

ANO
2019

ALLAN DIEGO MAFFEZZOLLI | TÉCNICA DE LIMITAÇÃO DE CORRENTE POR MEIO DE RESISTÊNCIA
VIRTUAL NÃO LINEAR APLICADA A UM DSTATCOM CONTROLADO EM TENSÃO



UDESC

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

Esse trabalho apresenta um novo conceito de Resistência Virtual Não Linear aplicado a um DSTATCOM controlado em tensão. O conceito proposto permite que o DSTATCOM permaneça operante em condições de distúrbios da rede elétrica, protegendo o conversor e as cargas próximas ao ponto comum de conexão. A técnica limita a potência de saída do conversor, através da limitação de corrente do conversor. Em condição normal de operação, a técnica não altera a resposta dinâmica da malha de tensão. O trabalho é concluído com a implementação da técnica em um protótipo de 30kVA.

Orientador: Alessandro Luiz Batschauer

Joinville, 2019

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**TÉCNICA DE LIMITAÇÃO DE CORRENTE
POR MEIO DE RESISTÊNCIA VIRTUAL
NÃO LINEAR APLICADA A UM
DSTATCOM CONTROLADO EM TENSÃO**

ALLAN DIEGO MAFFEZZOLLI

JOINVILLE, 2019

ALLAN DIEGO MAFFEZZOLLI

**TÉCNICA DE LIMITAÇÃO DE CORRENTE POR MEIO DE RESISTÊNCIA
VIRTUAL NÃO LINEAR APLICADA A UM DSTATCOM CONTROLADO EM
TENSÃO**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre Engenheiro Eletricista.

Orientador: Dr. Alessandro Luiz Batschauer

Joinville, SC

2019

Maffezzolli, Allan Diego
TÉCNICA DE LIMITAÇÃO DE CORRENTE POR MEIO DE
RESISTÊNCIA VIRTUAL NÃO LINEAR APLICADA A UM DSTATCOM
CONTROLADO EM TENSÃO / Allan Diego Maffezzolli. -
Joinville, 2019.
121 p.

Orientador: Alessandro Luiz Batschauer
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de
Pós-Graduação Profissional em Engenharia Elétrica,
Joinville, 2019.

1. Limitação de corrente. 2. Resistência Virtual Não
Linear. 3. Regulação de Tensão. 4. DSTATCOM. 5. Distúrbios
da Rede. I. Batschauer, Alessandro Luiz. II. Universidade
do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação.
III. Título.

Técnica de Limitação de Corrente por Meio de Resistência Virtual não Linear
Aplicada a um DSTATCOM Controlado em Tensão

por

Allan Diego Maffezzolli

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA

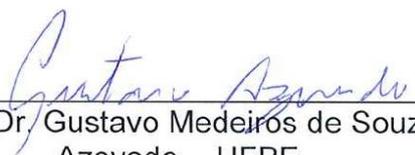
Área de concentração em “Automação de Sistemas”
e aprovada em sua forma final pelo

CURSO DE MESTRADO PROFISSIONAL EM ENGENHARIA ELÉTRICA
DO CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA.

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Alessandro Luiz Batschauer
CCT/UDESC (Orientador/Presidente)



Prof. Dr. Gustavo Medeiros de Souza
Azevedo - UFPE



Prof. Dr. Marcello Mezaroba
CCT/UDESC

Joinville,SC, 18 de fevereiro de 2019.

AGRADECIMENTOS

Os primeiros agradecimentos vão aos céus, ao nosso Senhor Jesus Cristo, a quem tudo devo. Aos meus pais Altair e Deise e minha irmã Fernanda, pelo apoio e incentivo. À minha esposa Heloísa, pelo amor, compreensão e sacrifício. À minha amada filha Lavínia, por ser fonte de inspiração. À minha tia Dionara pela revisão deste trabalho. E a toda minha família e amigos que compreenderam minha ausência durante este período.

Ao meu orientador Alessandro Luiz Batschauer, seu conhecimento, auxílio e incentivo foram muito importantes para que eu pudesse realizar este trabalho. Agradeço aos Professores da banca, os quais se dispuseram a realizar a leitura e avaliação deste trabalho.

Eu gostaria de agradecer ao corpo docente da pós-graduação de Engenharia Elétrica da UDESC, pelos ensinamentos durante as disciplinas do mestrado. Ao meu chefe Gleisson Jardim França e gerente Martin Brand, da WEG Drive & Controls, cuja compreensão e auxílio foram essenciais. À Empresa Supplier, pela ajuda material para a realização deste trabalho, e à FAPESC e FITEJ, pela contribuição na aquisição de materiais e equipamentos.

Não poderia deixar de agradecer também aos meus amigos, pessoas queridas que contribuíram com ensinamentos, apoio técnico, sugestões e críticas. Obrigado ao Felipe Joel Zimann, Gustavo Lambert, José Adriano Damacena Diesel, Leandro Santos Monteiro, Luís Fernando Momm Antunes, Marcos Vinicius Bressan, Mateus Nicoladelli de Oliveira, Murilo Brunel da Rosa e Rubens Tadeu Hock Júnior.

*“Uma pessoa que nunca cometeu um erro,
nunca tentou nada novo”.*

- Albert Einstein

*“Os dias prósperos não vêm por acaso;
nascem de muita fadiga e persistência”.*

- Henry Ford

RESUMO

Os compensadores de reativos controlados em tensão operando em redes de distribuição de energia estão suscetíveis a distúrbios (afundamentos, elevações, surtos, interrupções e curto-circuito), assim, é possível que estes venham a processar correntes elevadas, podendo levar a seu desligamento ou até mesmo torná-los inoperantes. Esse trabalho apresenta um novo conceito de Resistência Virtual Não Linear aplicado a um DSTATCOM controlado em tensão. A técnica limita a potência de saída do conversor por meio da limitação de corrente do conversor. Em condição normal de operação, a técnica não altera a resposta dinâmica da malha de tensão. O conceito proposto permite que o DSTATCOM permaneça operante em condições de distúrbios da rede elétrica, protegendo o conversor e as cargas próximas ao ponto comum de conexão. Uma lógica dos estados de operação durante os distúrbios é apresentada, variando os limites de corrente ou bloqueando o PWM. Resultados de simulação mostram a capacidade de operação da técnica proposta para diversas condições de distúrbios da rede. O trabalho é concluído com a implementação da técnica em um protótipo de 30 kVA. A validação dos estudos por meio de resultados experimentais obtidos comprovam o bom funcionamento do limitador de corrente em condição de distúrbios.

Palavras-chave: Limitação de Corrente, Resistência Virtual Não Linear, Regulação de Tensão, DSTATCOM, Distúrbios da rede, Afundamento, Elevação.

ABSTRACT

Voltage controlled static compensators operating in distribution networks grid are susceptible to transients (sag, swell, surge, interruption and short circuit), so they would process high peak currents, which may lead to their shutdown, or even render them inoperative. This dissertation presents a new concept of Nonlinear Virtual Resistance applied to a voltage controlled DSTATCOM. The technique limits the converter output power by limiting the converter current. In normal operating condition the technique does not change the dynamic response of the voltage loop. The proposed concept allows the DSTATCOM to remain operative during disturbances of the grid, protecting the converter and the loads near to the point of common coupling. The logic of operating states during disturbances is introduced by varying the current limits or by blocking the PWM. Simulation results show the ability of the proposed technique to operate for several conditions of disturbances network. The work is concluded with the implementation of the technique in a prototype of 30 kVA. The experimental results obtained demonstrate the good functioning of the current limiter in condition of disturbances.

Key words: Current Limiting, Nonlinear Virtual Resistance, Voltage Regulation, DSTATCOM, Network Disturbances, Sag, Swell.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distúrbios de tensão encontrados na rede elétrica.	27
Figura 2 – Afundamento de tensão causado por curto entre fase e neutro	28
Figura 3 – Afundamento de tensão causado por acionamento de grandes motores.	29
Figura 4 – Sobretensão causada por curto entre fase e neutro.....	29
Figura 5 – Interrupção seguida de reinicialização	30
Figura 6 – Transiente de corrente impulsiva causada por descarga atmosférica.....	32
Figura 7 – Transiente de tensão causado por chaveamento de banco de capacitores.	32
Figura 8 – Curva ITIC para representar variações de tensão.	33
Figura 9 – Diagrama de blocos do controlador para um DSTATCOM controlado em corrente.	35
Figura 10 – Diagrama de blocos do controlador para um DSTATCOM controlado em tensão.	36
Figura 11 – Diagrama de blocos para um DSTATCOM controlado em tensão, mais controle indireto da corrente.	37
Figura 12 – Sistema de Distribuição.....	41
Figura 13 – Conexão do DSTATCOM no sistema de distribuição.....	42
Figura 14 – Circuito equivalente do conversor conectado à rede e o diagrama fasorial das tensões.	43
Figura 15 – Circuito de Potência do DSTATCOM	45
Figura 16 – Diagrama de blocos do controle do DSTATCOM utilizando a técnica RVNL....	46
Figura 17 – Representação do circuito com a RVNL.....	49
Figura 18 – Diagrama de blocos da técnica RVNL.....	50
Figura 19 – Tensão e corrente na saída do DSTATCOM e sinais de controle RVNL para uma condição de afundamento de tensão monofásica.....	51
Figura 20 – Variação dinâmica de $I_{G1} = \text{MÁX}$ para $I_{G0} = 0$	52
Figura 21 – Fluxograma lógico dos estados de operação durante distúrbios de tensão.	53
Figura 22 – Circuitos eletrônicos da técnica RVNL.....	56
Figura 23 – Circuito Fonte do cartão, para ajuste dos níveis de atuação da técnica RVNL. ...	58
Figura 24 – Placa de circuito impresso com o circuito RVNL (Top Layer).	58
Figura 25 – Placa de circuito impresso com o circuito RVNL (Bottom Layer).....	59
Figura 26 – Circuito de Potência Simulado.....	61
Figura 27 – Circuito de Controle Simulado – DSP.	62

Figura 28 – Circuito de Controle Simulado – Malhas de Controle e técnica RVNL.	63
Figura 29 – Elevação para 1,25 pu de tensão no PCC.	64
Figura 30 – Afundamento para 0,72 pu de tensão do PCC.....	65
Figura 31 – Afundamento para 0,43 pu de tensão no PCC.....	66
Figura 32 – Interrupção de tensão por 3 ciclos de rede	67
Figura 33 – Condição de curto-circuito trifásico no PCC.....	68
Figura 34 – Condição de interrupção monofásica de curta duração.	69
Figura 35 – DSTATCOM protótipo com a técnica RVNL.....	71
Figura 36 – Distribuição dos Circuitos do DSTATCOM	72
Figura 37 – Kit de desenvolvimento TMDSDOCK28335.....	73
Figura 38 – Módulo de Potência Inversor SPCIT 4500-60-15.	75
Figura 39 – Esquema unifilar do circuito utilizado nos ensaios experimentais do DSTATCOM.	77
Figura 40 – Medição da tensão no PCC, com e sem compensação da tensão.	78
Figura 41 – Medição da corrente de saída do DSTATCOM, com e sem compensação da tensão.	78
Figura 42 – Atuação da proteção de sobrecorrente com desligamento do DSTATCOM.....	79
Figura 43 – Atuação da proteção de sobrecorrente com desligamento do DSTATCOM, com <i>zoom</i> no transiente.....	79
Figura 44 – Operação em sobrecarga, com limitação da corrente de saída do DSTATCOM por meio da técnica RVNL.....	80
Figura 45 – Atuação da técnica RVNL, limitando a corrente de saída do DSTATCOM.....	81
Figura 46 – Compensando a tensão no PCC, operando com carga pesada, “sem” a técnica RVNL.....	82
Figura 47 – Compensando a tensão no PCC, operando em sobrecarga, “com” a técnica RVNL	82
Figura 48 – Análise do transiente da tensão no PCC ao “habilitar” a técnica RVNL.	83
Figura 49 – Análise do transiente da tensão no PCC ao “desabilitar” a técnica RVNL.	84
Figura 50 – Sinais de Controle, compensando a tensão no PCC, com a RVNL “desabilitada”.	85
Figura 51 – Sinais de Controle, compensando a tensão no PCC, com a RVNL “desabilitada”.	86
Figura 52 – Sinais de Controle, compensando a tensão no PCC, com a RVNL “habilitada”. 87	
Figura 53 – Sinais de Controle, compensando a tensão no PCC, com a RVNL “habilitada”. 87	

Figura 54 – Compensando a tensão no PCC, em uma condição de afundamento de tensão, com a técnica RVNL habilitada.	88
Figura 55 – Compensando a tensão no PCC, em uma condição de afundamento de tensão, com a técnica RVNL habilitada.	89
Figura 56 – Compensando a tensão no PCC, em uma condição de afundamento de tensão, com a técnica RVNL habilitada.	89
Figura 57 – Compensando a tensão no PCC, em uma condição de afundamento de tensão, com a técnica RVNL habilitada.	90
Figura 58 – Sinais de Potência, impondo uma referência de corrente de ~ 0 A.....	91
Figura 59 – Sinais de Potência, impondo uma referência de corrente de ~ 0 A, zoom no transiente inicial.	92
Figura 60 – Sinais de potência, impondo uma referência de corrente de ~ 0 A, zoom no transiente final.....	93
Figura 61 – Sinais de Controle, impondo uma referência de corrente de ~ 0 A.	94
Figura 62 – Sinais de Controle, impondo uma referência de corrente de ~ 0 A, zoom no transiente inicial.....	94
Figura 63 – Sinais de Controle, impondo uma referência de corrente de ~ 0 A, zoom no transiente final.	95
Figura 64 – Pré-carga do barramento c.c., com a técnica RVNL desabilitada.....	96
Figura 65 – Pré-carga do barramento c.c., com a técnica RVNL habilitada.	96
Figura 66 – Técnica de <i>anti-windup</i> implementada no controlador da tensão de saída do conversor.	106
Figura 67 – Dinâmica da tensão de saída sobre condição de falta, com e sem a técnica <i>anti-windup</i>	107
Figura 68 – Foto do protótipo do cartão com a técnica RVNL na bancada de teste	109
Figura 69 – Identificação dos circuitos medidos no teste do cartão.....	110
Figura 70 – Sinais de controle da técnica RVNL, simulando uma condição normal de operação.	110
Figura 71 – Sinais de controle da técnica RVNL, simulando a operação em condição de falta.	111
Figura 72 – Sinais de Controle da Técnica RVNL com amplificador operacional falsificado.	113
Figura 73 – Sinais de Controle da Técnica RVNL com amplificador operacional original. .	114

Figura 74 – Sinais de Controle, compensando a tensão no PCC, com a técnica RVNL habilitada, impondo uma referência de corrente de ~ 0 A	115
Figura 75 – Sinais de Controle, compensando a tensão no PCC, com a técnica RVNL habilitada, impondo uma referência de corrente de ~ 0 A	116
Figura 76 – Tensão no PCC com compensação de reativos, e corrente do DSTATCOM fase A, com a técnica RVNL desabilitada.....	117
Figura 77 – Tensão no PCC com compensação de reativos, e corrente do DSTATCOM fase A, com a técnica RVNL habilitada.	117
Figura 78 – Tensão no PCC com compensação de reativos, e corrente do DSTATCOM fase A, com e sem a técnica RVNL.....	118
Figura 79 – Zoom, na tensão do PCC com compensação de reativos, e corrente do DSTATCOM fase A, com e sem a técnica RVNL.	119
Figura 80 – Espectro harmônico da tensão no PCC, fase C, com e sem a técnica RVNL. ...	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação da ANEEL para variação de tensão de curta duração (VTCD).....	31
Tabela 2 – Faixa de tensão para sistemas em 220 V de fase	34
Tabela 3 – Principais características de potência do conversor.....	46
Tabela 4 – Parâmetros do sistema simulado com compensação de reativos.....	63
Tabela 5 – Parâmetros do DSTATCOM e da rede artificial.	76
Tabela 6 – Distorção Harmônica Total, com e sem a técnica RVNL.	119
Tabela 7 – Níveis de referência para distorção harmônica individual de tensão em porcentagem da fundamental.	120

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abrev/Siglas	Descrição
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ADC	<i>Analog-Digital Converter</i>
c.a.	Corrente Alternada.
c.c.	Corrente Contínua
DHT	Distorção Harmônica Total
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
IEEE	<i>Institute of Electric and Electronic Engineers</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
ITIC	<i>Information Technology Industry Council</i>
MAC	<i>Multiply-Accumulate</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema
PCC	Ponto de Conexão Comum
PCI	Placa de Circuito Impresso
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
PLL	<i>Phase-Locked Loop</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
RMS	<i>Root Mean Square</i> , valor eficaz
RVNL	Resistência Virtual Não Linear
SMD	<i>Surface Mount Device</i>
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
THT	<i>Through Hole Technology</i>
VSI	<i>Voltage Source Inverter</i>
VTCD	Variação de Tensão de Curta Duração
VTLD	Variação de Tensão de Longa Duração

LISTA DE SÍMBOLOS

Descrição	Símbolo
Amplitude da tensão imposta ao PCC	E
Ângulo da tensão no PCC	θ
Ângulo defasagem da tensão da fonte para tensão PCC	δ
Bloco da técnica <i>anti-windup</i>	$aw(t)$
Capacitância do Filtro LC do DSTATCOM	C_f
Capacitância equivalente do barramento c.c.	C_o
Controlador de amortecimento ativo	$C_{aa}(s)$
Controlador de tensão de saída c.a.	$C_{vca}(s)$
Corrente instantânea de saída do DSTATCOM fase A	i_a
Corrente instantânea de saída do DSTATCOM fase B	i_b
Corrente instantânea de saída do DSTATCOM fase C	i_c
Corrente Limiar de operação em falta grave da técnica RVNL	I_{G0}
Corrente Limiar de operação normal da técnica RVNL	I_{G1}
Corrente máxima projetada da técnica RVNL para falta grave	I_{M0}
Corrente máxima projetada da técnica RVNL para operação normal	I_{M0}
Corrente no indutor do filtro de saída do DSTATCOM	I_{Lf}
Frequência angular da rede elétrica	ω_r
Frequência angular no PCC	ω_{PLL}
Frequência da rede	f_r
Frequência de comutação do DSTATCOM	f_s
Ganho constante proporcional à resistência virtual	k_{rv}
Ganho do <i>anti-windup</i>	k_t
Ganho do modulador PWM	k_{PWM}
Ganho do sensor de corrente de saída	k_{si}
Ganho do sensor de tensão de saída	k_{st}
Ganho dos sensores de tensão do barramento c.c.	k_{svo}
Impedância da rede entre a fonte alimentadora e o DSTATCOM	Z_r
Indutância do filtro LC do DSTATCOM	L_f
Ondulação de corrente no indutor	ΔI_L
Parcela indutiva da impedância da linha entre fonte e DSTATCOM	L_r

Parcela resistiva da impedância da linha entre fonte e DSTATCOM	R_r
Potência ativa consumida pela carga	P_o
Potência ativa fornecida pela fonte alimentadora	P_r
Potência nominal do DSTATCOM	S_o
Potência reativa demandada pela carga	Q_o
Potência reativa fornecida ou absorvida pelo DSTATCOM	Q_{inv}
Potência reativa fornecida pela fonte alimentadora	Q_r
Saturador da técnica RVNL	Sat
Sinal controle define IG1 ou IG0 da fase A	lim_a
Sinal controle define IG1 ou IG0 da fase B	lim_b
Sinal controle define IG1 ou IG0 da fase C	lim_c
Sinal da tensão diferencia do barramento c.c.	v_d
Sinal da tensão total do barramento c.c.	v_o
Sinal de controle do controlador de tensão c.a. com <i>anti-windup</i>	$comp_b$
Sinal de controle do controlador de tensão c.a. sem <i>anti-windup</i>	$comp_a$
Sinal de entrada do controlador de tensão c.a. com <i>anti-windup</i>	$erro_{vb}$
Sinal de entrada do controlador de tensão c.a. sem <i>anti-windup</i>	$erro_{va}$
Sinal de controle de referência da tensão de saída	v_{ref}
Sinal de controle de referência da tensão de saída da fase A	$v_{a,ref}$
Sinal de controle de referência da tensão de saída da fase A c/ RVNL	$v_{a,ref}$
Sinal de controle de referência da tensão de saída da fase B	$v_{b,ref}$
Sinal de controle de referência da tensão de saída da fase B c/ RVNL	$v_{b,ref}$
Sinal de controle de referência da tensão de saída da fase C	$v_{c,ref}$
Sinal de controle de referência da tensão de saída da fase C c/ RVNL	$v_{c,ref}$
Sinal de controle da tensão diferencia do barramento c.c	E_{cc}
Sinal de controle proporcional a resistência virtual não linear	v_{rvnl}
Sinal de corrente saturada de saída do DSTATCOM – técnica RVNL	$i_{a,lim}$
Sinal de diferença entre as correntes subtraídas i_a e $i_{a,dif}$ RVNL	$i_{a,dif}$
Sinal de referência da tensão total do barramento c.c.	v_o
Sinal de referência para a tensão diferencia do barramento c.c.	v_d

Sinal de saída da malha do <i>anti-windup</i>	<i>anti</i> $-windup_{vb}$
Sinal de saída do controlador de tensão c.a.	$u(t)$
Sinal desabilita PWM	$Bloq_{PWM} = 1$
Sinal habilita PWM	$Bloq_{PWM} = 0$
Sinal saturado da saída do controlador de tensão c.a.	$v(t)$
Tensão de pico a pico nominal de fase da rede	V_{pk-pk}
Tensão eficaz da fonte alimentadora	V_r
Tensão eficaz em pu no PCC da fase A	$v_{a,rms}$
Tensão eficaz no PCC imposta pelo DSTATCOM	V_{PCC}
Tensão instantânea de saída do DSTATCOM fase A	v_a
Tensão instantânea de saída do DSTATCOM fase B	v_b
Tensão instantânea de saída do DSTATCOM fase C	v_c
Tensão total do barramento c.c.	V_o

Símbolos usados para referenciar elementos de circuitos

Símbolo	Descrição	Unidade
<i>C</i>	Capacitor	F
<i>D</i>	Diodo	
<i>L</i>	Indutor	H
<i>R</i>	Resistor	Ω
<i>Q</i>	Interruptor	

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	27
1.1	PROBLEMAS DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA.....	27
1.1.1	Elevação, Afundamento e Interrupção de Tensão	28
1.1.2	Transitórios de Tensão Impulsivos e Oscilatórios.....	31
1.2	CURVA ITIC	33
1.3	ADEQUAÇÃO DA TENSÃO DE FORNECIMENTO	34
1.4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DOS DSTATCOMS	35
1.5	OBJETIVO E SOLUÇÃO PROPOSTA.....	37
1.6	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	38
1.7	ARTIGO PUBLICADO EM CONGRESSO	39
2	ANÁLISE DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO COM O DSTATCOM	41
2.1	TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA ENTRE A REDE E O CONVERSOR	41
2.2	RESUMO DO CAPÍTULO.....	44
3	CIRCUITO DE POTÊNCIA E CONTROLE DO DSTATCOM.....	45
3.1	ESTRUTURA DE POTÊNCIA	45
3.2	ESTRUTURA DE CONTROLE.....	46
3.3	RESUMO DO CAPÍTULO.....	48
4	TÉCNICA DE RESISTÊNCIA VIRTUAL NÃO LINEAR	49
4.1	ASPECTOS TEÓRICOS DA TÉCNICA RVNL	49
4.2	VARIAÇÃO DINÂMICA DOS LIMITES DO SATURADOR	52
4.3	ESTADOS DE OPERAÇÃO DURANTE DISTÚRBIOS DA REDE ELÉTRICA.....	52
4.4	RESUMO DO CAPÍTULO.....	54
5	IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA DA TÉCNICA RVNL.....	55
5.1	PROJETO DA CIRCUITO ELETRÔNICO COM A TÉCNICA RVNL.....	55
5.2	PROJETO DA FONTE DE TENSÃO REGULÁVEL.....	57
5.3	PROJETO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO	58
5.4	RESUMO DO CAPÍTULO.....	59
6	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	61
6.1	CIRCUITOS DE POTÊNCIA.....	61
6.2	CIRCUITO DE CONTROLE	62
6.3	ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE SIMULAÇÃO	63
6.4	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.....	64
6.4.1	Atuação da Técnica RVNL para a Condição de Elevação de Tensão no PCC	64
6.4.2	Atuação da Técnica RVNL para a Condição de Afundamento de Tensão no PCC de 0,72 pu	65
6.4.3	Atuação da Técnica RVNL para a Condição de Afundamento de Tensão no PCC de 0,43 pu	66
6.4.4	Atuação da Técnica RVNL para a Condição de Interrupção de Tensão no PCC ..	67
6.4.5	Atuação da Técnica RVNL para a Condição de Curto-Circuito Trifásico no PCC	68
6.4.6	Atuação da Técnica RVNL para a Condição de Interrupção Monofásica de Curta Duração	69
6.5	RESUMO DO CAPÍTULO.....	70

7	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	71
7.1	SISTEMA IMPLEMENTADO	71
7.1.1	Interface de Sinais	72
7.1.2	<i>Daughter Board</i> TMDSCNCD28335	73
7.1.3	Conversor de Sinal Digital para Analógico	74
7.1.4	Técnica RVNL	74
7.1.5	Controladores e Moduladores	74
7.1.6	Circuito de Proteção	74
7.1.7	Estrutura de Potência	75
7.1.8	Transdutores de Tensão e Corrente	75
7.1.9	Filtro LC	75
7.2	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	76
7.2.1	Operando “COM” e “SEM” Compensação de Reativos, Analisando o Transiente	77
7.2.2	Técnica de Proteção de Sobrecorrente Desabilitando o DSTATCOM	79
7.2.3	Técnica de Proteção de Sobrecorrente RVNL Não Desabilitando o DSTATCOM	80
7.2.4	Operando em Carga Pesada Sem a Técnica RVNL	81
7.2.5	Operando em Carga Pesada Com a Técnica RVNL	82
7.2.6	Análise de Transiente da Tensão e Corrente ao Habilitar a Técnica RVNL	83
7.2.7	Análise de Transiente da Tensão e Corrente ao Desabilitar a Técnica RVNL	84
7.2.8	Análise do Sinal de Controle Compensando a Tensão no PCC com a Técnica RVNL “Desabilitada”	85
7.2.9	Análise do Sinal de Controle Compensando a Tensão no PCC com a Técnica RVNL “Habilitada”	86
7.2.10	Operando em Condição de Afundamento de Tensão da Rede	88
7.2.11	Análise dos Sinais de Potência ao Impor Referência de Corrente 0 A para o DSTATCOM	91
7.2.12	Análise dos Sinais de Controle ao Impor Referência de Corrente 0 A para o DSTATCOM	93
7.2.13	Análise da Técnica RVNL na Pré-Carga do Barramento C.C.	95
7.3	RESUMO DO CAPÍTULO	97
8	CONCLUSÕES GERAIS	98
	REFERÊNCIAS	100
APÊNDICE	A – TÉCNICA ANTI-WINDUP	105
APÊNDICE	B – TESTES PARCIAIS DO CARTÃO ELETRÔNICO COM A TÉCNICA RVNL	109
APÊNDICE	C – COMERCIALIZAÇÃO DE AMPLIFICADORES OPERACIONAIS FALSIFICADOS	113
APÊNDICE	D – ANÁLISE DOS TRANSITÓRIOS NA VARIAÇÃO DOS LIMITES DE SATURAÇÃO	115
APÊNDICE	E – ANÁLISE DA DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL COM A ATUALIZAÇÃO DA TÉCNICA RVNL	117

1 INTRODUÇÃO

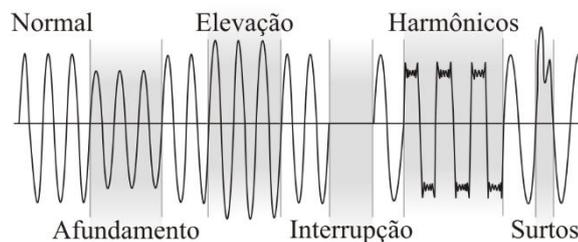
As redes de distribuição estão sujeitas a distúrbios elétricos, o que compromete a qualidade de energia elétrica (QEE). Segundo a norma IEEE Std. 1159 (IEEE, 2009), os distúrbios elétricos são separados em sete classes: transitórios, variação do valor eficaz de curta duração, variação do valor eficaz de longa duração, desequilíbrio, distorção da forma de onda, flutuação de tensão e variação de frequência. Os compensadores estáticos de reativos são especialmente adotados pelas companhias distribuidoras como soluções temporárias para regulação da tensão eficaz, adequando os níveis da QEE.

Os compensadores estáticos de reativos controlados em tensão estão suscetíveis aos distúrbios, assim, é possível que estes venham a processar correntes elevadas, podendo levar a seu desligamento ou até mesmo torná-los inoperantes. Nesse contexto, é proposto neste trabalho um novo conceito de Resistência Virtual Não Linear aplicado a um DSTATCOM controlado em tensão, possibilitando sua operação durante as condições de distúrbios descritas.

1.1 PROBLEMAS DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Os distúrbios elétricos de tensão mais comuns e também mais enfrentados pelas concessionárias de energia, segundo (ANEEL, 2018), são afundamentos, elevações, interrupção, harmônicos e surtos, os quais são ilustrados na Figura 1:

Figura 1 – Distúrbios de tensão encontrados na rede elétrica.



Fonte: Baseado em (FRANCO, 2013).

Os distúrbios são variações temporárias do estado estacionário do sistema elétrico devido a qualquer tipo de falha de curta duração ou a mudança repentina como, por exemplo, operações de entrada e saída de grandes cargas, curto-circuito na rede, manutenção preventiva, descargas atmosféricas, energização de transformadores, atuação de sistemas de proteção ou quedas de linha de transmissão.

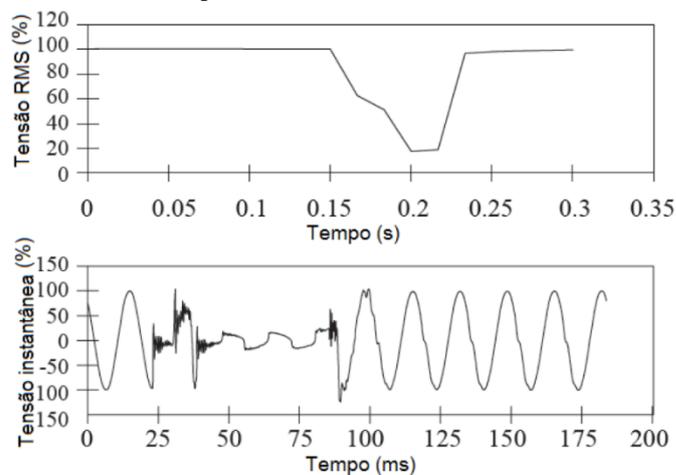
A seguir são apresentados os distúrbios de qualidade de energia que acometem o sistema elétrico, sendo classificados em variações de tensão de longa duração (VTLD's) e variações de tensão de curta duração (VTCD's), que podem ser instantâneas, momentâneas ou temporárias. São abordados os três eventos de variação de tensão: elevação de tensão (*Voltage Swell*), afundamento de tensão (*Voltage Sag*) e interrupção, como também, os transitórios de tensão impulsivos e oscilatórios. As variações de tensão são descritas na norma IEC 61000-4-30 (IEC, 2015).

1.1.1 Elevação, Afundamento e Interrupção de Tensão

A norma internacional IEE Std 1195 (IEEE, 2009) define uma elevação de tensão como uma elevação entre 10% e 80% do valor eficaz da tensão na frequência nominal, com duração de meio ciclo a um minuto. Já um afundamento de tensão é definido como uma redução de 10% a 90% do valor eficaz da tensão na frequência nominal, com duração de meio ciclo a um minuto.

Os efeitos de um afundamento de tensão geralmente são mais visíveis do que os de elevação de tensão. Um afundamento de tensão de duração maior que meio ciclo é geralmente visto como o piscar de iluminação. Equipamentos mais sensíveis, como computadores, podem travar ou mesmo perder informações armazenadas. Os afundamentos estão associados geralmente à falha do sistema, como curto circuito entre fases e neutro, conforme Figura 2, como chaveamento de grandes cargas, por exemplo, o acionamento de grandes motores, conforme Figura 3, ou ainda por falta de compensação de reativos.

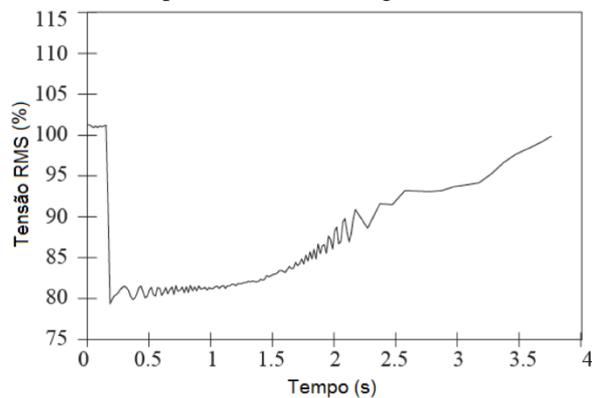
Figura 2 – Afundamento de tensão causado por curto entre fase e neutro



Fonte: Norma 1159 (IEEE, 2009)

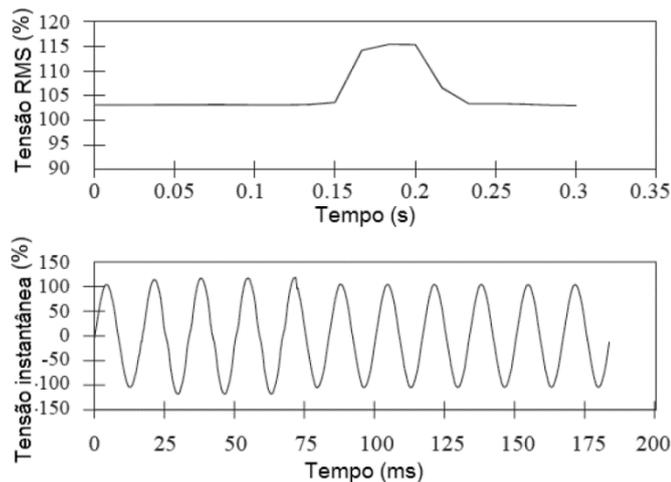
Já os efeitos de uma elevação de tensão são mais danosos aos equipamentos, visto que sobretensões podem danificar permanentemente os aparelhos, causando maiores riscos às pessoas e aos equipamentos. Este fenômeno está associado a faltas no sistema elétrico, como a falta fase-terra, que pode gerar um acréscimo de tensão nas demais fases, e também às manobras no sistema elétrico, como a remoção de grandes cargas, a desenergização de bancos de capacitores devido à parada de compensação de reativos, ou curto-circuito entre fase e neutro (Figura 4) IEEE 1159 (IEEE, 2009); e 61000-4,30 (IEC, 2015).

Figura 3 – Afundamento de tensão causado por acionamento de grandes motores.



Fonte: Norma 1159 (IEEE, 2009)

Figura 4 – Sobretensão causada por curto entre fase e neutro.

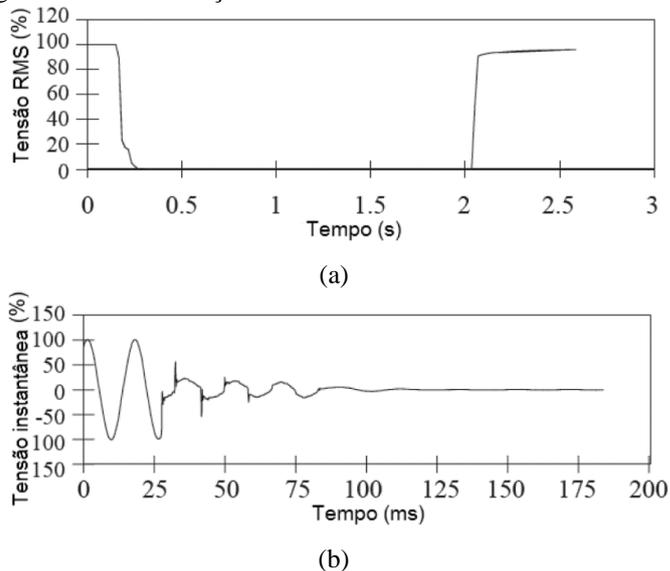


Fonte: Norma 1159 (IEEE, 2009)

A interrupção pode ser entendida como um caso muito severo de afundamento de tensão. Trata-se da redução da tensão do sistema a um nível muito inferior ao da tensão nominal, a qual fica abaixo do limite de interrupção. O limite de interrupção pode ser, por exemplo, de 10% da tensão nominal, embora a IEC 61000-4-30 considere um intervalo de até 5%.

As interrupções podem ser consequências de falhas no sistema elétrico, falhas em equipamentos ou devido ao mau funcionamento de sistemas de controle da geração ou distribuição de energia elétrica. A duração da interrupção depende da resposta do sistema de proteção que identifica a falha, pois se a interrupção é precedida por uma falta do sistema, um afundamento persistirá até que algum sistema de proteção atue. Na Figura 5 (a) é mostrada uma interrupção com reinicialização. Após a interrupção, se a tensão da rede não cair a zero instantaneamente, pode haver uma tensão remanescente devido ao efeito da força contra eletromotriz proveniente de motores de indução no sistema interrompido, conforme ilustrado na Figura 5 (b).

Figura 5 – Interrupção seguida de reinicialização



Fonte: Norma IEE (IEEE, 2009)

A ANEEL classifica as variações de tensão de uma forma diferente da IEEE, o Módulo 8 do PRODIST estabelece limites e valores de referência para adequação da qualidade de energia fornecida aos seus consumidores, o documento descreve que a diferença entre uma VTCD e uma VTLD é a duração do distúrbio, quando a primeira é inferior a três minutos e a segunda superior a três minutos (ANEEL, 2018). A classificação da ANEEL para uma variação de tensão de curta duração é apresentada na Tabela 1.

A interrupção de uma fase pode ser considerada como interrupção para um consumidor monofásico, mas não ser considerada uma interrupção para um consumidor polifásico. Quando relacionadas com variações de tensão de longa duração, as interrupções são consideradas pela norma IEEE 1159 como de longa duração, quando são superiores a 1 minuto, enquanto que o módulo 8 do PRODIST considera como de longa duração a partir de 3 minutos.

Tabela 1 – Classificação da ANEEL para variação de tensão de curta duração (VTCD).

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência.
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,10 pu
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,10 e inferior a 0,90 pu
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,10 pu
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,10 pu
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,10 e inferior a 0,90 pu
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,10 pu

Fonte: (ANEEL, 2018)

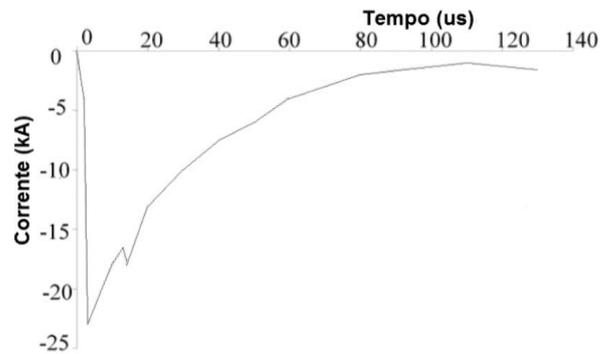
1.1.2 Transitórios de Tensão Impulsivos e Oscilatórios

Os transitórios são distúrbios temporários por natureza e correspondem a uma mudança nos valores de tensão e corrente. São divididos em transitórios impulsivos e transitórios oscilatórios.

Os transitórios impulsivos são geralmente causados por descargas atmosféricas, assim, repentinos e de curta duração. Esse evento pode gerar problemas como a indução de altas tensões nos condutores fase (quando correntes impulsivas circulam nesses condutores em direção ao aterramento) e a elevação do potencial do condutor terra em vários quilovolts. Na Figura 6 é mostrado o transiente de uma corrente impulsiva causada por uma descarga atmosférica.

Os transitórios oscilatórios são variações repentinas nos valores instantâneos de tensão e/ou corrente, em que a polaridade pode mudar rapidamente, sem, no entanto, alterar a frequência fundamental da rede.

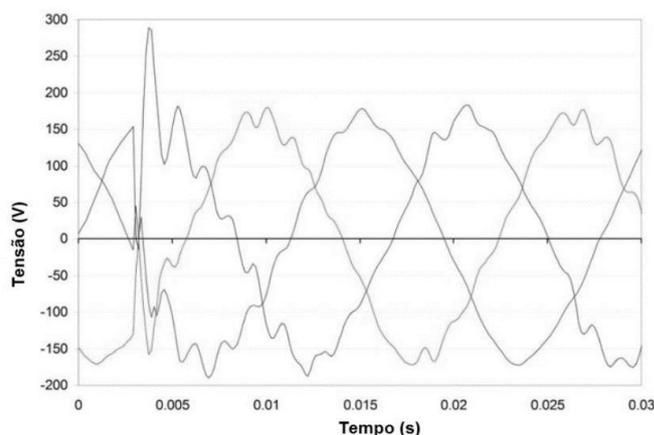
Figura 6 – Transiente de corrente impulsiva causada por descarga atmosférica



Fonte: Norma IEE 1159 (IEEE, 2009)

Os transitórios oscilatórios são divididos em alta, média e baixa frequência. Os transitórios oscilatórios de alta frequência são, na maioria das vezes, consequência de algum tipo de chaveamento ou resposta a um transiente impulsivo. Os transitórios oscilatórios de média frequência podem se originar quando há operações em linhas de transmissão e cabos da rede, na energização de transformadores e banco de capacitores ou também como resposta a transitórios impulsivos. O efeito da energização de banco de capacitores é mais intenso quando a energização está próxima de outros bancos já energizados. Os transitórios oscilatórios de baixa frequência são causados, principalmente por energização de banco de capacitores quando a frequência base está entre 300 Hz e 900 Hz, com picos de magnitude que podem ser superiores a 2 pu (200% do valor nominal), conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 – Transiente de tensão causado por chaveamento de banco de capacitores.



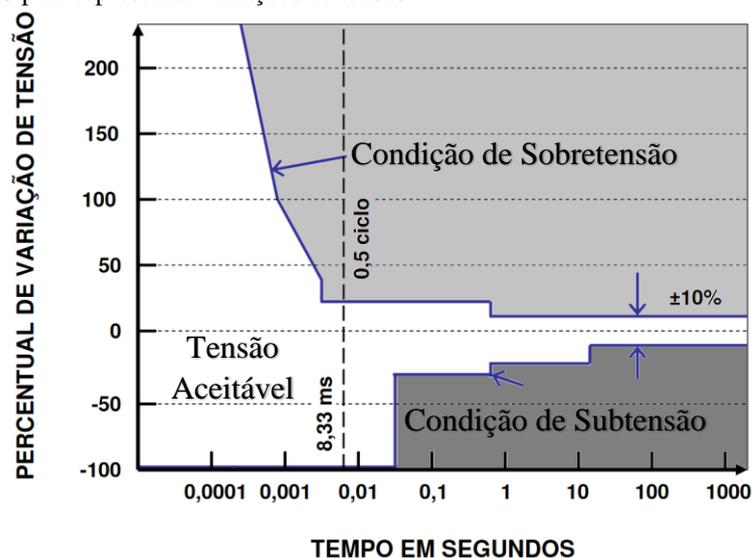
Fonte: Norma IEE 1159 (IEEE, 2009)

1.2 CURVA ITIC

O Comitê Técnico 3 do ITIC (*Information Technology Industry Council - ITIC*), formalmente conhecida por CBEMA (*Computer & Business Equipment Manufacturer's Association*), publicou em 1995, a curva ITIC, que representa os eventos de variação de tensão. A curva ITIC é um gráfico cujo eixo vertical é a porcentagem de tensão nominal aplicada a um equipamento eletrônico e o eixo horizontal é o tempo que a tensão é aplicada, em escala logarítmica. Neste gráfico está delimitada a porcentagem de variação da tensão de entrada de equipamentos eletrônicos sensíveis, a qual pode ser tolerada sem nenhuma alteração do seu funcionamento apropriado. A curva ITIC foi originalmente apresentada na norma IEEE 466 (IEEE, 1995), e revisada em 2000.

Na curva ITIC mostrada na Figura 8 pode-se observar três regiões bem definidas: a região “tensão aceitável”, em branco, onde o equipamento sensível deverá manter seu funcionamento normal; a região “sem dano”, localizada abaixo da linha denominada condição de subtensão, em que, embora possa haver interrupção do funcionamento normal do equipamento, danos permanentes não ocorrerão; e a região “proibida” localizada acima da linha denominada de condição de sobretensão, em que, além de alterar o funcionamento do equipamento, existe risco de danos permanentes.

Figura 8 – Curva ITIC para representar variações de tensão.



Fonte: Baseado em IEEE 466 (IEEE, 1995)

1.3 ADEQUAÇÃO DA TENSÃO DE FORNECIMENTO

A ANEEL, através do módulo 8 do PRODIST, determina os valores para as faixas de fornecimento de tensão em adequada, precária e crítica (ANEEL, 2018). A Tabela 2 apresenta os valores de Tensão de Leitura (TL) para os sistemas atendidos em 380/220 V.

Tabela 2 – Faixa de tensão para sistemas em 220 V de fase

Tensão de Atendimento	Faixa de Variação de Tensão de Leitura
Adequada	$201 \text{ V} \leq \text{TL} \leq 231 \text{ V}$ ($0,914 \text{ pu} \leq \text{TL} \leq 1,05 \text{ pu}$)
Precária	$189 \text{ V} \leq \text{TL} < 201 \text{ V}$ ou $231 \text{ V} < \text{TL} \leq 233 \text{ V}$ ($0,859 \text{ pu} \leq \text{TL} < 0,914 \text{ pu}$ ou $1,05 \text{ pu} < \text{TL} \leq 1,059 \text{ pu}$)
Crítica	$\text{TL} < 189 \text{ V}$ ou $\text{TL} > 233 \text{ V}$ ($\text{TL} < 0,859$ ou $\text{TL} > 1,059 \text{ pu}$)

Fonte: Adaptado IEEE 466 (IEEE, 1995)

A tensão de fornecimento é classificada de acordo com os valores limites adequados, precários e críticos. Para ser considerado um problema de qualidade de energia, a tensão de fornecimento ao consumidor deve possuir mais de 3% das leituras na faixa precária e mais de 0,5% na faixa crítica. Quando for detectada uma classificação fora da faixa adequada, a concessionária de energia responsável pelo fornecimento a esse consumidor tem 90 dias para solucionar o problema, caso a transgressão esteja dentro da faixa precária, e somente 15 dias caso esteja dentro da faixa crítica. A distribuidora de energia elétrica precisa manter a tensão em regime permanente dentro dos padrões adequados de fornecimento, para que não esteja passível de multas e ressarcimento aos consumidores afetados.

Para adequar a qualidade de tensão, soluções como melhoria de infraestrutura, inserção de elementos passivos na rede e adequação de TAP em transformadores são os procedimentos normais, porém, requerem um extenso planejamento por parte da concessionária, que poderá demorar mais que o prazo permitido pela ANEEL, incrementando as despesas da distribuidora por conta dos ressarcimentos.

Para a manutenção do nível de tensão em um período temporário, diversos equipamentos e dispositivos vêm sendo estudados e utilizados. Um desses equipamentos é o Compensador Estático de Reativos para redes de distribuição (*Distribution Static Compensator* – DSTATCOM), que atua na circulação da energia reativa no sistema para manter o valor eficaz da tensão regulada.

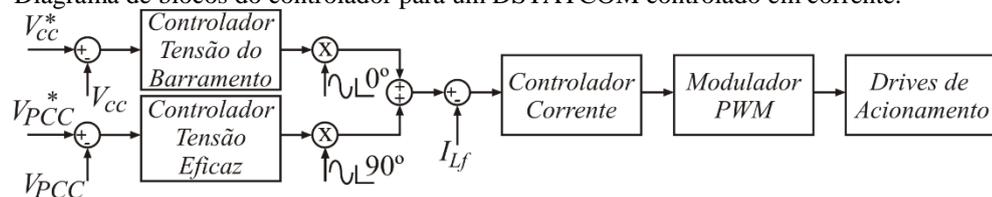
1.4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DOS DSTATCOMS

O DSTATCOM pode ser utilizado para solucionar os problemas de qualidade de energia recém-citados. A solução envolve conectar o DSTATCOM em derivação com ponto de conexão comum (PCC) e controlar diretamente a magnitude, o ângulo de fase e a frequência da tensão do PCC (BORRÉ, XAVIER, *et al.*, 2006).

O DSTATCOM possui diversos modos de controle que são divididos em duas estratégias principais: o controle em corrente e o controle em tensão. A correção do fator de potência, a filtragem ativa de componentes harmônicas e a regulação da tensão eficaz no PCC são algumas das técnicas de controle em corrente, encontradas na literatura (DA CUNHA, 2015), (ZIMANN, 2016).

Em (SINGH, ADYA, *et al.*, 2006) e (AGGARWAL, GUPTA, *et al.*, 2010) é proposto o controle em corrente, sendo o diagrama de blocos apresentado na Figura 9. A técnica baseia-se na composição de duas componentes de referência para a corrente, uma em fase com a tensão no PCC e a outra em quadratura, ou seja, defasada em 90 graus. A amplitude da primeira componente é determinada pelo controle sobre a tensão total nos capacitores do barramento do conversor. A amplitude da segunda componente é determinada pelo controle do valor eficaz da tensão no PCC. A corrente de referência imposta ao controlador de corrente é, então, dada pela soma das duas componentes. A corrente resultante dessa operação é uma corrente senoidal na frequência da tensão da rede que apresenta uma defasagem em torno de 90 graus, pois a componente em fase apenas supre as perdas do DSTATCOM.

Figura 9 – Diagrama de blocos do controlador para um DSTATCOM controlado em corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

No modo de controle de corrente encontra-se uma característica importante que é a limitação da corrente de saída efetuada de forma natural, uma vez que o controle impõe uma referência com máximo valor admitido. Isso deixa o conversor imune aos efeitos nocivos de uma situação de curto-circuito, onde elevadas correntes circulam pelo sistema. Entretanto, este modo de controle não atua sobre os distúrbios de tensão encontrados em situações de funcionamento anormal do sistema, como transitórios de tensão, surtos, afundamento e elevação de tensão (HOCK JR., 2015).

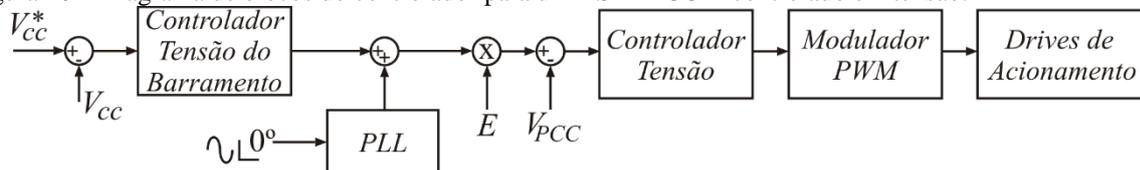
Em da Cunha (DA CUNHA, 2015) é proposta a regulação da tensão eficaz e a mitigação das harmônicas da tensão no PCC por meio de controle em cascata. São utilizadas duas malhas de controle, uma malha interna responsável pelo controle de corrente e uma malha externa responsável pelo controle da tensão eficaz. O tempo necessário para restauração da amplitude de tensão do PCC é lento, da ordem de 2 ou mais ciclos de rede.

Outras técnicas propostas para eliminação de harmônicas são baseadas na geração de referências através de lógica *fuzzy* (ARYA e SINGH, 2013) e redes neurais (PRAJAPATI e SHARMA, 2014). Em ambas as técnicas a implementação é complexa e, no quesito regulação da tensão com baixa distorção, apresentam desempenho inferior quando comparados ao modo de controle de tensão (HOCK JR., 2015).

Em Elnady & Salama (ELNADY e SALAMA, 2005) é proposto o uso do filtro de *Kalman* para detecção e atuação em uma condição de afundamento de tensão. Apesar da técnica de controle avançada, os resultados apresentam um tempo de resposta lento quando a tensão é reestabelecida. Esse efeito provoca uma elevação na tensão de fornecimento, podendo ser danoso ao conversor e aos outros circuitos conectados à rede, como cargas e alimentadores.

Em (KUMAR e MISHRA, 2013) o DSTATCOM opera em modo de controle de tensão, conforme apresentado na Figura 10. Essa técnica de controle baseia-se na composição de duas componentes de referência para a tensão, sendo estas a amplitude da tensão desejada no PCC e a fase do sinal senoidal. Ao impor a tensão, o conversor atua na circulação da corrente reativa no sistema e mantém a tensão instantânea no PCC regulado. Deste modo, o DSTATCOM é visto pelo sistema como um caminho de baixa impedância, o que resulta no desvio das componentes harmônicas da corrente da fonte, deixando o sistema livre de distorções.

Figura 10 – Diagrama de blocos do controlador para um DSTATCOM controlado em tensão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

No modo de controle de tensão, o DSTATCOM impõe uma tensão controlada no PCC, protegendo as cargas críticas dos distúrbios de tensão. No entanto, a corrente processada pelo DSTATCOM é consequência do sistema ao qual está conectado, assim, é possível que o mesmo venha a processar correntes elevadas durante os distúrbios, podendo torná-lo inoperante.

Em (ENDERLE, 2012) o autor emprega o controle em tensão, sendo que a proteção de corrente do DSTATCOM é efetuada por meio de seu desligamento, quando detectado um valor

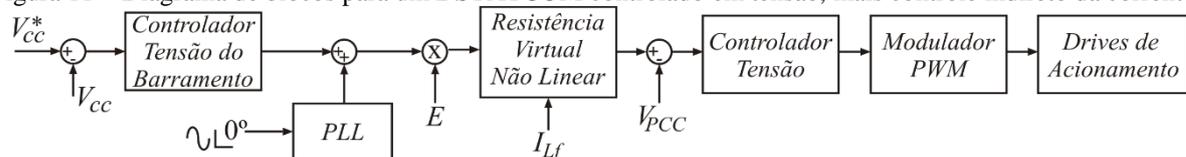
elevado de corrente. Contudo, esta solução não visa proteger as cargas sensíveis conectadas ao PCC. Em Li & Zhang (LI e ZHANG, 2017) é proposto o controle indireto de corrente de curto-circuito variando o índice de modulação quando detectada uma variação brusca da tensão do barramento c.c. e do ângulo δ . Tal técnica impõe uma variação permanente nos sinais de controle, o que não é desejado, pois afeta a dinâmica das malhas de controle. Em Kumar & Mishra (KUMAR e MISHRA, 2012) é proposta a variação dos modos de controle de tensão para o modo de controle de corrente após receber um sinal externo de falta. Através dos resultados apresentados, foram observados que podem ser gerados picos de corrente e surtos de tensão durante a transição dos modos de controle, gerando instabilidade para o controle.

O sistema de controle adotado neste trabalho é o controle de tensão, pois apresenta melhor característica dinâmica de regulação de tensão. Em DSTATCOMs controlados em tensão, a tensão do PCC é a tensão de saída do conversor e o DSTATCOM, assim, se não exceder sua máxima potência de projeto, ele pode manter o PCC regulado para distúrbio na rede ou desequilíbrio nas cargas. A forma de onda da tensão do PCC, possuirá um formato senoidal com baixa distorção harmônica, mesmo com a presença de cargas não lineares. Com isso, o conversor provê melhora na qualidade da forma de onda de forma natural, sem a necessidade de inclusão de uma malha de controle específica.

1.5 OBJETIVO E SOLUÇÃO PROPOSTA

Tendo em vista as características das técnicas encontradas na literatura, este trabalho propõe a utilização do conceito de resistência virtual para efetuar o controle indireto da corrente quando utilizado o modo de controle de tensão em DSTATCOMs. Por possuir características não lineares, devido à operação apenas em condições previamente definidas, a técnica aqui proposta é denominada de Resistência Virtual Não Linear, sendo abreviada no decorrer do trabalho pelas siglas RVNL. A Figura 11 reapresenta o diagrama de blocos do controle de tensão, e complementa com a técnica RVNL.

Figura 11 – Diagrama de blocos para um DSTATCOM controlado em tensão, mais controle indireto da corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

O objetivo do estudo é:

- Desenvolver uma técnica que identifique uma condição de falta e atue de forma a limitar a corrente de saída para DSTATCOMs controlados em tensão.
- Possuir rápida resposta dinâmica na identificação e atuação da proteção, controlando a corrente antes que a proteção de *hardware* atue.
- Permanecer operante durante a condição de falta, protegendo o dispositivo e, se possível, as cargas próximas conectadas.
- Limitar a corrente de saída próximo a 0A durante o afundamento de tensão severo, mantendo por um maior tempo a tensão do barramento c.c.
- Não interferir na dinâmica dos controladores do DSTATCOM durante a condição normal de operação.
- Implementar a técnica nas malhas de controle de forma simples, sem gerar a necessidade de reprojeto dos controladores de tensão.
- Definir uma estratégia que altere os limites de máxima corrente de operação, e habilitar/desabilitar o PWM, de acordo com a condição de operação.

1.6 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esse trabalho é dividido da seguinte forma:

No Capítulo 2 são apresentadas as causas da diminuição da tensão eficaz na rede, como também são apresentados os aspectos teóricos da transferência de potência entre a rede e o conversor, demonstrando como o DSTATCOM eleva a tensão eficaz no PCC. As técnicas de compensação com energia reativa são mostradas e equacionadas, sendo obtidos os modelos matemáticos equivalentes para o sistema.

No Capítulo 3 é apresentada a estrutura de controle e potência do compensador de reativos utilizado para validar a técnica de limitação de corrente aqui proposta.

No Capítulo 4 é descrita a técnica da Resistência Virtual Não Linear, são apresentados os aspectos teóricos com uma descrição detalhada de sua operação, suas equações matemáticas para determinação das constantes. Uma lógica complementar é apresentada para variação dinâmica dos limites do saturador, que define a máxima corrente de operação do conversor.

No Capítulo 5 é apresentado, de forma detalhada, o projeto dos circuitos eletrônicos que contemplam a técnica RVNL, como também, o projeto de *layout* da placa de circuito impresso.

No Capítulo 6 são apresentados os circuitos de controle e potência do DSTATCOM controlado em tensão, utilizados para validação da técnica RVNL, via simulação numérica. Os resultados das simulações são apresentados para diversas condições de distúrbios da rede elétrica, tais como, surto de tensão, elevação de tensão, afundamento de tensão, interrupção de tensão e curto-circuito trifásico na saída do DSTATCOM.

No Capítulo 7 são apresentados os resultados experimentais com a implementação da técnica RVNL no protótipo DSTATCOM. Sendo também apresentados os componentes necessários para a montagem do protótipo, suas conexões no DSTATCOM, principais circuitos e respectivas funções.

O trabalho se encerra apresentando as principais conclusões, analisando o projeto e o desempenho da técnica de limitação de corrente proposta. Na sequência são discutidas as considerações finais do autor e algumas sugestões para o prosseguimento da pesquisa da técnica de limitação de corrente para o compensador de reativos.

1.7 ARTIGO PUBLICADO EM CONGRESSO

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foi efetuada a apresentação e a publicação de um artigo no Congresso Brasileiro de Automática (CBA) 2018, em João Pessoa, Paraíba.

MAFFEZZOLLI, A. D; HOCK JR, R. T.; ZIMANN, F. J.; BATSCHAUER, A. L, **Técnica de Limitação de Corrente por Meio da Resistência Virtual Não Linear Aplicado a um DSTATCOM Controlado em Tensão**. Congresso Brasileiro de Automática (CBA), João Pessoa, PB. 2018. (MAFFEZZOLLI, HOCK JR, *et al.*, 2018)

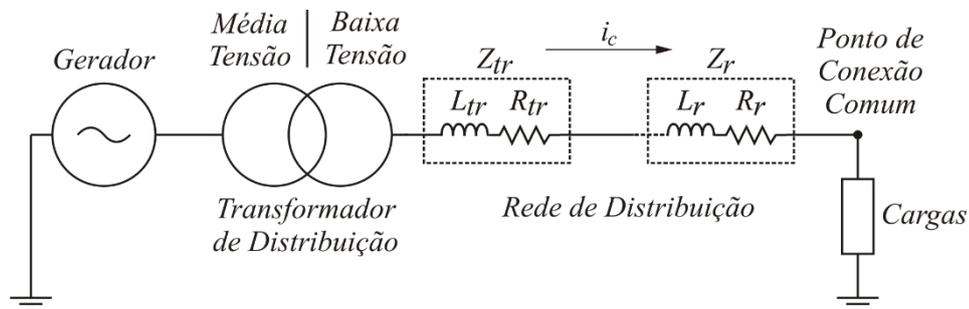
2 ANÁLISE DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO COM O DSTATCOM

Para desenvolver uma técnica de limitação de corrente para um DSTATCOM controlado em tensão, se faz necessário o entendimento sobre o fluxo de potência entre a rede e o conversor. Assim, neste capítulo é descrito o que provoca a diminuição da tensão eficaz da rede, como também são abordados os aspectos teóricos da transferência de potência entre a rede, o conversor e as cargas, permitindo que o DSTATCOM eleve a tensão eficaz no PCC. São apresentadas também, algumas das equações matemáticas que determinam o fluxo de potência entre a rede, o conversor e as cargas.

2.1 TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA ENTRE A REDE E O CONVERSOR

O sistema de distribuição convencional é composto por uma rede de média tensão fornecendo energia para vários alimentadores através de transformadores abaixadores. A Figura 12 apresenta um sistema de distribuição simples constituído de um gerador em média tensão, um transformador abaixador, cabos de distribuição, unidades consumidoras alimentadas pelo sistema.

Figura 12 – Sistema de Distribuição



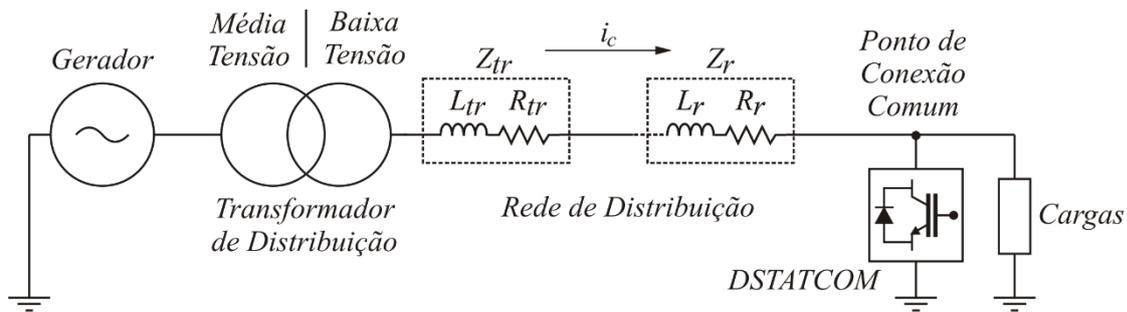
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A impedância do transformador (Z_{tr}) é composta por uma parcela resistiva (R_{tr}) e indutiva (L_{tr}) e a impedância dos cabos de distribuição (Z_r) também é composta por uma parcela resistiva (R_r) e indutiva (L_r). Como a impedância dos cabos é dependente do comprimento, quanto mais distante do transformador maior a impedância total até o ponto de conexão comum PCC.

As “Cargas” representam a impedância equivalente vista pelo sistema para todos os consumidores que estão ligadas a partir do PCC. As cargas demandam de elevadas potências, provocando um fluxo de corrente através do sistema de distribuição. A circulação da corrente

(i_c) através da impedância do transformador (Z_{tr}) e dos cabos de distribuição (Z_r) provocam uma diminuição no valor eficaz da tensão fornecida às cargas, a atenuação da tensão fica mais acentuada no trecho final de longas linhas. A conexão do DSTATCOM ao PCC, conforme mostra a Figura 13, permite elevar o valor eficaz da tensão no ponto de conexão comum.

Figura 13 – Conexão do DSTATCOM no sistema de distribuição.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Os compensadores estáticos de reativos são conversores que processam idealmente somente energia reativa com o intuito de reduzir a queda de tensão na parcela indutiva das redes de distribuição. Estes compensadores injetam correntes senoidais em quadratura com a tensão do PCC, emulando o efeito de reatâncias capacitivas ou indutivas. Com isso, é possível controlar o fluxo de potência reativa (SINGH, SAHA, *et al.*, 2009).

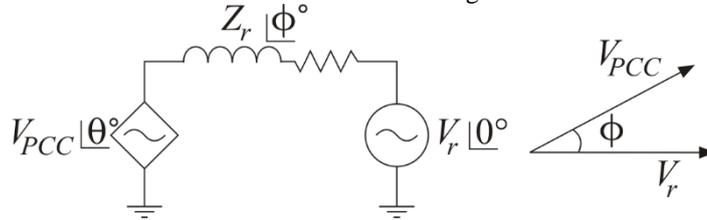
Um compensador de reativos em modo de controle de tensão é visto pelo sistema como uma fonte de tensão controlada. A transferência de potência entre duas fontes de tensão ocorre através da diferença entre as amplitudes e o ângulo das tensões de cada fonte. Nesse sistema, o fluxo de potência que haverá entre o alimentador e o DSTATCOM é função da amplitude e do ângulo da tensão imposta ao PCC. Durante uma condição de falta, em que os ângulos de fase e as amplitudes da tensão da rede são subitamente alterados, o DSTATCOM deverá impor a mesma variação para a tensão imposta ao PCC, possibilitando assim controlar o fluxo de potência entre a rede e o conversor.

Para a análise do fluxo de potência, é mostrada a Figura 14 onde o conversor e as cargas são substituídas por uma fonte ideal de tensão com um ângulo θ , denominado de V_{PCC} , o gerador e o transformador de distribuição são substituídos por uma fonte de tensão denominada de V_r com ângulo 0 e a impedância da linha de distribuição é representada por Z_r com ângulo ϕ . Isso pode ser feito porque o controle de tensão do conversor mantém a tensão do PCC regulada.

A potência ativa que flui entre a rede e o DSTATCOM é dada, majoritariamente, pela defasagem ϕ entre as tensões da rede e do PCC. Por outro lado, o fluxo de potência reativa é regido principalmente pelas amplitudes de V_r e de V_{PCC} . Com a imposição da amplitude da

tensão do PCC, o fluxo de potência reativa está definido e o DSTATCOM precisa ajustar o ângulo ϕ , por meio do controlador de tensão do barramento c.c., para drenar a potência ativa da rede necessária para suprir as perdas do DSTATCOM e manter a tensão do barramento c.c.

Figura 14 – Circuito equivalente do conversor conectado à rede e o diagrama fasorial das tensões.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

O fluxo de potência ativa e reativa fornecida pelo alimentador pode ser demonstrado por meio das relações de potência complexa e análise de circuitos, que podem ser expresso por:

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

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

Onde ϕ representa o ângulo da impedância da rede, Z_r o módulo da impedância da rede e θ o ângulo da tensão no PCC.

O balanço de energia ativa do DSTATCOM é dado, então, atribuindo um valor nulo para a potência ativa fornecida para a rede. Assim, pode-se escrever:

$$P_r + P_o = 0 \quad (3)$$

Onde P_o é a potência ativa consumida pela carga.

Substituindo (1) em (2), determina-se a equação que relaciona a potência de carga com o ângulo necessário para que o DSTATCOM não forneça ou absorva energia ativa.

$$\frac{V_r^2}{Z_r} \cdot \cos(\phi) - \frac{V_r \cdot V_{PCC}}{Z_r} \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\theta) + \frac{V_r \cdot V_{PCC}}{Z_r} \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(\theta) + P_o = 0 \quad (4)$$

Na equação (4) verifica-se que o ângulo de carga θ possui relação com a energia ativa demandada da carga. Para uma determinada demanda de energia ativa pela carga, há um ângulo de defasagem entre a tensão da rede e a tensão do PCC correspondente que satisfaz a equação.

O balanço de energia reativa, diferentemente do balanço de energia ativa, é influenciado diretamente pelo DSTATCOM e é escrito por:

$$Q_{inv} = Q_0 - Q_r \quad (5)$$

Onde Q_{inv} é a energia reativa fornecida ou absorvida pelo DSTATCOM e Q_0 a energia reativa demandada pela carga.

Substituindo a equação (2) na equação (5), determina-se a equação que quantifica a energia reativa que o DSTATCOM deve fornecer para manter o ângulo θ encontrado anteriormente.

$$Q_{inv} = Q_0 - \frac{V_r^2}{Z_r} \cdot \text{sen}(\phi) + \frac{V_r \cdot V_{PCC}}{Z_r} \cdot \text{sen}(\phi) \cdot \cos(\theta) + \frac{V_r \cdot V_{PCC}}{Z_r} \cdot \cos(\phi) \cdot \text{sen}(\theta) \quad (6)$$

A energia reativa fornecida pela rede elétrica também depende do ângulo θ , mas o ângulo é previamente determinado para cada ponto de operação do DSTATCOM. Com os valores do ângulo θ , é possível determinar a energia reativa fornecida ou absorvida pelo DSTATCOM nesses pontos de operação.

Com esses resultados é possível definir a potência do DSTATCOM, a qual é usualmente preferível que tenha capacidade de compensação inferior ao valor de potência nominal da rede de distribuição devido aos custos de aquisição do equipamento e também à capacidade do transformador, que pode ser ultrapassada com sobre compensação de reativos.

2.2 RESUMO DO CAPÍTULO

Nesse capítulo foram apresentadas os principais elementos que formam uma rede de distribuição, e descrito o que provoca a diminuição da tensão eficaz no ponto de conexão comum. Foram apresentados os circuitos equivalentes da rede de distribuição, seus parâmetros e a influência do compensador de reativos na rede. Fica compreendido que um compensador de reativos em modo de controle de tensão é visto pelo sistema como uma fonte de tensão controlada, que processa energia reativa e visa reduzir a queda de tensão na parcela indutiva das redes de distribuição. Estes compensadores injetam correntes senoidais em quadratura com a tensão do PCC, emulando o efeito de reatâncias capacitivas ou indutivas, controlando o fluxo de potência reativa. A técnica de controle baseia-se na composição de dois componentes de referência para a tensão, sendo estes a amplitude da tensão desejada no PCC e a fase do sinal senoidal. Logo, para limitar a corrente de saída para uma condição de distúrbio de tensão, a tensão sintetizada na saída do DSTATCOM ou as referências do controle devem possuir um formato similar ao distúrbio da tensão.

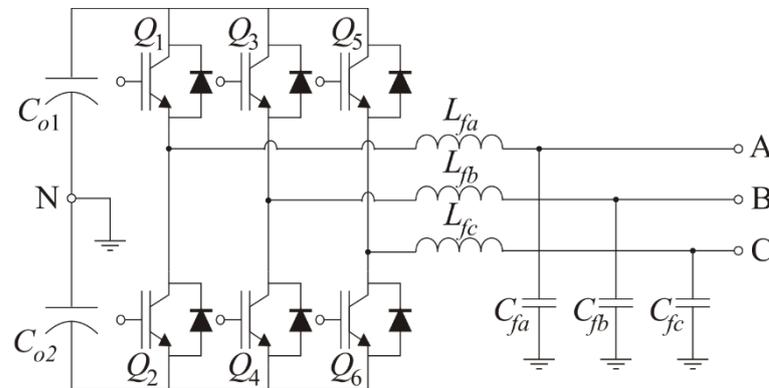
3 CIRCUITO DE POTÊNCIA E CONTROLE DO DSTATCOM

Neste capítulo são apresentadas a estrutura de potência e de controle do protótipo utilizado para efetuar os resultados experimentais e validar a técnica de limitação de corrente empregando a Resistência Virtual Não Linear.

3.1 ESTRUTURA DE POTÊNCIA

A estrutura de potência que compõe o DSTATCOM é um conversor meia ponte trifásico a quatro fios (3 fases + Neutro). Para reduzir o conteúdo harmônico gerado pela comutação dos interruptores do conversor, um filtro de saída do tipo LC é incluído entre o conversor e o PCC. A topologia do DSTATCOM, utilizado para a validação da técnica aqui proposta, é mostrada na Figura 15. Essa configuração permite a operação independente em cada uma das fases de sistema trifásico, devido à conexão do ponto central do barramento ao neutro (N). O conversor é conectado paralelamente às cargas, ao PCC e à fonte da rede de distribuição.

Figura 15 – Circuito de Potência do DSTATCOM



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

O projeto da estrutura de potência do conversor não é o foco deste trabalho, apenas os resultados obtidos por meio do mesmo são apresentados. Desta forma, a metodologia de projeto e a análise quantitativa pode ser encontrada em (DA CUNHA, 2015) e (HOCK JR., 2015), para a mesma topologia utilizada. A disponibilidade de um protótipo pré-montado no laboratório direcionou as especificações para o conversor em questão. As principais características de potência do conversor são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Principais características de potência do conversor.

Especificações	Variáveis	Valores
Potência nominal do DSTATCOM	S_o	30 kVA
Tensão eficaz de fase	V_r	220 V
Tensão eficaz de linha	V_{rl}	380 V
Tensão do barramento c.c.	V_{cc}	800 V
Frequência de comutação	f_s	20 kHz
Frequência da rede	f_r	60 Hz
Capacitância do filtro LC	C_f	50 μ F
Indutância do filtro LC	L_f	1,12 mH
Capacitância equivalente do barramento c.c.	C_{cc}	3,5 mF
Ganho do sensor de tensão do barramento c.c.	K_{svcc}	1/101
Ganho do sensor de tensão c.a. de entrada	K_{st}	1/101
Ganho do sensor de corrente c.a. de entrada	K_{si}	1/2000
Ganho do modulador PWM	K_{PWM}	1/20

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

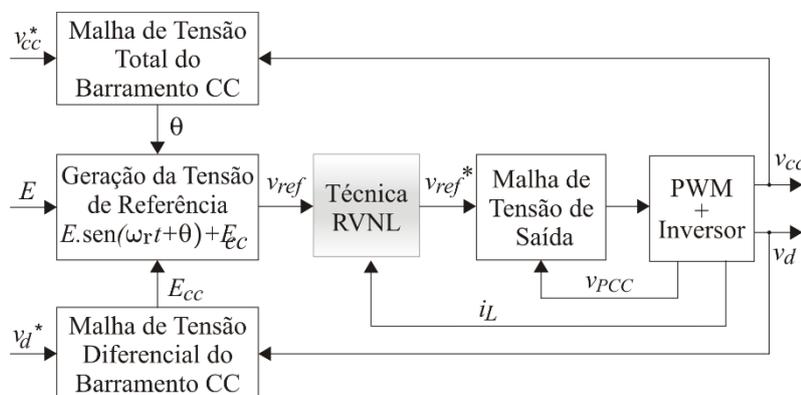
3.2 ESTRUTURA DE CONTROLE

A estrutura de controle utilizada neste trabalho é composta por:

- Uma malha de tensão total para a regulação do barramento;
- Uma malha de tensão diferencial para o equilíbrio do barramento;
- Uma malha de amplitude da tensão de saída;
- Três malhas com a técnica de limitação de corrente RVNL;
- Três malhas de tensão de saída com amortecimento ativo;

O diagrama de bloco do controle das malhas de controle são mostradas na Figura 16.

Figura 16 – Diagrama de blocos do controle do DSTATCOM utilizando a técnica RVNL



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A malha de tensão total do barramento c.c. monitora a tensão total do barramento c.c. e atua sobre a fase (θ) da tensão sintetizada pela malha de tensão c.a. Essa malha é projetada para ser mais lenta que a ondulação natural do barramento c.c., com frequência de cruzamento por zero girando em torno de 30 Hz a 60 Hz.

A malha de tensão diferencial é a malha responsável pelo equilíbrio das tensões do barramento c.c. Essa é a malha mais lenta do sistema, em torno de alguns Hertz. Dessa maneira, não há influência entre as outras duas malhas. A malha de tensão diferencial monitora a diferença entre as tensões dos capacitores do barramento c.c. e atua no sistema através da inserção de um pequeno nível médio na tensão (E_{cc}), fazendo com que um capacitor receba mais energia que o outro, levando-os ao equilíbrio.

A malha de tensão de saída, é responsável pela síntese de uma tensão adequada sobre os capacitores, ponto esse conectado ao PCC. Essa malha é extremamente rápida, em torno de um quarto da frequência de comutação dos interruptores, e é influenciada pela dinâmica da malha de amortecimento. A malha de tensão de saída é uma malha composta por uma malha de amortecimento ativo e uma malha de síntese da referência da tensão c.a. (v_{ref}). A malha de amortecimento atenua o pico de ressonância do filtro LCL equivalente do DSTATCOM, que surge da combinação entre o filtro LC do conversor e a indutância da rede. Essa malha atua monitorando a tensão sobre os capacitores do filtro LCL equivalente, compensando sua dinâmica e o sinal de controle dessa malha é subtraído do sinal de controle da malha de tensão c.a. Essa malha tem como função retirar qualquer dinâmica de ressonância que estaria prestes a aparecer sobre a tensão nos capacitores.

A malha com a técnica resistência virtual não linear é a malha responsável pela limitação da corrente de saída do conversor. Quando a técnica está atuando, essa malha altera o sinal de referência que vai para a malha da tensão de saída.

O bloco de tensão de referência recebe os sinais de ângulo e nível médio dos controladores de tensão do barramento c.c. e gera três sinais trifásicos equilibrados, defasados em 120 graus e de amplitude E .

O sinal de geração de referência é dado pela equação (7):

$$v_{ref} = E \cdot \text{sen}(\omega_r t + \delta) + E_{cc} \quad (7)$$

Onde v_{ref} é o sinal de referência da tensão de saída, E define a amplitude da tensão de pico imposta ao PCC, ω_r é a frequência angular da rede elétrica, δ é a diferença angular entre a tensão da rede e a tensão no PCC produzido pela malha de controle total e E_{cc} é um nível médio

de pequena amplitude para regulação do barramento c.c. produzido pela malha de controle diferencial.

A estratégia de controle utilizada é baseada no trabalho de (HOCK JR., 2015), onde pode ser encontrado o projeto detalhado das malhas de controle.

Nos resultados de simulação, foram utilizados componentes ideais que apresentam tensões de saída tendendo ao infinito, aumentando o tempo de resposta das malhas de controle durante a operação das condições de distúrbios. Para tornar os resultados de simulação mais próximos à condição real de operação, em que as máximas tensões de saída são as tensões próximas à tensão de alimentação dos componentes, foi adicionado um circuito com a técnica *anti-windup* nas malhas de tensão de saída do circuito de simulação. Para mais detalhes, consultar o APÊNDICE A (página 105).

3.3 RESUMO DO CAPÍTULO

Nesse capítulo foram apresentadas as principais características da estrutura de potência e das malhas de controle do protótipo DSTATCOM controlado em tensão, utilizado para efetuar as validações da técnica resistência virtual não linear.

A implementação da técnica RVNL é favorecida pela topologia utilizada, sendo a meia ponte trifásico à quatro fios que permite a operação independente em cada uma das fases de sistema trifásico. O conversor possui um filtro LC na saída, que tem a finalidade de reduzir o conteúdo harmônico gerado pela comutação dos interruptores de potência.

A estrutura de controle utilizada neste trabalho é formada por cinco diferentes malhas de controle. A malha de tensão total é responsável pelo controle da tensão do barramento c.c. e a malha de controle diferencial mantém as tensões entre os capacitores de barramento equilibradas. A malha de tensão de saída é responsável pelo controle da forma de onda instantânea de tensão de saída do conversor.

A malha de tensão de saída é uma malha composta por uma malha de amortecimento ativo e uma malha de síntese da referência da tensão c.a. A malha de amortecimento atenua o pico de ressonância do filtro LCL equivalente do DSTATCOM, que surge da combinação entre o filtro LC do conversor e a indutância da rede. A malha com a técnica resistência virtual não linear é a malha responsável pela limitação da corrente de saída do conversor.

4 TÉCNICA DE RESISTÊNCIA VIRTUAL NÃO LINEAR

Neste capítulo é apresentada uma técnica para limitação da corrente de saída do DSTATCOM controlado em tensão. A técnica proposta utiliza o conceito de Resistência Virtual Não Linear (RVNL), emulando uma resistência de valor variável na saída do conversor. O efeito da resistência virtual é a atenuação da tensão na saída do conversor em condições desfavoráveis de funcionamento, limitando a corrente do conversor.

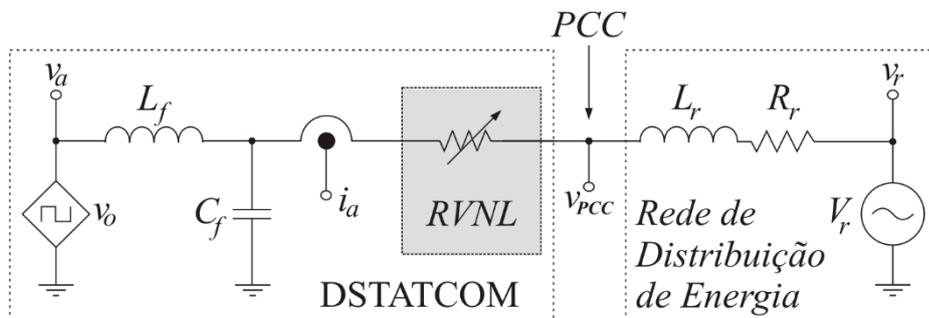
A técnica RVNL pode ser vista como uma malha externa, cuja saída é a tensão de referência do conversor, com a vantagem de que não existe um controlador de corrente. O problema em se ter um controlador de corrente em cascata com o controlador de tensão é a limitação da dinâmica do controlador de tensão, diminuindo a banda passante do DSTATCOM. Assim, a técnica RVNL não altera a banda passante do controlador de tensão e não altera a resposta dinâmica do controle em regime permanente.

4.1 ASPECTOS TEÓRICOS DA TÉCNICA RVNL

Em condição normal de operação, em que os máximos valores de corrente não sejam alcançados, a técnica RVNL não tem efeito sobre os sinais da malha de controle de tensão. Ao exceder esse limite, o valor da resistência virtual é gradativamente elevado, o que provoca uma atenuação progressiva da tensão de saída do conversor.

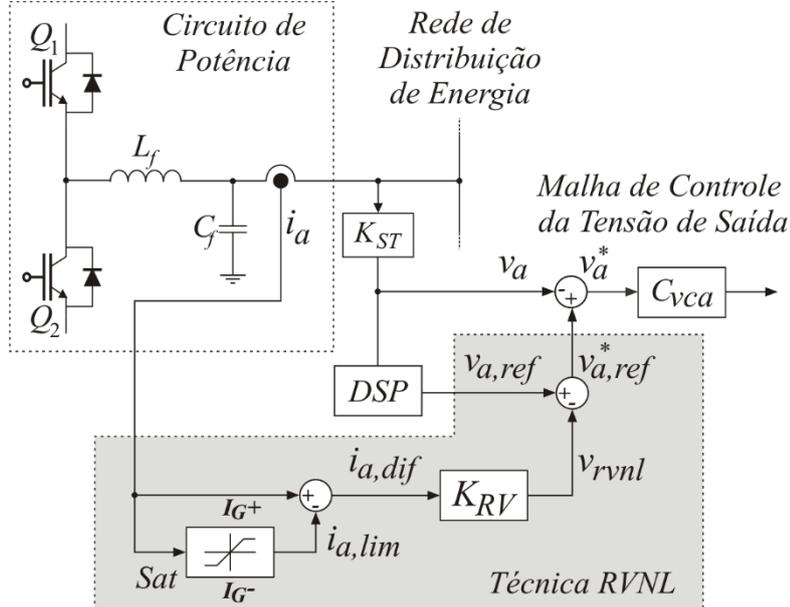
Na Figura 17 é mostrado o circuito equivalente do DSTATCOM, o filtro LC de saída, a resistência virtual não linear, o ponto de conexão comum (PCC) e a rede de distribuição de energia.

Figura 17 – Representação do circuito com a RVNL.



A Figura 18 apresenta o diagrama de blocos da técnica RVNL.

Figura 18 – Diagrama de blocos da técnica RVNL.

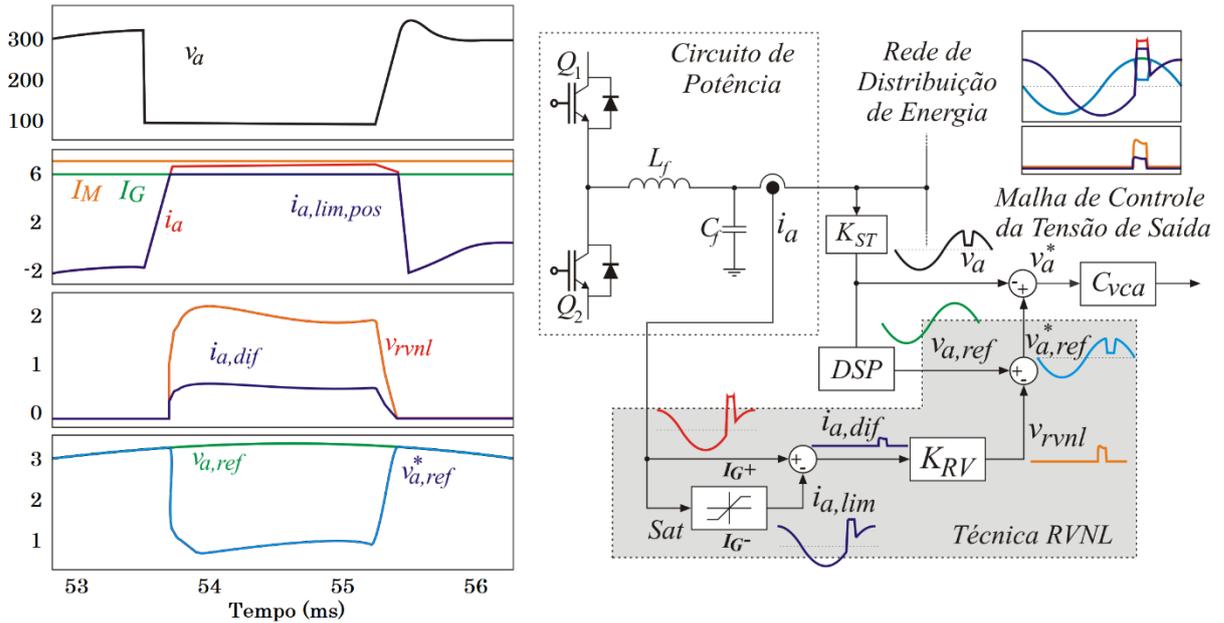


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Nesta técnica o bloco Sat representa um saturador, sendo os limites de saturação os valores definidos de corrente de limiar I_G , ou seja, I_G é o valor de corrente para o qual a técnica RVNL começa a emular uma resistência não nula. O bloco K_{RV} é uma constante proporcional à resistência virtual. O bloco K_{ST} é o sensor da tensão de saída do DSTATCOM. O sinal de referência de controle ($v_{a,ref}$) é gerado por um processador digital de sinais (Digital Signal Processor - DSP), sincronizado com o PCC e com a amplitude desejada.

Com o intuito de detalhar os sinais de controle da técnica RVNL, é apresentada na Figura 19 uma condição de afundamento de tensão da rede (v_a), onde i_a é a corrente instantânea na saída do DSTATCOM. O sinal de corrente i_a é subtraído por seu valor saturado $i_{a,lim}$ resultando no sinal de diferença $i_{a,dif}$. O valor $i_{a,dif}$ é multiplicado pela constante K_{RV} , sendo o resultado denominado de tensão sobre a resistência virtual não linear v_{rvnl} . O valor v_{rvnl} é subtraído da tensão de referência $v_{a,ref}$, resultando no sinal $v_{a,ref}^*$, que por sua vez é subtraído da tensão de saída do conversor v_a , resultando no sinal de erro v_a^* que vai para o controlador de tensão de saída do conversor.

Figura 19 – Tensão e corrente na saída do DSTATCOM e sinais de controle RVNL para uma condição de afundamento de tensão monofásica.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Para determinar o valor da Resistência Virtual (K_{RV}) é necessário especificar o valor de corrente limiar (I_G) e o valor desejado de máxima corrente de saída (I_M), para o qual é gerada a maior variação de tensão de saída. A maior variação de tensão de saída é o valor de pico a pico da tensão nominal de fase (V_{pk-pk}). O valor da tensão de pico da fase garante que o DSTATCOM limite a corrente para uma condição de curto-circuito. Assim, a corrente de saída do conversor tende a limitar-se entre os valores de I_G e I_M . O valor de K_{RV} é dado pela equação (8):

$$K_{RV} = \frac{V_{pk-pk}}{I_M - I_G} \quad (8)$$

O valor de v_{rvnl} é dado pela equação (9)

$$v_{rvnl} = (i_a - i_{a,lim}) \cdot K_{RV} \quad (9)$$

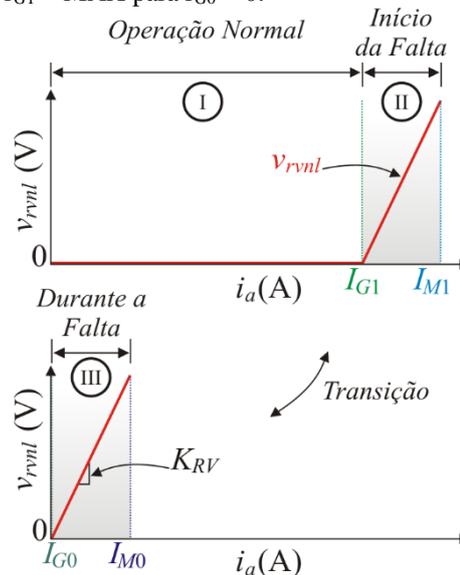
Considerando a técnica RVNL, o novo valor de tensão de referência para o controlador da tensão de saída do DSTATCOM, para uma respectiva fase, é dado pela equação (10):

$$v_{ref}^* = E \cdot \text{sen}(\omega_r t + \delta) + E_{cc} - v_{rvnl} \quad (10)$$

4.2 VARIAÇÃO DINÂMICA DOS LIMITES DO SATURADOR

Uma variação dinâmica pode ser implementada no limite superior (I_{G+}) e inferior (I_{G-}) do saturador, variando de um limite máximo de corrente para um limite mínimo, permitindo assim que em condições desejadas, por exemplo, de curto-circuito o DSTATCOM forneça ao PCC uma corrente próxima a zero. Como vantagem, a tensão do barramento c.c. se mantém regulada próxima do valor nominal de operação, permitindo que o DSTATCOM prontamente reestabeleça a tensão do PCC assim que a falta cesse. Caso contrário, haveria o tempo de energização do equipamento a ser considerado. A Figura 20 exemplifica a variação dinâmica, sendo I_{G1} o valor limite para a corrente em condição normal de operação, e I_{G0} o valor para atuação com valor mínimo de corrente de operação. A constante K_{RV} define a inclinação da reta, que se mantém para ambas condições de corrente limiar.

Figura 20 – Variação dinâmica de $I_{G1} = \text{MÁX}$ para $I_{G0} = 0$.

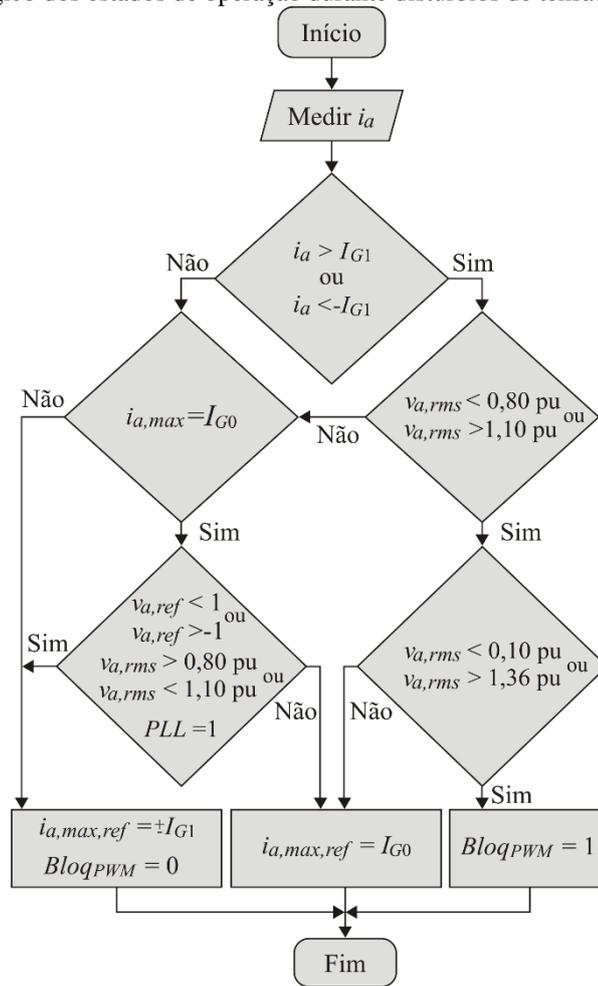


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

4.3 ESTADOS DE OPERAÇÃO DURANTE DISTÚRBIOS DA REDE ELÉTRICA

No presente trabalho, o sincronismo com a rede é efetuado por meio de um circuito de detecção de fase (*Phase-Locked Loop* - PLL) e os sinais da tensão de referência para o controle de tensão são gerados internamente no DSP. Através das saídas digitais do DSP é possível controlar o nível máximo de corrente de saída e bloquear/desbloquear o PWM de saída. Para efetuar esse controle é implementada a lógica mostrada na Figura 21.

Figura 21 – Fluxograma lógico dos estados de operação durante distúrbios de tensão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Durante a operação normal do DSTATCOM, com V_{PCC} entre 0,80 pu e 1,10 pu, o limite máximo de corrente ($I_{a,MAX,REF} = \pm I_{G1}$) é mantido. Em condições de subtensão na rede, quando a tensão eficaz corrigida é menor que 0,80 pu, ou sobretensão com tensão eficaz de 1,10 pu, o DSP identifica a tensão do PCC e altera o limite do valor de corrente de saída, passando para aproximadamente 0 A ($I_{a,MAX,REF} = I_{G0}$), permanecendo ligado e pronto para voltar a operar. Quando a tensão da rede for menor que 0,10 pu, o PWM é bloqueado ($Bloq_{PWM} = 1$) e o DSTATCOM é desligado.

Após a condição de falta, em que o nível da tensão eficaz do PCC retorna a um nível maior que 0,80 pu, o DSTATCOM verifica o sincronismo com a rede, o cruzamento da tensão de referência por zero e então eleva o limite da corrente de saída ($I_{a,MAX,REF} = \pm I_{G1}$) e habilita o PWM de saída ($Bloq_{PWM} = 0$).

4.4 RESUMO DO CAPÍTULO

Nesse capítulo foi apresentada a técnica da Resistência Virtual Não Linear, sendo abordados os aspectos teóricos com uma descrição detalhada de sua operação para uma condição de afundamento de tensão de curta duração. Foram apresentadas as equações matemáticas para determinação das constantes da técnica RVNL.

A técnica RVNL permite operar com diferentes valores de corrente limiar ao efetuar variação dinâmica dos limites do saturador. Assim, a técnica passa a limitar a corrente de saída do conversor próximo a zero amperes, permitindo que seja mantida a tensão do barramento c.c em nível alto, por um maior tempo, durante a condição de falta.

Para a definição de quando se deve alterar os valores de corrente limiar, é proposto um fluxograma para implementação de uma lógica que monitora a tensão eficaz da rede, o valor da corrente e o cruzamento da tensão por zero, para então definir qual é o melhor valor de corrente limiar.

5 IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA DA TÉCNICA RVNL

Neste capítulo é apresentado o projeto do cartão eletrônico que contempla a técnica de Resistência Virtual Não Linear. Para integrar aos cartões eletrônicos já existentes do protótipo, o circuito eletrônico que contempla a técnica RVNL foi implementado de forma analógica, por meio de amplificadores operacionais e circuitos grampeadores de tensão.

O projeto do cartão contempla 3 circuitos com a técnica RVNL, sendo cada um específico por fase, mais dois circuitos com regulador de tensão ajustável, um para a tensão positiva e outro para a tensão negativa e, por último, os circuitos de interface com o DSP.

5.1 PROJETO DA CIRCUITO ELETRÔNICO COM A TÉCNICA RVNL.

O circuito com a técnica Resistência Virtual Não Linear é apresentado na Figura 22. No circuito 1 o sinal do transdutor de corrente (i_a) é convertido em sinal de tensão pelo resistor Ra1, na sequência esse sinal passa por um filtro de ruídos e é lido pelo *buffer* U2A. Com o intuito de efetuar uma calibração nos circuitos de comparação entre os sinais saturado e não saturado, foi inserido o circuito 2, em que os resistores Ra7 e Ra75 geram uma atenuação do sinal de aproximadamente 2%, seguido por um ganho ajustável de até 4% no amplificador não inversor U3A.

No circuito 3, após o sinal passar por um amplificador não inversor, o nível máximo e mínimo é grampeado através dos diodos D1 e D2, saturando assim o sinal de acordo com o nível de tensão ajustado nos pontos “+6” e “-6”.

No circuito 4, o sinal saturado e o não saturado passam por um subtrator U2D, gerando a tensão proporcional a resistência virtual não linear (v_{RVNL}). O circuito 5 recebe o sinal da tensão de referência (v_{ref}) que vem do DSP, sendo que no circuito 6 esse sinal de referência (v_{ref}) é subtraído pelo sinal da resistência (v_{RVNL}), gerando um novo sinal de referência para a malha de saída (v_{ref}^*) do conversor.

No circuito 7, é utilizado o circuito integrado CD4081 (porta AND) que recebe o sinal do DSP, zerando o sinal saturado e fazendo com que o conversor opere com aproximadamente zero ampères na saída. No circuito 8, o buffer U3B repassa o sinal de corrente da entrada para o DSP, com o ganho definido pelos resistores Ra27 e Ra28.

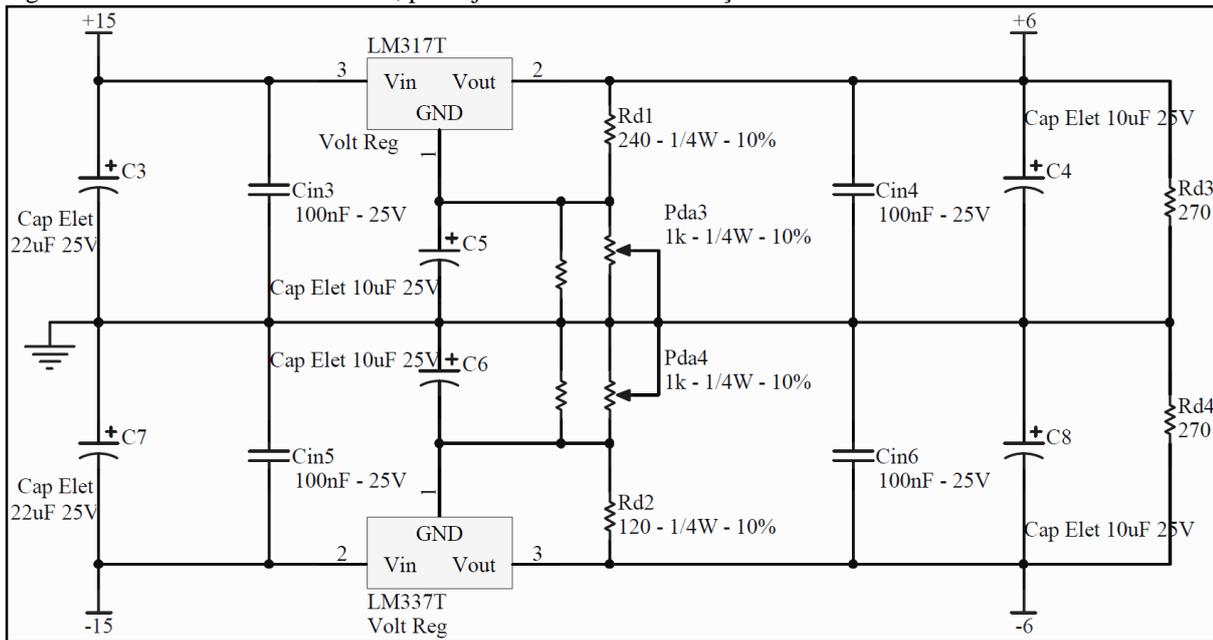
Devido à falta de referências para a implementação deste circuito, foram necessárias algumas interações até seu correto funcionamento. Como exemplo, pode-se citar a necessidade de utilizar diodos de grampeamento de baixa capacitância, pois a capacitância do diodo acaba provocando uma alteração na forma de onda do sinal saturado, quando operando em frequências elevadas, como a de comutação que é 20kHz. Neste circuito é fundamental adicionar uma alta impedância (Ra101) após o grampeamento, pois, sem a mesma, o ganho do amplificador U2D tende ao infinito.

Um problema encontrado durante os testes iniciais do cartão foi a deformação dos sinais nas entradas e saídas dos amplificadores operacionais. Após algumas horas efetuando alterações no circuito, identificou-se que os amplificadores operacionais não estavam operando adequadamente para frequências acima de 1 kHz. Ao substituir os amplificadores operacionais por outros de mesmo modelo, porém de origem comprovada, os sinais apresentaram o formato desejado. Logo, os CI's com desempenho inferior são falsificados. Para mais detalhes consultar o APÊNDICE C (página 113).

5.2 PROJETO DA FONTE DE TENSÃO REGULÁVEL.

Para o circuito implementado, o nível da tensão de saturação é proporcional a máxima corrente que o conversor pode operar sem a atuação da técnica RVNL. Para possibilitar o teste da técnica com diferentes limites de atuação da técnica, foi adicionado ao projeto do cartão dois circuitos reguladores de tensão ajustáveis. Os circuitos integrados utilizados foram o LM 317 para a tensão positiva, e o LM 337 para a tensão negativa. Por se tratarem de circuitos simples e muito utilizados, não será detalhado o projeto dos reguladores. Assim, os diodos de grampeamento limitam o valor máximo do sinal de acordo com o nível de tensão ajustado nestas fontes (sinais +6 e -6). Por meio deste circuito é possível ajustar de 1,25 V até aproximadamente a tensão de alimentação. O circuito com as fontes ajustáveis de tensão positiva e negativa é apresentado na Figura 23.

Figura 23 – Circuito Fonte do cartão, para ajuste dos níveis de atuação da técnica RVNL.

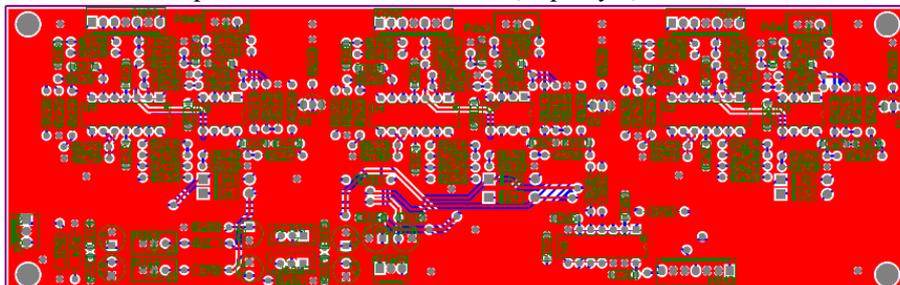


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

5.3 PROJETO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

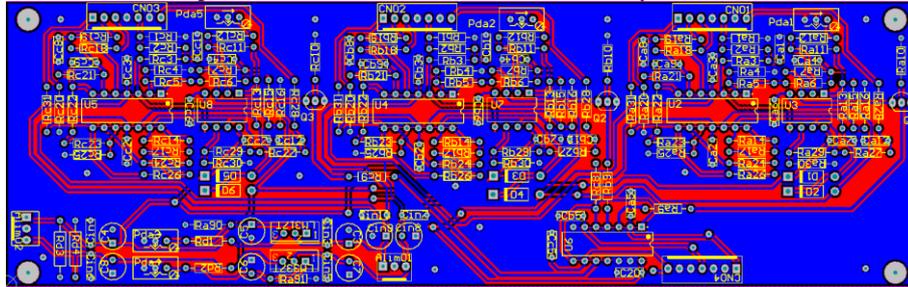
O projeto da PCI foi efetuado no programa *ALTIUM Designer®*, sendo utilizadas duas camadas para o roteamento das trilhas e componentes THT (*Through-Hole Technology*) por facilitar a montagem do cartão. O projeto da placa de circuito impresso é apresentado na Figura 24 e na Figura 25. Na parte superior do cartão estão os circuitos da técnica RVNL, na parte inferior esquerda, o circuito de fonte ajustável, e na parte inferior direita o circuito lógico de interface com o DSP.

Figura 24 – Placa de circuito impresso com o circuito RVNL (Top Layer).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Figura 25 – Placa de circuito impresso com o circuito RVNL (Bottom Layer).



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

5.4 RESUMO DO CAPÍTULO

Nesse capítulo foi apresentado de forma detalhada o projeto dos circuitos eletrônicos que contemplam a técnica RVNL. Iniciou-se pelo filtro adicionado para o sinal de corrente, passando pelos ganhos dos amplificadores operacionais e seguindo por um circuito de calibração. A saturação do sinal foi efetuado por meio de diodos de grampeamento, sendo que os níveis de tensão grampeada foram ajustados pelas fontes simétricas projetadas. Os sinais saturados e não saturados foram subtraídos por um circuito subtrator, sendo o sinal resultante subtraído do sinal de referência do conversor, gerando o novo sinal de referência atenuado pelo sinal de tensão proporcional à resistência virtual não linear. O projeto dos circuitos possuem algumas particularidades que acabam comprometendo seu funcionamento, como também requer uma banda passante alta para os amplificadores operacionais e uma baixa capacitância dos diodos grampeadores. Ainda assim, o projeto dos circuitos do *layout* da placa de circuito impresso se mostra simples e de fácil implementação.

No APÊNDICE B (página 109) são apresentados os testes parciais do cartão, para uma melhor compreensão de seu funcionamento. No APÊNDICE C (página 113) são apresentados os sinais de controle do cartão utilizando os amplificadores operacionais TL084 falsificados e comparado com os amplificadores operacionais genuínos do fabricante TEXAS INSTRUMENTS.

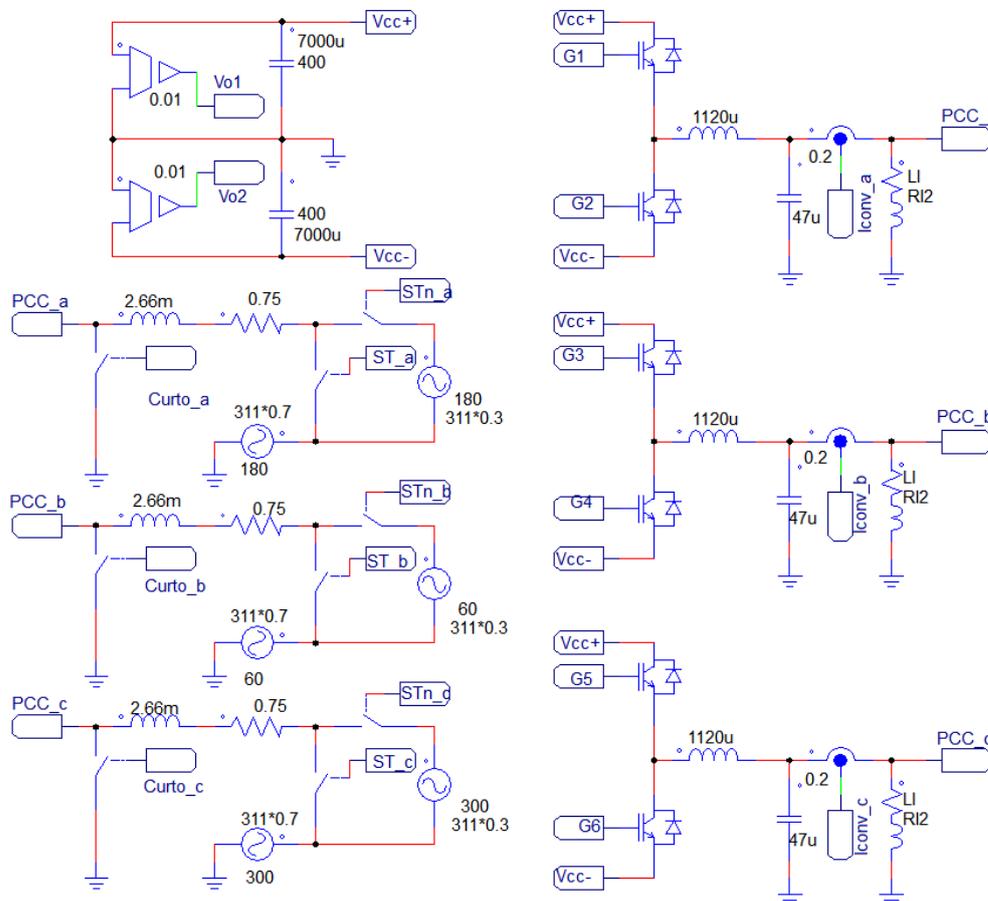
6 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados de simulação efetuados no software PSIM[®]. O sistema simulado contempla a fonte geradora, a impedância da rede, as cargas e o DSTATCOM. Na sequência, são descritos os circuitos de potência e controle utilizados na simulação e as especificações técnicas do sistema. O DSTATCOM é submetido a diversas condições de distúrbios da rede elétrica para a análise de desempenho da RVNL alocada em série com o indutor do filtro LC de saída e alocada após o filtro LC.

6.1 CIRCUITOS DE POTÊNCIA

Os circuitos de potência são apresentados na Figura 26, contendo os capacitores do barramento c.c., os interruptores do conversor meia ponte trifásico, os filtros LC de saída e a representação da rede elétrica, por meio de três fontes senoidais ideais junto a sua impedância. A carga é representada pelos resistores e indutores nomeados como “R12” e “L1” e assumem valores distintos conforme as simulações de interesse.

Figura 26 – Circuito de Potência Simulado.

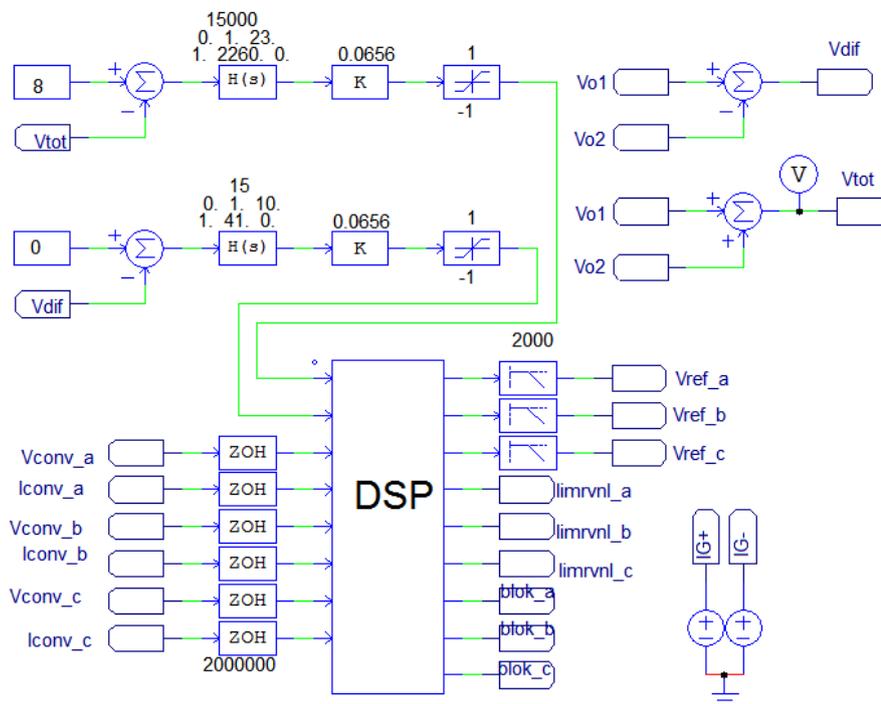


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

6.2 CIRCUITO DE CONTROLE

A Figura 27 e a Figura 28 apresentam os circuitos de controle do compensador de tensão. Na Figura 27 estão os circuitos das malhas de tensão total e diferencial do barramento c.c. e o bloco que representa o DSP. As entradas do DSP são os sinais das malhas de tensão do barramento c.c., as três tensões do PCC e as três correntes de compensação do conversor. As saídas do DSP são os sinais de referência para as malhas de tensão c.a.

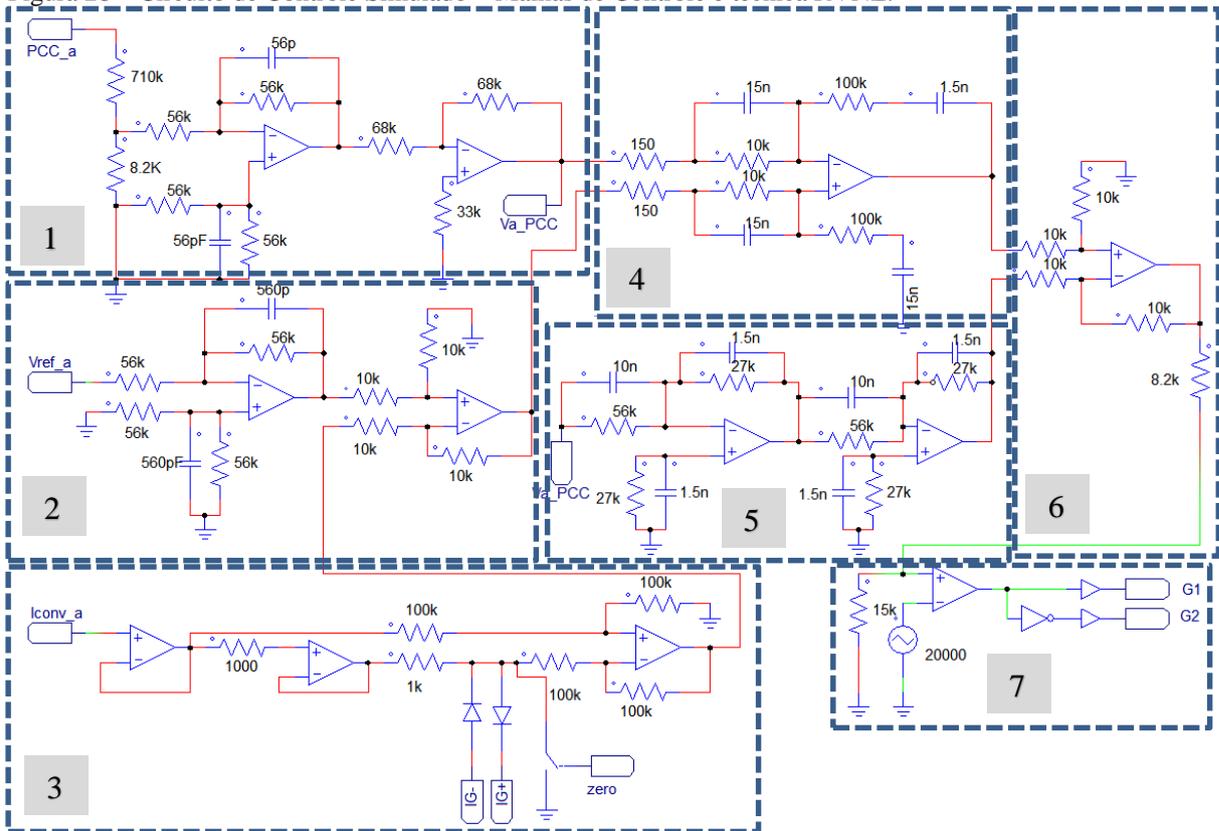
Figura 27 – Circuito de Controle Simulado – DSP.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

No circuito 1 da Figura 28, são efetuados a atenuação e medição da tensão de saída do conversor. O circuito 2 recebe o sinal de referência da tensão de saída que vem do DSP e subtrai do sinal proporcional a tensão da resistência virtual não linear que vem do circuito 3. No circuito 4 é subtraída a tensão da rede pelo sinal da referência, gerando o sinal de erro que vai para o controlador de tensão do circuito 4. O controlador do filtro ativo é ilustrado no circuito 5, sendo seu sinal subtraído do sinal do controlador de tensão, resultando em um nível c.c. que é comparada com um sinal triangular do circuito 7, gerando o sinal PWM que vai para as chaves de potência.

Figura 28 – Circuito de Controle Simulado – Malhas de Controle e técnica RVNL.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

6.3 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE SIMULAÇÃO

Na Tabela 4 são apresentadas as especificações técnicas da simulação, sendo selecionada uma carga com fator de potência de 0,8 indutivo, com 0,80 pu (24 kVA) de potência e a corrente limiar foi ajustada para 60 A.

Tabela 4 – Parâmetros do sistema simulado com compensação de reativos.

Parâmetros	Valores
Potência nominal	S_o 30 kVA
Tensão nominal do barramento c.c.	V_o 800 V
Tensão eficaz de fase	V_r 220 V
Frequência da rede	f_r 60 Hz
Frequência de comutação	f_s 20 kHz
Capacitância do barramento c.c.	C_o 3,5 mF
Capacitância do filtro de saída	C_f 47 μ F
Indutância do filtro de saída	L_f 1120 μ H
Resistência da rede	R_r 0,75 Ω
Indutância da rede	L_r 2,66 mH
Corrente limiar	I_{G1} \pm 60 A
Corrente máxima	I_M \pm 90 A

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

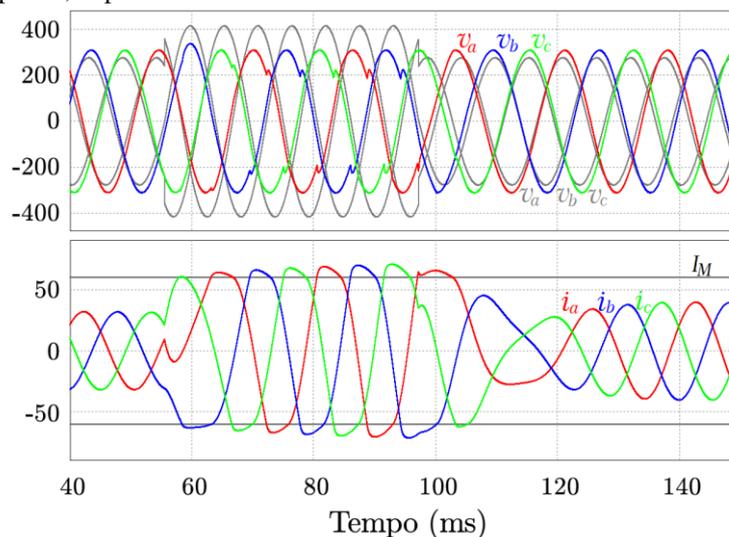
6.4 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Nesta seção serão apresentados os resultados das simulações numéricas, para análise do desempenho da técnica RVNL atuando em diversas condições de distúrbios da rede elétrica, tais como: surto de tensão, elevação de tensão, afundamento de tensão, interrupção de tensão e curto-circuito trifásico na saída do DSTATCOM.

6.4.1 Atuação da Técnica RVNL para a Condição de Elevação de Tensão no PCC

Na Figura 29 é mostrada uma condição de subtensão no PCC, seguido por uma elevação de tensão e retornando para a condição de subtensão. Sem a compensação de reativos na rede efetuada pelo conversor, a tensão eficaz no PCC (v_a, v_b, v_c em cinza) passa de 0,80 pu para 1,36 pu, e retorna para 0,80 pu. Com a compensação dos reativos via o DSTATCOM, a tensão eficaz no PCC (v_a, v_b, v_c) mantém-se regulada em 1,00 pu. Durante a elevação da tensão, ocorre uma pequena distorção na rede, entretanto o valor eficaz é equivalente a 1,05 pu. Durante a condição de elevação de tensão, a técnica RVNL limita a corrente de saída em 69 A de pico (i_a, i_b, i_c), porém compromete a THD da tensão passando do valor de 0,3 % para o valor de 12,5 % de distorção.

Figura 29 – Elevação para 1,25 pu de tensão no PCC.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

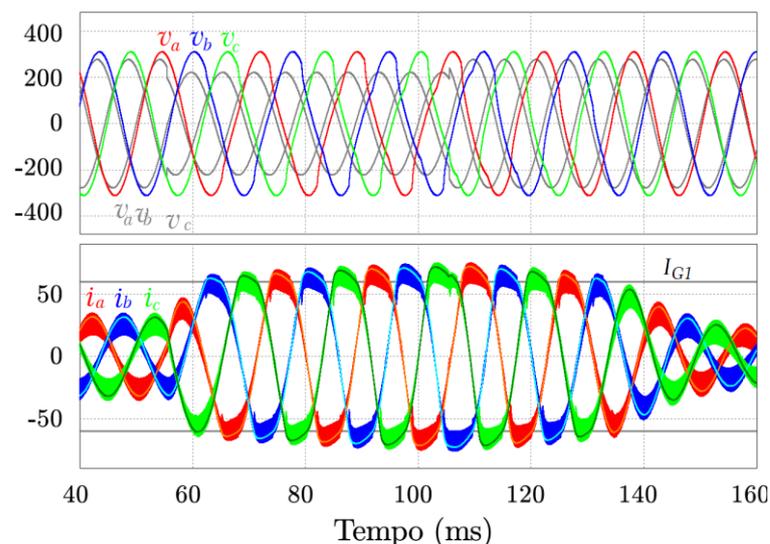
Nesta condição a técnica RVNL detectou a condição de falta de forma rápida, limitou a corrente de saída em um valor abaixo do máximo (I_M) especificado no projeto, que é de 90A, como também permitiu ao conversor manter a tensão do PCC próxima a 1,00 pu. Durante os

transientes em que a técnica RVNL foi habilitada e desabilitada, não houve sobretensões ou oscilações. Ao desabilitar a técnica, o controle voltou a regular a tensão no PCC de forma rápida, entrando em seu regime permanente de operação. Logo, a técnica protegeu o DSTATCOM e as cargas próximas conectadas, e não gerou interferência na dinâmica dos controladores quando desabilitada.

6.4.2 Atuação da Técnica RVNL para a Condição de Afundamento de Tensão no PCC de 0,72 pu

Com o intuito de apresentar a limitação de potência de saída do DSTATCOM utilizando a técnica RVNL, uma condição de afundamento de tensão é mostrada na Figura 30. No PCC sem compensação de reativos, a tensão eficaz (v_a , v_b , v_c em cinza) passa de 0,80 pu para 0,71 pu e retorna para 0,80 pu. Com compensação de reativos o conversor mantém em 1,00 pu, entretanto, durante o transitório a tensão eficaz no PCC é mantida em 0,97 pu. Ao limitar a corrente de saída em 72 A de pico (i_a , i_b , i_c), a THD da tensão é de 15 %. Nesta imagem também são apresentadas as formas de onda da corrente no indutor do filtro de saída do conversor (i_a , i_b , i_c), que apresenta a oscilação do chaveamento, o que demonstra que o conversor está limitando os máximos valores de corrente de saída.

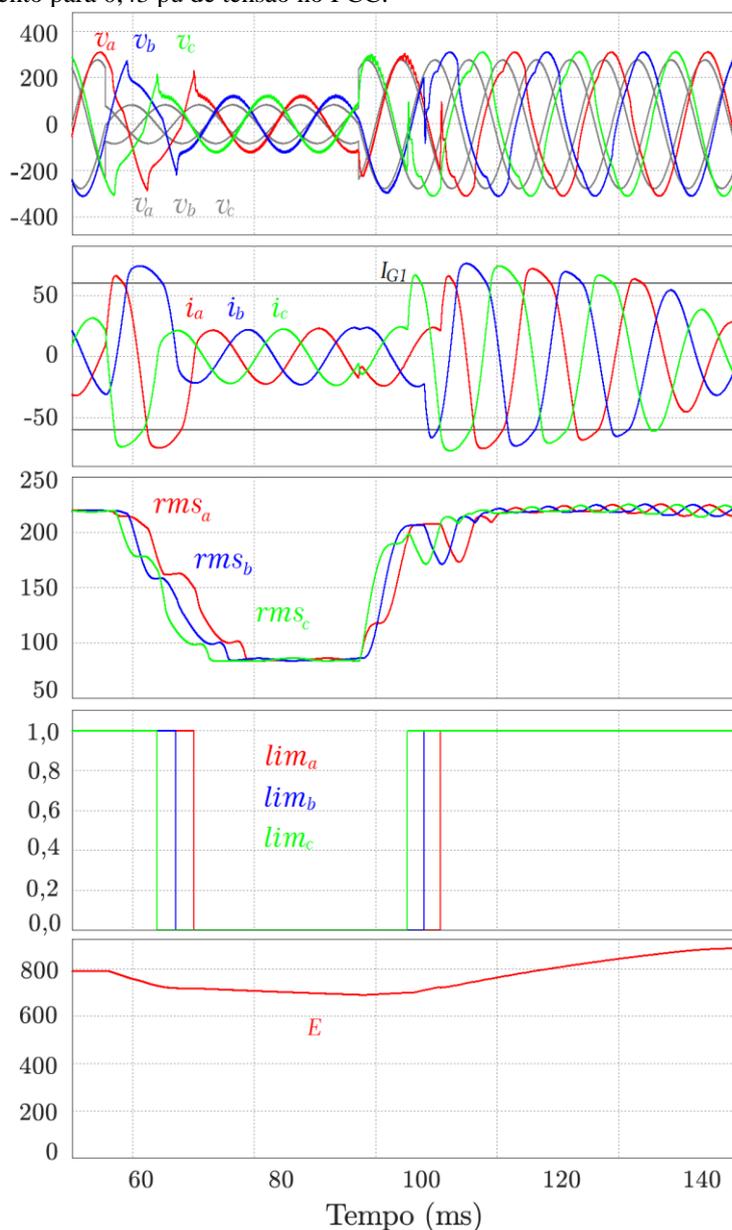
Figura 30 – Afundamento para 0,72 pu de tensão do PCC.



6.4.3 Atuação da Técnica RVNL para a Condição de Afundamento de Tensão no PCC de 0,43 pu

Uma condição de afundamento de tensão mais severa é apresentada na Figura 31. No PCC sem compensação de reativos, a tensão eficaz (v_a , v_b , v_c em cinza) varia de 0,80 pu a 0,43 pu. Durante a falta, o DSTATCOM detecta (lim_a , lim_b , lim_c) uma tensão eficaz ($v_{a,rms}$, $v_{b,rms}$, $v_{c,rms}$) menor que 0,80 pu e altera os valores das correntes limiar para um valor próximo a zero. Ao limitar a corrente de saída do DSTATCOM, é mantido o nível de tensão no barramento c.c., caso contrário o conversor injetaria uma elevada corrente por um longo período, provocando a redução no nível do barramento c.c. e, conseqüentemente, o desligamento do conversor.

Figura 31 – Afundamento para 0,43 pu de tensão no PCC.

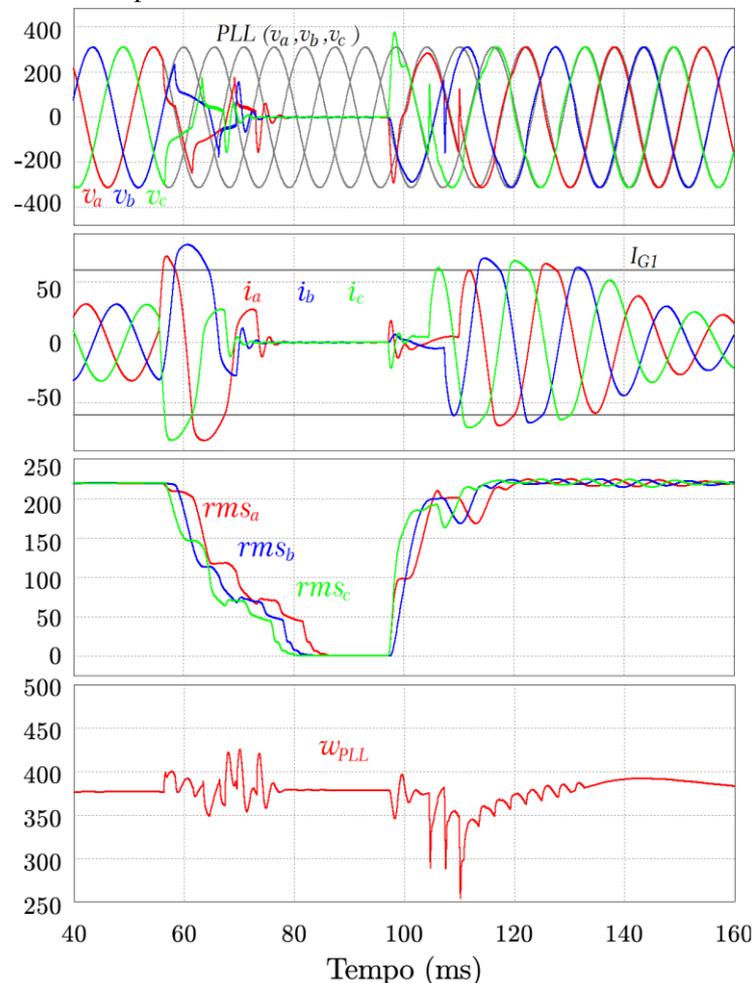


Nesta condição a técnica RVNL limita a corrente de saída em 74 A de pico e, após a condição de falta em que o nível da tensão eficaz do PCC retorna a um nível maior que 0,80pu, o DSTATCOM verifica o sincronismo com a rede, o cruzamento da tensão de referência por zero e então eleva o limite da corrente de saída ($I_{a,MAX,REF} = \pm I_{GI}$), voltando a regular a tensão em 1,00 pu.

6.4.4 Atuação da Técnica RVNL para a Condição de Interrupção de Tensão no PCC

Uma condição de interrupção de tensão é apresentada na Figura 32. Quando a tensão eficaz é menor que 0,10 pu o DSTATCOM não deve injetar energia na rede, logo, os sinais de comando são bloqueados. Os sinais de comando são restaurados após a falta, quando a tensão eficaz atinge um valor maior que 0,80 pu, com o PLL (v_a, v_b, v_c) sincronizado com a rede ($\omega_{PLL}=377\text{rad/s}\pm 5\%$) e com a tensão de referência cruzando por zero, voltando a corrigir a tensão eficaz no PCC para o valor de referência de 1,00 pu.

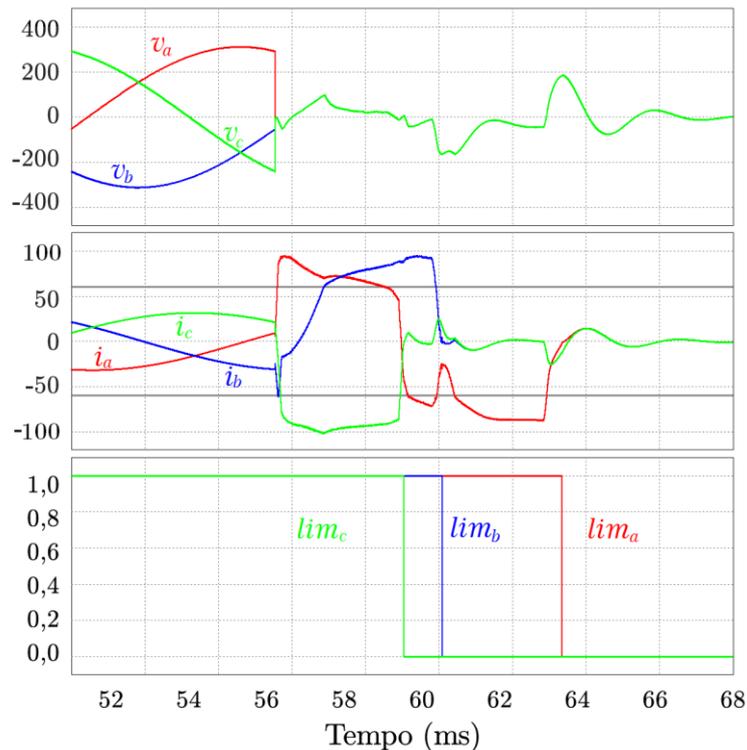
Figura 32 – Interrupção de tensão por 3 ciclos de rede



6.4.5 Atuação da Técnica RVNL para a Condição de Curto-Circuito Trifásico no PCC

A Figura 33 mostra uma condição de curto-circuito trifásico na saída do DSTATCOM, sendo esta a pior condição para avaliar uma técnica de limitação de corrente, pois as derivadas de corrente são muito altas, sendo necessário que o RVNL atue quase instantaneamente. Conforme pode ser observado, as três fases passam a apresentar o mesmo nível de tensão, estando, portanto, em condição de curto-circuito. As correntes de saída do DSTATCOM são limitadas em 84 A pela técnica RVNL. Com o decaimento da tensão eficaz, o valor da corrente limiar é alterado para uma referência próximo a zero ampères e, na sequência, a comutação das chaves de potência é bloqueada.

Figura 33 – Condição de curto-circuito trifásico no PCC.

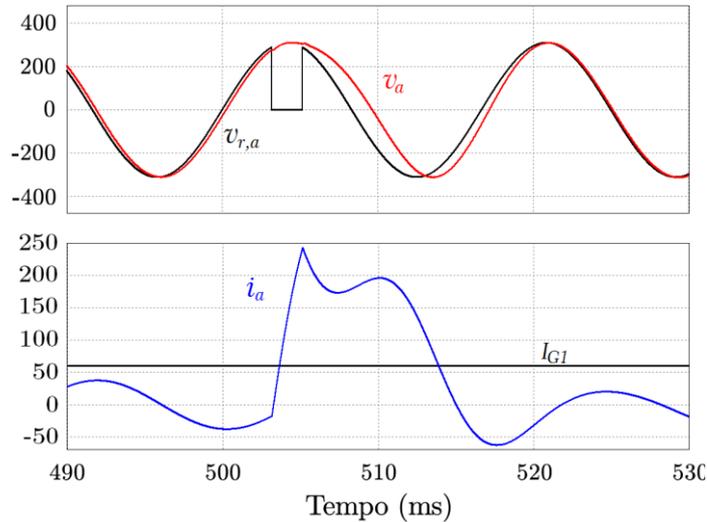


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

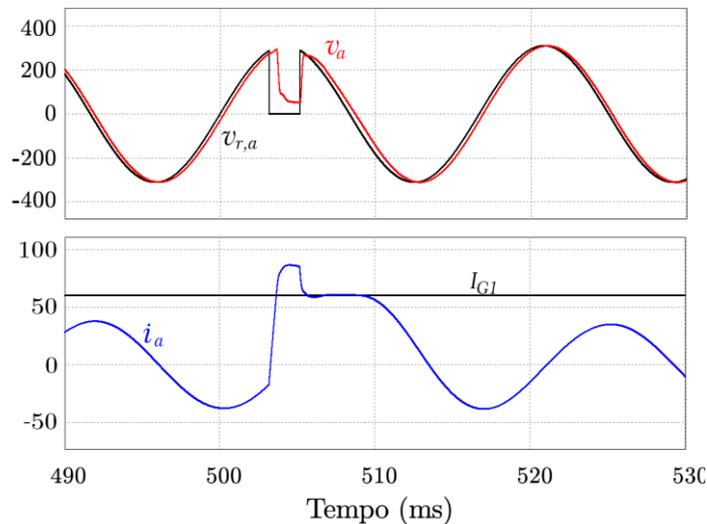
6.4.6 Atuação da Técnica RVNL para a Condição de Interrupção Monofásica de Curta Duração

Na Figura 34 é mostrada uma simulação para a operação do DSTATCOM durante uma condição de interrupção monofásica de curta duração. Na Figura 34 (a) a técnica de limitação de corrente está desabilitada e, nesta situação, o DSTATCOM consegue manter a tensão da rede, sem apresentar o afundamento de tensão. Entretanto, pode-se observar um grande aumento na corrente do conversor, chegando ao valor expressivo de 240 A de pico, o que pode levar à queima do equipamento. Na Figura 34 (b) a técnica de limitação de corrente está habilitada e se pode observar que além de limitar a corrente em 78 A, a técnica contribuiu para uma resposta dinâmica mais rápida neste transitório, pois acaba funcionando como um *anti-windup*.

Figura 34 – Condição de interrupção monofásica de curta duração.



(a) Operação sem a técnica RVNL



(b) Operação com a técnica RVNL

6.5 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os resultados de simulações efetuadas para a validação da técnica resistência virtual não linear. Inicialmente são descritos os circuitos de controle e potência do DSTATCOM, detalhados os circuitos da técnica RVNL e, por fim, apresentados os parâmetros do conversor e da rede simulada. Os resultados das simulações apresentados foram efetuados para diversas condições de distúrbios da rede elétrica, tais como surto de tensão, elevação de tensão, afundamento de tensão, interrupção de tensão e curto-circuito trifásico na saída do DSTATCOM.

Os resultados obtidos para todos os distúrbios apresentados demonstraram que a técnica RVNL limitou a corrente de saída do conversor, preservando o equipamento e as cargas próximas conectadas durante distúrbios elétricos no PCC.

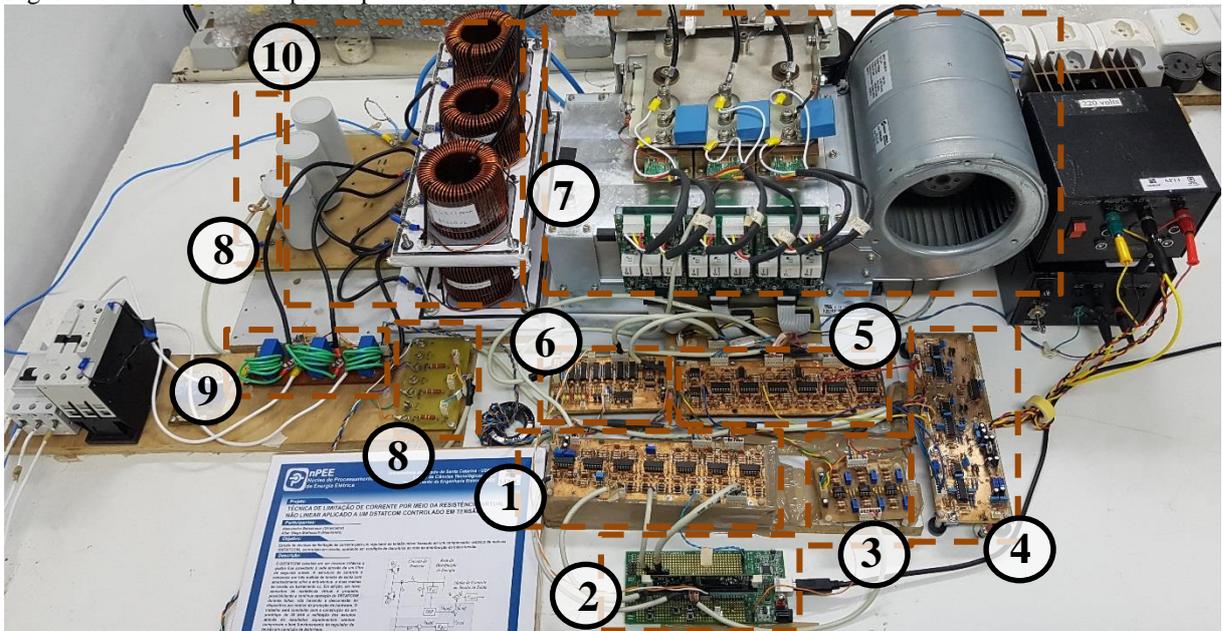
7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Após a validação da técnica Resistência Virtual Não Linear por simulações numéricas, a técnica foi implementada em um DSTATCOM protótipo controlado em tensão. Neste capítulo são apresentadas as principais características construtivas do protótipo, os circuitos de potência, comando, controle e proteção, bem como o sistema para ensaio experimental do protótipo. Por fim, são apresentados os ensaios efetuados que buscam comprovar o funcionamento da técnica proposta, resistência virtual não linear.

7.1 SISTEMA IMPLEMENTADO

O sistema implementado, com identificação dos sub-circuitos é ilustrado na Figura 35.

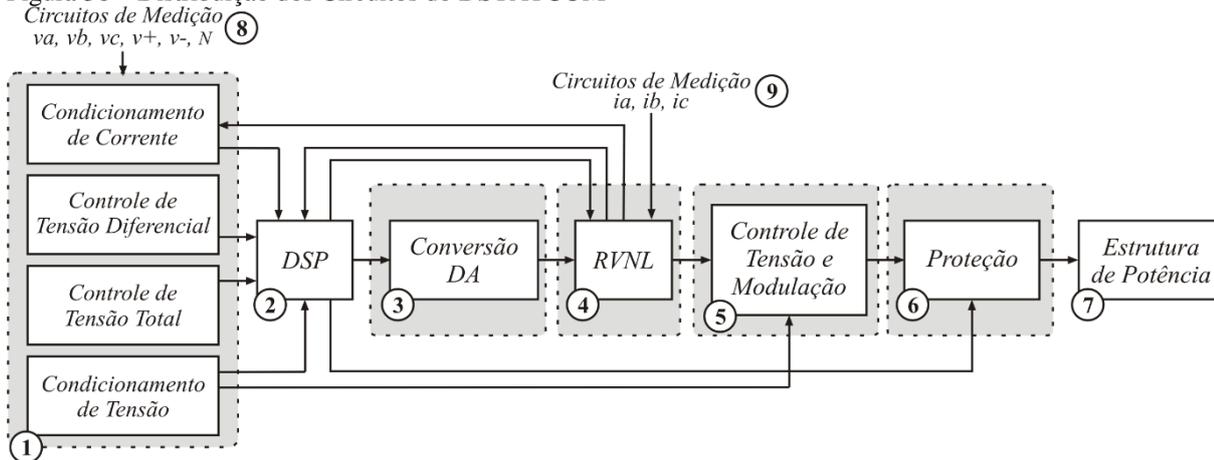
Figura 35 – DSTATCOM protótipo com a técnica RVNL.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

O diagrama de blocos da Figura 36 apresenta a composição do DSTATCOM, indicando o fluxo de informação entre os módulos eletrônicos. Informações providas do sensoriamento das tensões do PCC, tensões do barramento c.c., correntes de saída, assim como ações de controle e comando dos interruptores.

Figura 36 – Distribuição dos Circuitos do DSTATCOM



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Os cartões grifados em cinza, identificados por 1, 3, 4, 5 e 6 são os cartões eletrônicos implementados, cada um desempenhando uma função específica, separados pela sua posição e pelo tipo de sinal que contém. A seguir, são detalhados os cartões de controle, assim como o DSP, a estrutura de potência e circuitos de sensoriamento utilizados.

7.1.1 Interface de Sinais

O primeiro (1) cartão é a placa de entrada do Processador Digital de Sinais (DSP) e contém os circuitos de condicionamento das três tensões do PCC e das três correntes do conversor, assim como as tensões do barramento c.c. Estão incluídos também os dois controladores de tensão do barramento, o controlador de tensão total e o controlador de tensão diferencial. A placa de condicionamento de sinais é responsável por garantir que cada sinal provido dos sensores de tensão (v_{PCC}) tenha sua amplitude adequada para leitura através dos conversores analógicos digitais (*Analog-Digital Converter ADC*) do DSP. O circuito adéqua a amplitude dos sinais medidos por meio do circuito de ganho e do saturador, soma a esses um nível c.c. de 1,5 V e aplica o filtro anti-recobrimento. Ainda há proteção de contra sobressinais na entrada do ADC do DSP por intermédio de diodos grampeadores.

7.1.2 *Daughter Board* TMDSCNCD28335

O segundo (2) cartão é o kit de desenvolvimento TMDSDOCK28335 utilizando a *daughter board* TMDSCNCD28335 e o DSP TMS320F28335 da Texas Instruments. O DSP (*Digital Signal Processor*) é responsável por efetuar o sincronismo das senoides com a tensão do PCC (v_{PCC}), calcular seu valor eficaz, calcular a ação de controle da malha de tensão eficaz e calcular a ação de controle da malha de tensão. Os sinais de referências sincronizados com a tensão do PCC são disponibilizados em três saídas do DSP através de sinais do tipo PWM. O DSP apresenta boa velocidade, grande memória, operações *Multiply-Accumulate* (MAC), diversas saídas PWM e ADC. A Figura 37 traz uma imagem do kit de desenvolvimento. Os principais parâmetros do dispositivo são:

- Frequência de clock de até 150 MHz.
- CPU de 32 bits; Ponto flutuante.
- Arquitetura de barramento tipo Harvard.
- 256 k x 16 bits de memória FLASH.
- 34 k x 16 bits de memória SRAM
- 12 saídas PWM com temporizadores de 16 bits.
- Módulos PWM de alta resolução.
- 16 canais de conversores AD de 12 bits.

Figura 37 – Kit de desenvolvimento TMDSDOCK28335



Fonte: Texas Instruments.

7.1.3 Conversor de Sinal Digital para Analógico

A placa identificada por “Conversão DA” (3) possui os circuitos de saída do DSP e tem como função converter os três sinais PWM enviados pelo DSP em três sinais analógicos. O circuito efetua dupla filtragem no sinal PWM recebido do DSP, além de eliminar as componentes de alta frequência, remove as componentes contínuas dos sinais digitais (1,65 V), adéqua o ganho do sinal e aplica um saturador de sinal na saída, a fim de evitar sobressinais nas referências de tensão.

7.1.4 Técnica RVNL

A placa identificada por “RVNL” (4) contém o circuito proposto RVNL para limitação de corrente de saída do conversor. Esta placa recebe os sinais de medição de corrente de saída do DSTATCOM e os sinais de referência de tensão c.a. Caso necessário, altera o sinal de referência de tensão c.a. e transmite o sinal para o circuito seguinte.

7.1.5 Controladores e Moduladores

A placa “Controle de Tensão e Modulação” (5) possui o circuito de controle analógico e abriga os compensadores de tensão c.a., os compensadores de amortecimento ativo e o modulador PWM.

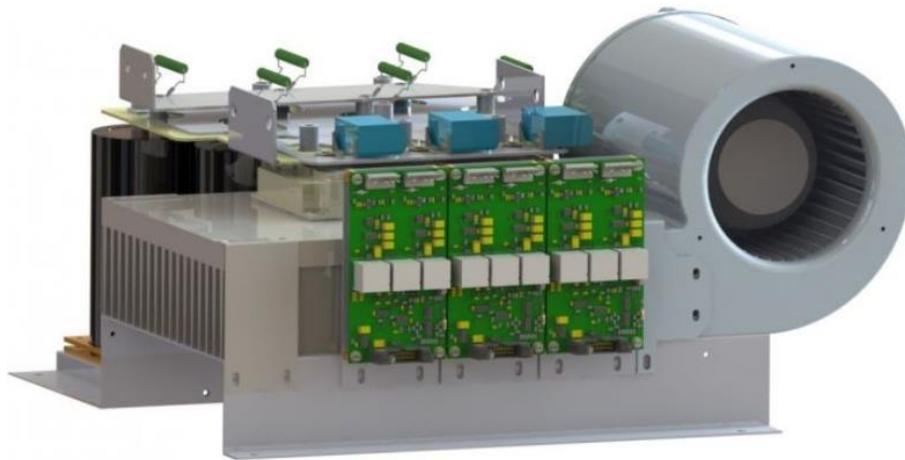
7.1.6 Circuito de Proteção

A placa “Proteção” (6) contém os sinais digitais do conversor, realiza a proteção via hardware do conversor, recebe o sinal de proteção proveniente do DSP e envia os pulsos de gatilho para os interruptores no estágio de potência.

7.1.7 Estrutura de Potência

A “Estrutura de Potência” (7) é o módulo inversor de 45 kVA, modelo SPCIT 4500-60-15 do fabricante SUPPLIER. O mesmo utiliza três capacitores eletrolíticos B43875 em paralelo em cada polo do barramento c.c., resistores para descarregar o barramento c.c. ao desligar o conversor, capacitores de polipropileno próximos aos interruptores para evitar sobretensões nos mesmos e todo circuito de drivers necessário. A Figura 38 ilustra o módulo de potência utilizado.

Figura 38 – Módulo de Potência Inversor SPCIT 4500-60-15.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

7.1.8 Transdutores de Tensão e Corrente

Já as placas de medição são divididas em duas: sensoriamento de tensão (8) e de corrente (9). Para o sensor de tensão são utilizados divisores resistivos e para o sensor de corrente são utilizados transdutores LA 100-P de efeito Hall, fabricante LEM. Cada transdutor de corrente possui ganho de corrente do primário para o secundário de 1/2000 e sua leitura é efetuada em tensão, por meio da inserção de um resistor de carga de 100 Ohms. Uma vez que foram adicionadas seis passagens do condutor pelo sensor, o ganho geral da leitura é $k_i = 0,3$.

7.1.9 Filtro LC

A conexão entre o DSTATCOM e a rede elétrica é realizada através de uma impedância que tem como objetivo filtrar as componentes da frequência de comutação e suas harmônicas, deixando apenas as componentes desejadas. Esta impedância é composta por um indutor conectado em série a um capacitor, o qual está em paralelo com a rede, formando um filtro LC de segunda ordem, identificados na Figura 35.

Os indutores de filtro de saída são do fabricante Magmattec. Cada indutor possui 560 μH , utiliza cinco unidades do núcleo MMTS26T7716, possui 56 espiras e suporta 23 A. Para compor a indutância L_f do DSTATCOM, dois indutores por fase são conectados em série. O capacitor utilizado para a aplicação é fabricado pela empresa EPCOS, sua capacitância é de 50 μF , e seu código é B32322B4506J010.

7.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios práticos da RVNL alocada após o filtro LC, com a técnica atuando no controle de um DSTATCOM. Antes da exposição dos resultados obtidos em bancada, são esclarecidos os métodos utilizados para obtenção e comparação dos resultados.

Os ensaios do conversor são realizados com parâmetros semelhantes àqueles apresentados para as simulações e os resultados são obtidos com cargas resistivas e de potência inferior devido a limitações dos equipamentos.

Com o intuito de emular distúrbios na rede, o DSTATCOM é testado em uma rede artificial, onde a impedância de linha utilizada é provida por um autotransformador conectado em série com uma impedância artificial (Z_{rd_art}), formada por resistor de 0,75 Ω e um indutor de 2,66 mH, pois esse sistema sobrepõe a impedância da rede elétrica da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC). Na Tabela 5 são apresentadas as especificações técnicas do conversor implementado e da rede artificial.

Tabela 5 – Parâmetros do DSTATCOM e da rede artificial.

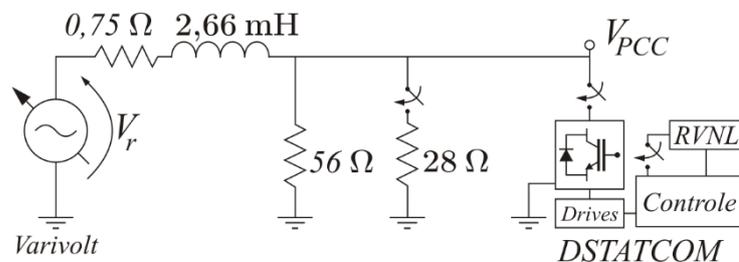
Parâmetros	Valores	
Potência nominal	S_o	30 kVA
Tensão nominal do barramento c.c.	V_o	800 V
Tensão eficaz de fase	V_r	220 V
Frequência da rede	f_r	60 Hz
Frequência de comutação	f_s	20 kHz
Capacitância do barramento c.c.	C_o	3,5 mF
Capacitância do filtro de saída	C_f	47 μF
Indutância do filtro de saída	L_f	1120 μH
Resistência da rede	R_r	0,75 Ω
Indutância da rede	L_r	2,66 mH
Corrente limiar	I_{GI}	$\pm 10 \text{ A} / \pm 7 \text{ A}$
Corrente máxima	I_M	$\pm 18 \text{ A} / \pm 14 \text{ A}$
Ganho da resistência virtual	k_{rv}	125
Carga Leve	R_L	56 Ω
Carga Pesada	R_P	18,7 Ω

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Para uma melhor avaliação da técnica, foram configurados diferentes valores para a corrente limiar, assim, alguns resultados experimentais foram realizados com $\pm 10A$ e outros resultados experimentais foram realizados com $\pm 7A$.

Nos testes são empregadas duas configurações de cargas, denominadas de leve e pesada. A carga leve é um resistor de 56Ω e fica permanentemente conectado ao PCC, a carga pesada trata-se da conexão de um resistor de 28Ω em paralelo. Nos testes dinâmicos da técnica RVNL o comportamento do DSTATCOM é analisado durante a transição habilitando e desabilitando a técnica, e transição de carga leve para pesada e vice-versa, respectivamente chamados de degrau de 34% para 100% de carga e degrau de 100% para 34% de carga. A Figura 39 apresenta um esquema unifilar do circuito artificial utilizado nos ensaios experimentais.

Figura 39 – Esquema unifilar do circuito utilizado nos ensaios experimentais do DSTATCOM.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

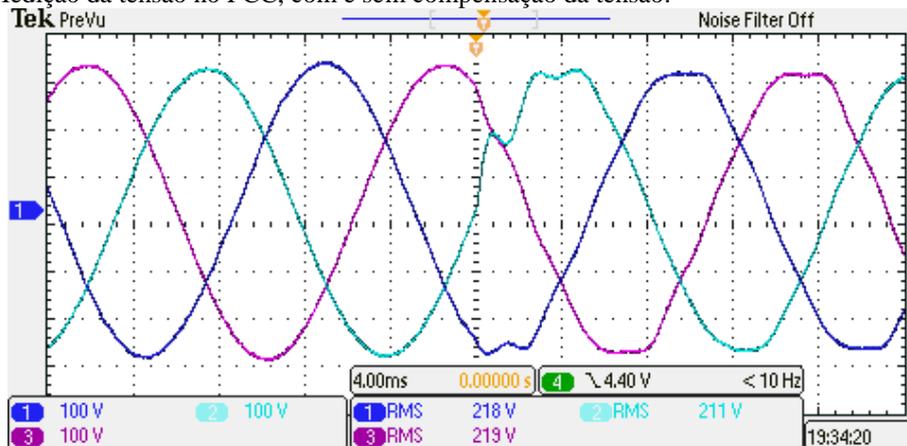
As formas de onda das fases A, B e C são doravante atribuídas aos canais CH1, CH2 e CH3, respectivamente, tanto para as tensões do PCC quanto para as correntes processadas pelo conversor. Para a aquisição dos resultados são utilizados os osciloscópios MSO2014B e MDO3014 do fabricante Tektronix.

7.2.1 Operando “COM” e “SEM” Compensação de Reativos, Analisando o Transiente

Nos resultados experimentais, os transientes das tensões do PCC são medidos com o DSTATCOM em funcionamento e em seguida desabilitando seu funcionamento, com o objetivo de constatar melhoria na qualidade da tensão do PCC na presença do dispositivo.

O valor de tensão para o PCC é arbitrado em 220 V (1,00 pu), mesmo valor nominal da tensão da rede. As tensões do PCC operando sem a compensação do DSTATCOM possuem valor eficaz de tensão de 215 V, 219 V e 218 V para as fases A, B e C, respectivamente. A Figura 40 mostra o transiente descrito das formas de onda das três tensões do PCC sintetizadas pelo DSTATCOM para uma carga leve.

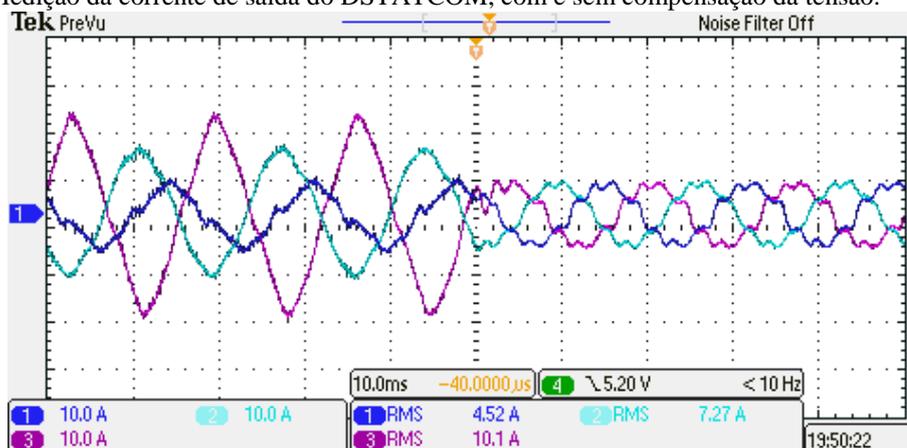
Figura 40 – Medição da tensão no PCC, com e sem compensação da tensão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Como pode ser visto, as tensões do PCC com compensação estão reguladas no valor adotado e apresentam baixa distorção harmônica, sendo medido um valor menor que 3,0%. Ao desabilitar o DSTATCOM a tensão da rede passa a apresentar uma distorção harmônica de 8,32%. Já as formas de onda de corrente do DSTATCOM, durante o transiente, iniciando com a compensação do conversor e em seguida o desabilitando, são apresentadas na Figura 41. As correntes das fases A, B e C possuem valor eficaz de 5,74 A, 8,53 A e 12,3 A, respectivamente, totalizando uma potência de 3,35 kVA (0,112 pu).

Figura 41 – Medição da corrente de saída do DSTATCOM, com e sem compensação da tensão.



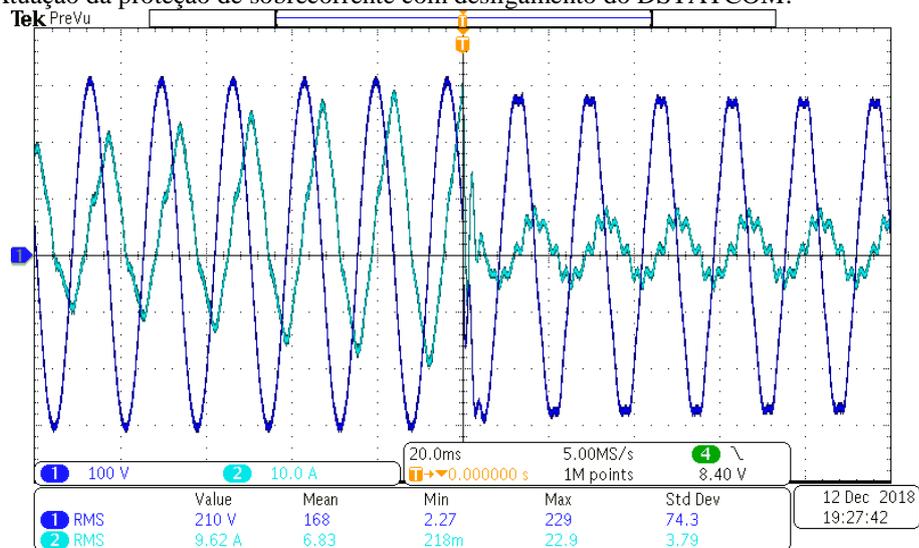
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A distorção harmônica presente nas formas de onda de corrente são originadas pela distorção da tensão da rede. O conversor, impondo tensões com baixa THD, absorve essas distorções na forma de corrente e evita que a tensão do PCC seja distorcida, conforme visto durante os resultados de simulação. Ao desabilitar o conversor, é medido a corrente reativa no capacitor do filtro LC de saída.

7.2.2 Técnica de Proteção de Sobrecorrente Desabilitando o DSTATCOM

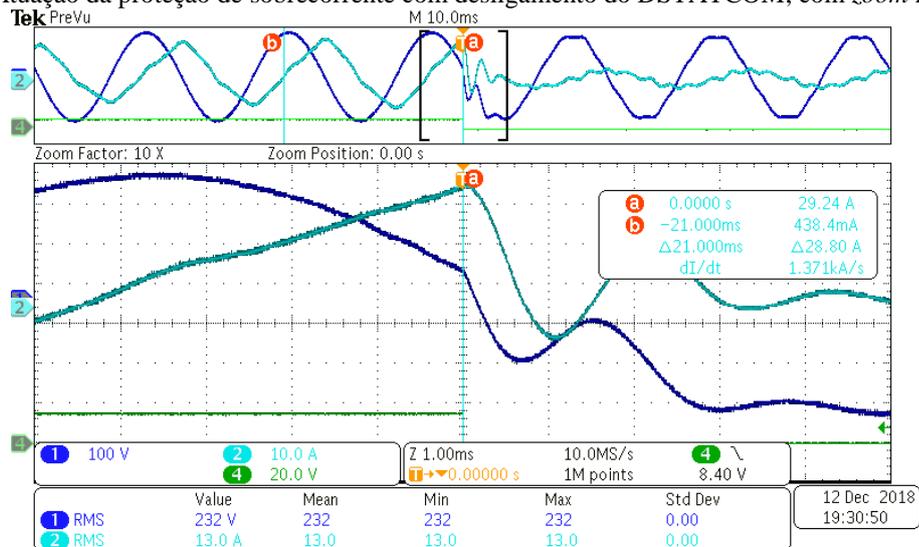
A técnica auxiliar de proteção de corrente mais adotada para compensadores de reativos controlados em tensão é desabilitar seu funcionamento e efetuar sua desconexão da rede, após detectar um máximo valor de corrente admissível ao conversor. Para demonstração prática, a Figura 42 ilustra o transiente de detecção e interrupção de seu funcionamento quando submetido a uma corrente de pico de 30 A aproximadamente.

Figura 42 – Atuação da proteção de sobrecorrente com desligamento do DSTATCOM.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Figura 43 – Atuação da proteção de sobrecorrente com desligamento do DSTATCOM, com zoom no transiente.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

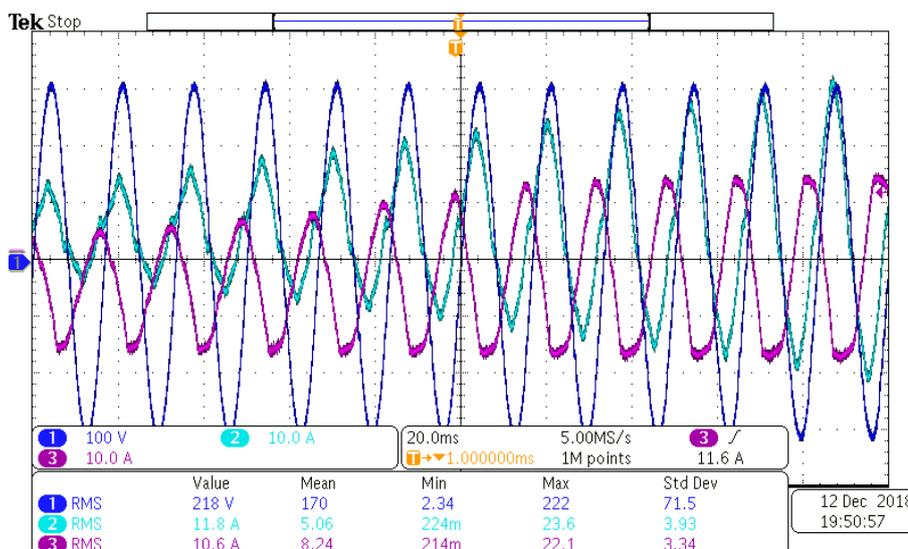
A Figura 42 traz as formas de onda da tensão do PCC (CH1) e da corrente do conversor (CH2) para a fase A. É possível verificar que a corrente do conversor está adiantada em relação à tensão do PCC, com ângulo de defasagem próximo a 90 graus. As demais fases possuem comportamento semelhante ao apresentado para a fase A, distinguindo-se exclusivamente pela defasagem do sistema trifásico.

Na Figura 43 é reapresentada, com mais detalhe, a detecção da falta. Nesta é efetuado um *zoom* no transiente. Conforme pode ser observado, o nível da corrente de pico medido é de 29,24 A. Após a detecção, o sinal de PWM é bloqueado, provocando o decaimento da corrente de saída do conversor. A corrente medida após desabilitar o conversor é a corrente reativa capacitiva do filtro de saída do conversor.

7.2.3 Técnica de Proteção de Sobrecorrente RVNL Não Desabilitando o DSTATCOM

Ao habilitar a técnica RVNL e submeter a mesma condição de sobrecorrente, pode-se verificar pela Figura 44 que a técnica passa a limitar a corrente de saída do conversor. A figura traz as formas de onda da tensão do PCC (CH1), da corrente da rede (CH2) e da corrente do conversor (CH3) para a fase A.

Figura 44 – Operação em sobrecarga, com limitação da corrente de saída do DSTATCOM por meio da técnica RVNL.



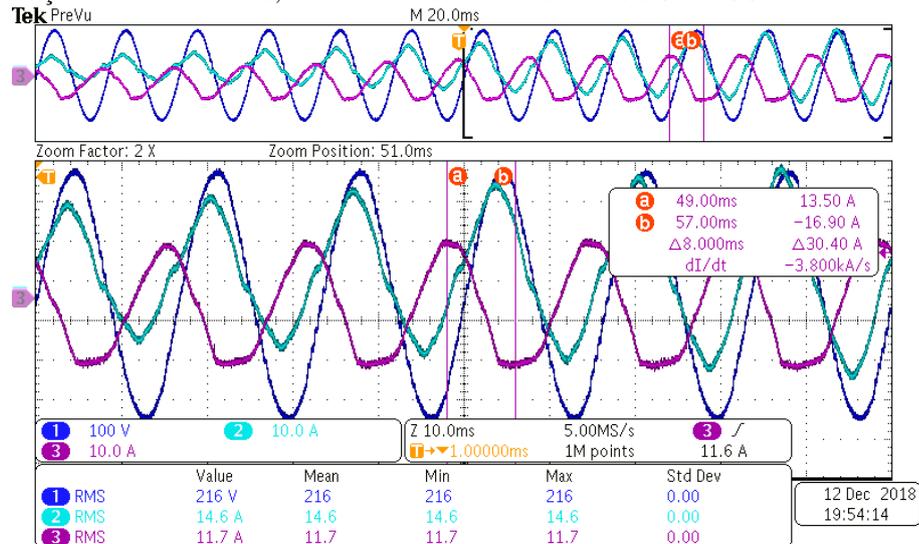
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Observa-se pela figura que o valor de pico da corrente da rede passa de 30 A, com uma tendência a elevar esse valor, enquanto que a corrente máxima do conversor agora não passa os 20 A e com uma tendência de estabilização do valor máximo. Ainda, pode ser verificado que a

forma de onda da corrente do conversor passa a apresentar um formato de achatamento, provocado pela técnica proposta, conforme os resultados apresentados de simulação numérica.

Na Figura 45 é reapresentada, com mais detalhe, a técnica RVNL atuando. Nesta é efetuado um *zoom* e, conforme pode ser observado, o máximo nível da corrente de pico medida foi de -16,9 A, sendo que este valor está dentro da limite estabelecido em projeto que é de -18 A. Com a atuação da técnica RVNL, o conversor não é desabilitado e o nível da tensão eficaz no PCC é mantido.

Figura 45 – Atuação da técnica RVNL, limitando a corrente de saída do DSTATCOM.

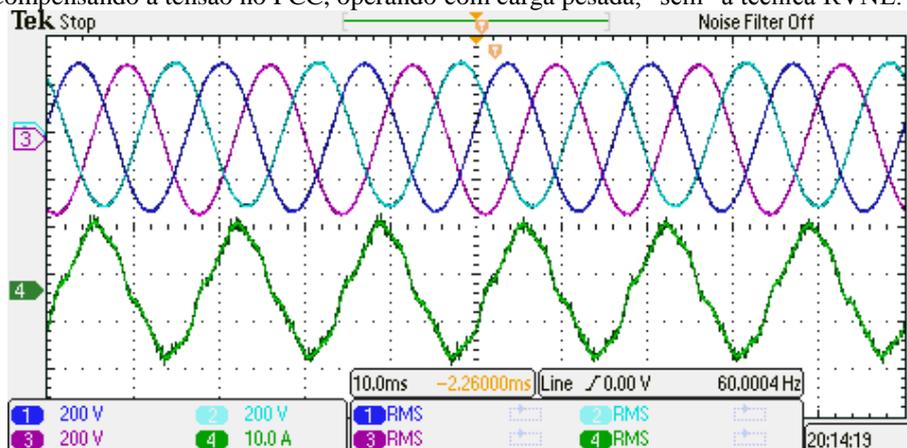


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

7.2.4 Operando em Carga Pesada Sem a Técnica RVNL

A Figura 46 traz as formas de onda da tensão do PCC da fase A (CH1), fase B (CH2), fase C (CH3) e da corrente do conversor da fase C (CH4), operando com a carga pesada. Nesta condição o conversor está compensando os reativos da rede e a técnica RVNL não está habilitada. As tensões do PCC estão reguladas em 220 V (1,00 pu) e apresentam baixa distorção harmônica, sendo de 2,83%, 2,68% e 1,59%, para as fases A, B e C respectivamente (ver APÊNDICE E, página 117). Com a técnica desabilitada, a corrente medida da fase C apresenta valores de até 17 A de pico.

Figura 46 – Compensando a tensão no PCC, operando com carga pesada, “sem” a técnica RVNL.

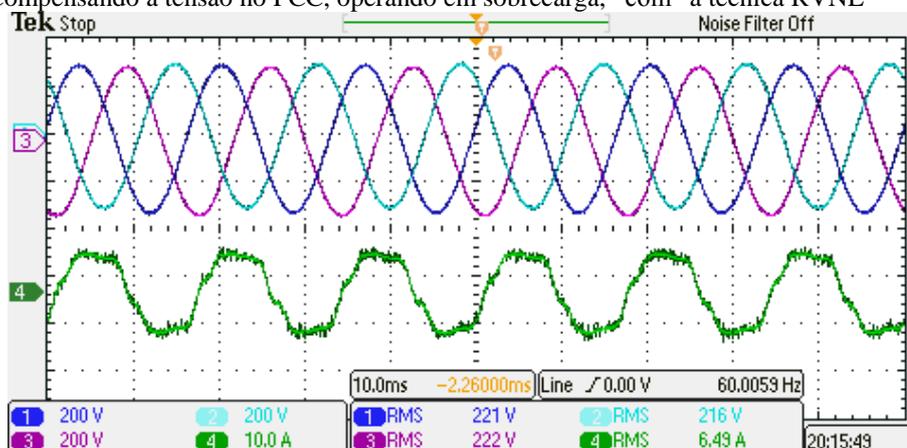


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

7.2.5 Operando em Carga Pesada Com a Técnica RVNL

A Figura 47 traz as formas de onda da tensão do PCC da fase A (CH1), fase B (CH2), fase C (CH3) e da corrente do conversor da fase C (CH4), operando com a carga pesada. Nesta condição o conversor está compensando os reativos da rede. Com o intuito de comparar a distorção harmônica entre as fases, a técnica RVNL foi habilitada apenas na fase C. As tensões do PCC estão reguladas no valor adotado e apresentam baixa distorção harmônica, sendo de 2,65%, 2,63% e 2,29%, para as fases A, B e C respectivamente. Com a técnica RVNL habilitada, a THD aumentou em 0,7%, o que já era esperado. Com a técnica habilitada, a corrente medida da fase C apresenta um formato achatado, com valores de até 9 A de pico, sendo que para essa condição a corrente limiar é de 7 A e máxima de 14 A, portanto a técnica limitou dentro da faixa projetada.

Figura 47 – Compensando a tensão no PCC, operando em sobrecarga, “com” a técnica RVNL

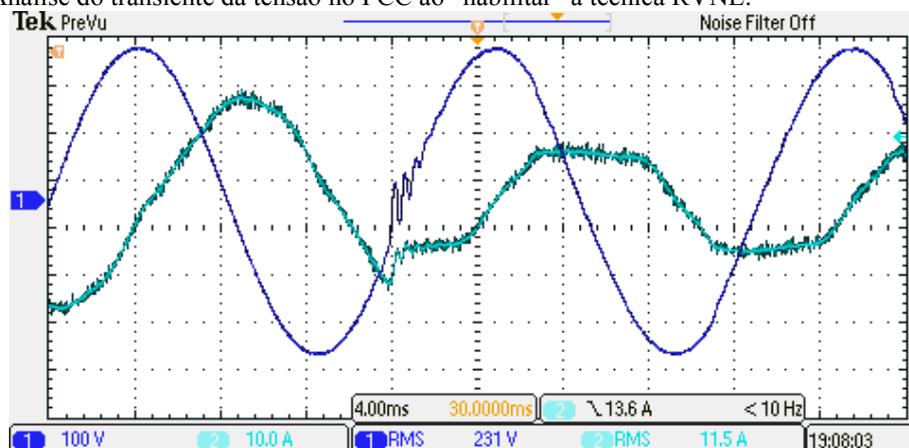


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

7.2.6 Análise de Transiente da Tensão e Corrente ao Habilitar a Técnica RVNL

A Figura 48 traz as formas de onda da tensão do PCC da fase A (CH1) e da corrente do conversor da fase A (CH2), operando com a carga pesada habilitada. Nesta condição o conversor está compensando os reativos da rede e inicialmente a técnica RVNL está desabilitada. Com o intuito de apresentar o transiente na forma da tensão do PCC e da corrente do DSTATCOM, a técnica é habilitada. As tensões do PCC estão reguladas em 220 V (1,00 pu) e apresentam distorção harmônica total menor que 3%.

Figura 48 – Análise do transiente da tensão no PCC ao “habilitar” a técnica RVNL.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

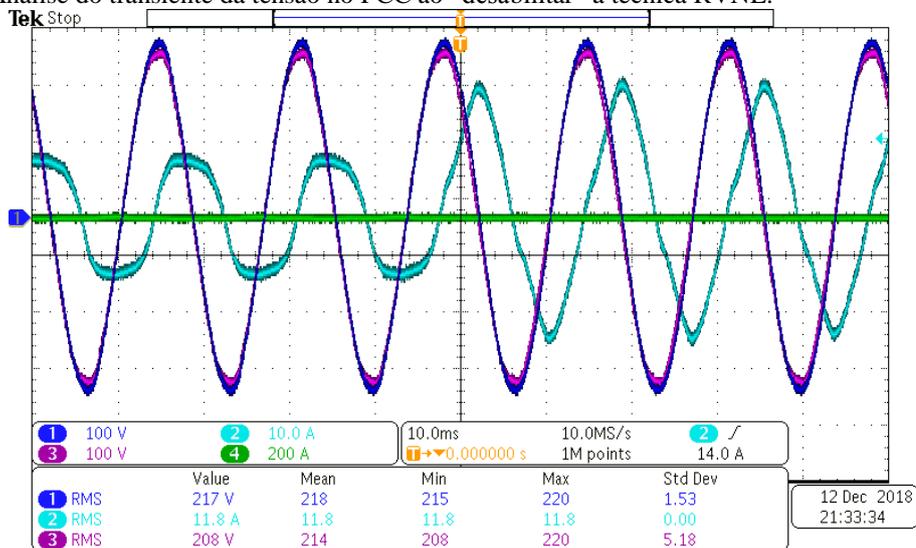
Com a técnica desabilitada, a corrente medida da fase B apresenta valor de até 20 A de pico, após habilitar a técnica, o seu valor é limitado próximo a 10 A de pico. Ao habilitar, a técnica RVNL impõe um degrau de erro no sinal de controle, provocando uma perturbação na saída do compensador, que pode ser observada pela oscilação na tensão do PCC, entretanto em 2 ms o sistema entra em regime permanente.

Ao analisar a Figura 48, pode-se verificar o efeito de deformação da tensão no PCC com a técnica habilitada, o que já era esperado, uma vez que, para limitar a corrente de saída, o DSTATCOM deve impor uma tensão diferente do PCC, provocando essa deformação. Ainda assim, a distorção harmônica com a técnica atuando é baixa, menor que 3%.

7.2.7 Análise de Transiente da Tensão e Corrente ao Desabilitar a Técnica RVNL

A Figura 49 traz as formas de onda da tensão do PCC da fase A (CH1) e da corrente do conversor da fase A (CH2) e a tensão da rede da fase A (CH3), operando com a carga pesada habilitada. Nesta condição o conversor está compensando os reativos da rede e inicialmente a técnica RVNL está habilitada. Com o intuito de apresentar o transiente na forma da tensão do PCC e da corrente do DSTATCOM, a técnica é desabilitada. As tensões do PCC estão reguladas em 220 V (1,00 pu) e apresentam distorção harmônica total menor que 3%.

Figura 49 – Análise do transiente da tensão no PCC ao “desabilitar” a técnica RVNL.



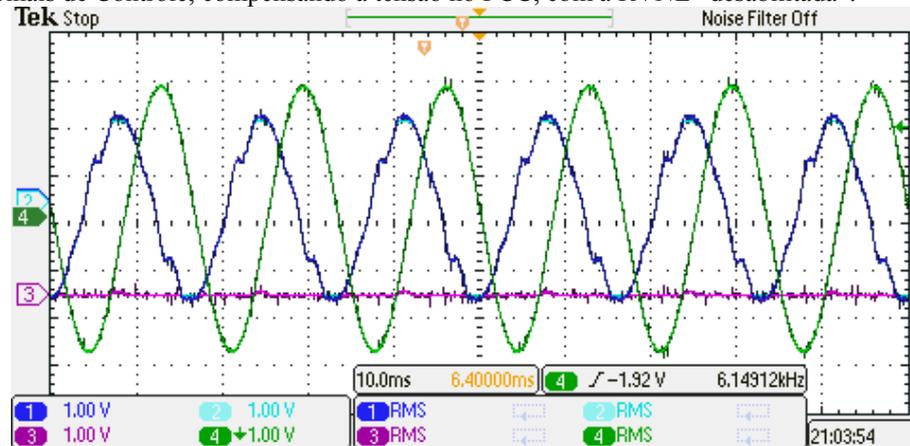
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Com a técnica habilitada, a corrente medida da fase B apresenta valor limitado próximo a 10 A de pico, ao desabilitar, a corrente de pico é maior que 20 A. Na Figura 49, pode-se verificar o efeito de deformação da tensão no PCC com a técnica RVNL atuando, onde a tensão do PCC é similar à tensão da rede. Ao desabilitar a técnica RVNL, a tensão no PCC segue a referência imposta pela malha de tensão de saída, possuindo um perfil mais senoidal e com uma pequena defasagem angular comparado com a tensão da rede.

7.2.8 Análise do Sinal de Controle Compensando a Tensão no PCC com a Técnica RVNL “Desabilitada”

A Figura 50 traz as formas de onda dos sinais de controle da técnica RVNL que são entregues para o controlador do conversor, sendo o sinal proporcional à corrente de saída (CH1), o sinal saturado da corrente de saída (CH2), o sinal proporcional à resistência virtual não linear (CH3) e o sinal de referência da tensão de saída para a fase A com a atenuação do sinal pela técnica RVNL (CH4). Nesta condição a técnica RVNL está habilitada, porém os limites de saturação de corrente são aproximadamente o valor de corrente de pico em operação do conversor, o que caracteriza uma condição normal de operação do conversor.

Figura 50 – Sinais de Controle, compensando a tensão no PCC, com a RVNL “desabilitada”.

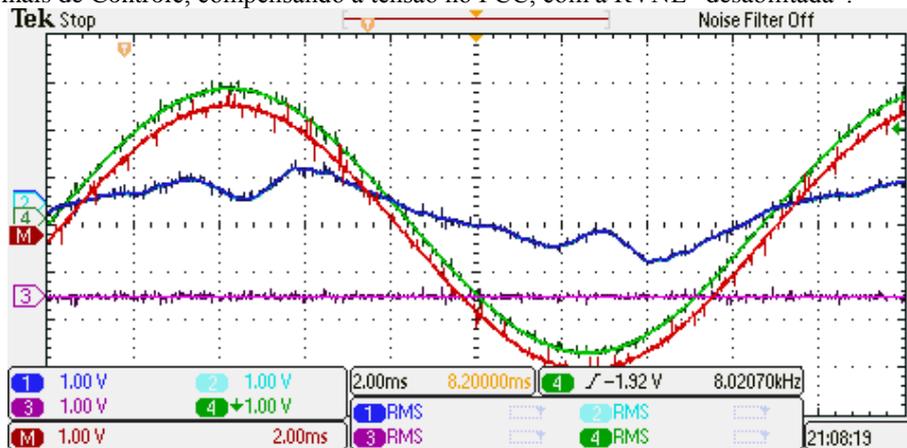


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Pode-se verificar pela figura que a corrente de saída do conversor está operando no valor limiar de início de operação da técnica RVNL, sendo possível ver o valor saturado da corrente (CH2) e, como efeito, aparece uma pequena oscilação no sinal proporcional à resistência virtual (CH3). Porém, é imperceptível a atenuação no sinal de referência de tensão de saída do conversor (CH4).

Na Figura 51 é apresentada uma condição em que o valor da corrente de saída do conversor (CH1) está abaixo do nível de saturação, sobrepondo ao sinal de corrente que seria saturado (CH2) e, por consequência, o sinal de resistência virtual (CH3) permanece em 0 V e não atenua o sinal de referência da tensão de saída (CH4). A forma de onda em vermelho (M) é o sinal proporcional à operação matemática (CH3 + CH4), que resulta no sinal de referência senoidal que vem do DSP. Esse sinal é adicionado na medição para melhorar a visualização da deformação do sinal de referência atenuado.

Figura 51 – Sinais de Controle, compensando a tensão no PCC, com a RVNL “desabilitada”.



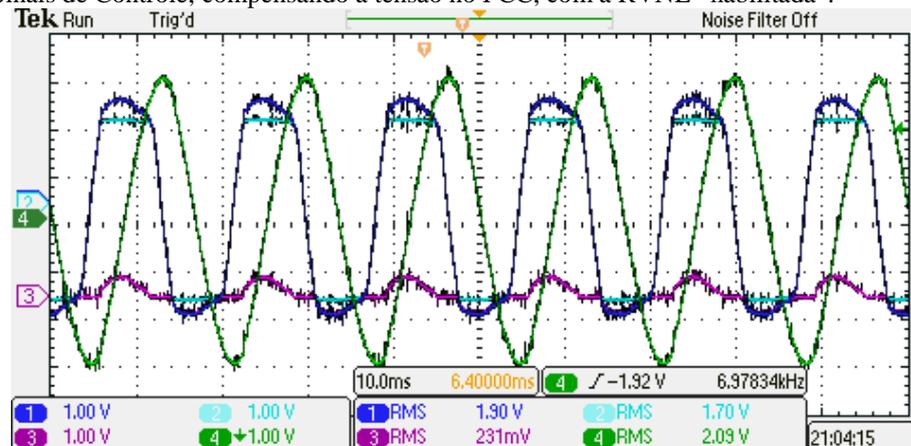
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Analisando a simetria entre o sinal de referência de tensão medido (CH4) e o sinal matemático gerado (M), fica evidente que são equivalentes, comprovando que a técnica RVNL não deforma o sinal de referência de controle quando não está atuando. Os *spikes* apresentados em todos os sinais medidos são ruídos de medição e não tem efeito negativo sobre as malhas de controle.

7.2.9 Análise do Sinal de Controle Compensando a Tensão no PCC com a Técnica RVNL “Habilitada”

A Figura 52 traz as formas de onda dos sinais de controle da técnica RVNL que são entregues ao controlador do conversor, sendo o sinal proporcional à corrente de saída (CH1), o sinal saturado da corrente de saída (CH2), o sinal proporcional a resistência virtual não lineal (CH3) e o sinal de referência da tensão de saída para a fase A com a atenuação da técnica RVNL (CH4). Nesta condição a técnica RVNL está habilitada, os limites de saturação de corrente são menores que a corrente de saída do conversor, o que caracteriza uma condição de operação do conversor em sobrecarga, onde a técnica RVNL está atuando.

Figura 52 – Sinais de Controle, compensando a tensão no PCC, com a RVNL “habilitada”.

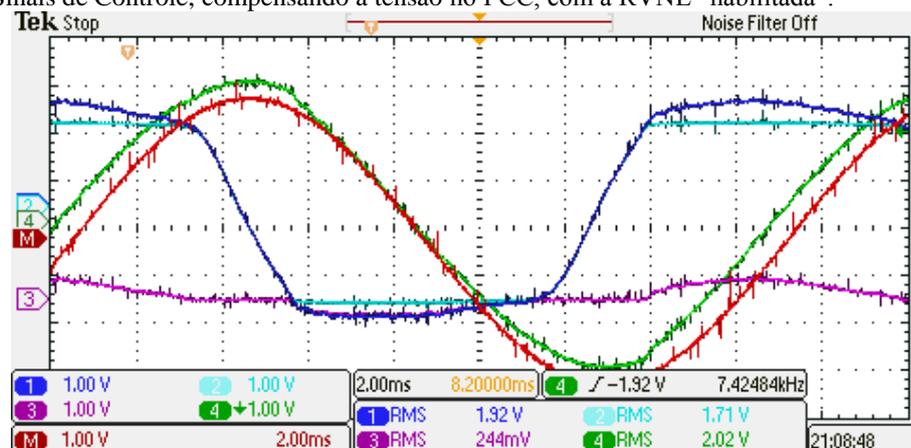


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Pode-se verificar pela figura que a corrente de saída do conversor está operando acima do valor de atuação da técnica RVNL, sendo possível visualizar o valor saturado da corrente (CH2) e, como efeito, aparece uma elevação no sinal proporcional à resistência virtual (CH3). Neste caso é visível a atenuação no sinal de referência de tensão de saída do conversor (CH4).

Na Figura 53 é rerepresentada a condição anterior, porém com uma menor escala de tempo, em que o valor da corrente de saída do conversor (CH1) está acima do nível de saturação, sobrepondo o sinal saturando de corrente (CH2) e, por consequência, o sinal de resistência virtual (CH3) atenua o sinal de referência da tensão de saída (CH4). A forma de onda em vermelho (M) é o sinal proporcional à operação matemática (CH3 + CH4), que resulta no sinal de referência senoidal que vem do DSP.

Figura 53 – Sinais de Controle, compensando a tensão no PCC, com a RVNL “habilitada”.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

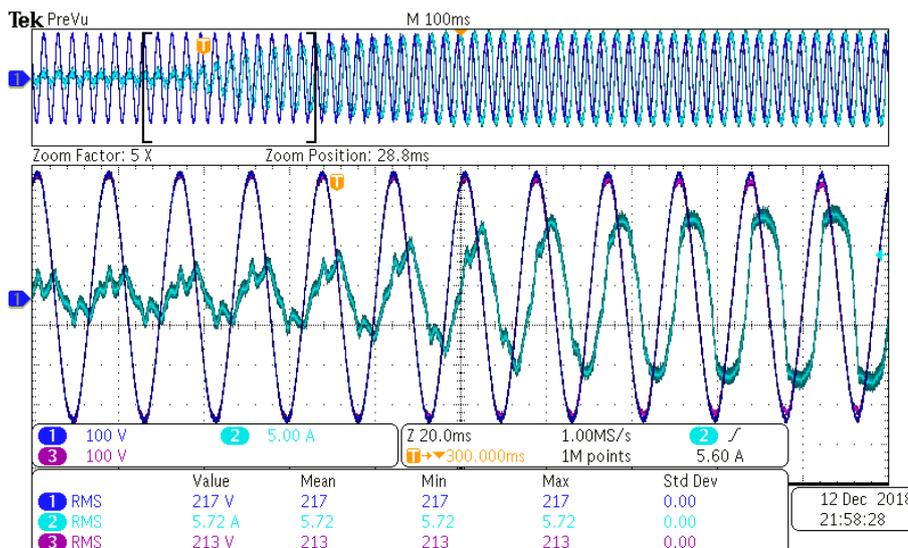
Analisando a simetria entre o sinal de referência de tensão medido (CH4) e o sinal matemático gerado (M), fica evidente que não são equivalentes e o sinal de referência de tensão de saída (CH4) está atenuado, comprovando que a técnica RVNL está alterando o sinal de referência da tensão do PCC para a respectiva fase.

7.2.10 Operando em Condição de Afundamento de Tensão da Rede

Ao reduzir a tensão da “rede artificial” com o autotransformador e manter o DSTATCOM regulando a tensão no PCC em 220 V (1,00 pu), é possível simular uma condição de afundamento de tensão da rede. A Figura 54 traz as formas de onda da tensão do PCC da fase A (CH1), da corrente do conversor da fase A (CH2), e a tensão da rede da fase A (CH3), operando com a carga leve.

Nesta condição o conversor está compensando os reativos da rede e inicialmente a técnica RVNL não está atuando, com o decaimento da tensão de rede de 218 V para 182 V, o conversor passa a trabalhar em sobrecarga e, ao atingir o limite de corrente especificado, a técnica RVNL inicia sua atuação, limitando a corrente de saída do conversor e atenuando a tensão do PCC.

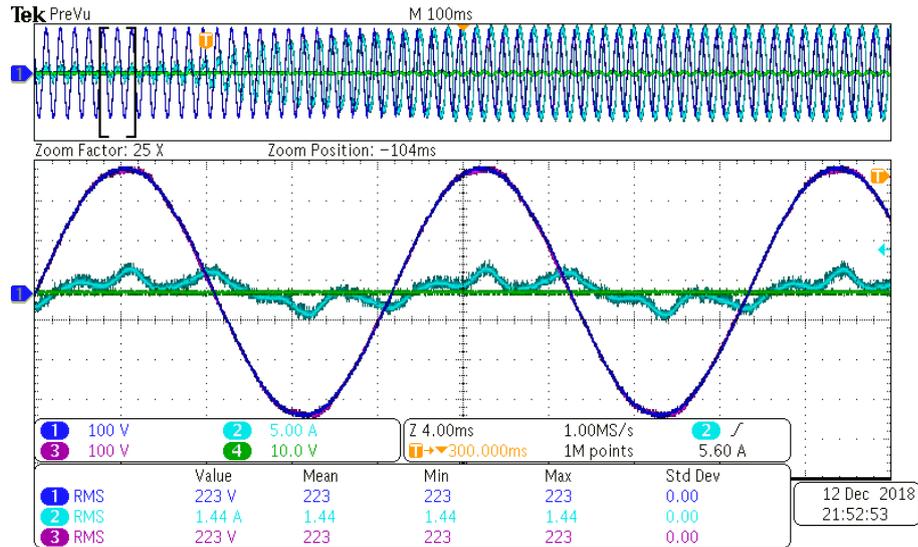
Figura 54 – Compensando a tensão no PCC, em uma condição de afundamento de tensão, com a técnica RVNL habilitada.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A condição de afundamento de tensão é rerepresentada na Figura 55. Nesta é efetuado um *zoom* nos sinais medidos, analisando o comportamento dos sinais antes do início da queda da tensão da rede. A tensão no PCC (CH1) e a tensão da rede (CH3) estão em 223 V, senoidais, fazendo com que o conversor processe menos corrente (CH2), bastando apenas 1,44 A para corrigir a distorção harmônica da rede e manter sua operação. Nesta figura é também apresentado o sinal de tensão da resistência virtual não linear (CH4), que nesta condição se mantém em 0 V.

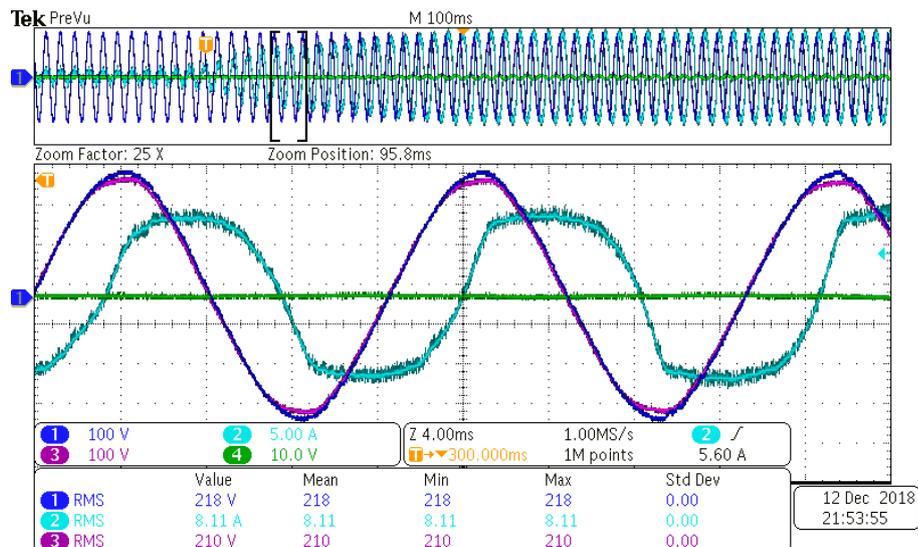
Figura 55 – Compensando a tensão no PCC, em uma condição de afundamento de tensão, com a técnica RVNL habilitada.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A condição de afundamento de tensão é reapresentada na Figura 56. Nesta é efetuado um *zoom* nos sinais medidos, analisando o comportamento dos sinais no início da queda da tensão da rede. A tensão no PCC (CH1) está em 218 V e a tensão da rede (CH3) está em 210 V, ainda senoidais, porém apresentando pouca distorção harmônica. Nesta condição a técnica RVNL está atuando e a corrente é limitada próximo a 10 A de pico. Nesta figura, o sinal de tensão da resistência virtual não linear (CH4) apresenta uma pequena oscilação, demonstrando que a técnica está ativa.

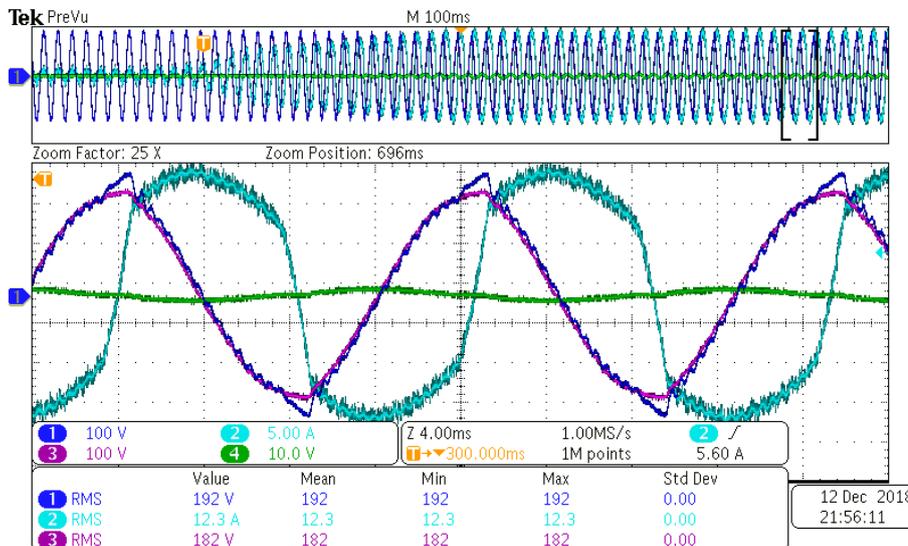
Figura 56 – Compensando a tensão no PCC, em uma condição de afundamento de tensão, com a técnica RVNL habilitada.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A condição de afundamento de tensão é reapresentada na Figura 57. Nesta é efetuado um *zoom* nos sinais medidos, analisando o comportamento dos sinais no final do afundamento da tensão da rede. A tensão no PCC (CH1) está em 192 V e a tensão da rede (CH3) está em 182 V, apresentando uma alta distorção harmônica, porém limitando à corrente de saída do conversor próximo a 15 A de pico, protegendo o conversor e o mantendo em funcionamento. Nesta figura, o sinal de tensão da resistência virtual não linear (CH4) apresenta uma oscilação maior.

Figura 57 – Compensando a tensão no PCC, em uma condição de afundamento de tensão, com a técnica RVNL habilitada.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Considerando que o DSTATCOM não injeta potência ativa na rede, pois não é alimentado por uma outra fonte de energia, este não é capaz de manter o nível de tensão do PCC em 220 V e não consegue manter sua operação nesta condição por muito tempo, devido à queda da tensão do barramento c.c. Ao limitar a corrente de saída, a técnica RVNL altera a tensão de saída do conversor, tornando a tensão sintetizada no PCC em fase com a tensão da rede. Nesta condição, o DSTATCOM deve tomar alguma ação, como reduzir a tensão de referência para um nível menor e/ou desabilitar o conversor e/ou injetar menos corrente na rede durante a condição de falta.

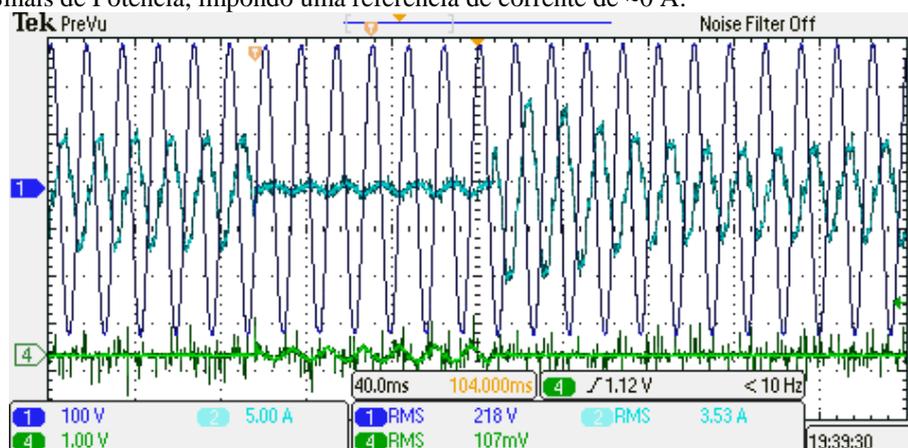
7.2.11 Análise dos Sinais de Potência ao Impor Referência de Corrente 0 A para o DSTATCOM

Uma variação dinâmica pode ser implementada no limite superior (IG+) e inferior (IG-) do saturador da técnica RVNL, variando de um limite máximo de corrente para um limite mínimo, permitindo assim que em condições desejadas, por exemplo, de afundamento de tensão ou curto-circuito, o DSTATCOM forneça ao PCC uma corrente próxima a zero. Como vantagem, a tensão do barramento c.c. se mantém próxima do valor nominal de operação, permitindo que o DSTATCOM prontamente reestabeleça a tensão do PCC assim que a falta cesse. Caso contrário, haveria o tempo de energização do equipamento a ser considerado.

Com o intuito de apresentar os transientes dos sinais de potência com a variação dinâmica dos limites de saturação, impondo uma referência de corrente próxima a 0 A é apresentada a Figura 58. Nesta ilustração é apresentada a forma de onda da tensão do PCC da fase A (CH1), da corrente do conversor da fase A (CH2) e da tensão proporcional ao sinal de resistência virtual não linear (CH4).

Nesta condição o conversor está inicialmente compensando os reativos da rede, em uma condição normal de operação, com carga leve e sem atuação da técnica RVNL. Após 100 ms é alterada a referência da corrente para aproximadamente 0 A, com duração de 110 ms, e, na sequência, os limites de saturação são alterados novamente para o nível de condição normal de operação (aproximadamente 10 A de pico).

Figura 58 – Sinais de Potência, impondo uma referência de corrente de ~0 A.

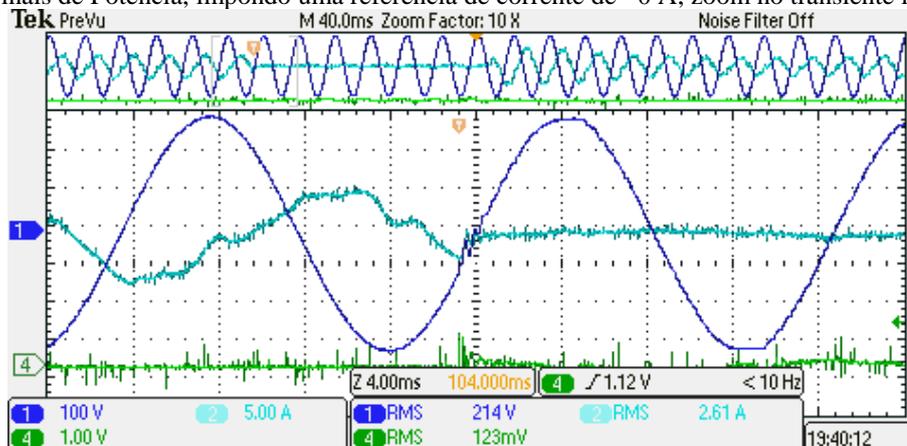


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A condição de variação dinâmica dos limites de saturação é reapresentada na Figura 59. Nesta é efetuado um *zoom* nos sinais medidos, analisando o comportamento transiente dos sinais ao ajustar os limites de saturação para uma corrente próxima a 0 A. A tensão no PCC (CH1) está inicialmente em 220 V e ao alterar o valor de referência de corrente, a tensão passa a ter o mesmo nível de tensão de rede, aproximadamente 212 V, com perfil senoidal, porém apresentando distorção harmônica. Antes de alterar o valor de referência da corrente, o valor injetado pelo compensador é de aproximadamente 3,5 A eficaz, com o valor de pico de 5 A. Após a alteração da referência, o valor eficaz da corrente é de 281 mA, sendo o valor de pico de aproximadamente 400 mA.

Ao alterar o valor de referência, o sinal de controle da técnica RVNL impõe um degrau de erro no sinal de controle, provocando uma perturbação na saída do compensador, que pode ser observada pela oscilação na tensão do PCC. Entretanto, em menos de 2 ms, o sistema entra em regime. Conforme pode ser observado pelo sinal de tensão proporcional à resistência virtual não linear (CH4), inicialmente o sinal se mantém em 0 V e, ao alterar o valor de referência, este passa a apresentar uma oscilação, comprovando que a técnica está atuando.

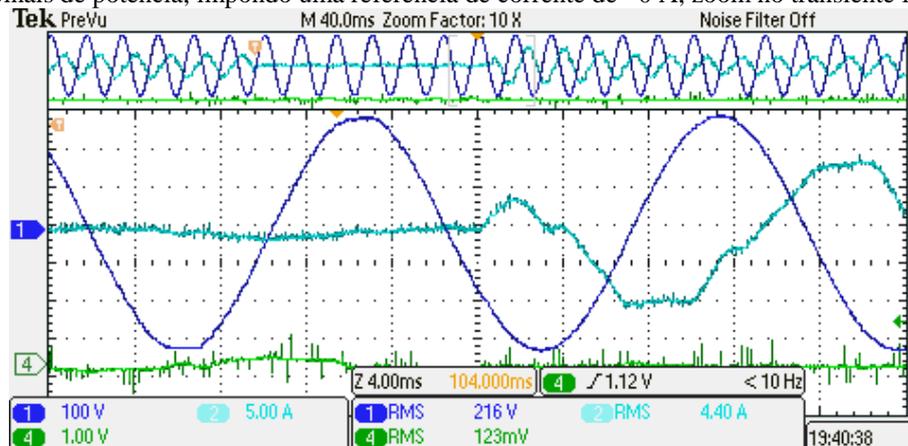
Figura 59 – Sinais de Potência, impondo uma referência de corrente de ~ 0 A, zoom no transiente inicial.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A condição de variação dinâmica dos limites de saturação é reapresentada na Figura 60. Nesta, é efetuado um *zoom* nos sinais medidos, analisando o comportamento transiente dos sinais ao ajustar os limites de saturação de uma corrente próxima a 0 A para seu valor normal de operação. A tensão no PCC (CH1) está inicialmente em 212 V e, ao alterar o valor de referência de corrente, a tensão deixa de ter o mesmo nível de tensão de rede e volta para o nível estabelecido pelo DSTATCOM, que é 220 V, com perfil senoidal, sem apresentar distorção harmônica.

Figura 60 – Sinais de potência, impondo uma referência de corrente de ~0 A, zoom no transiente final.



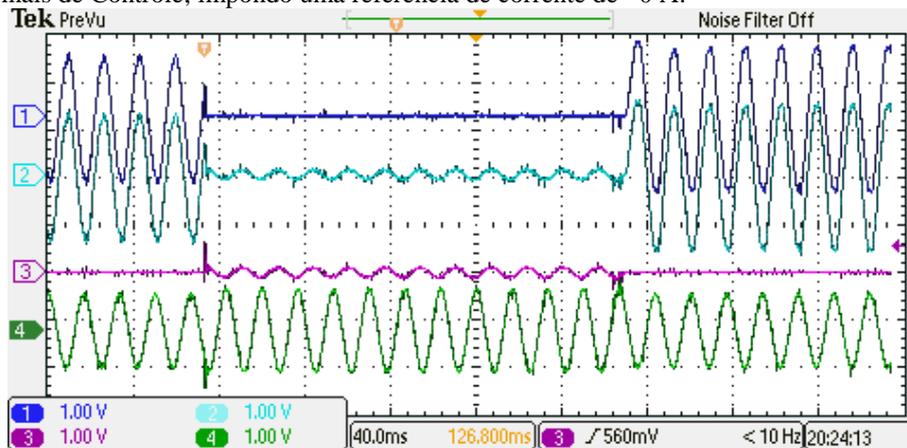
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Quando o conversor está operando em condição de limitação de corrente, esse consegue manter o nível do barramento c.c. por um maior tempo, porém, ainda assim existe um decaimento natural da tensão e, por consequência, os controladores do barramento c.c. tendem a impor os seus limites máximos buscando carregar esse barramento c.c. Quando a técnica RVNL está operando, esta acaba sobrepondo os sinais de controle do conversor e ao retornar para os níveis normais de saturação de limitação de corrente da técnica RVNL, o controlador do barramento c.c. acaba provocando uma sobrecorrente na saída do conversor, entretanto a técnica RVNL continua protegendo o conversor, limitando esse valor em 10 A de pico. Após alguns instantes, os controladores entram em regime e o conversor passa a operar em condição normal de operação.

7.2.12 Análise dos Sinais de Controle ao Impor Referência de Corrente 0 A para o DSTATCOM

Com o intuito de apresentar os transientes dos sinais de controle com a variação dinâmica dos limites de saturação, impondo uma referência de corrente próxima a 0 A, é apresentada a Figura 61. Nesta ilustração apresenta-se o sinal proporcional à corrente de saída para a fase A (CH2), o sinal proporcional à corrente de saída saturada da fase A (CH1), o sinal de tensão proporcional à resistência virtual não linear (CH3) e o sinal de referência da tensão, atenuado pela técnica RVNL (CH4).

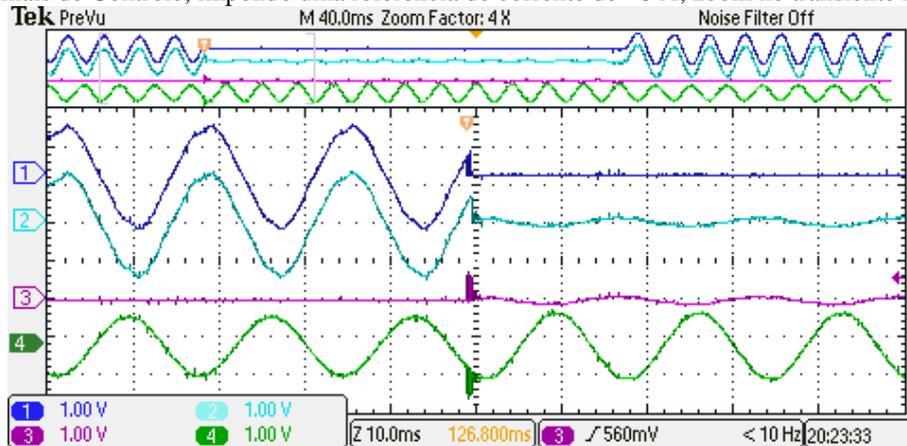
Figura 61 – Sinais de Controle, impondo uma referência de corrente de ~ 0 A.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A condição de variação dinâmica dos limites de saturação é reapresentada na Figura 62. Nesta, é efetuado um *zoom* nos sinais medidos, analisando o comportamento transiente dos sinais ao impor os limites de saturação para uma corrente próxima a 0 A.

Figura 62 – Sinais de Controle, impondo uma referência de corrente de ~ 0 A, zoom no transiente inicial.



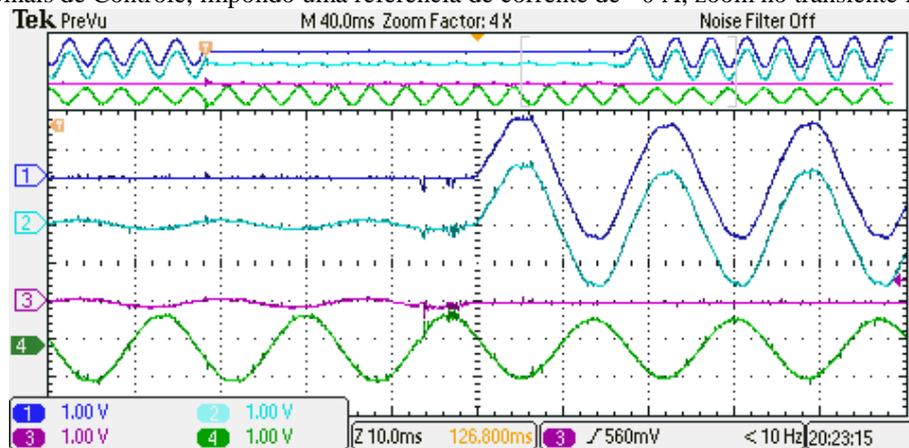
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A proposta inicial para esse trabalho é comutar o sinal de referência de corrente de 0 A por um sinal vindo do DSP, porém, devido à falta de tempo para a implementação prática deste circuito, o autor optou por adicionar uma chave *push-button* no circuito do diodo grameador. Ao acionar o botão, é efetuado o aterramento desse circuito, impondo 0 V de referência para o circuito. Devido às características construtivas e de operação dessa chave, surgem oscilações no acionamento/desacionamento do botão, que tem uma duração menor que 500 μ s e provoca um sinal similar a um PWM. Por consequência, a técnica acaba impondo essa oscilação no sinal de referência de tensão, que é fornecida ao controlador de tensão de saída (CH4). Entretanto,

observa-se que o controlador de tensão acaba atenuando essa oscilação devido a sua banda passante.

A condição de variação dinâmica dos limites de saturação é rerepresentada na Figura 63. Nesta, é efetuado um *zoom* nos sinais medidos, analisando o comportamento transiente dos sinais ao ajustar os limites de saturação de uma corrente próxima a 0 A para seu valor normal de operação.

Figura 63 – Sinais de Controle, impondo uma referência de corrente de ~ 0 A, zoom no transiente final.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Ao analisar a figura, pode-se verificar que os sinais proporcionais à corrente de saída (CH1 e CH2) possuem inicialmente um perfil senoidal, porém com os picos atenuados, demonstrando que a técnica está limitando a corrente máxima de operação.

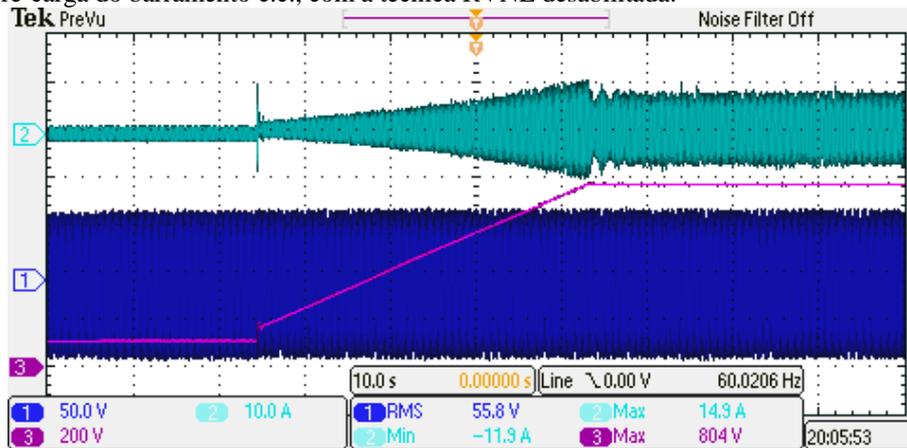
7.2.13 Análise da Técnica RVNL na Pré-Carga do Barramento C.C.

Para o correto funcionamento do compensador de tensão é preciso que os capacitores do barramento c.c. estejam carregados com a sua tensão nominal. A Figura 64 e a Figura 65 apresentam a evolução temporal da tensão total do barramento c.c. (CH3), a tensão da rede para a fase A (CH1) e a corrente do conversor (CH2) para a fase A, durante a inicialização do DSTATCOM, com a técnica RVNL habilitada.

O procedimento de carga dos capacitores é efetuado da seguinte forma, inicialmente a tensão da rede (autotransformador) é configurada para 55 V e então é habilitado o conversor, que passa a modular uma tensão no PCC de 56 V, tendo amplitude e defasagem angular diferente da tensão da rede, absorve potência ativa e reativa da rede, carregando o barramento para a tensão total de 800 V, divididos em ± 400 V com relação ao neutro.

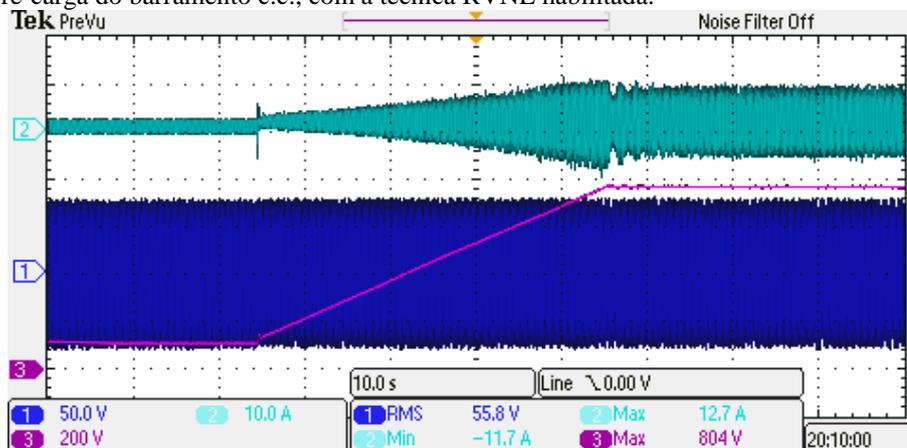
Para avaliar o efeito da limitação de corrente no carregamento de barramento c.c. é apresentada a Figura 64, onde o barramento é carregado com a técnica RVNL desabilitada, e a Figura 65, onde é realizado o mesmo procedimento de carga do barramento com a técnica RVNL habilitada.

Figura 64 – Pré-carga do barramento c.c., com a técnica RVNL desabilitada.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Figura 65 – Pré-carga do barramento c.c., com a técnica RVNL habilitada.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Devido a condição segura adotada para o carregamento da tensão do barramento c.c., que ocorre de forma lenta, só é possível observar a técnica atuando no final da rampa, momento em que o conversor absorve uma maior corrente. Sem a técnica habilitada, pode-se observar que os valores de corrente de pico a pico são maiores que 21 A e, com a técnica RVNL habilitada, o máximo valor de corrente pico a pico é de 16 A. Conforme esperado, com a técnica RVNL habilitada, o tempo para carregamento do barramento c.c. é maior.

7.3 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os componentes necessários na montagem do protótipo, suas conexões no DSTATCOM, principais circuitos e respectivas funções e os resultados experimentais com a técnica proposta, denominada de Resistência Virtual Não Linear.

O laboratório do Núcleo de Processamento de Energia Elétrica (nPEE), da Universidade do Estado de Santa Catarina não possui uma fonte de energia que simula distúrbios na rede de potência elevada, fato que impossibilita a realização de todos os testes efetuados no ambiente de simulação numérica e apresentados neste trabalho. Entretanto, ao realizar o ensaio com a impedância de rede artificial, foi possível gerar grande variação paramétrica da tensão da rede, validando a técnica de limitação de corrente para uma grande gama de condições e distúrbios. Assim como no ambiente de simulação, o DSTATCOM protótipo foi capaz de limitar a corrente de saída, impor quando possível a tensão de 1,00 pu ao Ponto Comum de Conexão, com baixa distorção harmônica, diante de todas as condições de distúrbios e cargas ensaiadas, mantendo o barramento c.c. regulado em seu valor nominal.

O efeito oscilatório apresentado pelo *push-button* provocou um resultado não desejável na imposição de uma corrente de ~ 0 A na saída do conversor, portanto é sugestão de um trabalho futuro a implementação da comutação via uma chave de estado sólido e seu acionamento via o DSP.

A técnica RVNL limita o valor máximo instantâneo da corrente de saída do DSTATCOM, o que provoca um achatamento na forma de onda da corrente, comprometendo a distorção harmônica total (*Total Harmonic Distortion - THD*), logo não atendendo os valores de referência de QEE especificadas pelo PRODIST. Contudo, conforme os Procedimentos de Rede do Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, a medição da distorção harmônica de tensão não se aplica a fenômenos transitórios ou de curta duração que resultem em injeção de correntes harmônicas (ONS, 2017).

A resposta da técnica foi avaliada por meio de análise das formas de ondas de tensões e correntes do PCC e dos sinais de controle da técnica RVNL. A solução obteve sucesso na limitação de corrente, assim como na imposição de corrente 0 A na saída do DSTATCOM.

8 CONCLUSÕES GERAIS

Esse trabalho apresentou um compensador estático de reativos controlado em tensão para a regulação da tensão de atendimento de consumidores em baixa tensão. A contribuição principal foi a adição de uma técnica auxiliar para limitação da corrente de saída, para operação em condição de distúrbios da rede elétrica. Complementarmente, foi desenvolvida uma lógica para definição dos valores do saturador, definindo os estados de operação durante os distúrbios da rede elétrica.

O Capítulo 2 apresentou a análise de transferência de potência entre a rede de distribuição e o conversor, quando foi visto como se obtém os circuitos equivalentes, seus parâmetros e a influência do compensador de reativos nessa rede. Os compensadores injetam correntes senoidais em quadratura com a tensão do PCC, emulando o efeito de reatâncias capacitivas ou indutivas, controlando o fluxo de potência reativa. A técnica de controle baseia-se na composição de duas componentes de referência para a tensão, sendo estas a amplitude da tensão desejada no PCC e a fase do sinal senoidal. Logo, para limitar a corrente de saída para uma condição de distúrbio de tensão, a tensão modulada na saída do DSTATCOM ou as referências do controle devem possuir um formato similar ao distúrbio da tensão.

O Capítulo 3 apresentou a estrutura de controle e potência do compensador de reativos utilizado. A estrutura de controle é composta por três controladores da tensão de saída com amortecimento ativo, um controlador da tensão total do barramento c.c., um controlador da tensão diferencial do barramento c.c., e a técnica de limitação de corrente RVNL. Apresentou a topologia meia ponte trifásico a quatro fios e o filtro de saída, que compõe o estágio de potência do conversor. A implementação da técnica RVNL é favorecida pela topologia utilizada devido a atuação independente para cada fase.

O Capítulo 4 abordou a técnica da Resistência Virtual Não Linear, apresentado os aspectos teóricos com uma descrição detalhada de sua operação e suas equações matemáticas para determinação das constantes. Uma lógica complementar foi apresentada para variação dinâmica dos limites do saturador, permitindo operar durante a condição de falta, injetando uma corrente próxima a zero, mantendo a tensão do barramento c.c.

O Capítulo 5 apresentou de forma detalhada o projeto dos circuitos eletrônicos que contemplam a técnica RVNL, além do o projeto de layout da placa de circuito impresso. O circuito se mostra simples e de fácil implementação.

O Capítulo 6 apresentou os circuitos de controle e potência do DSTATCOM controlado em tensão, utilizados para validação da técnica RVNL, via simulação numérica. Os resultados

apresentados das simulações foram efetuados para diversas condições de distúrbios da rede elétrica, tais como surto de tensão, elevação de tensão, afundamento de tensão, interrupção de tensão e curto-circuito trifásico na saída do DSTATCOM.

Ainda no Capítulo 6, a técnica RVNL permitiu, durante a falta de afundamento de tensão, limitar a corrente de saída do DSTATCOM próxima a zero e, por consequência, a tensão do barramento c.c. se manteve regulada próxima do valor nominal de operação, possibilitando que o DSTATCOM prontamente reestabelecesse a tensão do PCC assim que a falta cessou. Os resultados obtidos para todos os distúrbios apresentados demonstraram a capacidade de limitação de corrente de saída, preservando o equipamento e as cargas próximas conectadas.

O Capítulo 7 trouxe os resultados experimentais obtidos com a implementação da técnica RVNL no DSTATCOM protótipo. No capítulo foram apresentados os componentes necessários para a montagem do protótipo, suas conexões no DSTATCOM, os principais circuitos e respectivas funções. Ao realizar ensaios com a impedância de rede artificial, foi possível gerar grande variação paramétrica da tensão da rede, validando a técnica de limitação de corrente para uma grande gama de condições e distúrbios. Assim como no ambiente de simulação, o DSTATCOM protótipo foi capaz de limitar a corrente de saída, impor quando possível a tensão de 1,00 pu ao Ponto Comum de Conexão com baixa distorção harmônica. Diante de todas as condições de distúrbios e cargas ensaiadas, o DSTATCOM manteve o barramento c.c. regulado em seu valor nominal. A resposta da técnica foi avaliada por meio de análise das formas de ondas de tensões e correntes do PCC e dos sinais de controle da técnica RVNL. A solução obteve sucesso na limitação de corrente, assim como na imposição de corrente 0 A no DSTATCOM.

Diante do exposto, algumas investigações são propostas a fim de complementar a pesquisa acerca da técnica de limitação de corrente por meio da resistência virtual não linear:

- Implementar no DSP a lógica proposta que altera os estados de operação do conversor.
- Implementar o sistema de controle no tempo discreto e avaliar o seu desempenho em comparação ao tempo contínuo.
- Análise da influência de uma possível injeção de potência ativa no PCC, em conjunto com a compensação de reativos e a técnica RVNL.
- Análise em implementar o bloco Sat em coordenadas dq, limitando a corrente de saída com um perfil senoidal.
- Investigar o uso da técnica RVNL para outros fins, como para proteção de sobretensão no barramento c.c. durante a comutação de IGBTs. Implementar a técnica em compensadores de reativos controlados em corrente, visando manter o nível da tensão do PCC em condição de distúrbios.

REFERÊNCIAS

AGGARWAL, M. et al. **Control in Low Voltage Distribution System with Distributed Generation**. ICETET. International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology. Goa, Índia: ISSN 2157-0477. 2010. p. 426-429.

ANEEL. **Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica**. Agência Nacional de Energia Elétrica. [S.l.], p. 88. 2018.

ARYA, S. R.; SINGH, B. Neural Network Based Conductance Estimation Control Algorithm for Shunt Compensation. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, p. 569 - 577, 2013.

ÅSTRÖM, K. J.; RUNDQWIST, L. **Integrator windup and how to avoid it**. American Control Conference. Pittsburgh: PA. 1989. p. 1693-1698.

BARBI, I. **Eletrônica de Potência**. 4. ed. Florianópolis: Edição do Autor, v. 1, 2002.

BATSCHAUER, A. L. **Projeto de Reatores Eletrônicos para Lâmpadas de Vapor de Sódio de Alta Pressão de 250W e 400W**. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 143. 2002.

BATSCHAUER, A. L. **Inversor multiníveis híbrido trifásico baseado em módulos meia-ponte**. Florianópolis. 2011.

BORGONOVO, D.; BARBI, I. Uma Nova Topologia Para Um Retificador Passivo Trifásico Com Elevado Fator de Potência. **COBEP**, Fortaleza, 2003.

BORRÉ, A. C. et al. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O CONTROLE DIRETO E INDIRETO DE INJEÇÃO DE CORRENTE EM UM D-STATCOM. **Eletrônica de Potência**, v. 11, n. n°2, p. 8, 2006.

DA CUNHA, J. C. **Projeto e Implementação de um DSTATCOM Multifuncional Controlado em Corrente e com Mitigação de Harmônicas por Detecção de Tensão**, **Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado de Santa Catarina**. Joinville. 2015.

DFARS CASE 2012-D055, D. F. A. R. S. D. A. A. O. C. E. P. FEDERAL REGISTER, 05 jun. 2014. Disponível em: <<https://www.federalregister.gov/documents/2014/05/06/2014-10326/defense-federal-acquisition-regulation-supplement-detection-and-avoidance-of-counterfeit-electronic>>. Acesso em: 26 Janeiro 2019.

ELNADY, A.; SALAMA, M. M. A. Unified approach for mitigating voltage sag and voltage flicker using the DSTATCOM. **IEEE Transactions on Power Delivery**, p. 992 - 1000, 2005.

ENDERLE, T. P. **Análise, Projeto e Implementação de um D-STATCOM para Redes de Distribuição Monofásica**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2012.

FRANÇA, G. J. **Desenvolvimento de Compensador Série para Mitigação Harmônica Distribuída e Correção Dinâmica de Fator de Potência**. Universidade Federal de Minas Gerais Escola de Engenharia Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Belo Horizonte, p. 184. 2013. (155).

FRANCO, E. **Qualidade de Energia - Causas - Efeitos - Soluções, 2013**. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/9698268-Qualidade-de-energia-causas-efeitos-e-solucoes-autor-edgard-franco.html>>. Acesso em: 1 fev. 2019.

HOCK JR., R. T. **Regulador De Tensão Móvel Controlado Em Tensão Com Rastreamento Do Ponto De Mínima Potência Aparente**, Dissertação de Mestrado, Universidade do Estado de Santa Catarina. Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, p. 197. 2015. (621.3).

IEC. **IEC 61000-4-30: Testing and Measurement Techniques - Power Quality Measurement Methods**. [S.l.]. 2015.

IEEE, S. 1.-2. **Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality**. [S.l.]. 2009.

IEEE, S. 4. **IEEE Recommended Practice For Emergency and Standby Power Systems For Industrial and Commercial Applications**. [S.l.]. 1995.

JÚNIOR, R. T. H. **Regulador De Tensão Móvel Controlado Em Tensão Com Rastreamento Do Ponto De Mínima Potência Aparente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, p. 197. 2015. (621.3).

KUMAR, C.; MISHRA, K. M. **A Control Algorithm for Flexible Operation of DSTATCOM for Power Quality Improvement in Voltage and Current Control Mode**. IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES). Bengaluru, Índia: IEEE. 2012. p. 6.

KUMAR, C.; MISHRA, M. K. **Energy conservation and power quality improvement with voltage controlled DSTATCOM**. 2013 Annual IEEE India Conference. Mumbai, Índia.: INDICON. 2013. p. 1-6.

LI, L.; ZHANG, X. **Study on STATCOM principle and control strategy under short circuit fault**. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA). Takamatsu, Japan: IEEE. 2017. p. 5.

MAFFEZZOLLI, A. D. et al. **Técnica de Limitação de Corrente por Meio de Resistência Virtual Não Linear Aplicado a um DSTATCOM Controlado em Tensão**. Congresso Brasileiro de Automática (CBA). João Pessoa, PB, Brasil: CBA. 06 Agosto 2018. p. 6.

ONS. **Procedimentos de Rede - Submódulo 2.8: Gerenciamento dos indicadores de qualidade da Energia Elétrica da Rede Básica**. [S.l.]. 2017.

PRAJAPATI, R.; SHARMA,. **Fuzzy Logic Controller based Distribution Static Compensator**. IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS). Bhopal, India: IEEE. 2014. p. 6.

SINGH, B. et al. **Analysis, simulation and control of DSTATCOM in three-phase, four-wire isolated distribution systems**. IEEE Power India Conference 2006. Nova Déli, Índia: IEEE. 2006.

SINGH, B. et al. **Static synchronous compensators (STATCOM): a review**. **Power Electronics, IET**, v. 2, n. 4, p. 297-324, Julho 2009.

SOARES, C. E.; SANTOS, M. A. **Metodologia De Projeto Para Correção Do Fator De Potência Com Indutor À Jusante**. Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville, p. 36. 2007.

SPERB, J. D. **Retificadores - Correção do Fator de Potência com Indutor à Montante**. Universidade do Estado de Santa Catarina. Joinville. 2005.

ZIMANN, F. J. **Sistema de controle de potência ativa e reativa para a regulação de tensão em redes de distribuição de baixa tensão**. [S.l.]. 2016.

APÊNDICE A – TÉCNICA ANTI-WINDUP

Nos resultados de simulação, foram utilizados componentes ideais que apresentam sinais de tensões tendendo ao infinito, aumentando o tempo de resposta das malhas de controle durante a operação das condições de distúrbios. Para tornar os resultados de simulação mais próximos a condição real de operação, em que as máximas tensões de saída são as tensões próximas a tensão de alimentação dos componentes, foi implementado um circuito com a técnica *anti-windup* nas malhas de tensão de saída do circuito de simulação.

Quando ocorre um transitório em que o ângulo de fase e amplitude da tensão da rede alteram bruscamente, faz com que o DSTATCOM injete correntes elevadas buscando seguir as referências senoidais de tensão. Ao atingir o valor de corrente limiar, a técnica RVNL começa a atuar, impondo variações bruscas nos sinais que vão para o controlador de tensão, que passa a operar em condição de saturação, integrando o erro, aumentando o tempo de resposta após a falta.

Os impactos negativos da saturação da ação de controle são conhecidos pelo termo *windup*, enquanto que as técnicas sugeridas para contorná-los se chamam *anti-windup* (ÅSTRÖM e RUNDQWIST, 1989). Tais técnicas, em sua maioria, não exigem que o controlador seja resintonizado ou reprojetoado e não se leva em conta a presença da não-linearidade durante o projeto do controlador, o que pode torná-lo demasiadamente complicado e caro.

Na prática todos os atuadores apresentam limites. Quando o valor da variável de controle atinge o limite máximo (ou mínimo) do atuador, ocorre a saturação do sinal de controle. Este fato faz com que o circuito passe a estar em malha aberta, pois o atuador permanece no seu limite máximo (ou mínimo), independentemente da saída do processo. Entretanto, se um controlador com ação integral é utilizado, o erro continua a ser integrado e o termo integral tende a se tornar muito grande, ou seja, tende a “carregar-se” demasiadamente. Neste caso, para que o controlador volte a operar na região linear (saia da saturação) é necessário que o termo integral se “descarregue”. Para “descarregar”, o controle aplica na entrada do controlador um sinal de erro invertido, por um longo período de tempo. A consequência disto é que a resposta transitória do sistema tende a ficar lenta e oscilatória, característica extremamente indesejável.

A técnica de limitação de corrente aqui proposta, em condição de falta, efetua a alteração da tensão de referência, simulando um resistor em série com os elementos passivos do filtro de saída, fazendo com que o controle opere com uma planta diferente da que foi projetada, resultando com que o controlador sature e integre o erro. Desta forma, para melhorar a

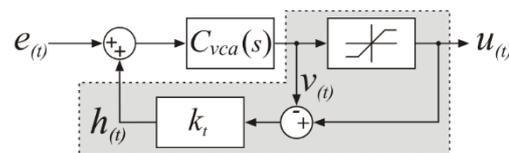
dinâmica, adiciona-se ao controle uma técnica *anti-windup* denominada *Back Calculation* para o compensador de tensão. Uma vez que o controlador excede os limites do atuador, um sinal de realimentação é gerado pela diferença entre o sinal saturado de controle e o sinal não-saturado e, a seguir, utilizado para reduzir a magnitude da entrada do integrador. O sinal de realimentação em um dado instante de amostragem t , $h(t)$, é descrito como:

$$h(t) = K_t \cdot [u(t) - v(t)] \quad (11)$$

Sendo $u(t)$ a saída do controlador (não-saturado) e $v(t)$ é o sinal que realmente atua (saturado) no processo a ser controlado (saída do atuador). A constante K_t determina o quanto é subtraído da parcela a ser integrada e, conseqüentemente, em quanto é reduzido o termo integral. Uma redução desta variável faz com que o sinal de controle saia mais rapidamente da região de saturação, alcançando o valor de regime em menos tempo e melhorando o desempenho do sistema.

Na implementação analógica, por meio de amplificadores operacionais, a saturação da saída ocorre naturalmente pelas características do circuito (tensão de alimentação). Ainda assim, não existe o efeito de subtração do erro integrado na entrada do compensador. Com o intuito de melhorar a dinâmica da resposta do compensador, é implementada a técnica *anti-windup back-calculation*, porém, atuando diretamente no sinal de entrada do compensador. O diagrama de blocos completo do sistema de controle implementado é ilustrado na Figura 66.

Figura 66 – Técnica de *anti-windup* implementada no controlador da tensão de saída do conversor.

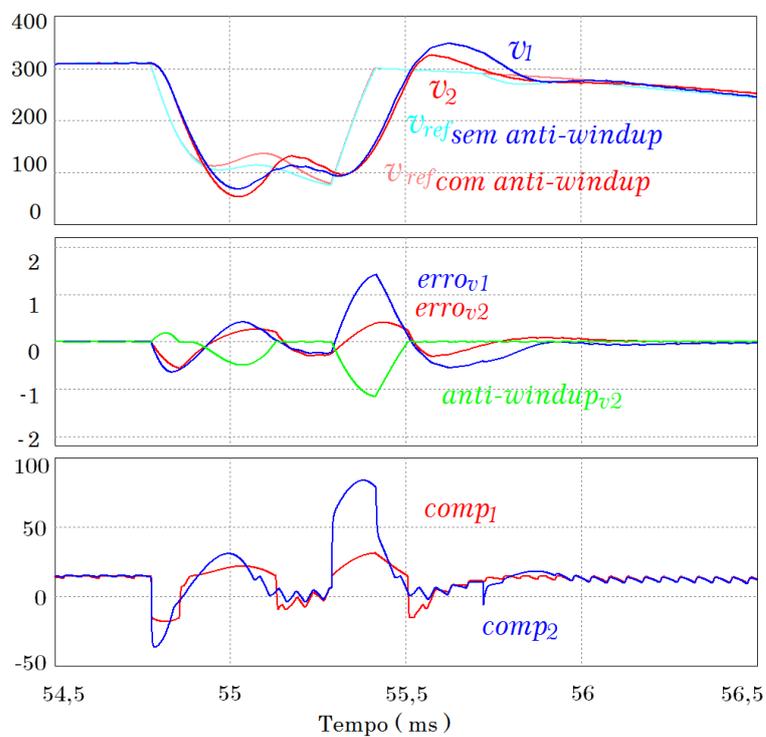


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Com o intuito de apresentar os efeitos da técnica anti-windup nas malhas de controle e na tensão do PCC é apresentada a Figura 67. Nesta, é ilustrado o transiente da tensão para uma condição de afundamento de tensão para 0,20 pu com duração de 1 ms. Onde v_2 e v_1 são a tensão no PCC da fase A, com e sem a atuação da técnica *anti-windup* respectivamente, e v_{ref} é o sinal de tensão de referência com atenuação da técnica RVNL, em que vai a malha de controle c.a. Os sinais impostos na entrada do compensador de tensão são denominados de $erro_{v2}$ e $erro_{v1}$ com e sem a técnica *anti-windup* respectivamente. O sinal $anti-windup_{v2}$ é o sinal da malha

anti-windup somada ao $erro_{v2}$. Sem a técnica *anti-windup*, o sinal compensado $comp_1$ atinge um valor muito elevado, enquanto que o sinal $comp_2$ apresenta um menor valor.

Figura 67 – Dinâmica da tensão de saída sobre condição de falta, com e sem a técnica *anti-windup*.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Na figura, observa-se, após cessar a falta, que com técnica *anti-windup* a sobretensão em v_2 é menor ao comparar com a sobretensão em v_1 (sem anti-windup). Além de que a técnica *anti-windup* aumentou a resposta dinâmica do controle, fazendo o sistema entrar em regime permanente em um menor período, comprovando seu correto funcionamento.

APÊNDICE B – TESTES PARCIAIS DO CARTÃO ELETRÔNICO COM A TÉCNICA RVNL

Para efetuar os testes do cartão eletrônico em que foi implementada a técnica RVNL, foi utilizado um gerador de sinais, sendo aplicado um sinal triangular com 1,64 V de pico, e frequência de 60 Hz, simulando o sinal proporcional à corrente de saída. A Figura 68 ilustra a bancada de teste.

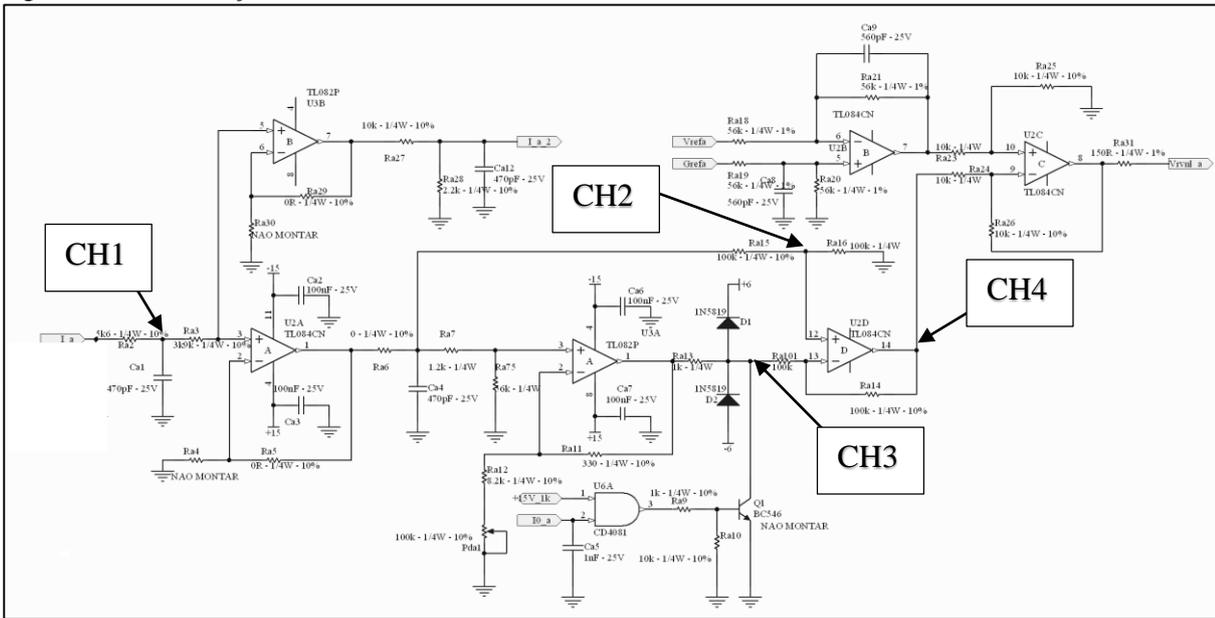
Figura 68 – Foto do protótipo do cartão com a técnica RVNL na bancada de teste



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A Figura 69 reapresenta o circuito do cartão RVNL e identifica os pontos em que foram realizadas as medições apresentadas, sendo o sinal do gerador de sinais (CH1), o sinal proporcional à corrente de saída (CH2), o sinal saturado da corrente de saída (CH3), e o sinal proporcional à resistência virtual não linear (CH4).

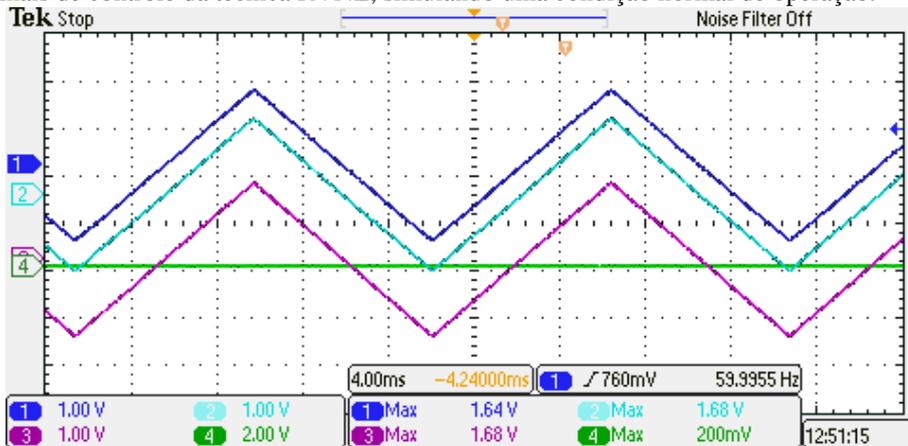
Figura 69 – Identificação dos circuitos medidos no teste do cartão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A Figura 70 apresenta uma condição em que a técnica RVNL está habilitada, porém os limites de saturação de corrente são inferiores ao valor necessário para a atuação da técnica, o que caracterizaria uma condição normal de operação do conversor. O sinal das correntes são subtraídos, resultando em aproximadamente 0 V no sinal proporcional à tensão da resistência virtual não linear (CH4). A figura comprova o correto funcionamento do cartão para a condição comentada.

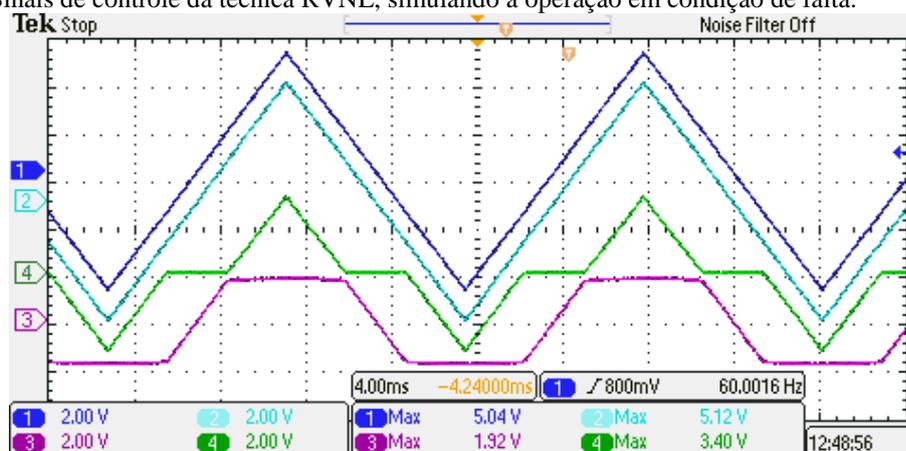
Figura 70 – Sinais de controle da técnica RVNL, simulando uma condição normal de operação.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A Figura 71 apresenta uma condição em que a técnica RVNL está habilitada e os limites de saturação de corrente (1,92 V) são menores que a corrente de operação do conversor (5,12 V), provocando a atuação da técnica, o que caracterizaria uma condição de falta. O sinal das correntes, saturada (CH3) e não saturada (CH2), são subtraídos, resultando em um sinal proporcional à tensão da resistência virtual não linear (CH4), sendo seu valor de pico igual a 3,4 V. A figura comprova o correto funcionamento do cartão para a condição comentada.

Figura 71 – Sinais de controle da técnica RVNL, simulando a operação em condição de falta.

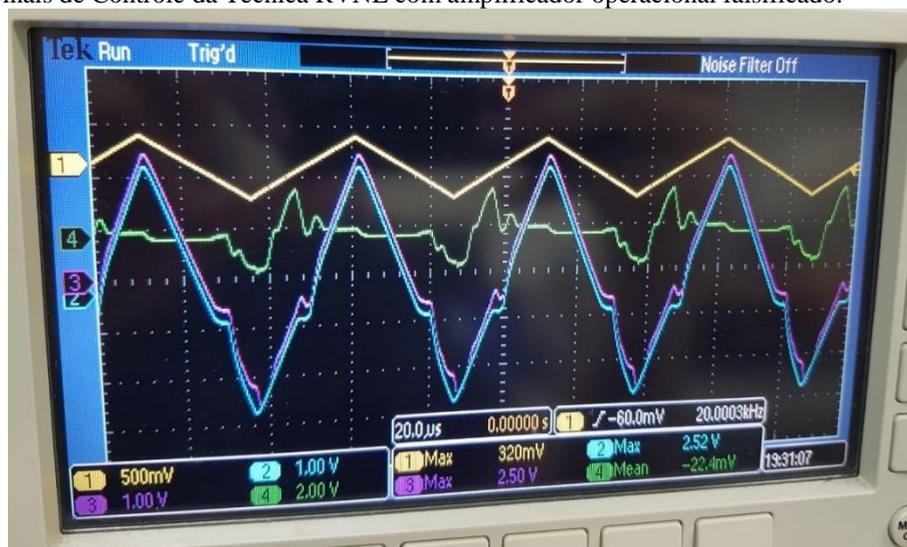


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

APÊNDICE C – COMERCIALIZAÇÃO DE AMPLIFICADORES OPERACIONAIS FALSIFICADOS

Nos testes iniciais do cartão eletrônico em que foi implementado a técnica RVNL foram identificados problemas de deformação nos sinais de entrada e saída dos amplificadores operacionais TL084 e TL082, quando operando com frequência acima de 1 kHz. Supondo ser problemas de layout ou projeto, foram realizadas diversas tentativas de corrigir o defeito, como redução dos ganhos dos amplificadores operacionais, alteração das fontes de alimentação simétrica, adição de capacitores de filtro próximos aos PADS de alimentação, substituição dos amplificadores operacionais pelos modelos TL074 e TL072. O melhor resultado alcançado, após efetuar as alterações descritas, resultou nas formas de onda ilustrada na Figura 72.

Figura 72 – Sinais de Controle da Técnica RVNL com amplificador operacional falsificado.



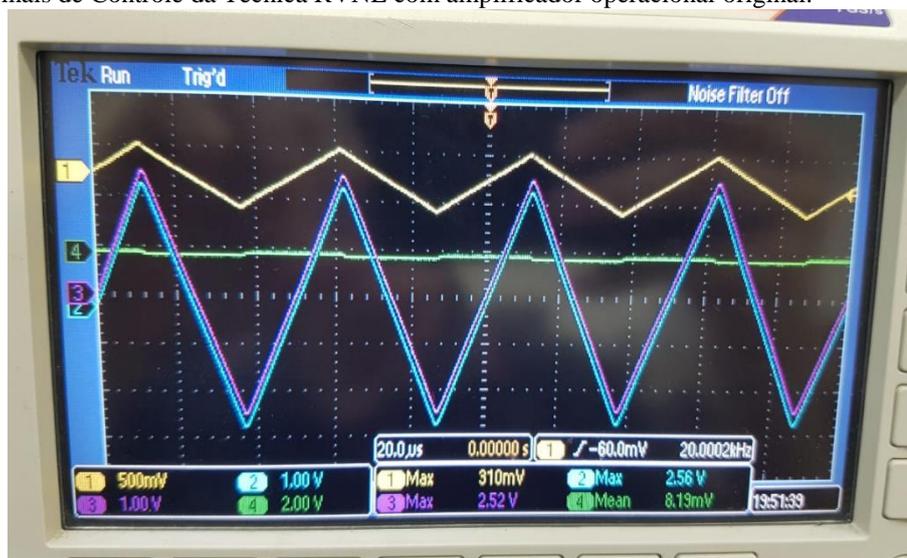
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Para efetuar o teste deste cartão foi utilizado um gerador de sinais, sendo aplicado um sinal triangular com 300 mV de pico, e frequência de 20 kHz, simulando o sinal proporcional à corrente de saída. Os pontos em que foram realizadas as medições apresentadas são os mesmos da Figura 69, sendo o sinal do gerador de sinais (CH1) o sinal proporcional à corrente de saída (CH2), o sinal saturado da corrente de saída (CH3), e o sinal proporcional à resistência virtual não linear (CH4). Nesta condição, a técnica RVNL está habilitada, porém os limites de saturação de corrente são superiores ao valor necessário para a atuação da técnica, o que caracterizaria uma condição normal de operação do conversor e, portanto, não poderia haver um sinal proporcional à resistência virtual não linear (CH4), que é gerado devido à distorção

dos sinais. Sem a resolução deste problema, não seria possível efetuar os testes experimentais e a comprovação prática da técnica proposta.

Ao informar o problema para o professor orientador, o mesmo comentou já ter tido problemas com falsificações do componente TL084, e forneceu novos componentes TL084 e TL082, de procedência garantida. Substituindo os amplificadores operacionais do cartão, sem efetuar mais nenhuma outra alteração, o problema foi resolvido, conforme pode ser observado na ilustração da Figura 73.

Figura 73 – Sinais de Controle da Técnica RVNL com amplificador operacional original.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Os amplificadores operacionais falsificados TL084, TL082, TL074 e TL082 foram comprados na maior loja de comercialização de componentes eletrônicos da cidade de Joinville/SC, sendo pago um valor acima do que é comercializado na internet. Após identificação do problema, fica evidente que a loja em questão não faz controle de qualidade dos componentes que recebe.

A comercialização de componentes eletrônicos falsificados vem crescendo ano após ano no mundo. O Brasil impõe poucas restrições e quase nenhuma fiscalização para inibir a comercialização destes componentes, entretanto, nos Estados Unidos a situação é grave, a ponto de ter leis específicas quanto a essa questão (DFARS CASE 2012-D055, 2014).

A utilização de componentes falsificados atinge aos projetos da academia, lojas específicas para conserto de equipamentos e até mesmo a indústria, assim, o prejuízo financeiro para a comunidade é incalculável.

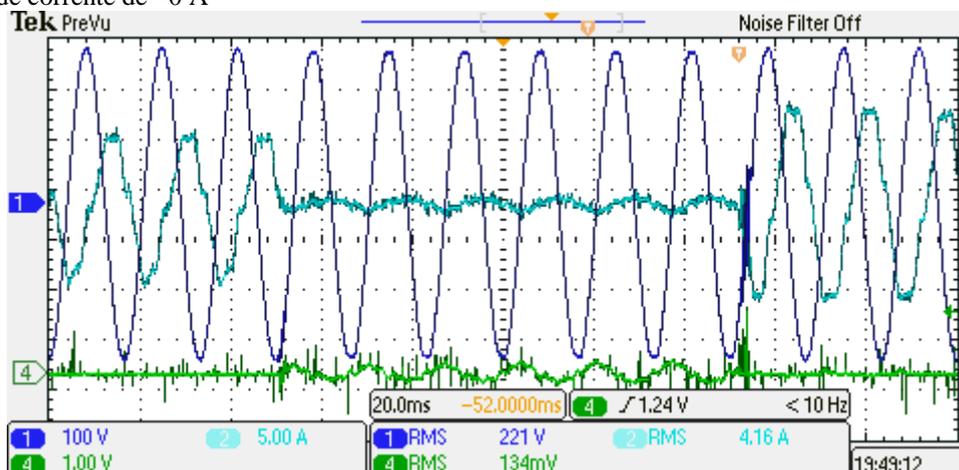
Uma alternativa é comprar de distribuidores com origem de componentes certificada, mas infelizmente estes muitas vezes trabalham com lotes mínimos de 100 unidades ou mais

APÊNDICE D – ANÁLISE DOS TRANSITÓRIOS NA VARIAÇÃO DOS LIMITES DE SATURAÇÃO

No capítulo 4.3 ESTADOS DE OPERAÇÃO DURANTE DISTÚRBIOS DA REDE ELÉTRICA, é proposto uma lógica que controla o instante que deve ocorrer a variação dinâmica no limite superior (I_{G+}) e inferior (I_{G-}) do saturador da técnica RVNL. De forma que, após a condição de falta em que o nível da tensão eficaz do PCC retorna a um nível maior que 0,80 pu, o DSTATCOM verifica o sincronismo com a rede, o cruzamento da tensão de referência por zero e então eleva o limite da corrente de saída e habilita o PWM de saída. A finalidade para essa sequência de operação é atenuar os valores máximos da tensão e corrente assim que a falta cesse.

Conforme comentado, essa lógica foi validada nos resultados de simulação numérica, porém, não foi implementada nos resultados experimentais. Com o intuito de apresentar a oscilação nos transientes dos sinais de potência, com a variação dinâmica dos limites de saturação sem a lógica proposta, é apresentada a Figura 74. Nesta ilustração é apresentada a forma de onda da tensão do PCC da fase A (CH1), da corrente do conversor da fase A (CH2), e da tensão proporcional ao sinal de resistência virtual não linear (CH4). O conversor está inicialmente compensando os reativos da rede em uma condição normal de operação com carga leve e sem atuação da técnica RVNL. Após 50 ms, é alterado a referência da corrente para aproximadamente 0 A, com duração de 120 ms, e, em sequência, os limites de saturação são alterados novamente para o nível de condição normal de operação (aproximadamente 10A de pico).

Figura 74 – Sinais de Controle, compensando a tensão no PCC, com a técnica RVNL habilitada, impondo uma referência de corrente de ~0 A

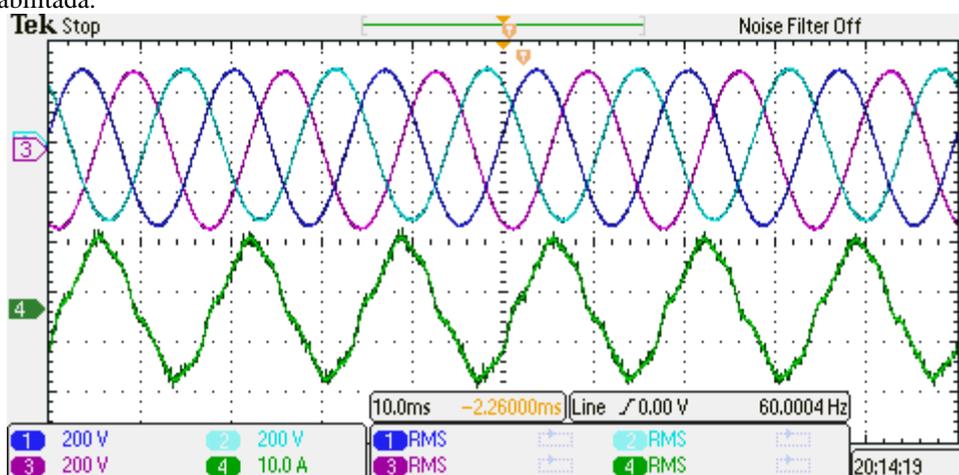


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

APÊNDICE E – ANÁLISE DA DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL COM A ATUALIZAÇÃO DA TÉCNICA RVNL

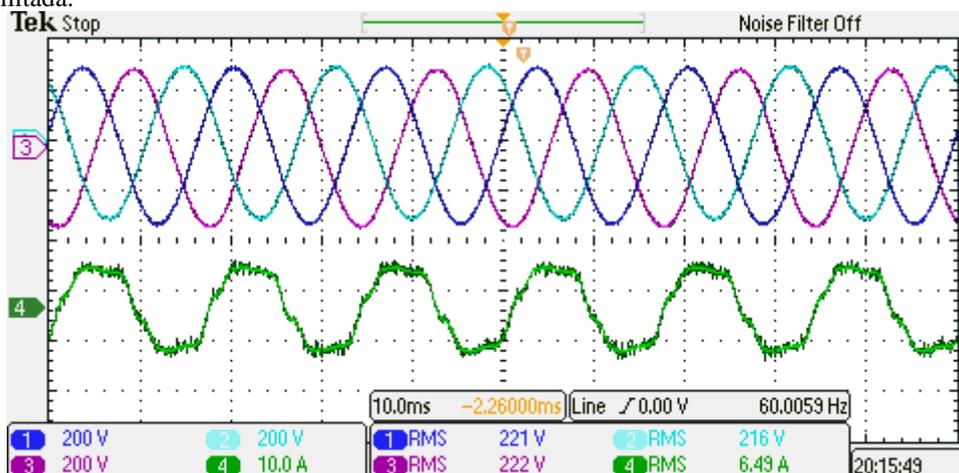
Nesta seção é apresentada uma análise da influência da técnica RVNL quanto à distorção harmônica total na tensão do PCC e na corrente de saída do DSTATCOM. Na Figura 76 é apresentada a medição da tensão no PCC para as 3 fases (CH1, CH2 e CH3) e da corrente do DSTATCOM (CH4), com compensação de reativos, porém, sem habilitar a técnica RVNL. Na Figura 77 a técnica RVNL é habilitada para a fase C (CH3). A corrente limiar definida nesta condição é de 7 A.

Figura 76 – Tensão no PCC com compensação de reativos, e corrente do DSTATCOM fase A, com a técnica RVNL desabilitada.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Figura 77 – Tensão no PCC com compensação de reativos, e corrente do DSTATCOM fase A, com a técnica RVNL habilitada.

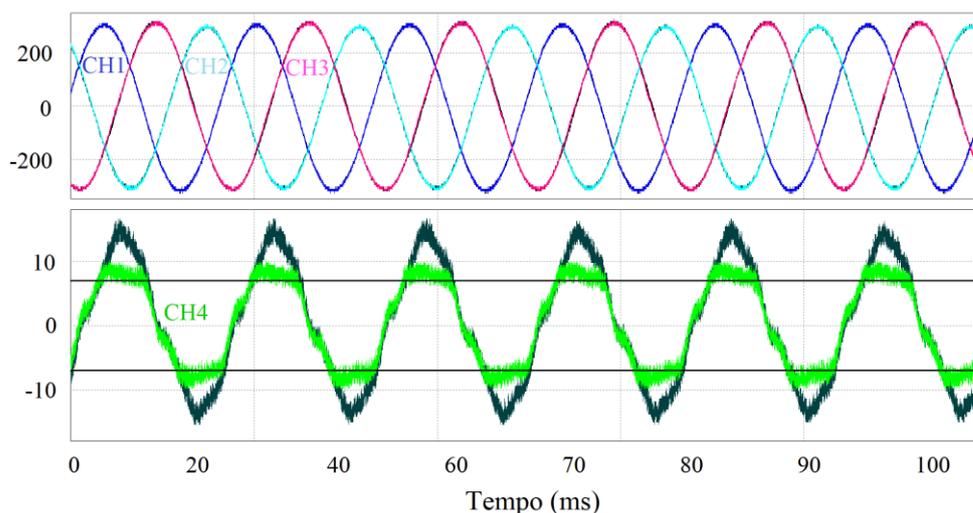


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Nas duas condições, a tensão eficaz no PCC para as três fases é de 220 V (1,00 pu). Sem limitação de corrente, o valor máximo instantâneo é 18 A e, ao habilitar a técnica RVNL, o máximo valor medido é 9 A.

A partir das medições efetuadas com o osciloscópio, são gerados arquivos de dados em formato de texto, os quais são carregados no programa SIMVIEW®, da POWERSIM Inc. Para comparar de forma fácil a distorção que a técnica RVNL gera na tensão do PCC, os 4 sinais medidos e apresentados na Figura 76 e na Figura 77 são plotados, sobrepostos e reapresentados na Figura 78. As três tensões no PCC, com a técnica desabilitada, são apresentadas na cor preta, ao fundo, enquanto que as três tensões com a técnica RVNL habilitadas são apresentadas na cor azul-claro (CH2), azul-escuro (CH1) e rosa (CH3).

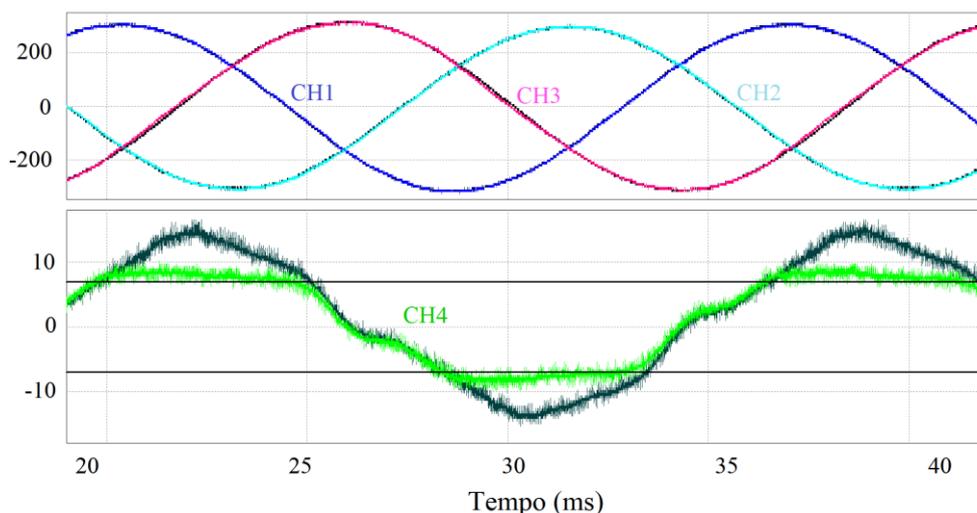
Figura 78 – Tensão no PCC com compensação de reativos, e corrente do DSTATCOM fase A, com e sem a técnica RVNL.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A Figura 79 reapresenta com um *zoom* os sinais sobrepostos, ficando evidente, que a tensão da fase A (CH3), cor rosa, apresenta uma pequena deformação ao comparar com a cor preta e que, por consequência, afeta a THD da tensão no PCC.

Figura 79 – Zoom, na tensão do PCC com compensação de reativos, e corrente do DSTATCOM fase A, com e sem a técnica RVNL.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A Tabela 6 apresenta os valores da distorção harmônica total para ambas as condições. Os resultados apresentados consideram os erros de medição, como baixa taxa de amostragem do osciloscópio e ruídos de medição, logo, os valores reais são iguais ou menores que os apresentados na tabela.

Tabela 6 – Distorção Harmônica Total, com e sem a técnica RVNL.

Variável medida	Canal	THD	
		Figura 76	Figura 77
Tensão no PCC da fase A sem limitação de corrente	CH1	2,83%	2,65%
Tensão no PCC da fase B sem limitação de corrente	CH2	2,68%	2,63%
Tensão no PCC da fase C sem limitação de corrente	CH3	1,59%	
Tensão no PCC da fase C com limitação de corrente			2,29%
Corrente do DSTATCOM sem limitação de corrente	CH4	11,59%	
Corrente do DSTATCOM com limitação de corrente			15,89%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Sem habilitar a técnica, a THD na fase C é de 1,59% e ao habilitar, a THD aumenta 0,7%. A Tabela 7 apresenta os níveis individuais de distorção harmônica para a tensão de fornecimento, que deve permanecer dentro dos limites estipulados pela norma para a classe de tensão menor que 1 kV.

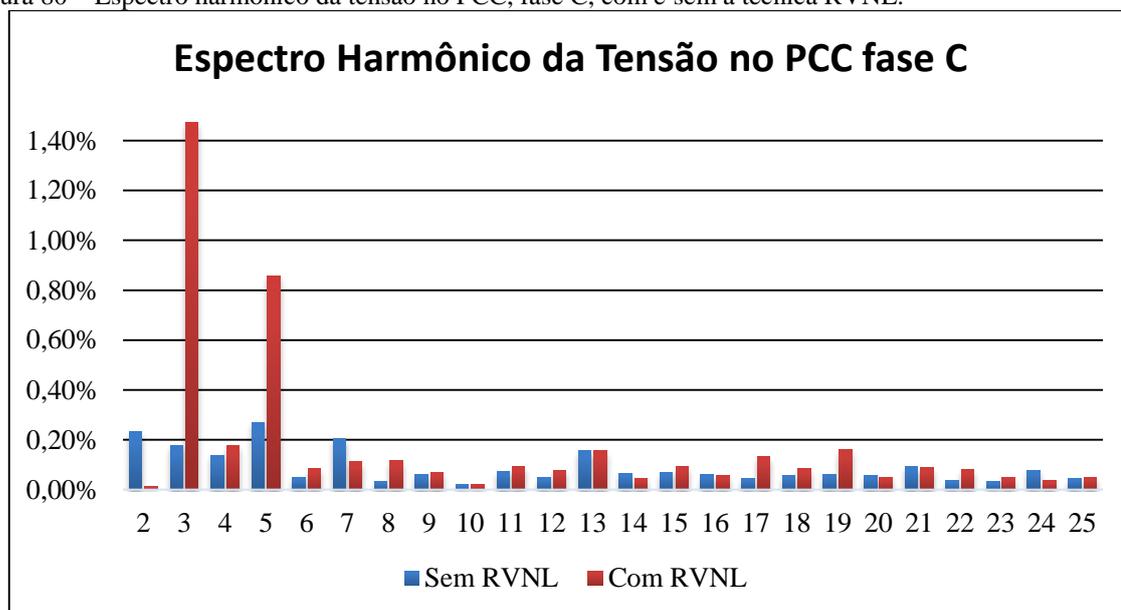
Tabela 7 – Níveis de referência para distorção harmônica individual de tensão em porcentagem da fundamental.

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]	
	$V_n \leq 1 \text{ kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5
	7	6,5
	11	4,5
	13	4
	17	2,5
	19	2
	23	2
	25	2
	> 25	1,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5
	9	2
	15	1
	21	1
	> 21	1
Pares	2	2,5
	4	1,5
	6	1
	8	1
	10	1
	12	1
	> 12	1

Fonte: Baseado em (ANEEL, 2018)

A análise do espectro harmônico proveniente da decomposição harmônica da forma de onda da tensão no PCC, para a fase C, com e sem a atuação da técnica RVNL, é mostrada na Figura 80. Pode-se notar um aumento das amplitudes das harmônicas de 3ª e 5ª ordem ao habilitar a técnica, ainda assim, o maior valor é o da harmônica de 3ª ordem (1,47%), que é menor que o máximo valor (6,5%) especificado no PRODIST (ANEEL, 2018). Logo, o DSTATCOM está impondo uma tensão no PCC com conteúdo harmônico menor que o especificado na norma, atendendo os requisitos de qualidade.

Figura 80 – Espectro harmônico da tensão no PCC, fase C, com e sem a técnica RVNL.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019