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos (ANEEL, 2021). A classificação de acordo com a variação do valor eficaz da tensão e a duração do evento é apresentada na Tabela 2.1. Aqui não se faz referência a variação instantânea de tensão.

Tabela 2.1: Classificação das variações de tensão de curta duração segundo PRODIST (VTCD).

Classificação	Denominação	Duração da variação	Valor eficaz em relação à tensão de referência
<b>Variação Momentânea de Tensão</b>	Interrupção momentânea de tensão	Inferior ou igual a 3 segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	1 ciclo a 3 segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	1 ciclo a 3 segundos	Superior a 1,1 p.u
<b>Variação Temporária de Tensão</b>	Interrupção Temporária de Tensão	Superior de 3 segundos e inferior a 3 minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior de 3 segundos e inferior a 3 minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão	Superior de 3 segundos e inferior a 3 minutos	Superior a 1,1 p.u

- **IEEE 1159:** Esta norma define a VTCD como a variação do valor nominal eficaz da tensão por um tempo maior que 0,5 ciclo e inferior a 1 minuto. A classificação desse fenômeno é apresentada na Tabela 2.2. Note que aqui se faz referência a variações instantâneas.

Tabela 2.2: Classificação das variações de tensão de curta duração segundo IEEE-1159.

Classificação	Denominação	Duração da variação	Valor eficaz em relação à tensão de referência
<b>Variação Momentânea de Tensão</b>	Interrupção	0,5 ciclo a 3 segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento (Sag/Dip)	30 ciclos a 3 segundos	0,1 a 0,9 p.u
	Elevação (Swell)	30 ciclos a 3 segundos	1,1 a 1,4 p.u
	Desequilíbrio de tensão	30 ciclos a 3 segundos	2% a 15%
<b>Variação Temporária de Tensão</b>	Interrupção	3 segundos a 1 minuto	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento (Sag/Dip)	3 segundos a 1 minuto	0,1 p.u a 0,9 pu
	Elevação (Swell)	3 segundos a 1 minuto	1,1 p.u a 1,2 p.u
	Desequilíbrio de tensão	3 segundos a 1 minuto	2% a 15%
<b>Variação Instantânea de Tensão</b>	Afundamento (Sag/Dip)	0,5 a 30 ciclos	0,1 a 0,9 p.u
	Elevação (Swell)	0,5 a 30 ciclos	1,1 a 1,8 pu

### Causas e efeitos das variações de tensão de curta duração

Independente da fonte de origem, é importante mencionar que esse fenômeno é um problema tanto para a empresa responsável em manter os indicadores de qualidade dentro dos padrões aceitáveis quanto para o consumidor final, que por sua vez pode ter grandes prejuízos devido a ocorrência da VTCD.

A Tabela 2.3 ilustra os principais causadores de VTCD. A Tabela 2.4 os efeitos que o mesmo pode causar na rede e/ou nas cargas que estão conectadas no determinado ponto de conexão (SINGH; CHANDRA; AL-HADDAD, 2015).

Tabela 2.3: Principais causas de VTCD.

Classificação	Causas
<b>Afundamento (SAG/Dip)</b>	Partida de motores
	Curto-circuitos
	Entrada de grandes cargas
<b>Elevação (SWELL)</b>	Chaveamento de banco de capacitores
	Saída de grandes cargas
	Curto-circuitos

Fonte: Adaptado de (SINGH; CHANDRA; AL-HADDAD, 2015).

Tabela 2.4: Principais efeitos causados pelos VTCD's.

Classificação	Efeitos
<b>Afundamento (SAG/Dip)</b>	Mal funcionamento da proteção
	Queima de equipamentos
	Mal funcionamento de equipamentos
<b>Elevação (SWELL)</b>	Perda de produção
	Mal funcionamento da proteção
	Queima de equipamentos
	Perda de produção

Fonte: Adaptado de (SINGH; CHANDRA; AL-HADDAD, 2015).

## Anexo IV – Declaração de autoria própria

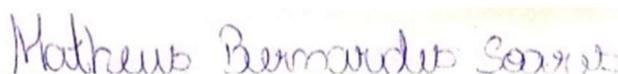
Eu, **MATHEUS BERNARDES SOARES**, discente do curso de Mestrado do Programa de Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, regularmente matriculado sob o número 11922EEL011, declaro que sou autor da dissertação de mestrado intitulada **ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM INVERSOR CONECTADO À REDE ELÉTRICA OPERANDO COM TÉCNICAS DE MODULAÇÃO SVM, SPWM E HISTERESE PARA COMPENSAÇÃO DE VARIAÇÕES MOMENTÂNEAS DE TENSÃO E CORREÇÃO DE FATOR DE POTÊNCIA**, desenvolvida durante o período de 19/08/2019 a 28/01/2022 sob a orientação do PROFESSOR LUIZ CARLOS GOMES DE FREITAS, ora submetida à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de mestre em Ciências, e que a mesma foi por mim elaborada e integralmente redigida, não tendo sido copiado ou extraído, seja parcial ou integralmente, de forma ilícita de nenhuma fonte além daquelas públicas consultadas e corretamente referenciadas ao longo do trabalho ou daquelas cujos dados resultaram de investigações empíricas por mim realizadas para fins de produção deste trabalho.

Assim, firmo a presente declaração, demonstrando minha plena consciência dos seus efeitos civis, penais e administrativos, e assumindo total responsabilidade caso se configure o crime de plágio ou violação aos direitos autorais.

Desta forma, na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Uberlândia a publicar, durante tempo indeterminado, o texto integral da obra acima citada, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação do programa de pós-graduação supracitado e ou da produção científica brasileira, a partir desta data.

Por ser verdade, firmo a presente.

Uberlândia, 23 de Fevereiro de 2022.



---

**MATHEUS BERNARDES SOARES**