

**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.  
115 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 Maffezzoli**

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

**MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Área de concentração em “Sistemas Eletroeletrônicos”  
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 (Presidente/Orientador)

---

Prof. Dr. Gustavo Medeiros de Souza  
Azevedo - UFPE

---

Prof. Dr. Marcello Mezaroba  
CCT/UDESC

---

Prof. Dr. Joselito Anastácio Heerd  
CCT/UDESC (Suplente)

**Joinville, SC, 18 de fevereiro de 2019.**



## **AGRADECIMENTOS**

Os primeiros agradecimentos vão aos céus, à Nosso Senhor Jesus Cristo, a quem tudo devo. Aos meus pais Altair e Deise e à minha irmã Fernanda, pelo apoio e incentivo. A minha esposa, Heloisa, pelo amor, compreensão e sacrífico. A toda minha família e amigos que compreendem 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 leitura e avaliação deste trabalho.

Eu gostaria de agradecer a todo corpo docente da pós-graduação de Engenharia Elétrica da UDESC, pelos ensinamentos durante a disciplina do mestrado. Ao meu chefe Gleisson Jardim França, e gerente Martin Brand da WEG Drive & Controls, cuja compreensão e auxílio foram essenciais. À 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 Damascena Diesel, Leandro Santos Monteiro, Luis 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 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, através 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. Validação dos estudos através de resultados experimentais obtidos comprovam o bom funcionamento do ~~regulador de tensão~~ <sup>limitador de corrente</sup> 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 voltage regulator in the condition of disturbances, validating the technique proposed in this dissertation.

**Keywords: 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.....	31
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 para um DSTATCOM controlado em corrente.....	35
Figura 10 – Diagrama de blocos 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 – Circuito equivalente do conversor conectado à rede e o diagrama fasorial das tensões.....	41
Figura 13 – Circuito de Potência do DSTATCOM.....	44
Figura 14 – Diagrama de blocos do controle do DSTATCOM utilizando a técnica RVNL....	45
Figura 15 – Técnica de <i>anti-windup</i> implementada no controlador da tensão de saída do conversor.....	47
Figura 16 – Diagrama de blocos completo do sistema de controle implementado. ....	48
Figura 17 – Representação do circuito com a técnica 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. ....	51
Figura 20 – Variação dinâmica de $I_{G1} = MÁX$ para $I_{G0} = 0$ . ....	52
Figura 21 – Fluxograma lógico dos estados de operação durante distúrbios de tensão. ....	53
Figura 22 – Esquema eletrônico do circuito com a técnica RVNL. ....	55
Figura 23 – Circuito Fonte do cartão, para ajuste dos níveis de atuação da técnica RVNL. ...	57
Figura 24 – Placa de circuito impresso com o circuito RVNL (Top Layer). ....	57
Figura 25 – Placa de circuito impresso com o circuito RVNL (Bottom Layer).....	58
Figura 26 – Circuito de Potência Simulado.....	59
Figura 27 – Circuito de Controle Simulado – DSP. ....	60
Figura 28 – Circuito de Controle Simulado – Malhas de Controle e RVNL. ....	61

Figura 29 – Surto de 1,3 kV na tensão do PCC. ....	62
Figura 30 – Elevação para 1,25 pu de tensão no PCC. ....	63
Figura 31 – Afundamento para 0,72 pu de tensão do PCC.....	64
Figura 32 – Afundamento para 0,43 pu de tensão no PCC.....	65
Figura 33 – Interrupção de tensão por 3 ciclos de rede .....	66
Figura 34 – Condição de curto-circuito trifásico no PCC.....	67
Figura 35 – Condição de interrupção monofásica de curta duração. ....	68
Figura 36 – Dinâmica da tensão de saída sobre condição de falta, com e sem a técnica <i>anti-windup</i> . ....	69
Figura 37 – DSTATCOM protótipo com a técnica RVNL.....	71
Figura 38 – Distribuição dos Circuitos do DSTATCOM .....	72
Figura 39 – Kit de desenvolvimento TMDSDOCK28335.....	73
Figura 40 – Módulo de Potência Inversor SPCIT 4500-60-15. ....	75
Figura 41 – Esquema unifilar do circuito utilizado nos ensaios experimentais do DSTATCOM. ....	77
Figura 42 – Medição da tensão no PCC, com e sem compensação da tensão. ....	78
Figura 43 – Medição da corrente de saída do DSTATCOM, com e sem compensação da tensão. ....	79
Figura 44 – Atuação da proteção de sobrecorrente com desligamento do DSTATCOM.....	80
Figura 45 – Atuação da proteção de sobrecorrente com desligamento do DSTATCOM, com <i>zoom</i> no transiente. ....	80
Figura 46 – Operação em sobrecarga, com limitação da corrente de saída do DSTATCOM por meio da técnica RVNL.....	81
Figura 47 – Atuação da técnica RVNL, limitando a corrente de saída do DSTATCOM.....	82
Figura 48 – Compensando a tensão no PCC, operando em sobrecarga, “sem” a técnica RVNL. ....	82
Figura 49 – Compensando a tensão no PCC, operando em sobrecarga, “com” a técnica RVNL .....	83
Figura 50 – Análise do transiente da tensão no PCC ao “habilitar” a técnica RVNL. ....	84
Figura 51 – Análise do transiente da tensão no PCC ao “desabilitar” a técnica RVNL. ....	85
Figura 52 – Sinais de Controle, compensando a tensão no PCC, com a RVNL “desabilitada”. ....	86
Figura 53 – Sinais de Controle, compensando a tensão no PCC, com a RVNL “desabilitada”. ....	87



Figura 54 – Sinais de Controle, compensando a tensão no PCC, com a RVNL “habilitada”.	88
Figura 55 – Sinais de Controle, compensando a tensão no PCC, com a RVNL “habilitada”.	88
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 – Compensando a tensão no PCC, em uma condição de afundamento de tensão, com a técnica RVNL habilitada.	90
Figura 59 – Compensando a tensão no PCC, em uma condição de afundamento de tensão, com a técnica RVNL habilitada.	91
Figura 60 – Sinais de Potência, impondo uma referência de corrente de $\sim 0$ A.	92
Figura 61 – Sinais de Potência, impondo uma referência de corrente de $\sim 0$ A, zoom no transiente inicial.	93
Figura 62 – Sinais de potência, impondo uma referência de corrente de $\sim 0$ A, zoom no transiente final.	94
Figura 63 – Sinais de Controle, impondo uma referência de corrente de $\sim 0$ A.	95
Figura 64 – Sinais de Controle, impondo uma referência de corrente de $\sim 0$ A, zoom no transiente inicial.	95
Figura 65 – Sinais de Controle, impondo uma referência de corrente de $\sim 0$ A, zoom no transiente final.	96
Figura 66 – Pré-carga do barramento c.c., com a técnica RVNL desabilitada.	97
Figura 67 – Pré-carga do barramento c.c., com a técnica RVNL habilitada.	97
Figura 68 – Foto do cartão protótipo na bancada de teste	105
Figura 69 – Identificação dos circuitos medidos no teste do cartão.	106
Figura 70 – Sinais de controle da técnica RVNL, simulando uma condição normal de operação.	106
Figura 71 – Sinais de controle da técnica RVNL, simulando a operação em condição de falta.	107
Figura 72 – Sinais de Controle da Técnica RVNL com amplificador operacional falsificado.	108
Figura 73 – Sinais de Controle da Técnica RVNL com amplificador operacional original.	109
Figura 74 – Sinais de Controle, compensando a tensão no PCC, com a técnica RVNL habilitada, impondo uma referência de corrente de $\sim 0$ A.	110

Figura 75 – Sinais de Controle, compensando a tensão no PCC, com a técnica RVNL habilitada, impondo uma referência de corrente de $\sim 0$ A .....	111
Figura 76 – Tensão no PCC com compensação de reativos, e corrente do DSTATCOM fase A, com a técnica RVNL desabilitada. ....	112
Figura 77 – Tensão no PCC com compensação de reativos, e corrente do DSTATCOM fase A, com a técnica RVNL habilitada. ....	112
Figura 78 – Tensão no PCC com compensação de reativos, e corrente do DSTATCOM fase A, com e sem a técnica RVNL. ....	113
Figura 79 – Zoom, na tensão do PCC com compensação de reativos, e corrente do DSTATCOM fase A, com e sem a técnica RVNL. ....	113
Figura 80 – Ordem harmônica individual de tensão em porcentagem da fundamental.....	115

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação da ANEEL para variação de tensão de curta duração (VTCD).....	30
Tabela 2 – Faixa de tensão para sistemas em 220 V de fase .....	33
Tabela 3 – Principais características de potência do conversor.....	45
Tabela 4 – Parâmetros do DSTATCOM. ....	61
Tabela 5 – Comparativo entre os parâmetros utilizados na simulação e nos ensaios .....	77
Tabela 6 – Parâmetros do DSTATCOM .....	77
Tabela 7 – Distorção Harmônica Total, com e sem a técnica RVNL. ....	114
Tabela 8 – Níveis de referência para distorção harmônica individual de tensão em porcentagem da fundamental. ....	114

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abrev/Siglas	Descrição
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CAD	Conversores Analógicos Digitais
c.a.	Corrente Alternada.
c.c.	Corrente Contínua
ONS	Operador Nacional do Sistema
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>
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>

## LISTA DE SÍMBOLOS

Descrição	Símbolo
Amplitude da tensão imposta ao PCC	$E$
Ângulo da tensão no PCC	$\theta$
Ângulo defasagem da tensão da fonte para tensão PCC	$\delta$
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	$\omega_r$
Frequência angular no PCC	$\omega_{PLL}$
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.	$k_{sv0}$
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	$\Delta I_L$
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 a 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 – windup</i> $v_b$
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

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
<i>C</i>	Capacitor	F
<i>D</i>	Diodo	
<i>L</i>	Indutor	H
<i>R</i>	Resistor	$\Omega$
<i>Q</i>	Interruptor	



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>27</b>
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
1.1.3	Curva ITIC para Análise das Tensões Admitidas a Equipamentos Eletrônicos Sensíveis	32
1.1.4	Adequação da Tensão de Fornecimento	33
1.2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DOS DSTATCOMS	34
1.3	OBJETIVO E SOLUÇÃO PROPOSTA	37
1.4	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	38
1.5	ARTIGO PUBLICADO EM CONGRESSO	39
<b>2</b>	<b>ANÁLISE DO FLUXO DE POTÊNCIA</b>	<b>40</b>
2.1	TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA ENTRE A REDE E O CONVERSOR	40
2.2	RESUMO DO CAPÍTULO	42
<b>3</b>	<b>CIRCUITO DE POTÊNCIA E CONTROLE DO DSTATCOM</b>	<b>44</b>
3.1	ESTRUTURA DE POTÊNCIA	44
3.2	ESTRUTURA DE CONTROLE	45
3.3	RESUMO DO CAPÍTULO	48
<b>4</b>	<b>TÉCNICA DE RESISTÊNCIA VIRTUAL NÃO LINEAR</b>	<b>49</b>
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	53
4.4	RESUMO DO CAPÍTULO	54
<b>5</b>	<b>IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA DA TÉCNICA RVNL</b>	<b>55</b>
5.1	PROJETO DA CIRCUITO ELETRÔNICO COM A TÉCNICA RVNL	55
5.2	PROJETO DA FONTE DE TENSÃO REGULÁVEL	56
5.3	PROJETO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO	57
5.4	RESUMO DO CAPÍTULO	58
<b>6</b>	<b>RESULTADOS DE SIMULAÇÃO</b>	<b>59</b>
6.1	CIRCUITOS DE POTÊNCIA	59
6.2	CIRCUITO DE CONTROLE	60
6.3	ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DE SIMULAÇÃO	61
6.4	SIMULAÇÕES NUMÉRICAS	62
6.4.1	Atuação da Técnica RVNL para a Condição de Surto de Tensão no PCC	62
6.4.2	Atuação da Técnica RVNL para a Condição de Elevação de Tensão no PCC	63
6.4.3	Atuação da Técnica RVNL para a Condição de Afundamento de Tensão no PCC de 0,72 pu	64
6.4.4	Atuação da Técnica RVNL para a Condição de Afundamento de Tensão no PCC de 0,43 pu	65
6.4.5	Atuação da Técnica RVNL para a Condição de Interrupção de Tensão no PCC	66
6.4.6	Atuação da Técnica RVNL para a Condição de Curto-Circuito Trifásico no PCC	67
6.4.7	Atuação da Técnica RVNL para a Condição de Interrupção Monofásica de Curta Duração	68
6.4.8	Análise das Técnicas <i>Anti-Windup</i> e RVNL Implementadas para a Condição de Afundamento de Tensão	69
6.5	RESUMO DO CAPÍTULO	70

<b>7</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS</b>	<b>71</b>
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	76
7.2	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	76
7.2.1	Operando “COM” e “SEM” Compensação de Reativos, Analisando o Transiente	78
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	81
7.2.4	Operando em Carga Pesada Sem a Técnica RVNL	82
7.2.5	Operando em Carga Pesada Com a Técnica RVNL	83
7.2.6	Análise de Transiente da Tensão e Corrente ao Habilitar a Técnica RVNL	84
7.2.7	Análise de Transiente da Tensão e Corrente ao Desabilitar a Técnica RVNL	85
7.2.8	Análise do Sinal de Controle Compensando a Tensão no PCC com a Técnica RVNL “Desabilitada”	86
7.2.9	Análise do Sinal de Controle Compensando a Tensão no PCC com a Técnica RVNL “Habilitada”	87
7.2.10	Operando em Condição de Afundamento de Tensão da Rede	89
7.2.11	Análise dos Sinais de Potência ao Impor Referência de Corrente 0 A para o DSTATCOM	92
7.2.12	Análise dos Sinais de Controle ao Impor Referência de Corrente 0 A para o DSTATCOM	94
7.2.13	Análise da Técnica RVNL na Pré-Carga do Barramento C.C.	96
7.3	RESUMO DO CAPÍTULO	98
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES GERAIS</b>	<b>99</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>101</b>
APÊNDICE	<b>A – TESTES PARCIAIS DO CARTÃO ELETRÔNICO COM A TÉCNICA RVNL</b>	<b>105</b>
APÊNDICE	<b>B – COMERCIALIZAÇÃO DE AMPLIFICADORES OPERACIONAIS FALSIFICADOS</b>	<b>108</b>
APÊNDICE	<b>C – ANÁLISE DOS TRANSITÓRIOS NA VARIAÇÃO DOS LIMITES DE SATURAÇÃO</b>	<b>110</b>
APÊNDICE	<b>D – ANÁLISE DA DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL</b>	<b>112</b>

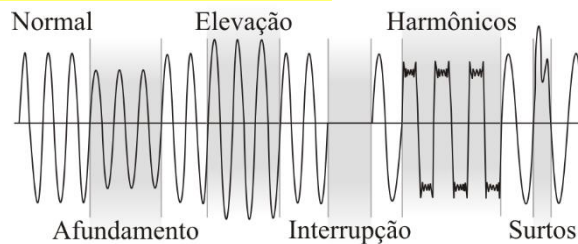
# 1 INTRODUÇÃO

As redes de distribuição <sup>estão sujeitas à</sup> ~~podem sofrer com~~ problemas de qualidade de energia elétrica (QEE). Segundo a norma <sup>IEEE Std</sup> 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.

## 1.1 PROBLEMAS DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Os distúrbios mais comuns, e também mais enfrentados pelas concessionárias de energia, segundo (ANEEL, 2018), são apresentados 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.

Entre os distúrbios de qualidade de energia que acometem o sistema elétrico, são enfatizadas neste trabalho as variações de tensão de curta duração (VTCD's) e variações de tensão de longa duração (VTLD's). Estas podem ser instantâneas, momentâneas ou temporárias. Há três tipos de eventos de variação de tensão: interrupção, afundamento de tensão "Voltage Sag" e elevação de tensão "Voltage Swell", todos descritos na norma IEC 61000-4-30 (IEC, 2015).

### 1.1.1 Elevação, Afundamento e Interrupção de Tensão

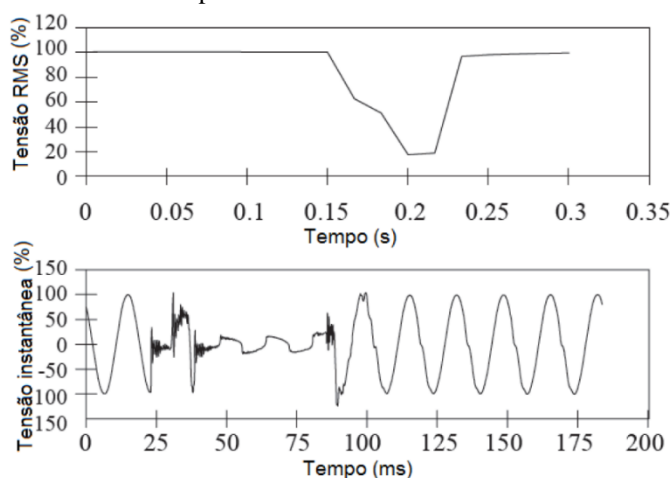
IEEE Std



A norma internacional 1195 (IEEE, 2009) define uma elevação de tensão como uma elevação entre 10% e 80% do valor eficaz da tensão ou corrente 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 ou corrente 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, em geral, a 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.

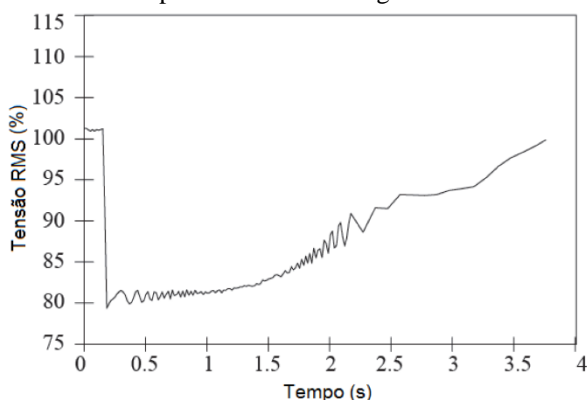
Figura 2 – Afundamento de tensão causado por curto entre fase e neutro



Fonte: Norma 1159 (IEEE, 2009)

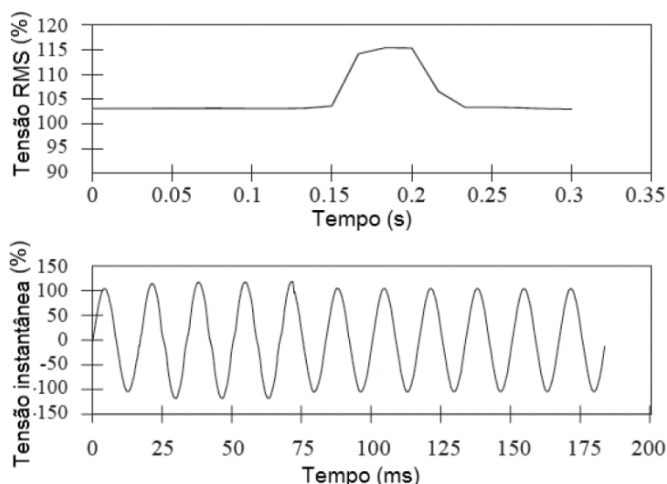
Já os efeitos de uma elevação de tensão são mais danosos aos equipamentos, visto que sobretensões podem danificar permanentemente os aparelhos causando maiores riscos as pessoas e aos equipamentos. Este fenômeno está associado a faltas no sistema elétrico, como a falta fase-terra, que pode gerar um acréscimo de tensão nas demais fases, e também, as manobras no sistema elétrico, como a remoção de grandes cargas, a desenergização de bancos de capacitores devido a 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)

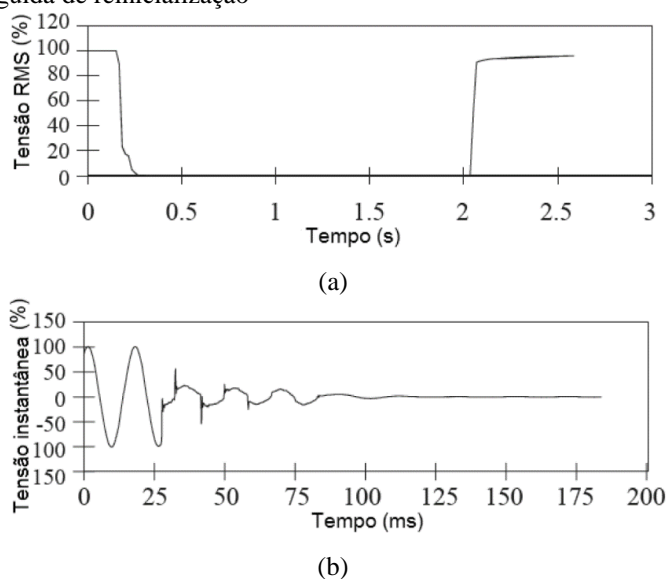
A interrupção pode ser entendida como um caso muito severo de afundamento de tensão. Trata-se da redução da tensão do sistema a um nível muito inferior ao da tensão nominal, a qual fica abaixo do limite de interrupção. O limite de interrupção pode ser, por exemplo, de 10% da tensão nominal, embora a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



As interrupções podem ser consequências de falhas no sistema elétrico, em equipamentos, ou devido ao mau funcionamento de sistemas de controle e sua duração depende da resposta do sistema de proteção que gera a falha ou do tempo de manutenção do sistema que está em falha, pois se a interrupção é precedida por uma falta do sistema, um afundamento persistirá até que algum sistema de proteção atue e, só então, a interrupção é gerada. 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 à 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:

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

<b>Classificação</b>	<b>Denominação</b>	<b>Duração da Variação</b>	<b>Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência.</b>
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)

A interrupção de uma fase pode ser considerada como interrupção para um consumidor monofásico, mas não ser considerada 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.

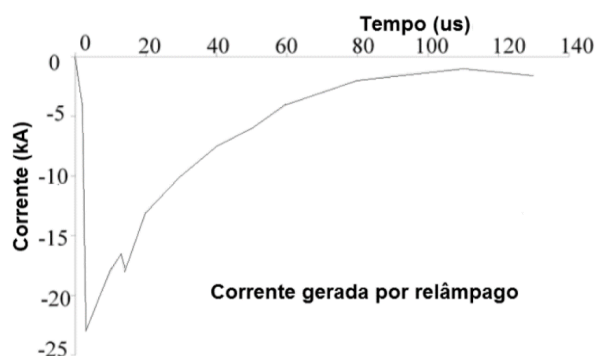
### 1.1.2 Transitórios de Tensão Impulsivos e Oscilatórios

Os transitórios são distúrbios temporários por natureza e correspondem a uma mudança nos valores de tensão e corrente, e 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 ~~kV~~ <sup>kilovolts</sup>.



Figura 6 – Transiente de corrente impulsiva causada por descarga atmosférica

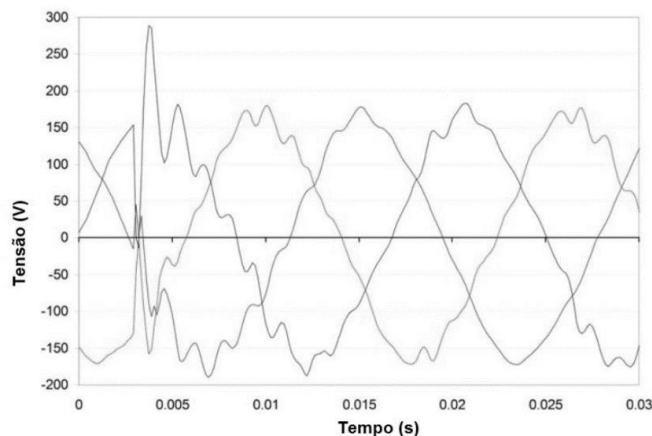


Fonte: Norma IEE 1159 (IEEE, 2009)

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. 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)

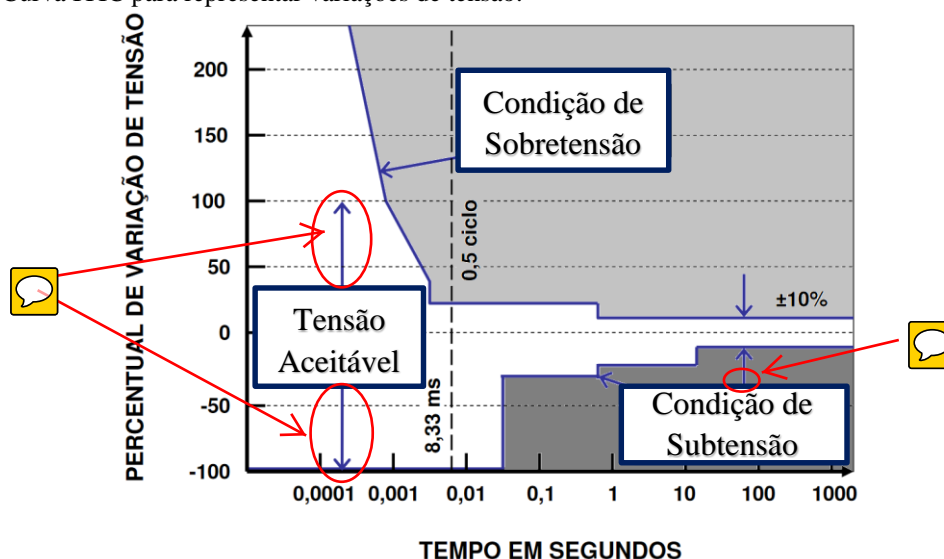
### 1.1.3 Curva ITIC para Análise das Tensões Admitidas a Equipamentos Eletrônicos Sensíveis

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)

### 1.1.4 Adequação da Tensão de Fornecimento

A ANEEL, através do módulo 8 do PRODIST, determina os valores para as faixas de classificação da tensão de fornecimento (ANEEL, 2018). A Tabela 2 apresenta os valores 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. A distribuidora de energia elétrica precisa manter a tensão em regime permanente dentro dos padrões adequados de fornecimento, para que não esteja passível de 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.

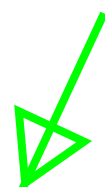
Para a manutenção do nível de tensão em um período temporário, diversos equipamentos e dispositivos vêm sendo estudados e utilizados. Um desses equipamentos é o Compensador Estático de Reativos para redes de distribuição (*Distribution Static Compensator* - DSTATCOM), que atua na circulação da energia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

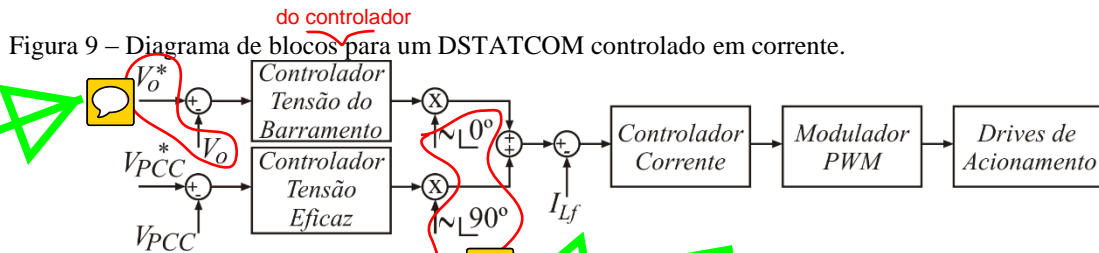
## 1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DOS DSTATCOMS

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 DSTACOM.





Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

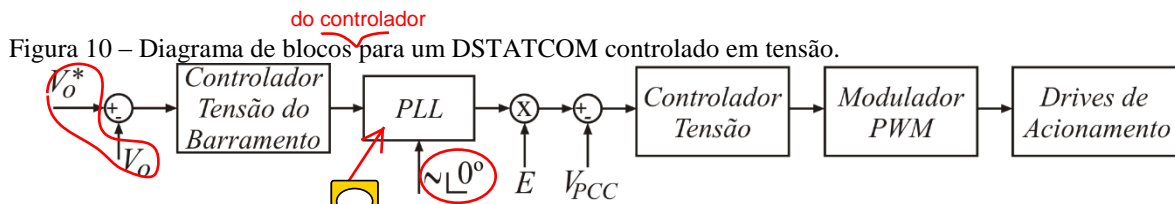
No modo de controle de corrente encontra-se uma característica importante que é a limitação da corrente de saída **efetuada de forma natural**. Isso deixa o conversor imune aos efeitos nocivos de uma situação de curto-circuito, onde elevadas correntes circulam pelo sistema. **Entretanto, este modo de 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.**

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 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.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

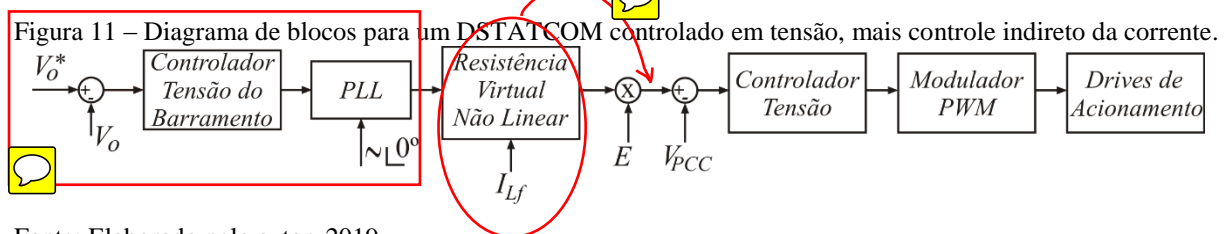
No modo de controle de tensão, o DSTATCOM impõe uma tensão controlada no PCC, protegendo as cargas críticas dos distúrbios de tensão. No entanto, a corrente processada pelo DSTATCOM é consequência do sistema a qual este está conectado, assim, é possível que o mesmo venha a processar correntes elevadas 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 através 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  $\delta$ . Tal técnica impõe uma variação permanente nos sinais de controle, **o que não é desejado**. 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 <sup>neste trabalho</sup> 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 pode manter o PCC regulado independentemente do distúrbio na rede ou desequilíbrio nas carga**. A forma de onda da tensão do PCC, possuirá ~~sempre~~ 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.

### 1.3 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 a 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 reinterpreta o diagrama de blocos do controle de tensão, e complementa com a técnica RVNL.



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.
- ~~Alta~~ <sup>Rápida</sup> 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 ~~a 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.
- Simples implementação, sem gerar a necessidade de reprojetos dos controladores de tensão.
- Definição de uma estratégia que altere os limites de máxima corrente de operação, e habilitar/desabilitar o PWM, de acordo com a condição de operação.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho é dividido nos seguintes capítulos:



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 serão 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 DSTATCOM protótipo. 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.

## 1.5 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 DO FLUXO DE POTÊNCIA

Para desenvolver uma técnica auxiliar 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 são apresentados os causadores da diminuição da tensão eficaz na rede, e abordados os aspectos teóricos da transferência de potência entre a rede e o conversor, apresentando 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.

### 2.1 TRANSFERÊNCIA DE POTÊNCIA ENTRE A REDE E O CONVERSOR

Os ramos do sistema de distribuição são compostos por transformadores de potência, cabos de diferentes comprimentos e cargas para cada trecho do sistema. Ao longo das linhas de distribuição ocorre a diminuição no valor eficaz da tensão fornecida, principalmente no trecho final de longas linhas. Esse efeito está relacionado aos parâmetros resistivos e indutivos inerentes aos cabos de distribuição. Por meio de um compensador estático de reativos, é possível elevar o valor eficaz da tensão no PCC, eliminar distorções harmônicas, conforme a estratégia de regulação.

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).

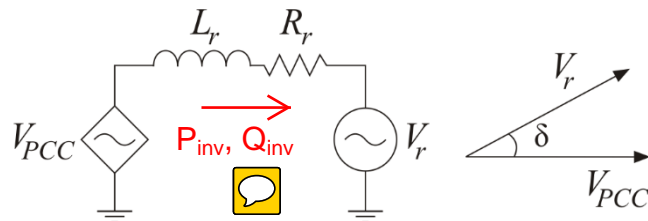
Um compensador de reativos em modo de controle de tensão é visto pelo sistema como uma fonte de tensão controlada. A transferência de potência entre duas fontes de tensão ocorre através da diferença entre as amplitudes e o ângulo das tensões de cada fonte. Nesse sistema, a amplitude e o ângulo da tensão do PCC são determinados pelo controlador em função das cargas, da impedância equivalente do transformador, da impedância dos cabos e do fluxo de potência ativa e reativa desejado entre o conversor e a fonte alimentadora.

Na Figura 12 é mostrado o circuito equivalente para a análise do fluxo de potência entre o conversor e a rede elétrica. Neste circuito  $V_r$  representa a tensão da fonte alimentadora,  $V_{PCC}$  representa a tensão imposta pelo DSTATCOM, e  $Z_r$  representa a impedância de rede, a qual, é composta por uma parcela resistiva  $R_r$  e outra parcela indutiva  $L_r$ . A impedância de rede é a



composição das impedâncias dos cabos e da impedância do alimentador. O diagrama fasorial das tensões é mostrado, destacando o ângulo de defasagem ( $\delta$ ) entre as tensões da fonte e do DSTATCOM.

Figura 12 – Circuito equivalente do conversor conectado à rede e o diagrama fasorial das tensões.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A potência ativa que flui entre a rede e o DSTATCOM é dada, majoritariamente, pela defasagem  $\delta$  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  $\delta$ , ~~através do controle de tensão total do barramento c.c.~~ <sup>por meio do controlador</sup> ~~através do controle de tensão total do barramento c.c.~~ <sup>drenar a</sup> para ~~balancear o fluxo de~~ <sup>potência ativa proveniente da rede</sup> ~~potência ativa proveniente da rede~~ <sup>necessária para suprir as perdas do DSTATCOM e manter a tensão do barramento c.c.</sup>

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

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

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

onde  $\theta$  representa o ângulo da impedância da rede,  $Z_r$  o módulo da impedância da rede e  $\theta$  o ângulo da tensão no PCC.

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

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

onde  $P_o$  é a potência <sup>de perdas do DSTATCOM.</sup> ~~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.

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

Na equação (4) verifica-se que o ângulo de carga  $\theta$  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  $\theta$  encontrado anteriormente.

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

Uma análise detalhada sobre o tema é apresentada por (HOCK JR., 2015). Conforme ábacos apresentados pelo autor, uma característica interessante do DSTATCOM é que a redução da tensão do PCC provoca uma redução na potência aparente processada pelo conversor. Além de que, há valores em que a combinação entre a tensão do PCC e a potência da carga demanda potência reativa nula do conversor.

## 2.2 RESUMO DO CAPÍTULO

Nesse capítulo foi apresentada a análise da rede de distribuição, mostrando como se obtêm os circuitos equivalentes, seus parâmetros e a influência do compensador de reativos nessa rede. Fica compreendido, que um compensador de reativos em modo de controle de tensão é visto pelo sistema como uma fonte de tensão controlada, 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 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~~<sup>synthesized</sup> na saída do DSTATCOM, ou as referências do controle, devem possuir um formato similar ao distúrbio da tensão.

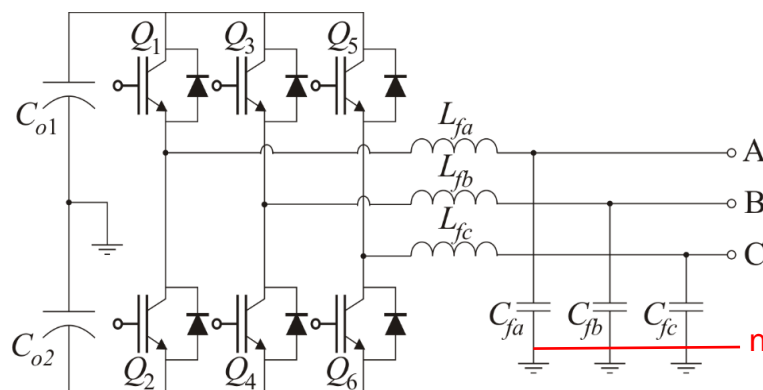
### 3 CIRCUITO DE POTÊNCIA E CONTROLE DO DSTATCOM

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 **à quatro fios**. 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 13. Essa configuração permite a operação independente em cada uma das fases de sistema trifásico, devido à conexão do ponto central do barramento ao neutro. O conversor é conectado paralelamente as cargas, ao PCC e a fonte da rede de distribuição.

Figura 13 – 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.

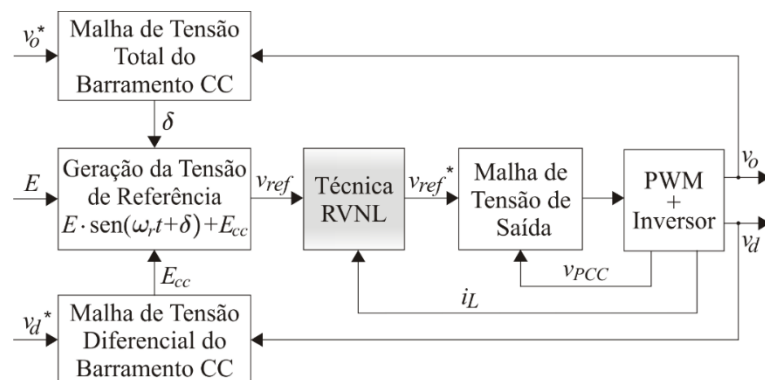
Especificações	Variáveis	Valores
Potência nominal do DSTATCOM	$S_o$	30 kVA
Tensão eficaz de fase	$V_r$	220 V
Tensão do barramento c.c.	$V_o$	800 V
Frequência de comutação	$f_s$	20 kHz
Frequência da rede	$f_r$	60 Hz
Capacitância do filtro LC	$C_f$	50 $\mu$ F
Indutância no lado da rede	$L_r$	1,82 mH
Resistência no lado da rede	$R_r$	0,685 $\Omega$
Indutância do filtro LC	$L_f$	1,12 mH
Capacitância equivalente do barramento c.c.	$C_o$	3,5 mF
Ganho do sensor de tensão do barramento c.c.	$K_{sv_o}$	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 mostrada na Figura 14. A malha de tensão de saída c.a. é responsável pelo controle da forma de onda instantânea de tensão de saída do conversor. 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. No bloco de geração das tensões de referências são produzidas as formas de onda que são utilizadas para o controle da tensão de saída. A estratégia de controle utilizada é baseada no trabalho de (HOCK JR., 2015), onde pode ser encontrado o projeto detalhado das malhas de controle.

Figura 14 – Diagrama de blocos do controle do DSTATCOM utilizando a técnica RVNL



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

O sinal de geração de referência é dado pela equação (1):

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

onde  $v_{ref}$  é o sinal de referência da tensão de saída,  $E$  define a amplitude da tensão de pico imposta ao PCC,  $\omega_r$  é a frequência angular da rede elétrica,  $\delta$  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.

Quando ocorre um transitório na rede, a atuação da técnica RVNL altera bruscamente a referência de tensão, somando a variação de tensão da rede, faz com que a dinâmica do compensador de tensão seja afetada, levando o mesmo a saturação, 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 <sup>poderia</sup> ~~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 " Descarregar". 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 esta, 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 projetado, fazendo 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:

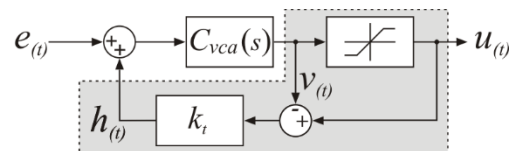
$$h(t) = K_i \cdot [u(t) - v(t)] \quad (8)$$

onde  $u(t)$  é 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  $K_i$  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, 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 implementado a técnica *anti-windup back-calculation* porém atuando diretamente no sinal de entrada do compensador. O circuito implementado é ilustrado na Figura 15.

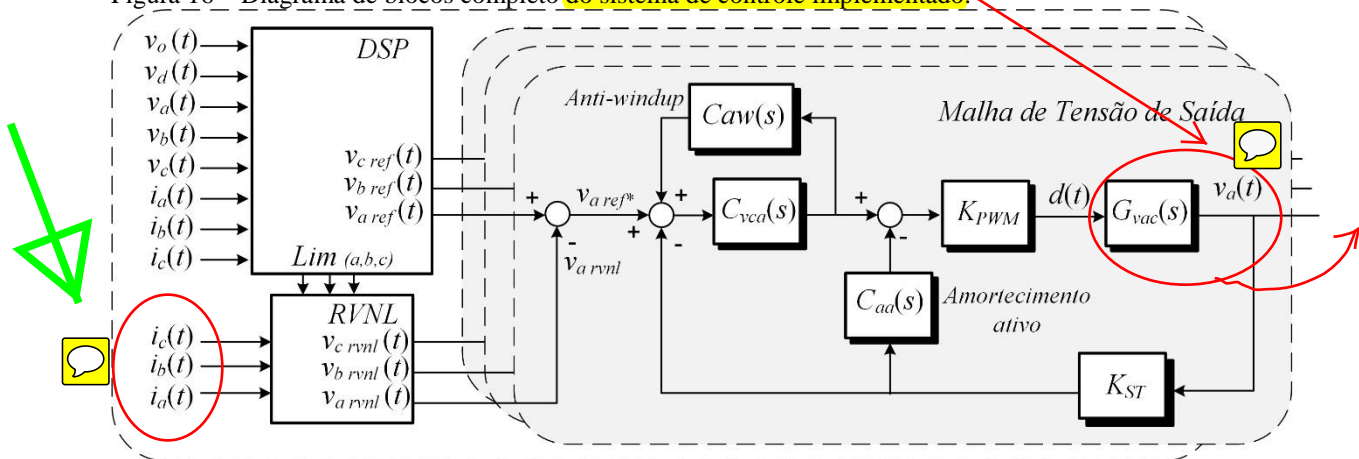
Nos resultados de simulação é apresentado um comparativo “com” e “sem” a técnica *anti-windup* implementada. O diagrama de blocos completo do sistema de controle implementado é ilustrado na Figura 16.

Figura 15 – Técnica de *anti-windup* implementada no controlador da tensão de saída do conversor.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Figura 16 – Diagrama de blocos completo do sistema de controle implementado.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Na imagem, o DSP recebe os sinais de tensão do barramento total e diferencial, as tensões e correntes de saída do conversor e gera as tensões de referência da malha de tensão de saída. As malhas de amortecimento ativo e *anti-windup* são também ilustradas.

### 3.3 RESUMO DO CAPÍTULO

Nesse capítulo foram apresentadas as principais características do DSTATCOM controlado em tensão, a topologia empregada e as principais características de potência do conversor.

O conversor emprega uma topologia bem disseminada, assim como seu projeto de controle. A implementação da técnica RVNL é favorecida pela topologia utilizada, devido a atuação independente para cada fase.

Para melhorar o desempenho das malhas de controle durante a atuação da técnica RVNL, será adicionada uma técnica *anti-windup* nos resultados de simulação numérica.



## 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 em série com o indutor do filtro de saída do conversor. O efeito da resistência virtual é a atenuação a tensão na saída do conversor em condições desfavoráveis de funcionamento, limitando a corrente do conversor.

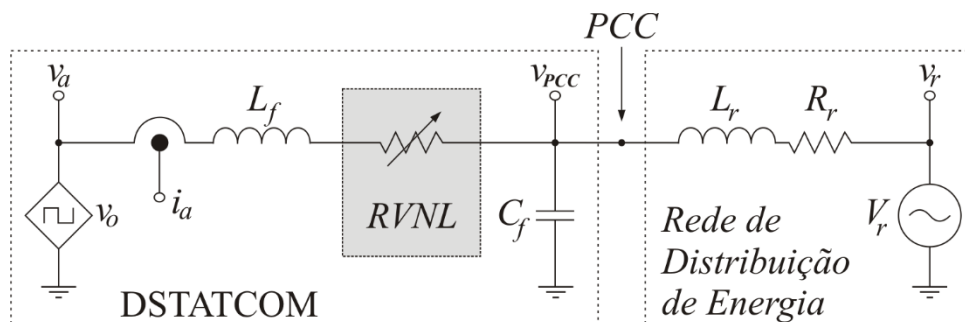
A técnica RVNL pode ser vista como uma malha externa, cuja saída é a tensão de referência do conversor, com a vantagem de que não existe um controlador de corrente. O problema em se ter um controlador de corrente em cascata com o controlador de tensão é a limitação da dinâmica do controlador de tensão, 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.

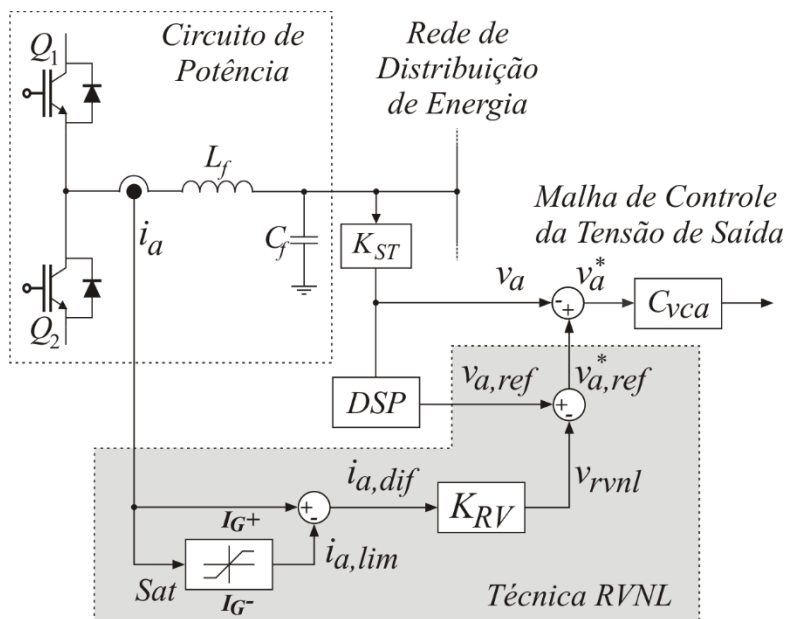
Na Figura 17 é mostrado o circuito equivalente do DSTATCOM com a técnica RVNL conectado ao ponto de conexão comum e a rede elétrica.

Figura 17 – Representação do circuito com a técnica RVNL.



Na Figura 18 é apresentado o diagrama de blocos que ilustra a técnica RVNL. 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 atenuador 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.

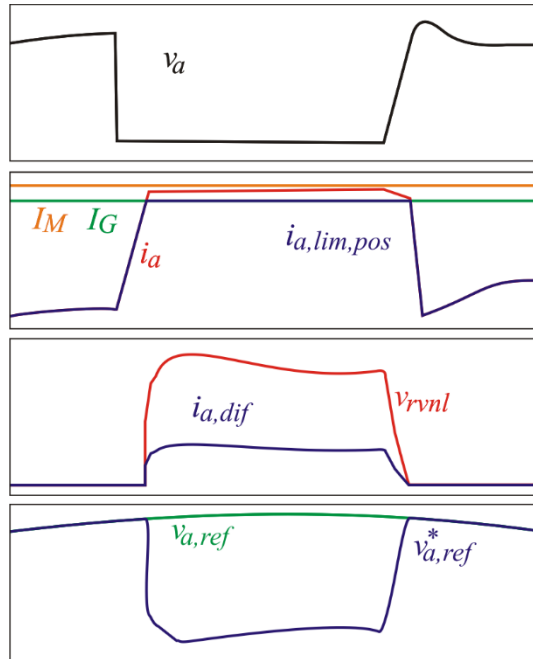
Figura 18 – Diagrama de blocos da técnica RVNL.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

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 no indutor 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.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Para determinar o valor da Resistência Virtual ( $K_{RV}$ ) é necessário especificar um valor de corrente limiar ( $I_G$ ) e o valor de corrente máxima 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 (9):

$$K_{RV} = \frac{V_{pk-pk}}{I_M - I_G} \quad (9)$$

O valor de  $v_{rvnl}$  é dado pela equação (10)

$$v_{rvnl} = (i_a - i_{a,lim}) \cdot K_{RV} \quad (10)$$

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 (11):

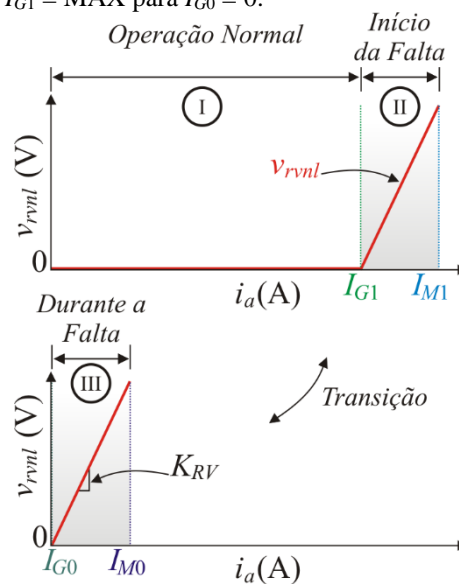
$$v_{ref}^* = E \cdot \text{sen}(\omega_r t + \delta) + E_{cc} - v_{rvnl} \quad (11)$$

## 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  $I_{G0} = 0$ .

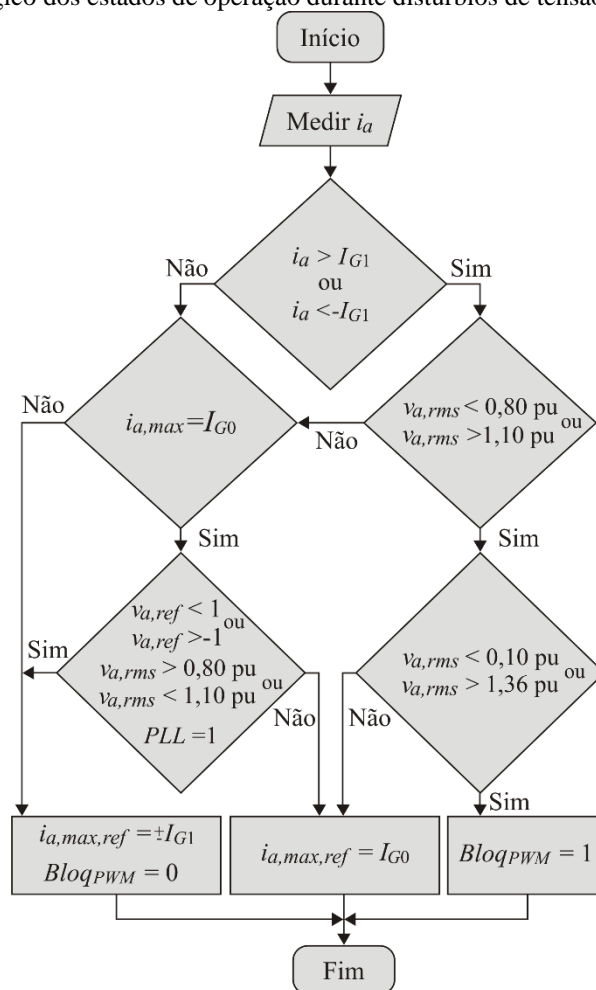


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

#### 4.3 ESTADOS DE OPERAÇÃO DURANTE DISTÚRBIOS DA REDE ELÉTRICA

No presente trabalho, o sincronismo com a rede é efetuado através 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. Por meio 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 ( $I_{a,MAX,REF} = \pm I_{GI}$ ) 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 abordado os aspectos teóricos com uma descrição detalhada de sua operação, suas equações matemáticas para determinação das constantes e uma lógica complementar 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. Assim, a técnica proposta RVNL passa a ser uma solução para controle indireto da corrente e a mesma pode ser aplicada a conversores estáticos em modo de controle de tensão.



## 5 IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA DA TÉCNICA RVNL



Nesta seção é apresentado o projeto do cartão eletrônico que contempla a técnica de Resistência Virtual Não Linear. Com o intuito de apresentar nos resultados experimentais os sinais de controle da técnica RVNL o circuito eletrônico foi implementado de forma analógica, por meio de amplificadores operacionais e circuitos grameadores de tensão.

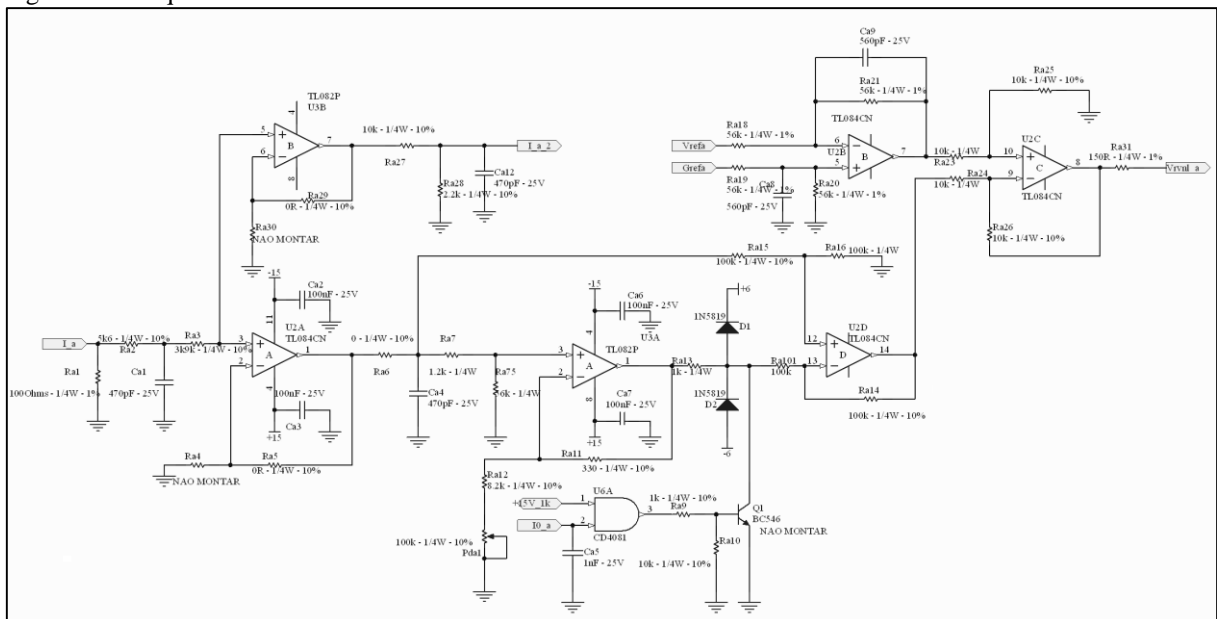


O projeto do cartão contempla 3 circuitos com a técnica RVNL, sendo cada um específico por fase, mais dois circuitos com regulador de tensão ajustável, um para a tensão positiva e outro para a tensão negativa e por último, os circuitos de interface com o DSP.

### 5.1 PROJETO DA CIRCUITO ELETRÔNICO COM A TÉCNICA RVNL.

O circuito com a técnica Resistência Virtual Não Linear é apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Esquema eletrônico do circuito com a técnica RVNL.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Neste circuito 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 dos sinais saturado e não saturado, foi inserido por meio dos resistores Ra7 e Ra75 uma atenuação do sinal de aproximadamente 2%, seguido por um ganho ajustável de até 4% no amplificador não inversor U3A.

Através dos diodos D1 e D2 é efetuado o grampeamento do nível de tensão utilizado, saturando assim o sinal de acordo com o nível de tensão ajustado nos sinais “+6” e “-6”. Neste circuito é fundamental adicionar uma alta impedância (Ra101) após o grampeamento, sem a mesma, o ganho do amplificador U2D tende ao infinito.

Na sequência, o sinal saturado e o não saturado passam por um subtrator U2D, o sinal resultante é subtraído do sinal de referência da tensão de saída ( $V_{refa}$ ). O novo sinal resultante é a referência da tensão de saída, agora atenuada pela técnica RVNL.

O circuito integrado CD4081 é uma porta AND, que recebe o sinal do DSP, zerando o sinal saturado, fazendo com que o conversor opere com aproximadamente zero ampères na saída. O buffer U3B repassa o sinal de corrente para o DSP, com o ganho definido pelos resistores Ra27 e Ra28.

Por este trabalho propor algo novo, portanto sem referências, foram necessárias algumas iterações até seu correto funcionamento. ~~Como exemplo pode-se citar a necessidade de uma alta resistência após os diodos de grampeamento, garantindo o funcionamento adequado do amplificador operacional como subtrator.~~ A necessidade de utilizar diodos de grampeamento de baixa capacitância. 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.



Um problema encontrado durante os testes iniciais do cartão, foi a deformação dos sinais nas entradas e saídas dos amplificadores operacionais, após horas efetuando alterações no circuito, foi identificado 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 B (página 108).

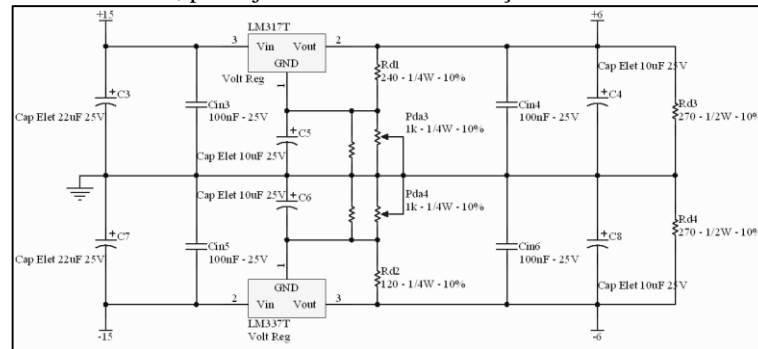
## 5.2 PROJETO DA FONTE DE TENSÃO REGULÁVEL.

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 LM317 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 grameamento 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.

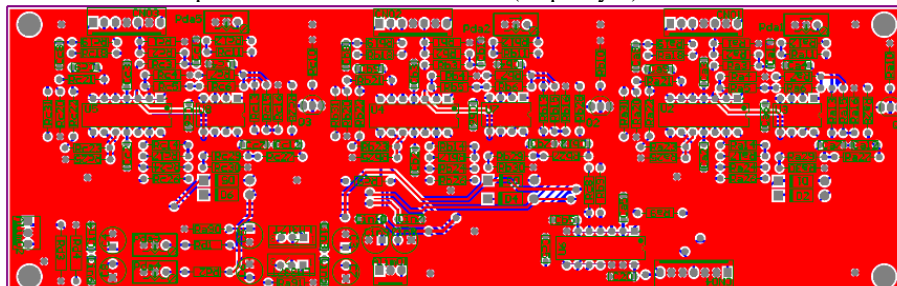


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

### 5.3 PROJETO DA PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO

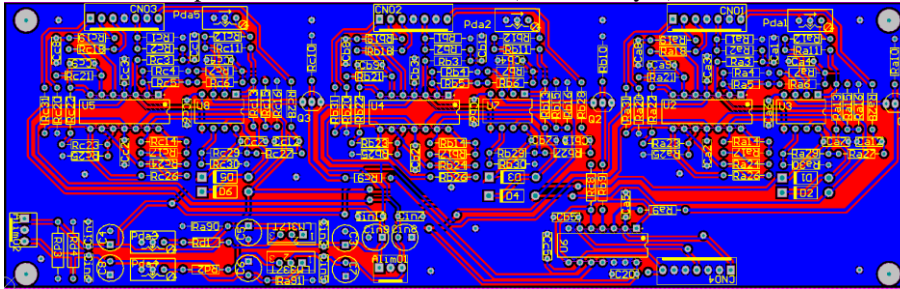
O projeto da PCI foi efetuado no programa *ALTIUM Designer®*, sendo utilizadas duas camadas para o roteamento das trilhas e componentes THT (*Through-Hole Technology*) por facilitar a montagem do cartão. O projeto da placa de circuito impresso é apresentado na Figura 24 e na Figura 25. Na parte superior 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, como também, o projeto de layout da placa de circuito impresso. O circuito se mostra simples e de fácil implementação.

No APÊNDICE A (página 105) são apresentados os testes parciais do cartão, para uma melhor compreensão de seu funcionamento. No APÊNDICE B (página 108) 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.

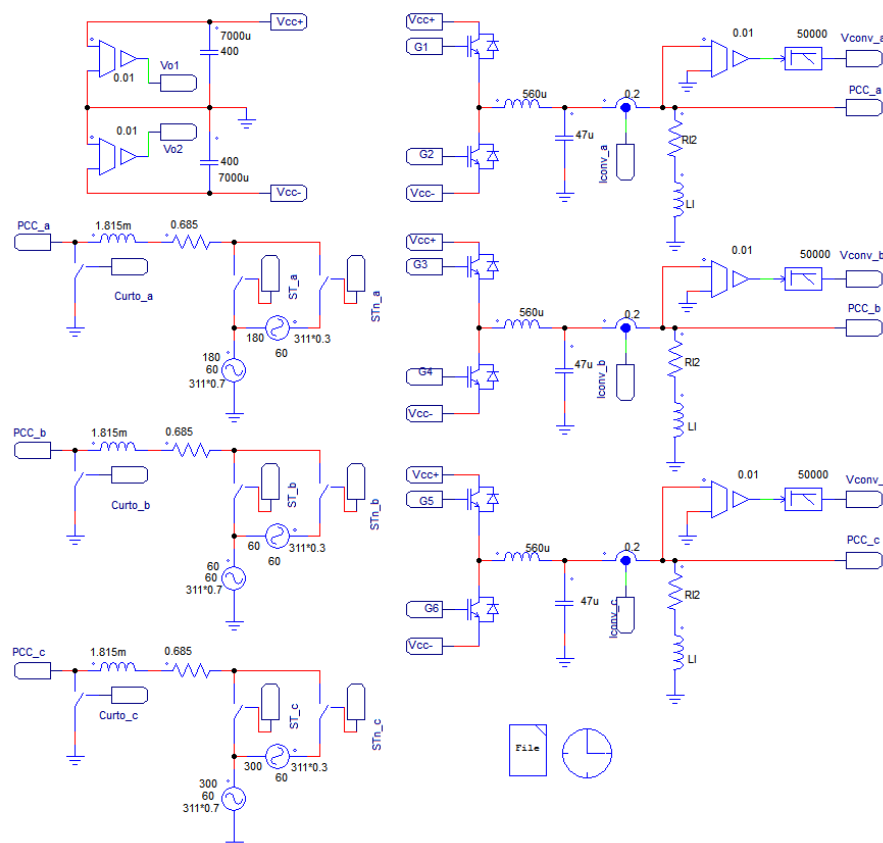
## 6 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

O sistema contemplando a fonte geradora, as cargas e o DSTATCOM são simulados no software PSIM®, sendo dividido em duas partes: os circuitos de controle e os circuitos de potência.

### 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 através de três fontes senoidais ideais juntamente com a sua impedância. A carga é representada pelos resistores e indutores nomeados como “R12” e “LI” e assumem valores distintos conforme as simulações de interesse.

Figura 26 – Circuito de Potência Simulado.

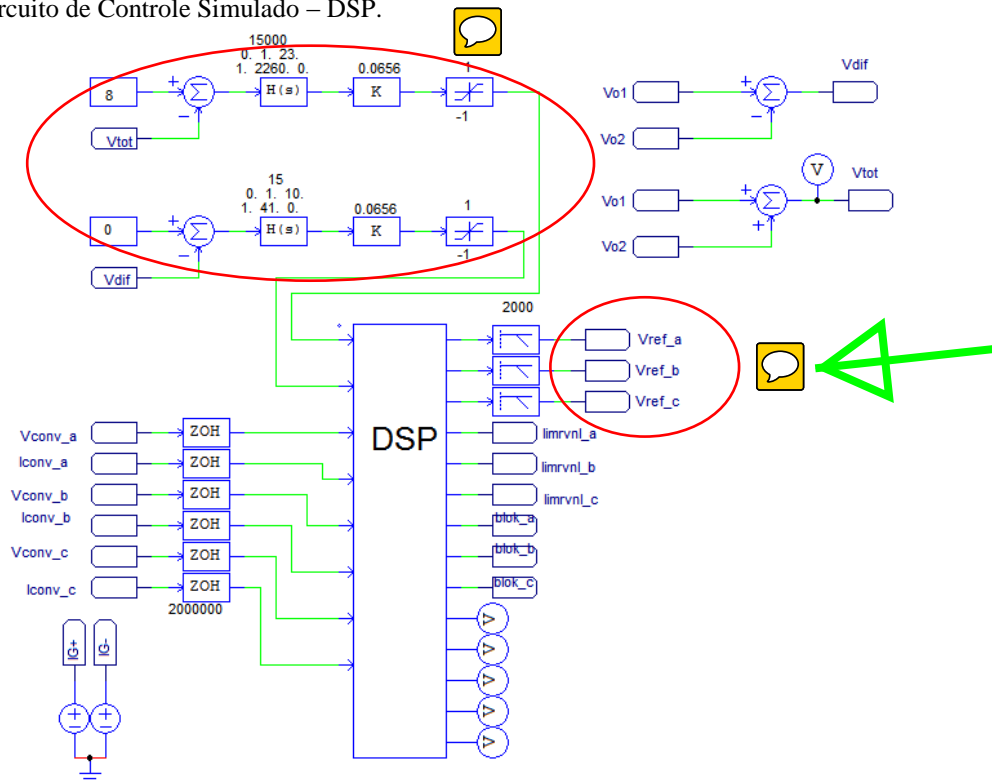


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

## 6.2 CIRCUITO DE CONTROLE

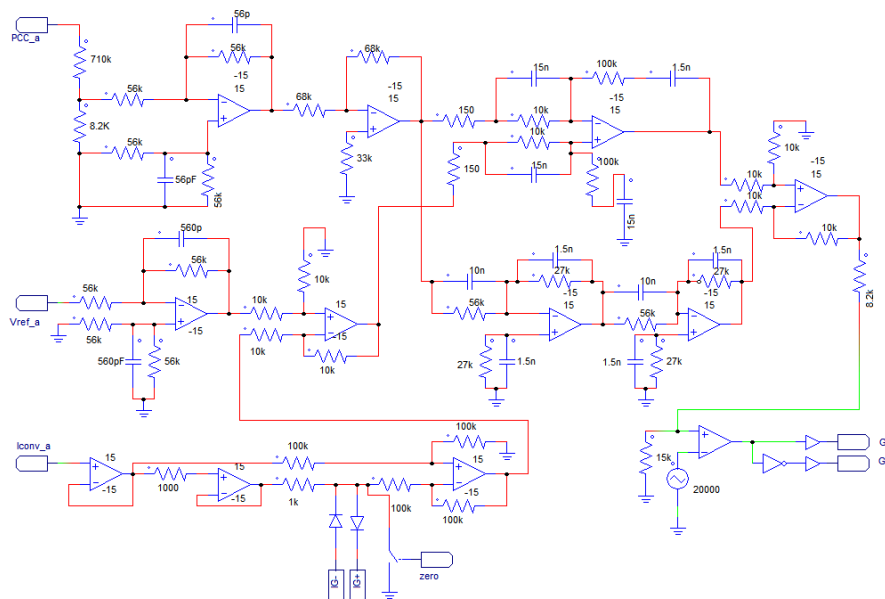
A Figura 27 e a Figura 28 apresentam os circuitos de controle do compensador de tensão. Na Figura 27 estão os circuitos das malhas de tensão total e diferencial do barramento c.c. e o bloco que representa o DSP. As entradas do DSP são os sinais das malhas de tensão do barramento c.c., as três tensões 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. Na Figura 28 estão os circuitos das malhas de tensão c.a., com os compensadores de tensão c.a. e os compensadores de amortecimento ativo e a técnica RVNL.

Figura 27 – Circuito de Controle Simulado – DSP.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Figura 28 – Circuito de Controle Simulado – Malhas de Controle e 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 DSTATCOM.

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
Ondulação de corrente no indutor	$\Delta I_L$ 30 %
Capacitância do barramento c.c.	$C_o$ 3,5 mF
Capacitância do filtro de saída	$C_f$ 47 $\mu$ F
Indutância do filtro de saída	$L_f$ 560 $\mu$ H
Resistência da rede	$R_r$ 1,37 $\Omega$
Indutância da rede	$L_r$ 3,63 mH
Corrente limiar	$I_{G1}$ $\pm$ 60 A
Corrente máxima	$I_M$ $\pm$ 70 A

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

## 6.4 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

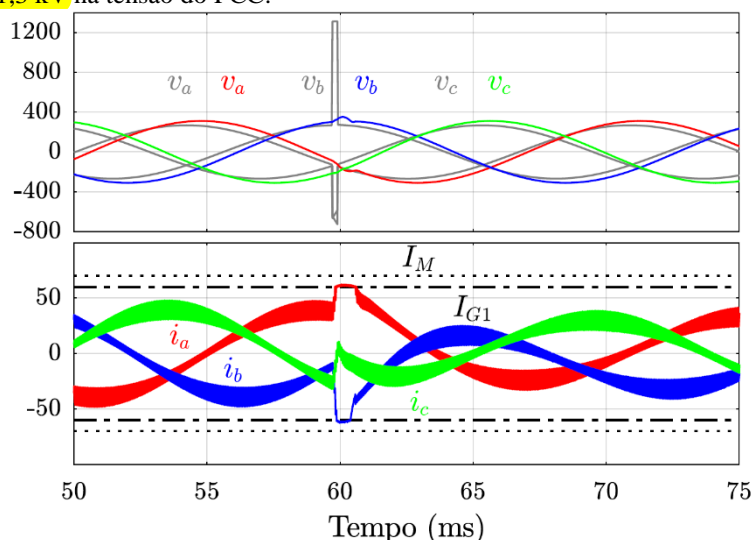
Nesta seção serão apresentados os resultados das simulações numéricas, para análise do desempenho da técnica RVNL atuando em diversas condições de distúrbios da rede elétrica, tais como: surto de tensão, elevação de tensão, afundamento de tensão, interrupção de tensão e curto-circuito trifásico na saída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

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

Na Figura 29 pode-se verificar a atuação da técnica RVNL em uma condição de surto de tensão no PCC, que pode ser caracterizada como uma descarga atmosférica próxima ao PCC. As formas de onda apresentadas em cinza são as condições sem a atuação do DSTATCOM e as formas de onda coloridas são os resultados com o DSTATCOM utilizando a técnica proposta.



Figura 29 – Surto de 1,3 kV na tensão do PCC.



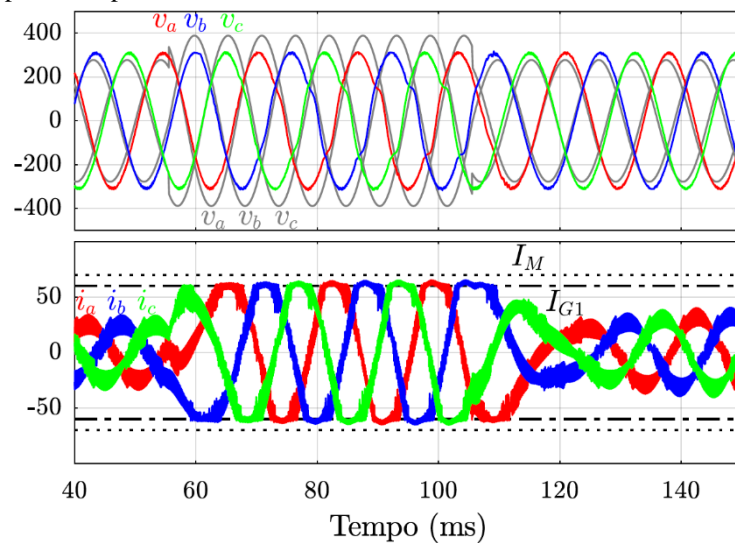
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Sem a correção da tensão o valor da tensão de pico chega a 1,3 kV ( $v_a$ ,  $v_b$ ,  $v_c$  em cinza) para um período aproximado de 500  $\mu$ s, podendo este ser um valor de tensão destrutível a equipamentos eletrônicos sensíveis. No entanto, com a regulação da tensão no PCC, pelo DSTATCOM com a técnica de RVNL, a tensão de pico chega em 350 V ( $v_a$ ,  $v_b$ ,  $v_c$ ), sendo a corrente limitada em 63 A de pico ( $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ ). Os sinais de corrente do DSTATCOM são medidos antes do filtro capacitivo, por este motivo é visto a ondulação de corrente do indutor. Nesta condição a técnica RVNL protegeu o DSTATCOM e as cargas próximas conectadas.

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

Na Figura 30 é mostrada uma condição de elevação de tensão. Sem correção, a tensão eficaz no PCC ( $v_a$ ,  $v_b$ ,  $v_c$  em cinza) **passa de 0,80 pu** para 1,25 pu. Com a atuação do DSTATCOM, a tensão eficaz no PCC ( $v_a$ ,  $v_b$ ,  $v_c$ ) mantém-se regulada em 1,01 pu. Ao limitar a corrente de saída em 65 A de pico ( $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$ ) a THD da tensão é comprometida, passando do valor de 0,3 % para o valor de 10 % de distorção.

Figura 30 – Elevação para 1,25 pu de tensão no PCC.



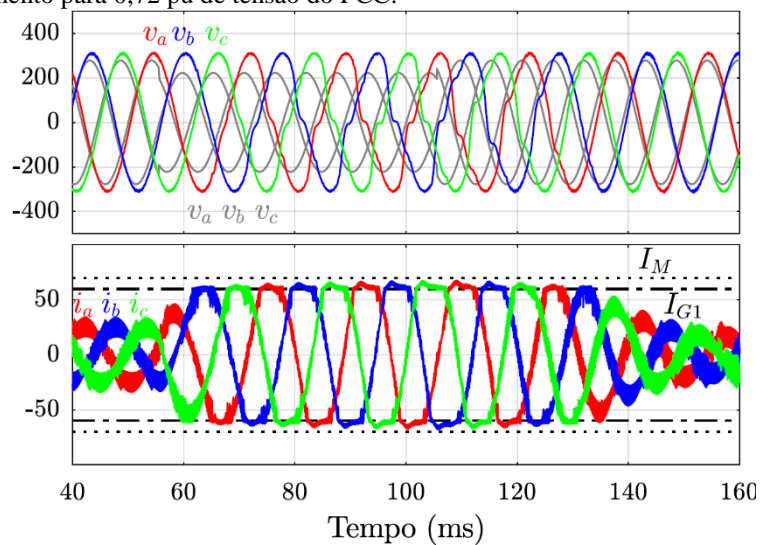
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

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, 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.

### 6.4.3 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 31. No PCC sem correção a tensão eficaz ( $v_a, v_b, v_c$  em cinza) **passa de 0,80 pu** para 0,72 pu. Com correção, durante o transitório, a tensão eficaz no PCC é corrigida para 0,98 pu. Ao limitar a corrente de saída em 66 A de pico ( $i_a, i_b, i_c$ ) a THD da tensão é de 17 %.

Figura 31 – Afundamento para 0,72 pu de tensão do PCC.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

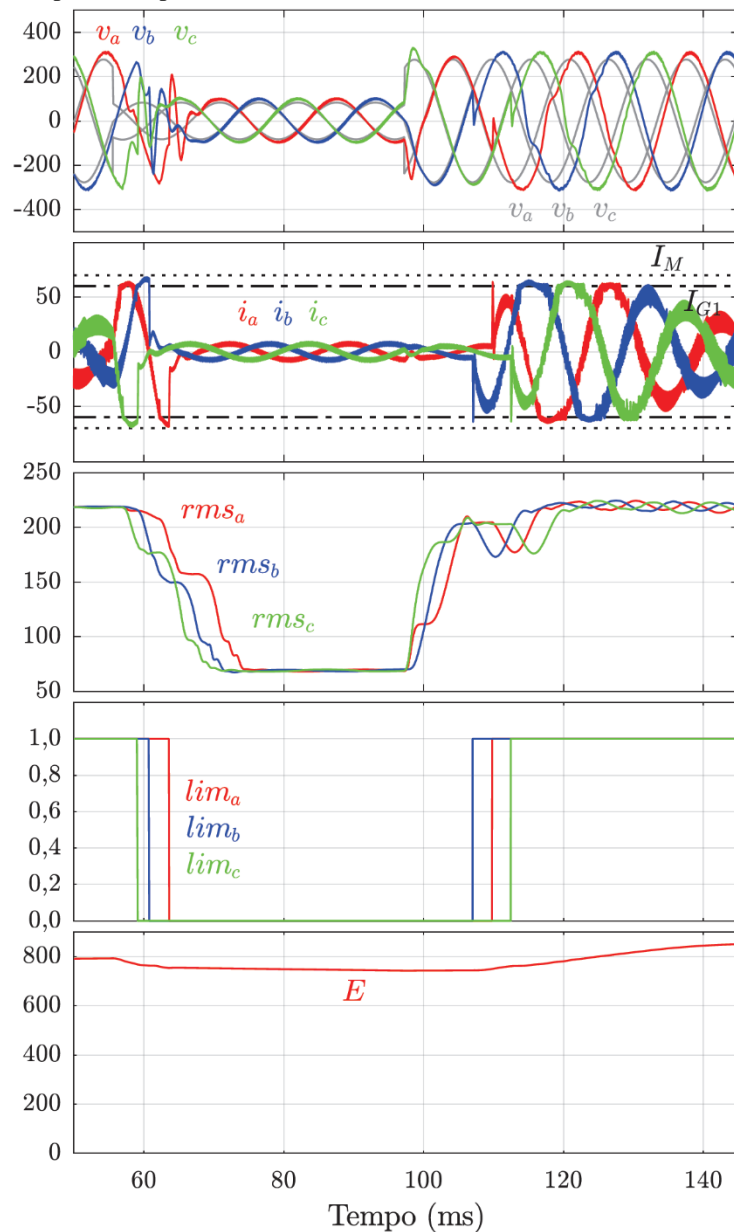
Nesta condição a técnica RVNL limitou a corrente de saída em um valor abaixo do máximo ( $I_M$ ) especificado no projeto, como também, permitiu o conversor manter a tensão do PCC próxima a 1,00 pu. Assim, a técnica protegeu o DSTATCOM e as cargas próximas conectadas.



#### 6.4.4 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 32. No PCC sem correção, a tensão eficaz ( $v_a$ ,  $v_b$ ,  $v_c$  em cinza) **passa de 0,80 pu** para 0,43 pu. Mesmo com correção, o DSTATCOM detecta uma tensão eficaz ( $v_{a,rms}$ ,  $v_{b,rms}$ ,  $v_{c,rms}$ ) **menor que 0,80** pu. Assim, são alterados os valores limites para correntes ( $lim_a$ ,  $lim_b$ ,  $lim_c$ ), ou seja, o valor da corrente limiar passa a ser próximo a zero. Ao limitar a corrente de saída do DSTATCOM é mantido o nível de tensão no barramento c.c., caso contrário o barramento c.c. seria descarregado e inviabilizaria o funcionamento normal da operação.

Figura 32 – Afundamento para 0,43 pu de tensão no PCC.

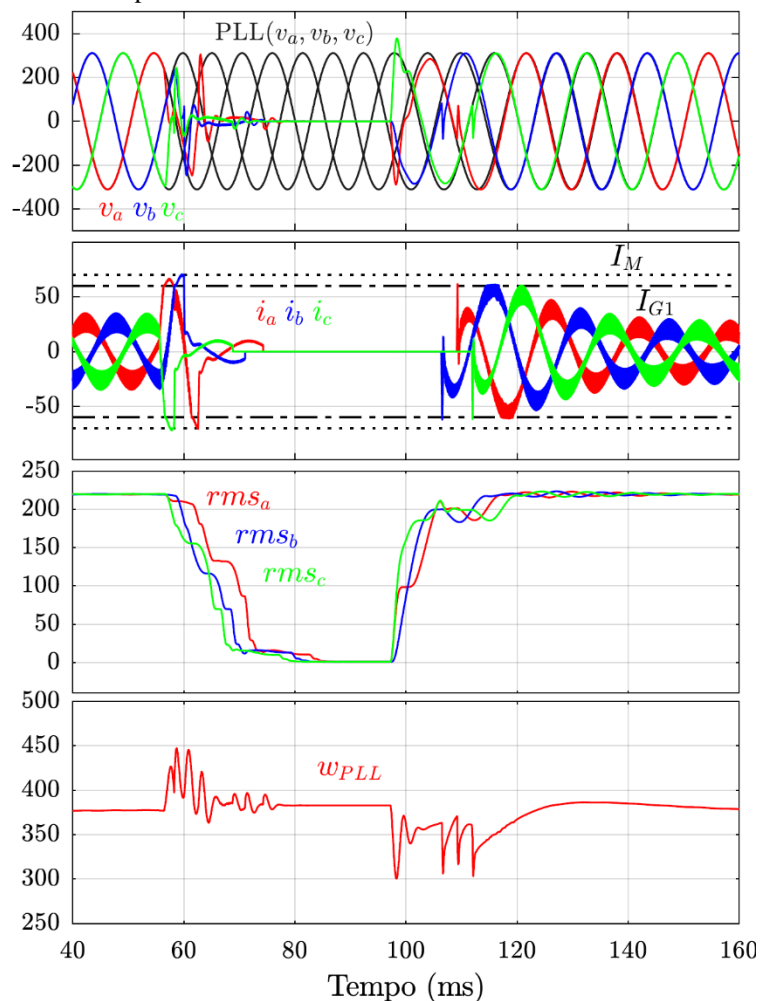


Nesta condição a técnica RVNL limita a corrente de saída, e após a condição de falta, em que o nível da tensão eficaz do PCC retorna a um nível maior que 0,80pu, o DSTATCOM verifica o sincronismo com a rede, o cruzamento da tensão de referência por zero e então eleva o limite da corrente de saída ( $I_{a,MAX,REF} = \pm I_{G1}$ ), voltando a regular a tensão em 1,00 pu.

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

Uma condição de interrupção de tensão é apresentada na Figura 33. 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.

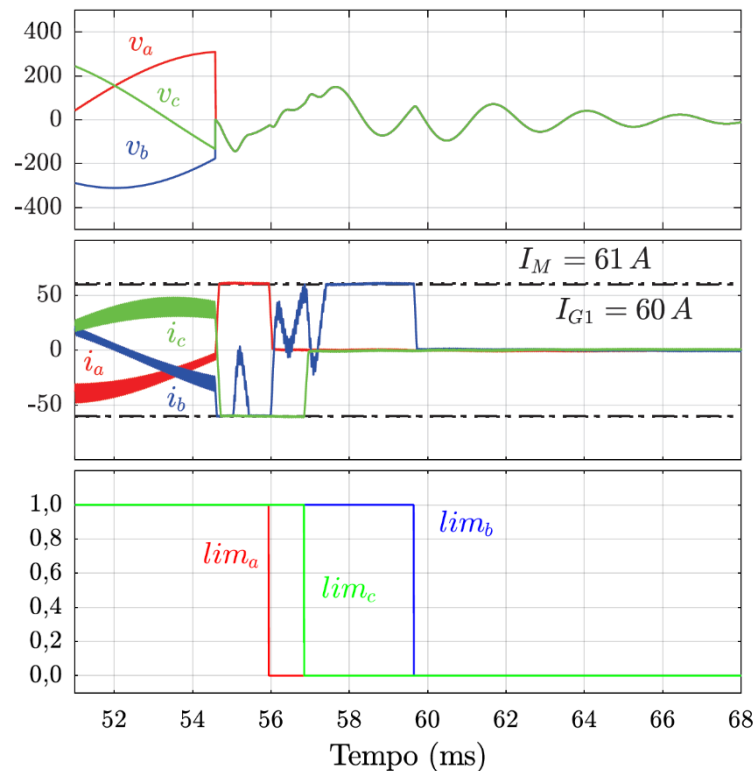
Figura 33 – Interrupção de tensão por 3 ciclos de rede



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

A Figura 34 mostra uma condição de curto-circuito trifásico na saída do DSTATCOM, sendo esta a pior condição para avaliar a técnica RVNL, pois a derivada de corrente é muito alta, sendo necessário que o RVNL atue quase instantaneamente. Neste caso a corrente máxima foi ajustada para 61 A. 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 60 A pelo RVNL. Porém, com o decaimento da tensão eficaz, a corrente de saída é limitada para o valor mínimo próximo de 0 A.

Figura 34 – Condição de curto-circuito trifásico no PCC.

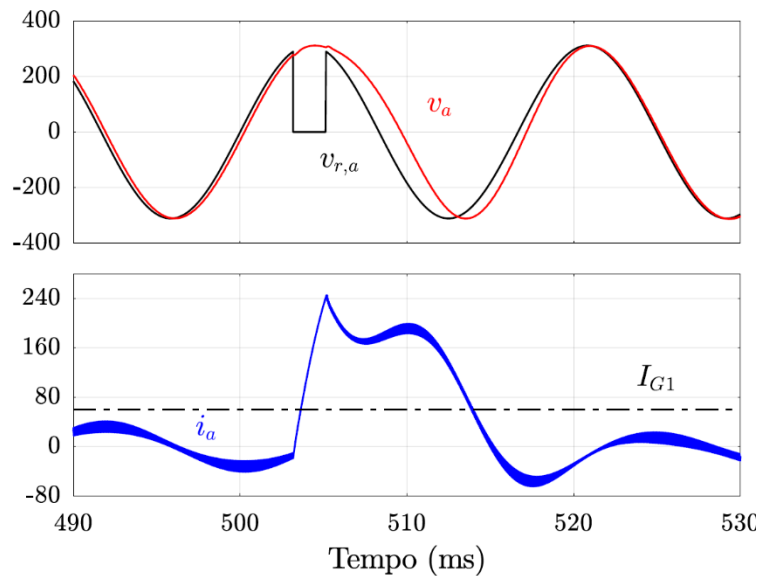


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

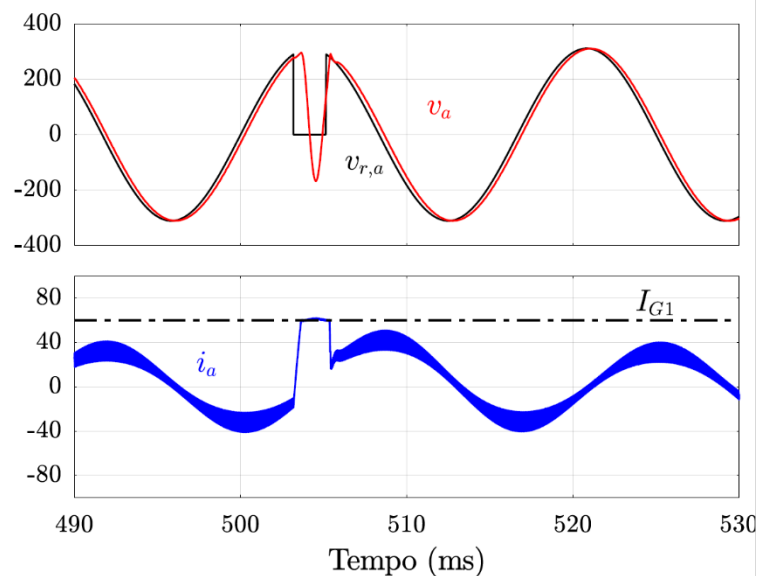
### 6.4.7 Atuação da Técnica RVNL para a Condição de Interrupção Monofásica de Curta Duração

Na Figura 35 é mostrada a operação do DSTATCOM durante uma condição de interrupção monofásica de curta duração. Na Figura 35 (a) são mostrados os resultados sem a técnica RVNL e pode-se observar um grande aumento na corrente do conversor. Na Figura 35 (b) são mostrados os resultados com a técnica RVNL e pode-se observar que além de limitar a corrente próximo ao valor limiar de  $I_{G1}$  e  $I_M$ , contribuiu para uma resposta dinâmica mais rápida neste transitório, pois ela acaba funcionando como um *anti-windup*.

Figura 35 – Condição de interrupção monofásica de curta duração.



(a) Operação sem a técnica RVNL

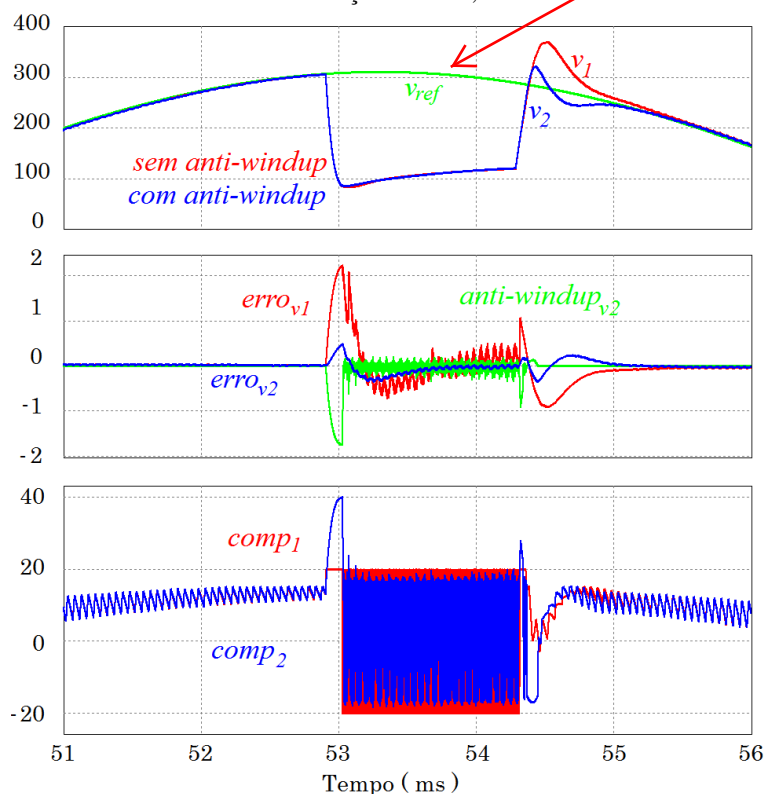


(b) Operação com a técnica RVNL

#### 6.4.8 Análise das Técnicas *Anti-Windup* e RVNL Implementadas para a Condição de Afundamento de Tensão

A Figura 36 ilustra os efeitos da técnica *anti-windup* implementada, para uma condição de afundamento de tensão para 0,50 pu com duração de 2 ms. Sendo  $v_2$  e  $v_1$  a tensão no PCC da fase A, com e sem a atuação da técnica *anti-windup* respectivamente. O sinal imposto na entrada do compensador de tensão  $erro_{v2}$  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  $comp_1$  permanece saturando durante a falta nos limites superior e inferior, diferente do sinal  $comp_2$  que não opera saturado.

Figura 36 – 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 que a técnica *anti-windup* atenua a sobretensão em  $v_2$  assim que falta cessa, comprovando seu correto funcionamento.

## 6.5 RESUMO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os circuitos de controle e potência do DSTATCOM controlado em tensão, ~~utilizados para validação da técnica RVNL, via simulação numérica.~~ <sup>implementados no PSIM e</sup> 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 a capacidade de limitação de corrente de saída, preservando o equipamento e as cargas próximas conectadas durante distúrbios elétricos no PCC.

O circuito da técnica de RVNL e sua implementação no conversor, portanto, estão aptos a serem reproduzidos e verificados em um protótipo.



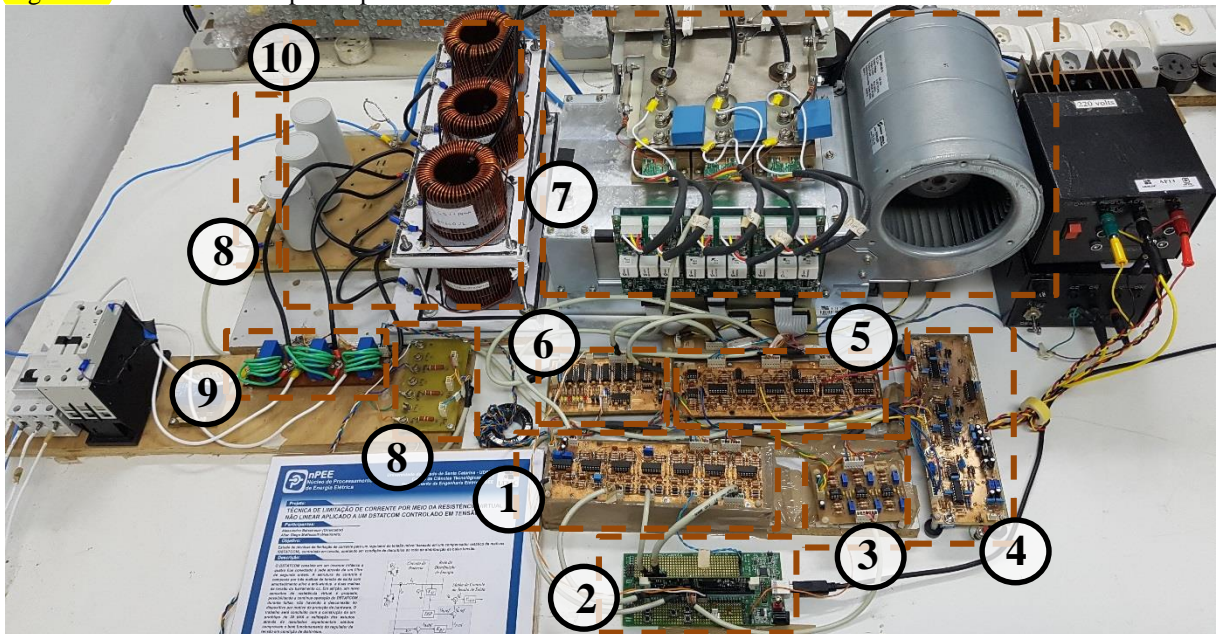
## 7 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Após a verificação da técnica Resistência Virtual Não Linear em 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.

### 7.1 SISTEMA IMPLEMENTADO

O sistema implementado, com identificação dos sub-circuitos é ilustrado na Figura 38.

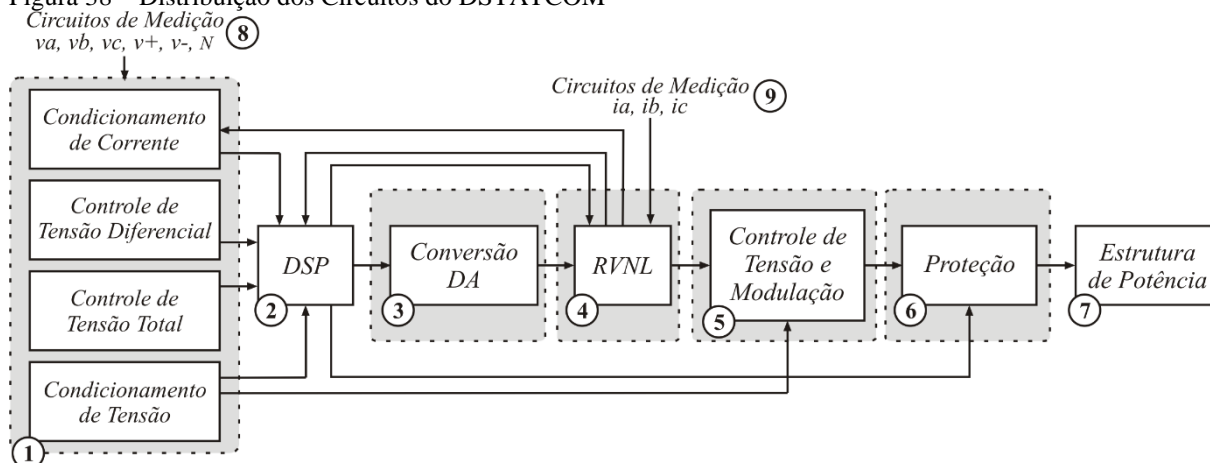
Figura 37 – DSTATCOM protótipo com a técnica RVNL.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

O diagrama de blocos da Figura 38 ilustra 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 nos indutores, assim como ações de controle e comando dos interruptores.

Figura 38 – 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, separadas 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 ( $v_{PC}$ ) tenha sua amplitude adequada para leitura através dos conversores analógicos digitais (CAD) do DSP. O circuito adéqua a amplitude dos sinais medidos através do circuito de ganho e do saturador, somam a estes um nível c.c. de 1,5 V e aplicam o filtro anti-recobrimento. Ainda há proteção de contra sobressinais na entrada do CAD do DSP através 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 CAD. 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 SARAM
- 12 saídas PWM com temporizadores de 16 bits.
- Módulos PWM (~~de 12~~) de alta resolução.
- 16 canais de conversores AD de 12 bits.



A Figura 39 traz uma imagem do kit de desenvolvimento.

Figura 39 – 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, afim 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. Se 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.

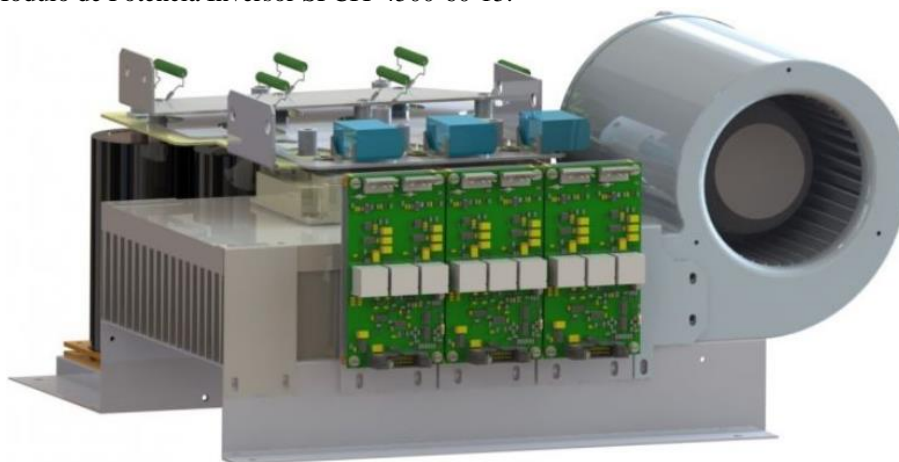
### **7.1.6 Circuito de Proteção**

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 sobre-tensões nos mesmos e todo circuito de drivers necessário.

Figura 40 – 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, através 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  $k_i = 0,3$ .

Ao efetuar a limitação da corrente, por meio da técnica RVNL, medindo a corrente no indutor de saída, exige-se do protótipo uma resposta dinâmica mais rápida, pois tende-se a alterar a referência do PWM de forma brusca, levando ao acionamento da proteção de hardware do módulo de potência. **Considerando que o projeto do módulo de potência não era o objetivo deste trabalho, optou-se em efetuar a medição da corrente após o filtro LC, assim, nos resultados experimentais apresentados, não é mais vista a oscilação da corrente no indutor, e sim a corrente na saída do DSTATOM.**



### 7.1.9 Filtro LC

A conexão entre o DSTATCOM e a rede elétrica é realizado 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 37.

Os indutores de filtro de saída são do fabricante Magmattec. Cada indutor possui 560  $\mu\text{H}$ , 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  $\mu\text{F}$ , e seu código é B32322B4506J010.

## 7.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção são apresentados os resultados dos ensaios práticos da técnica RVNL 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 auto-transformador conectado em série com uma impedância artificial ( $Z_{rd\_art}$ ), formada por resistor de 0,75  $\Omega$  e um indutor de 2,66 mH, este sistema sobrepõe a impedância da rede elétrica da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC). O valor da impedância artificial ( $Z_{rd\_art}$ ) é apresentado em (12).

$$Z_{rd\_art} = 0,75 \Omega + j \cdot 2,66 \text{ mH} \cdot 2 \pi \cdot f_{rd} \quad (12)$$

Os valores de impedância da rede adicionada ao ramal da rede, para a simulação e para o experimento, é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Comparativo entre os parâmetros utilizados na simulação e nos ensaios

	Módulo de impedância da rede	Ângulo da impedância da rede
Simulação	1,94	44,97°
Experimento	1,25	53,21°

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Na Tabela 6 são apresentadas as especificações técnicas do conversor implementado.

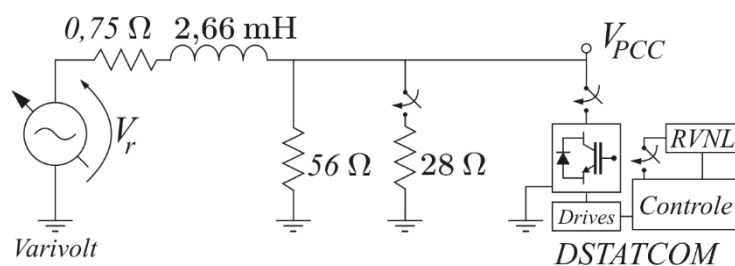
Tabela 6 – Parâmetros do DSTATCOM

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
Ondulação de corrente no indutor	$\Delta I_L$	30%
Capacitância do barramento c.c.	$C_o$	3,5 mF
Capacitância do filtro de saída	$C_f$	47 $\mu$ F
Indutância do filtro de saída	$L_f$	1120 $\mu$ H
Resistência da rede	$R_r$	0,75 $\Omega$
Indutância da rede	$L_r$	2,66 mH
Corrente limiar	$I_{GI}$	$\pm 10$ A / $\pm 7$ A
Corrente máxima	$I_M$	$\pm 18$ A / $\pm 14$ A
Ganho da resistência virtual	$k_{rv}$	125
Carga Leve	$R_L$	56 $\Omega$
Carga Pesada	$R_P$	18,7 $\Omega$

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Nos testes são empregadas duas configurações de cargas, denominadas de leve e pesada. A carga leve é um resistor de 56  $\Omega$  e fica permanentemente conectado ao PCC, a carga pesada trata-se da conexão de um resistor de 28  $\Omega$  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.

Figura 41 – Esquema unifilar do circuito utilizado nos ensaios experimentais do DSTATCOM.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

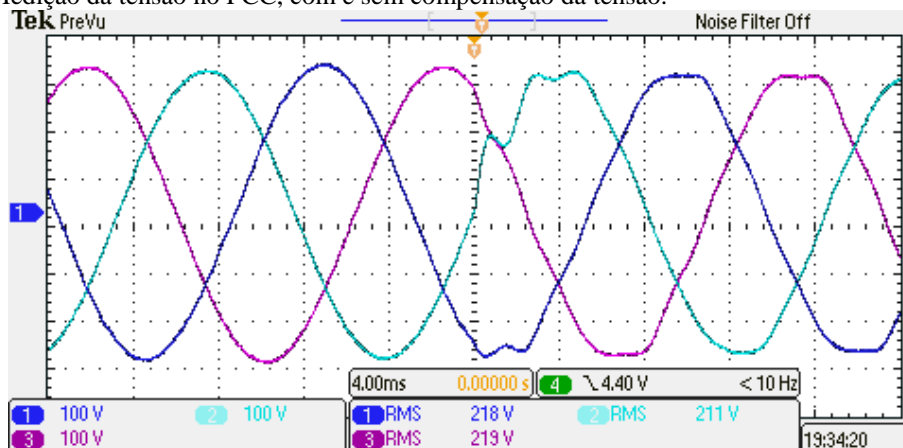
As formas de onda das fases A, B e C são doravante atribuídas aos canais CH1, CH2 e CH3, respectivamente, tanto para as tensões do PCC quanto para as correntes processadas pelo conversor. Para a aquisição dos resultados são utilizados os osciloscópios MSO2014B e MDO3014 do fabricante Tektronix.

### 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 DSATCOM 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 42 mostra o transiente descrito das formas de onda das três tensões do PCC sintetizadas pelo DSTATCOM para uma carga leve.

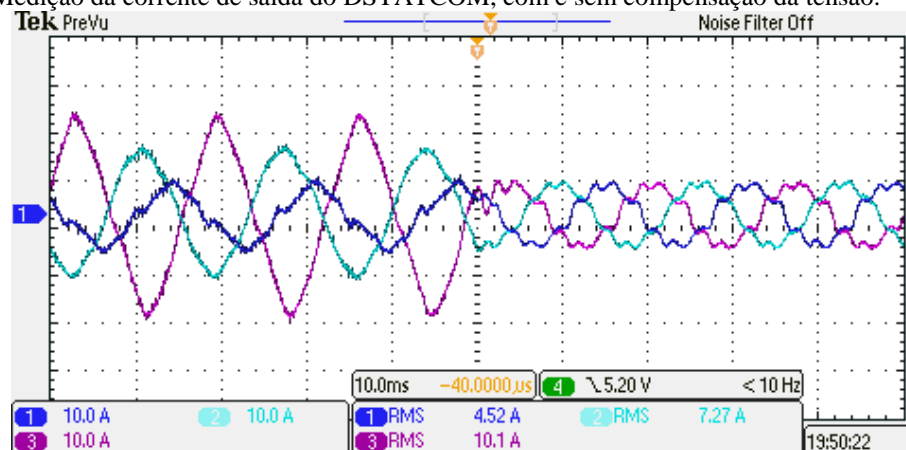
Figura 42 – Medição da tensão no PCC, com e sem compensação da tensão.



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%.

Figura 43 – Medição da corrente de saída do DSTATCOM, com e sem compensação da tensão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

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 43. 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).

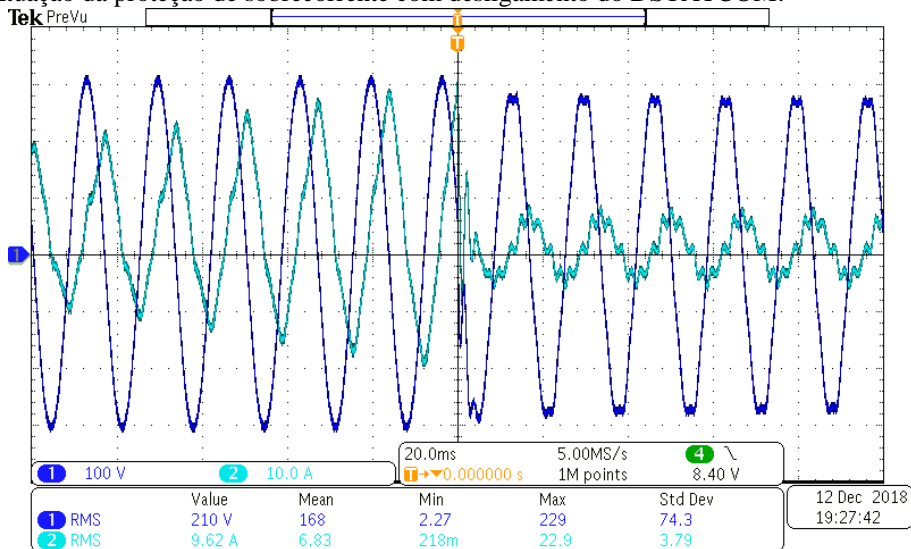
A distorção harmônica presente nas formas de onda de corrente são originadas pela distorção da tensão da rede. O conversor, impondo tensões com baixa THD, absorve essas distorções na forma de corrente e evita que a tensão do PCC seja distorcida, conforme visto durante os resultados de simulação.

### 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 44 ilustra o transiente de detecção e interrupção de seu funcionamento quando submetido a uma corrente de pico de 30 A aproximadamente.



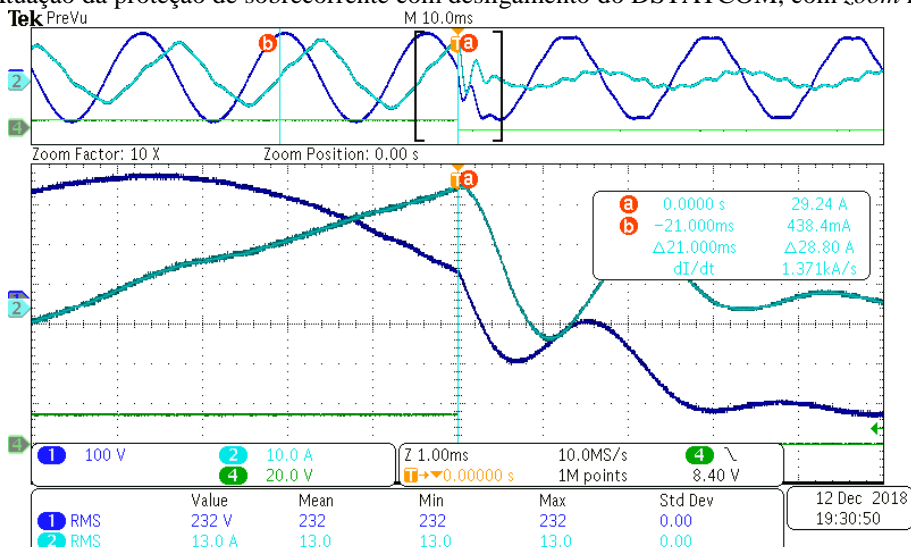
Figura 44 – Atuação da proteção de sobrecorrente com desligamento do DSTATCOM.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A Figura 44 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 45 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.

Figura 45 – Atuação da proteção de sobrecorrente com desligamento do DSTATCOM, com *zoom* no transiente.

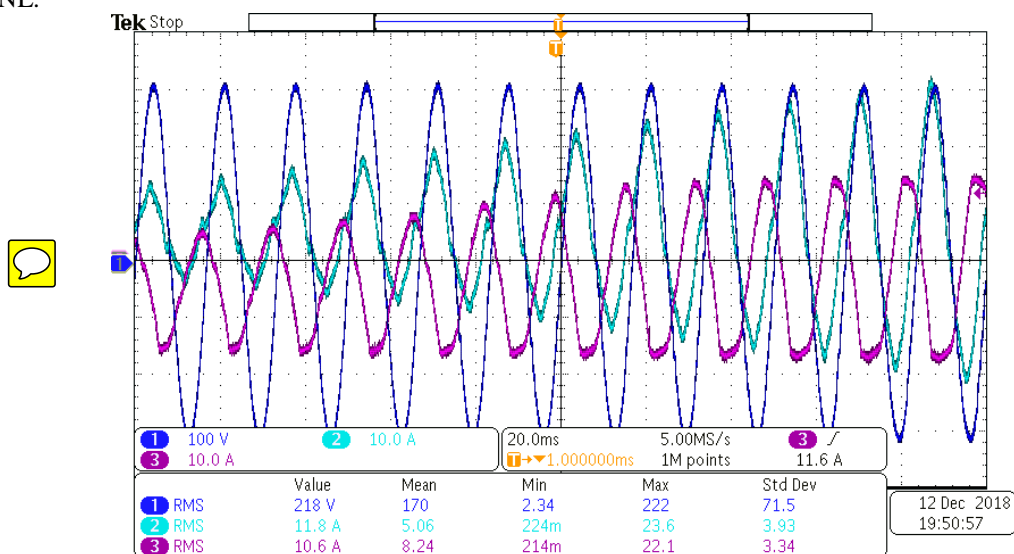
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019



### 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 46, 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 46 – Operação em sobrecarga, com limitação da corrente de saída do DSTATCOM por meio da técnica RVNL.

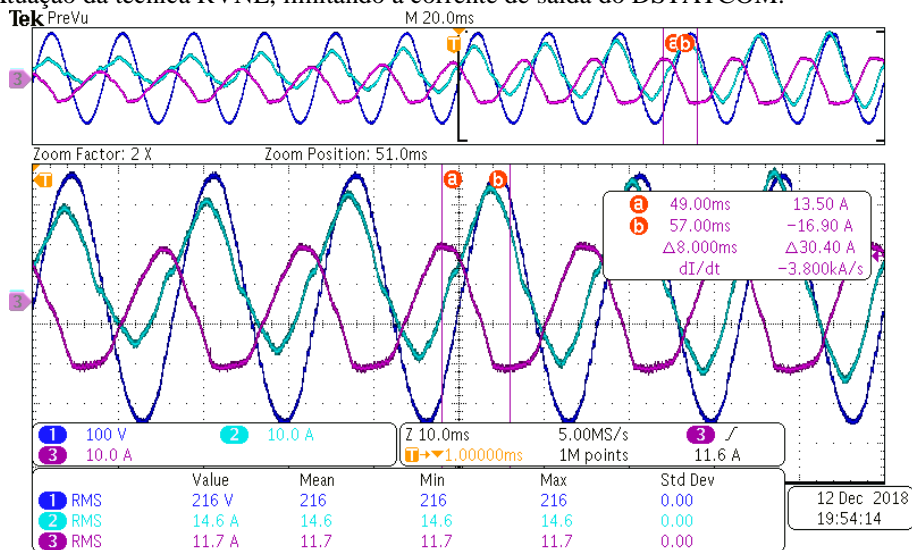


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Observa-se pela figura que o valor de pico da corrente da rede passa de 30 A, com uma tendência elevar esse valor, enquanto que a corrente máxima do conversor agora não passa os 20 A, e com uma tendência 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 de simulação numérica apresentados.

Na Figura 47 é rerepresentada, 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 este valor, **maior que** o -18 A definido em projeto. Com a atuação da técnica RVNL, o conversor não é desabilitado e o nível da tensão eficaz no PCC é mantido.

Figura 47 – Atuação da técnica RVNL, limitando a corrente de saída do DSTATCOM.

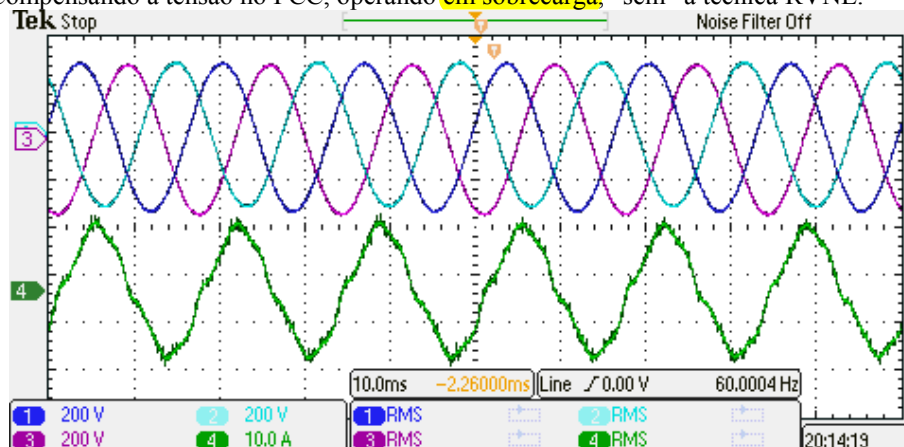


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

## 7.2.4 Operando em Carga Pesada Sem a Técnica RVNL

A Figura 48 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 ~~habilitada~~. 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 D, página 112). Com a técnica desabilitada, a corrente medida da fase C apresenta valores de até 17 A de pico.

Figura 48 – Compensando a tensão no PCC, operando em sobrecarga, “sem” a técnica RVNL.

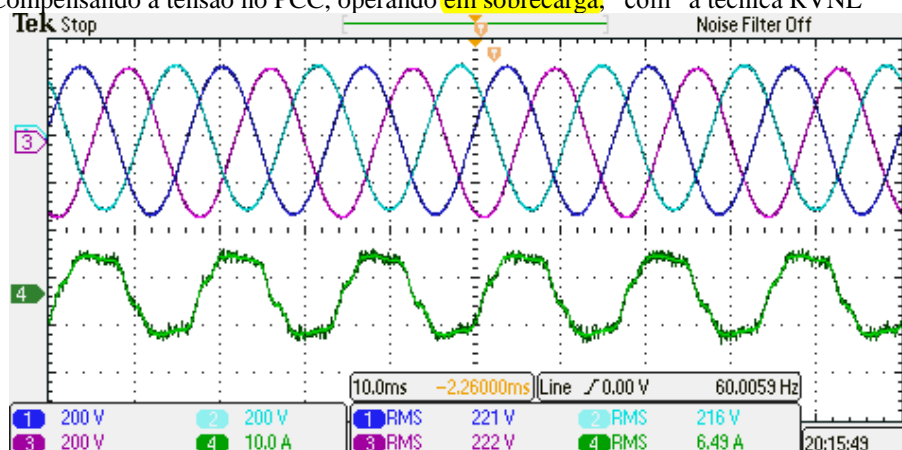


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

### 7.2.5 Operando em Carga Pesada Com a Técnica RVNL

A Figura 49 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 ~~habilitada~~. Nesta condição o conversor está compensando os reativos da rede e a técnica RVNL está habilitada **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 14A, portanto a técnica limitou dentro da faixa projetada.

Figura 49 – Compensando a tensão no PCC, operando **em sobrecarga**, “com” a técnica RVNL

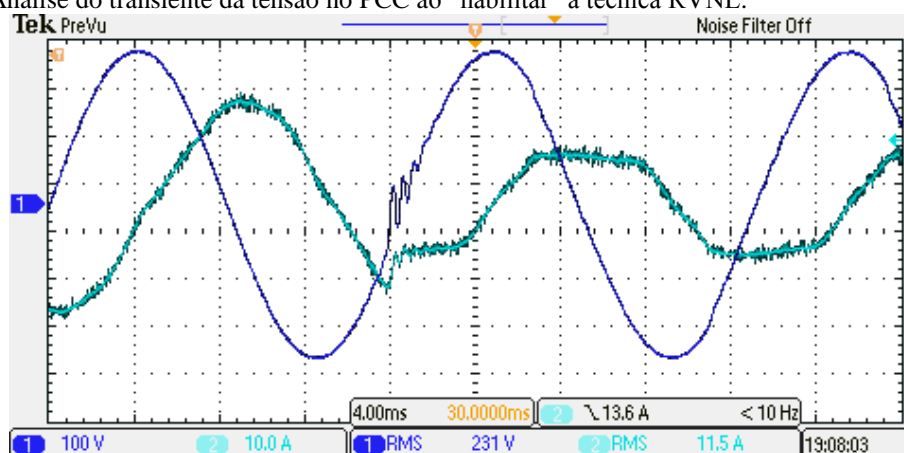


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

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

A Figura 60 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 50 – 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.

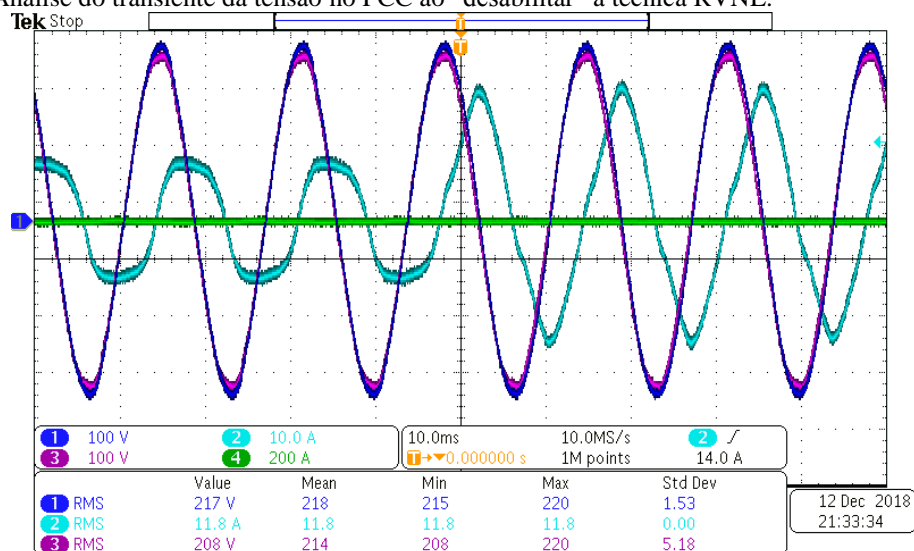
Ao analisar a Figura 50, pode-se verificar o efeito de deformação da tensão no PCC com a técnica habilitada, o que já era esperado, uma vez que para limitar a corrente de saída, o DSTATCOM deve impor uma tensão diferente do PCC, provocando essa deformação. Ainda assim, a deformação harmônica com a técnica atuando é baixa, menor que 3%.



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

A Figura 51 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 51 – Análise do transiente da tensão no PCC ao “desabilitar” a técnica RVNL.



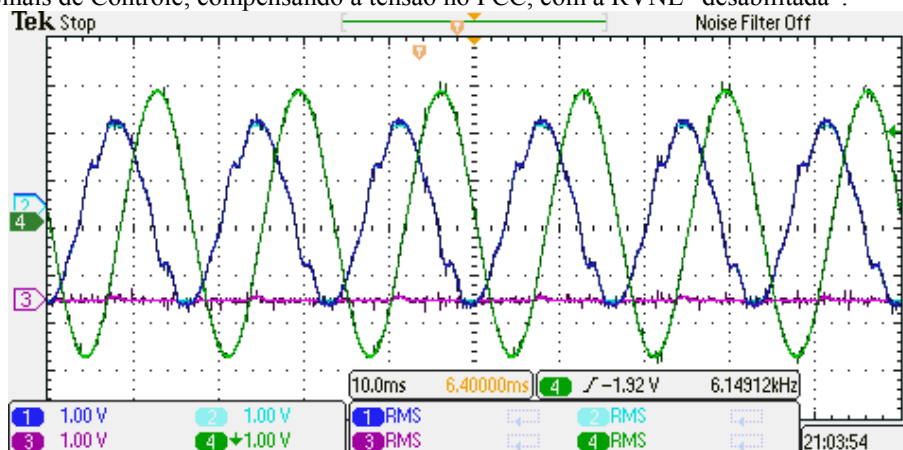
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

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 51, pode-se verificar o efeito de deformação da tensão no PCC com a técnica RVNL atuando, onde a tensão do PCC é similar a 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 52 traz as formas de onda dos sinais de controle da técnica RVNL que são entregues para o controlador do conversor, sendo o sinal proporcional a 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 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 52 – Sinais de Controle, compensando a tensão no PCC, com a RVNL “desabilitada”.

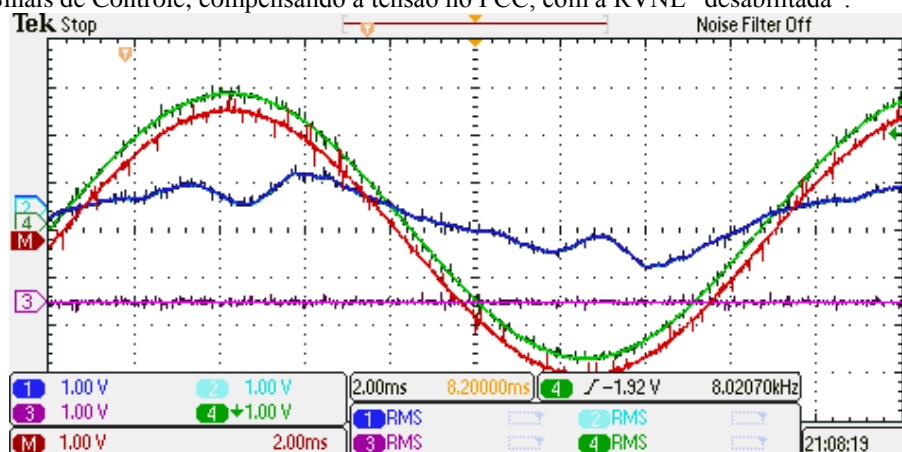


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

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 a resistência virtual (CH3). Porém é imperceptível a atenuação no sinal de referência de tensão de saída do conversor (CH4).

Na Figura 53 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, não atenua o sinal de referência da tensão de saída (CH4). A forma de onda em vermelho (M) é o sinal proporcional a 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 53 – Sinais de Controle, compensando a tensão no PCC, com a RVNL “desabilitada”.



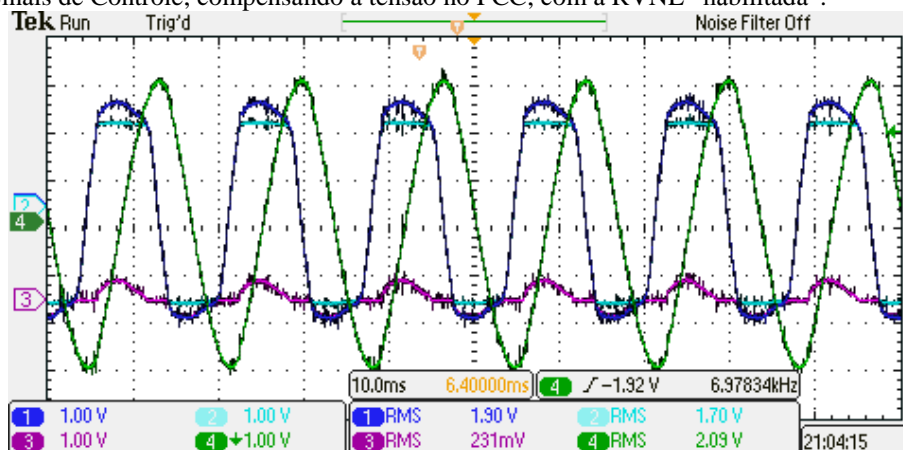
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

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 54 traz as formas de onda dos sinais de controle da técnica RVNL que são entregues ao controlador do conversor, sendo o sinal proporcional a 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 54 – Sinais de Controle, compensando a tensão no PCC, com a RVNL “habilitada”.

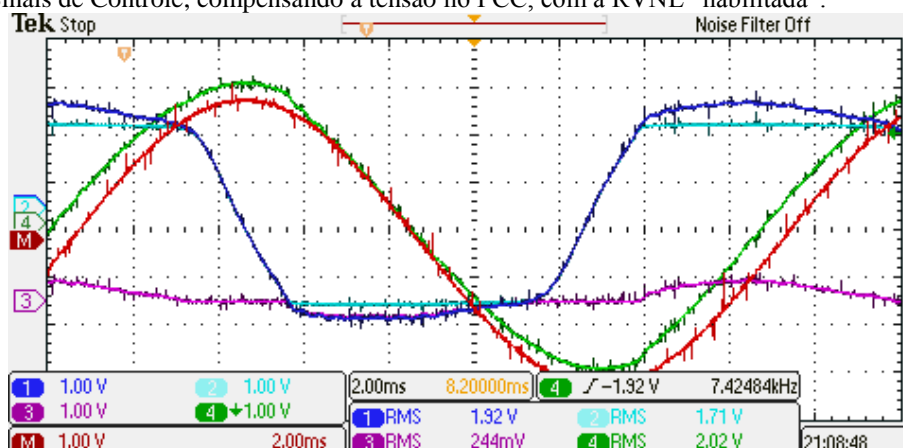


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

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 a resistência virtual (CH3). Neste caso é visível a atenuação no sinal de referência de tensão de saída do conversor (CH4).

Na Figura 55 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 a operação matemática (CH3 + CH4), que resulta no sinal de referência senoidal que vem do DSP.

Figura 55 – 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, agora o sinal de referência de



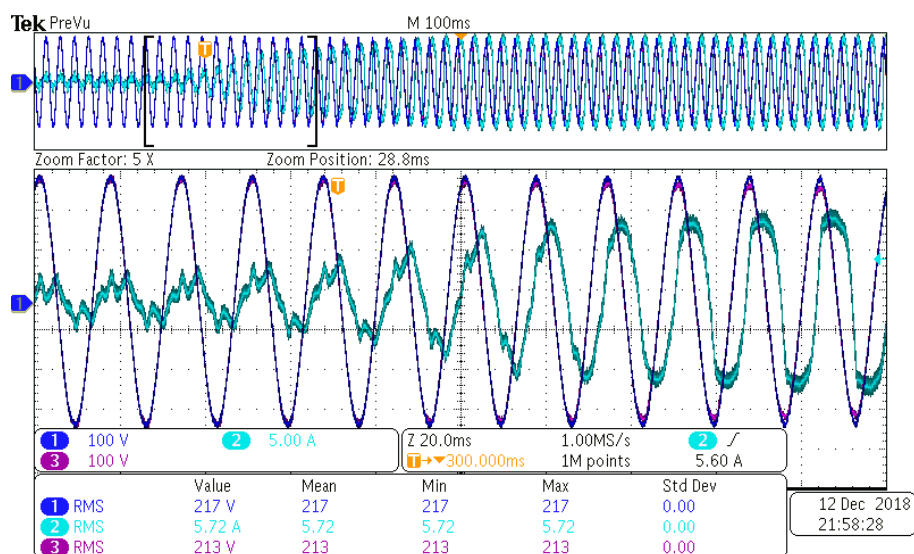
tensão de saída (CH4) está atenuado, comprovando que a técnica RVNL está alterando o sinal de referência da tensão do PCC para a respectiva fase.

### 7.2.10 Operando em Condição de Afundamento de Tensão da Rede

Ao reduzir a tensão da “rede artificial” com o auto transformador 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 56 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 56 – Compensando a tensão no PCC, em uma condição de afundamento de tensão, com a técnica RVNL habilitada.

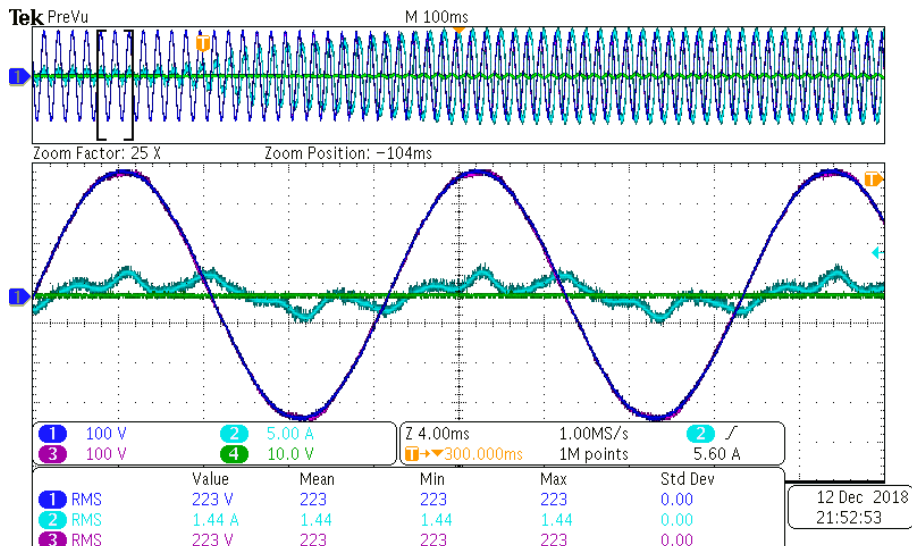


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A condição de afundamento de tensão é rerepresentada na Figura 57. 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.

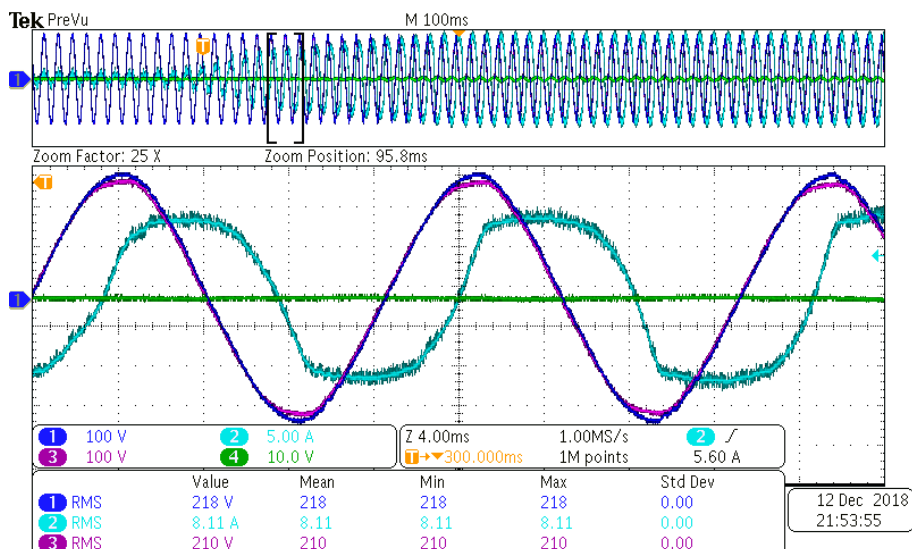
Figura 57 – Compensando a tensão no PCC, em uma condição de afundamento de tensão, com a técnica RVNL habilitada.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A condição de afundamento de tensão é rerepresentada na Figura 58. 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.

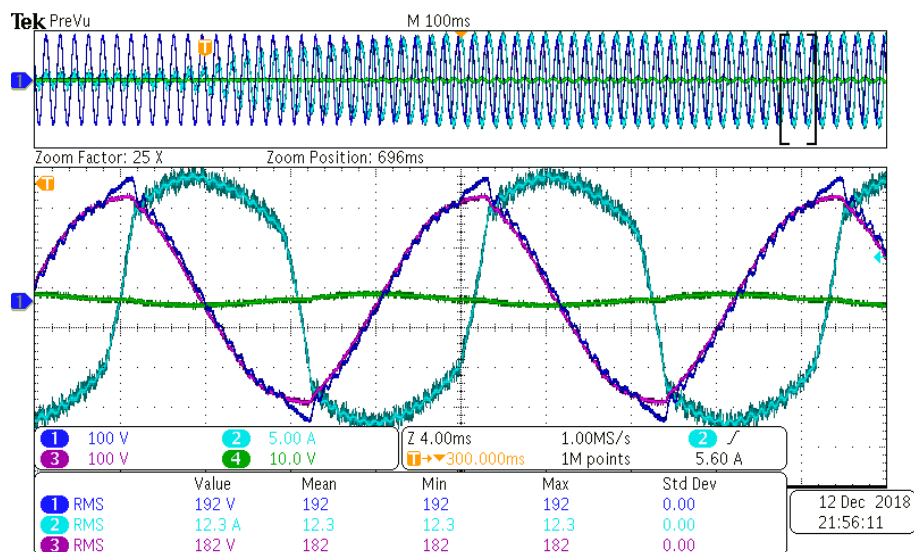
Figura 58 – Compensando a tensão no PCC, em uma condição de afundamento de tensão, com a técnica RVNL habilitada.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A condição de afundamento de tensão é reapresentada na Figura 59. 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 limitado a 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 59 – 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., que ainda está injetando energia reativa na 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.



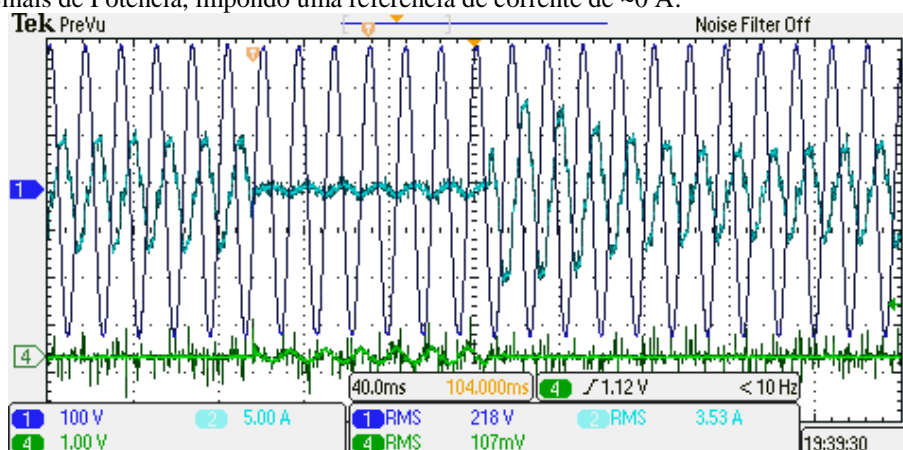
### 7.2.11 Análise dos Sinais de Potência ao Impor Referência de Corrente 0 A para o DSTATCOM

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 60. 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 60 – Sinais de Potência, impondo uma referência de corrente de ~0 A.

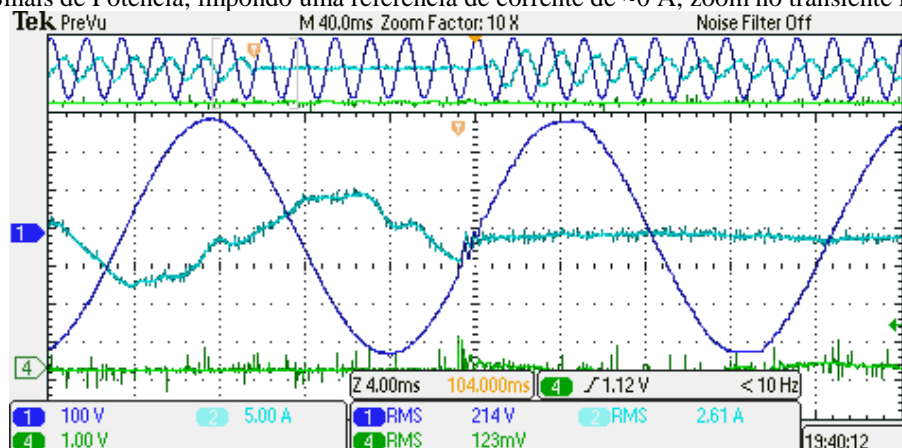


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A condição de variação dinâmica dos limites de saturação é reapresentada na Figura 61. 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, proximamente 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 a 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.

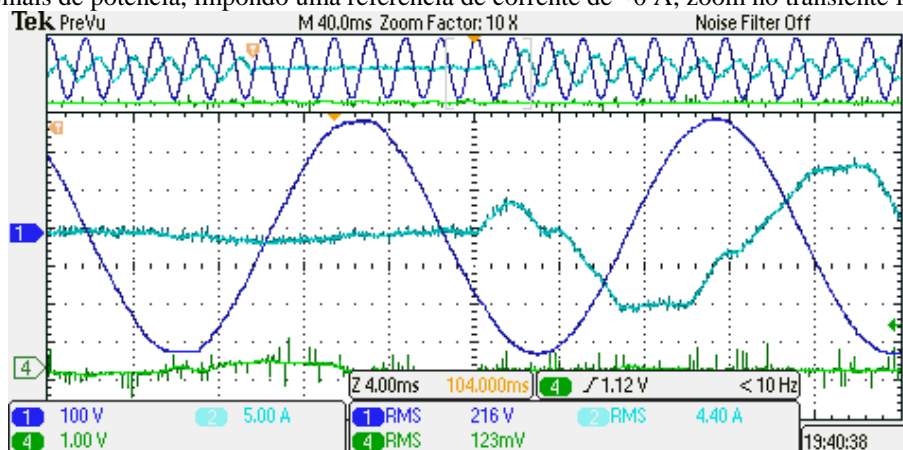
Figura 61 – Sinais de Potência, impondo uma referência de corrente de ~0 A, zoom no transiente inicial.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A condição de variação dinâmica dos limites de saturação é reapresentada na Figura 62. 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 62 – Sinais de potência, impondo uma referência de corrente de  $\sim 0$  A, zoom no transiente final.

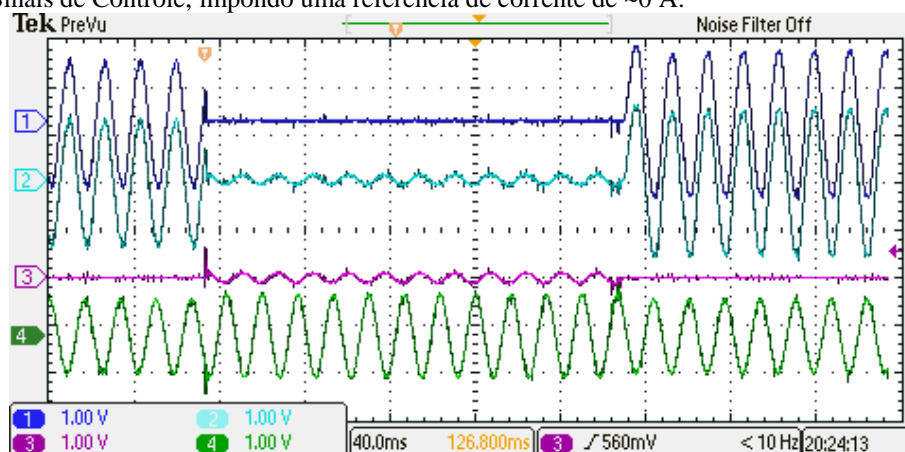


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Quando o conversor está operando em condição de limitação de corrente, este 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 da 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.

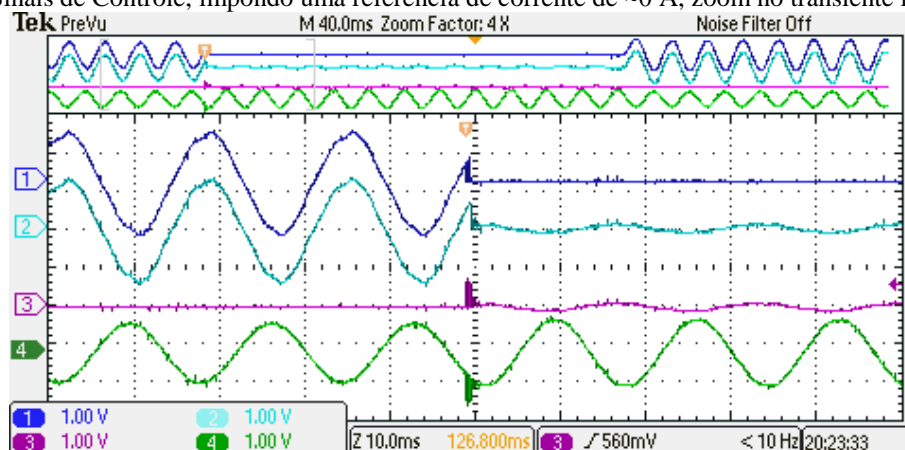
### 7.2.12 Análise dos Sinais de Controle ao Impor Referência de Corrente 0 A para o DSTATCOM

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 60. Nesta ilustração é apresentado o sinal proporcional a corrente de saída para a fase A (CH2), o sinal proporcional a corrente de saída saturada da fase A (CH1), o sinal de tensão proporcional a resistência virtual não linear (CH3) e o sinal de referência da tensão, atenuado pela técnica RVNL (CH4).

Figura 63 – Sinais de Controle, impondo uma referência de corrente de  $\sim 0$  A.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A condição de variação dinâmica dos limites de saturação é rerepresentada na Figura 61. 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 64 – Sinais de Controle, impondo uma referência de corrente de  $\sim 0$  A, zoom no transiente inicial.

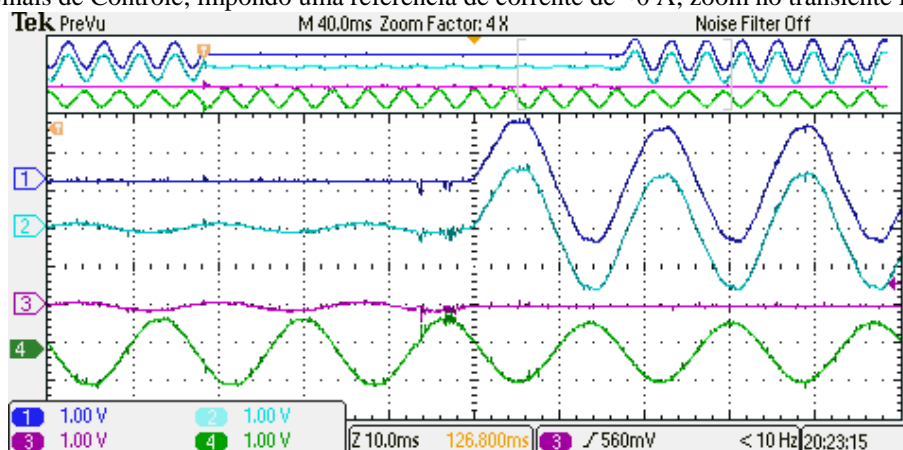
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

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 grampeador, ao acionar o botão, é efetuado o aterramento desse circuito, impondo 0 V de referência para o circuito. Devido as características construtivas e de operação dessa chave, acaba surgindo um oscilações no acionamento/desacionamento do botão, que tem uma duração menor que 500  $\mu$ 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 reapresentada na Figura 65. 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 65 – Sinais de Controle, impondo uma referência de corrente de  $\sim 0$  A, zoom no transiente final.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Ao analisar a figura, pode-se verificar que os sinais proporcionais a 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.

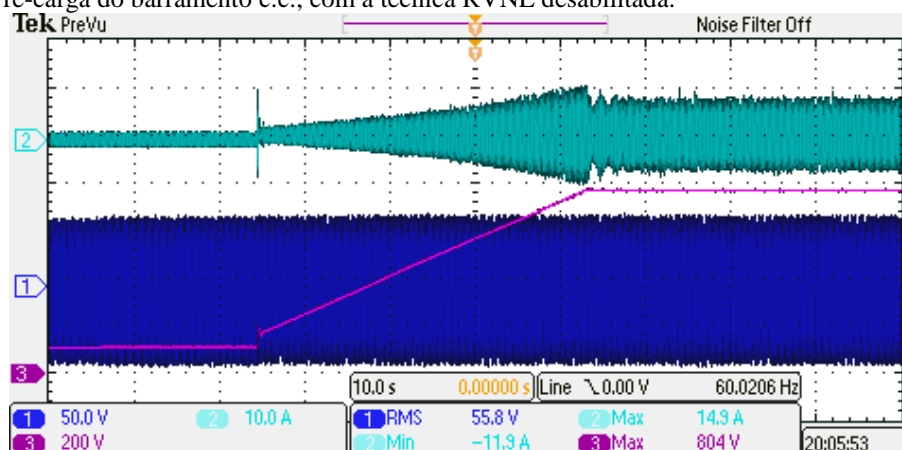
Para o correto funcionamento do compensador de tensão é preciso que os capacitores do barramento c.c. estejam carregados com a sua tensão nominal. A Figura 66 e a Figura 67 apresentam a evolução temporal da tensão total do barramento c.c. (CH3), a tensão da rede para a fase A (CH1) e a corrente do conversor (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 (auto-transformador) 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  $\pm 400$  V com relação ao neutro.



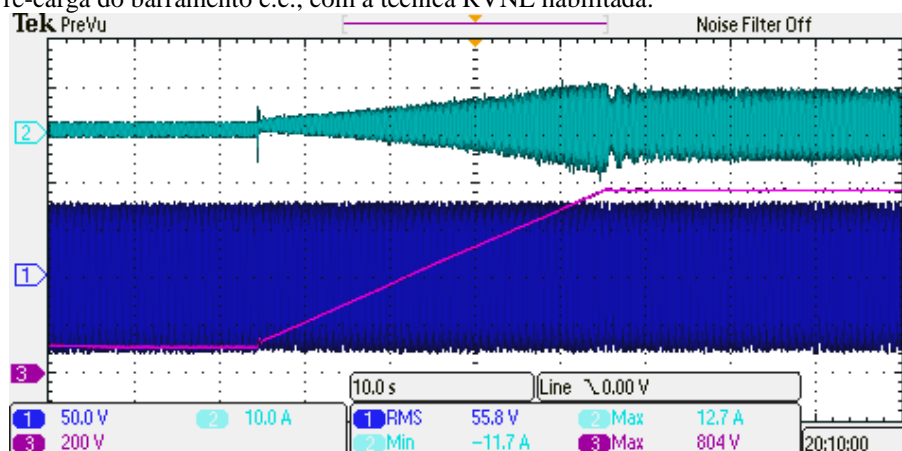
Para avaliar o efeito da limitação de corrente no carregamento de barramento c.c. é apresentada a Figura 66, onde o barramento é carregado com a técnica RVNL desabilitada, e a Figura 67, onde é realizado o mesmo procedimento de carga do barramento com a técnica RVNL habilitada.

Figura 66 – Pré-carga do barramento c.c., com a técnica RVNL desabilitada.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Figura 67 – 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 este, 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  $\sim 0$  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 através 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 sobrecorrente, 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, onde foi visto como se obtêm 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, um controlador da tensão total do barramento c.c., um controlador da tensão **diferencia** do barramento c.c., o controlador do amortecimento ativo, e a técnica de limitação de corrente RVNL. Descreveu a técnica *anti-windup* empregada nos circuitos apresentados nos resultados de simulação numérica. Apresentou a topologia meia ponte trifásico a quatro fios utilizado, 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, apresentou os aspectos teóricos com uma descrição detalhada de sua operação, 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, como também, 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, 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 através 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 a interface de comando entre o cartão RVNL e o DSP.
- Implementar no DSP a lógica proposta no capítulo 4.3 ESTADOS DE OPERAÇÃO DURANTE DISTÚRBIOS DA REDE ELÉTRICA
- Implementação do sistema de controle no tempo discreto e avaliação de 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.
- Investigação de outros métodos para a limitação da corrente de saída.

## 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 Std 1159-2009:

IEEE. **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, India: 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 – 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 proporcionar a corrente de saída. A Figura 68 ilustra a bancada de teste.

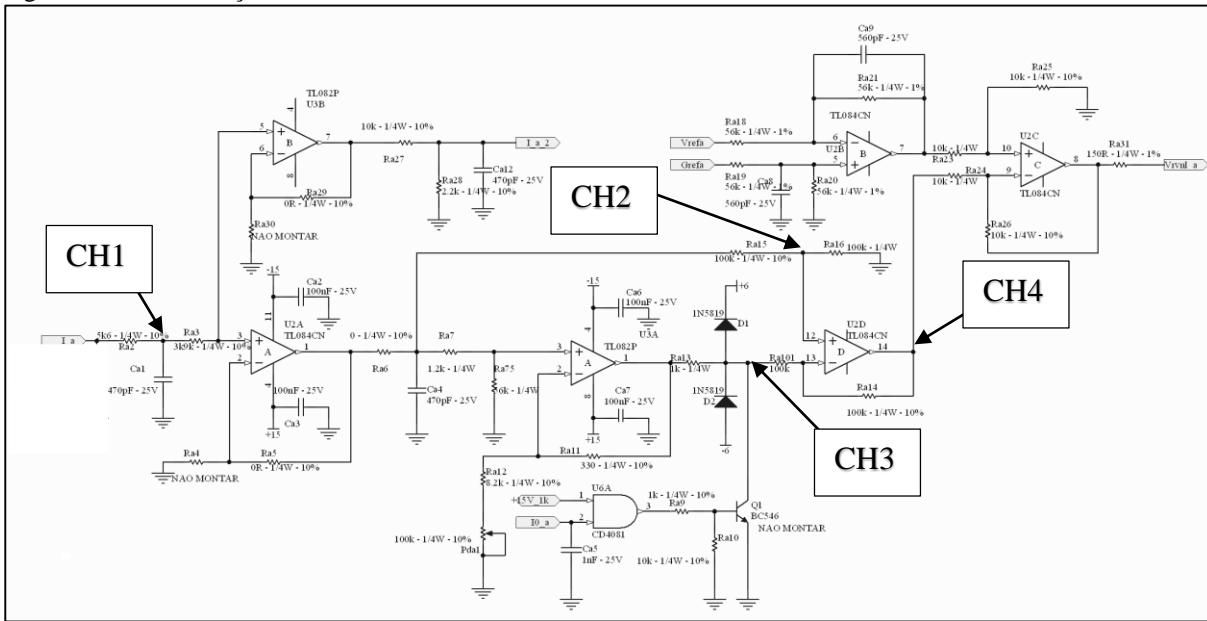
Figura 68 – Foto do cartão **protótipo** na bancada de teste



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 a corrente de saída (CH2), o sinal saturado da corrente de saída (CH3), e o sinal proporcionar a resistência virtual não lineal (CH4).

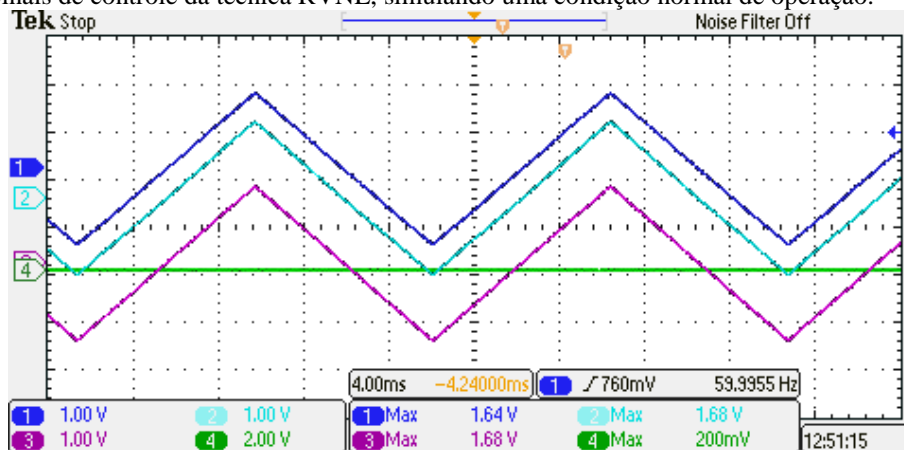
Figura 69 – Identificação dos circuitos medidos no teste do cartão.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A Figura 70 apresenta uma condição em que a técnica RVNL está habilitada, porem os limites de saturação de corrente são inferiores ao valor necessárias 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 a tensão da resistência virtual não linear (CH4). A figura comprova o correto funcionamento do cartão para a condição comentada.

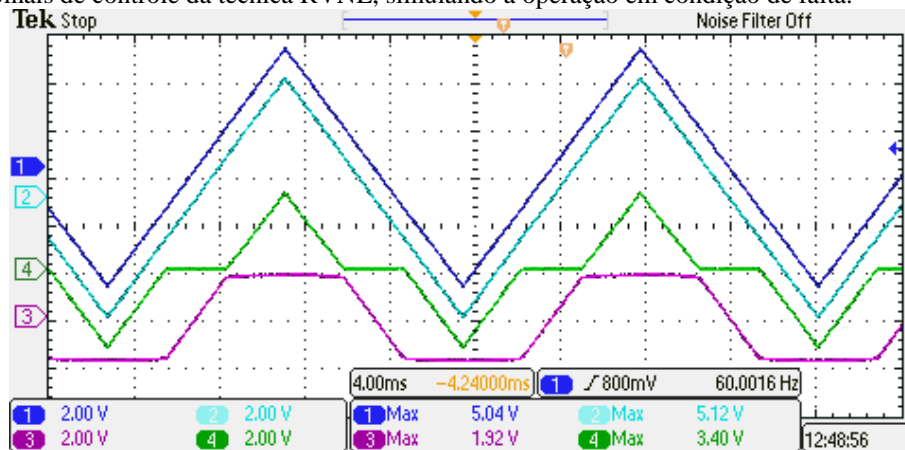
Figura 70 – Sinais de controle da técnica RVNL, simulando uma condição normal de operação.



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) é menor do 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 a 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.

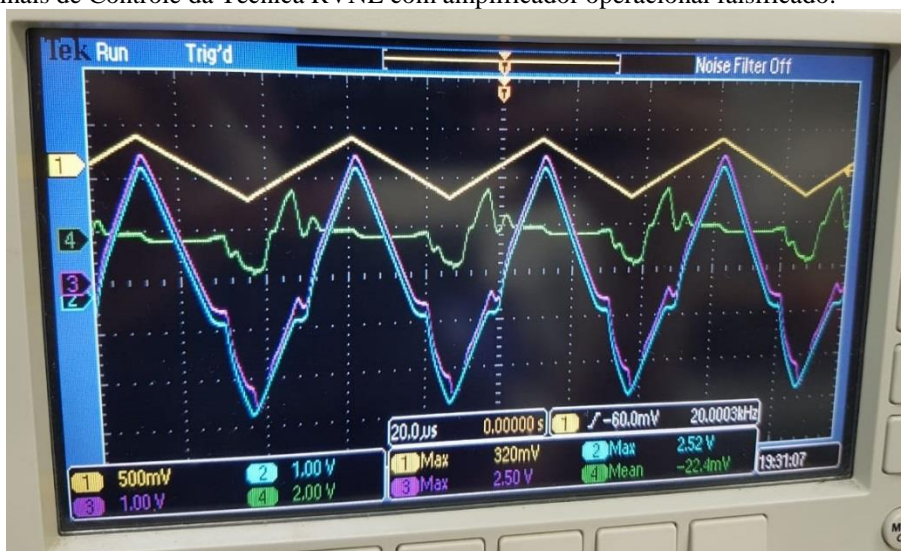


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

## APÊNDICE B – 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, alterado as fontes de alimentação simétrica, adicionando capacitores de filtro próximos aos PADS de alimentação, substituindo os 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.



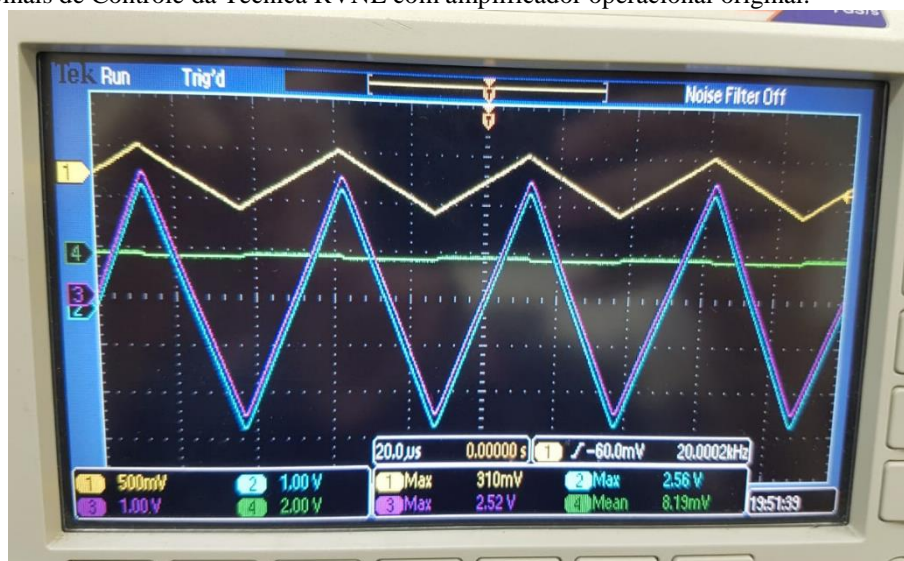
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

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 a 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 a corrente de saída (CH2), o sinal saturado da corrente de saída (CH3), e o sinal proporcional a resistência virtual não linear (CH4). Nesta condição a técnica RVNL está habilitada, porém os limites de saturação de corrente são superiores ao valor necessárias para a atuação da técnica, o que caracterizaria uma condição normal de operação do conversor, e portanto, não poderia haver um sinal proporcional a resistência virtual não linear (CH4), que é gerado devido a 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 pouca 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 para a indústria, assim, o prejuízo financeiro para a comunidade é incalculável.

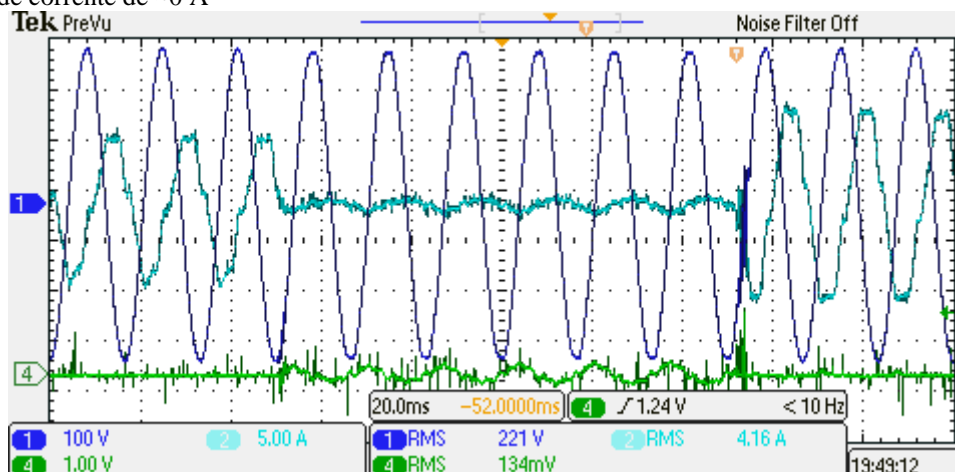
Uma alternativa é comprar de distribuidores com origem de componentes certificada, mas infelizmente estes muitas vezes trabalham com lotes mínimos de 100 unidades ou mais.

## APÊNDICE C – 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 (IG+) e inferior (IG-) 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 0,80pu, 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 e habilita o PWM de saída. A finalidade para essa sequência de operação, busca 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).

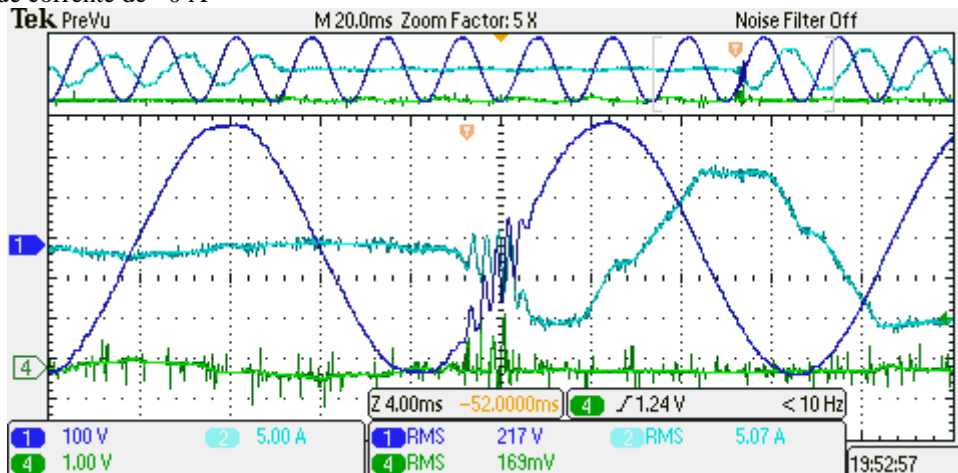
Figura 74 – Sinais de Controle, compensando a tensão no PCC, com a técnica RVNL habilitada, impondo uma referência de corrente de ~0 A



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A condição de variação dinâmica dos limites de saturação é rerepresentada na Figura 75. 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 75 – Sinais de Controle, compensando a tensão no PCC, com a técnica RVNL habilitada, impondo uma referência de corrente de  $\sim 0$  A



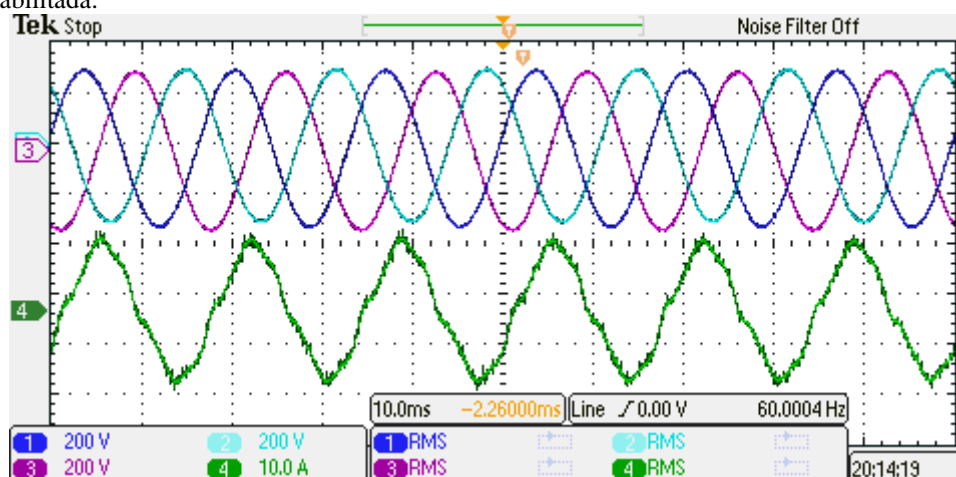
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

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, a qual pode ser observada pela oscilação na tensão do PCC. Entretanto, em menos de 5 ms o sistema entra em regime. Conforme comentado, a oscilação na tensão e na corrente poderia ser atenuada com a implementação da lógica proposta no DSP, habilitando o novo valor de referência, no cruzamento da tensão por zero.

## APÊNDICE D – ANÁLISE DA DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL

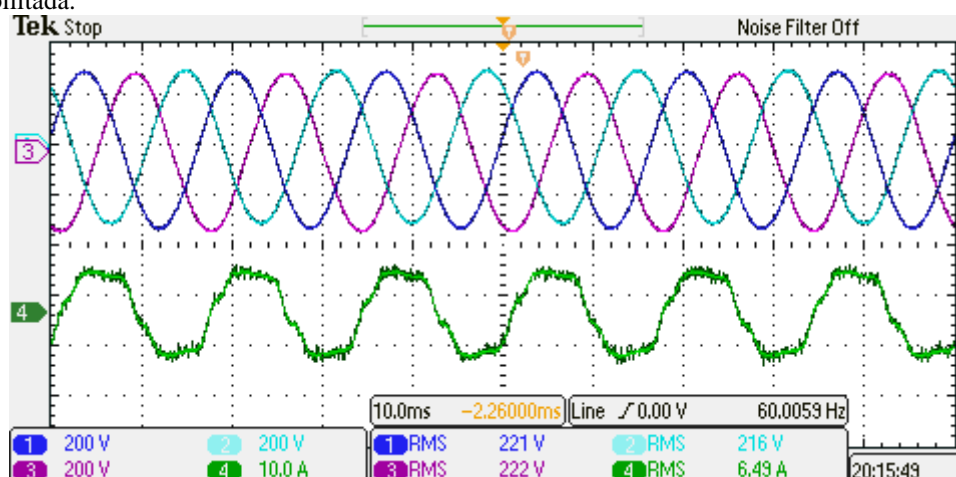
Nesta seção é apresentada uma análise da influência da técnica RVNL, quanto a distorção harmônica total na tensão do PCC e na corrente de saída do DSTATCOM. Na Figura 76 é apresentada a medição da tensão no PCC para as 3 fases (CH1, CH2 e CH3), e da corrente do DSTATCOM (CH4), com compensação de reativos, 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.



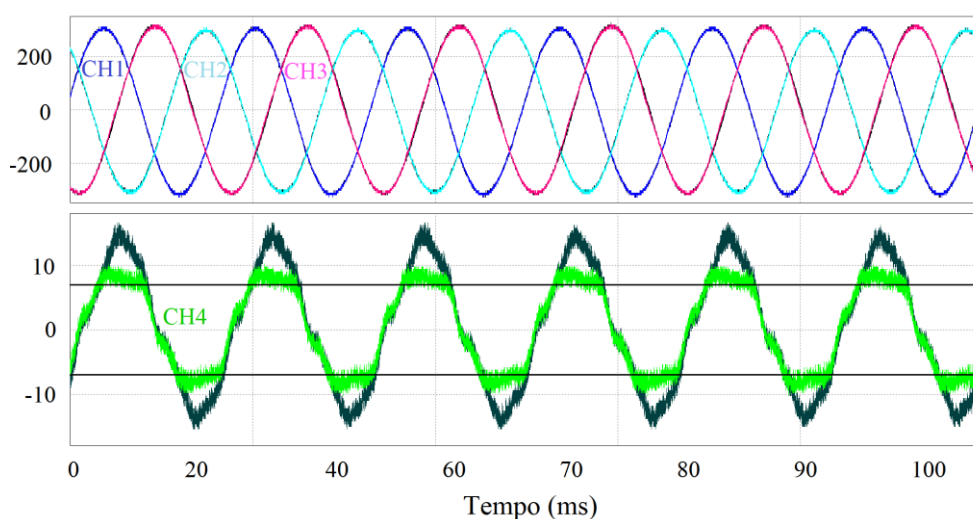
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

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 instantânea é 18 A, 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, no qual, 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).

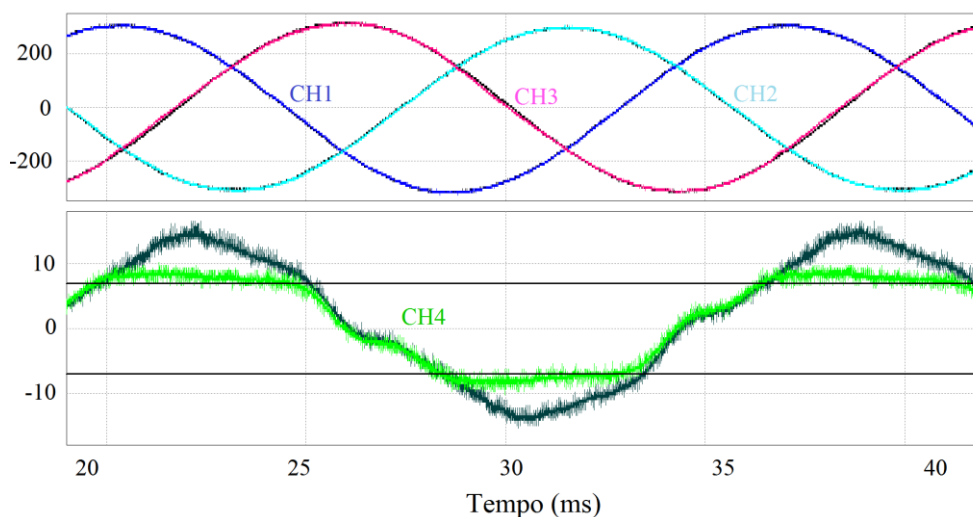
Figura 78 – Tensão no PCC com compensação de reativos, e corrente do DSTATCOM fase A, com e sem a técnica RVNL.



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

Tabela 7 – 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 <b>com</b> limitação de corrente			2,29%
Corrente do DSTATCOM sem limitação de corrente	CH4	11,59%	
Corrente do DSTATCOM <b>com</b> 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 8 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.

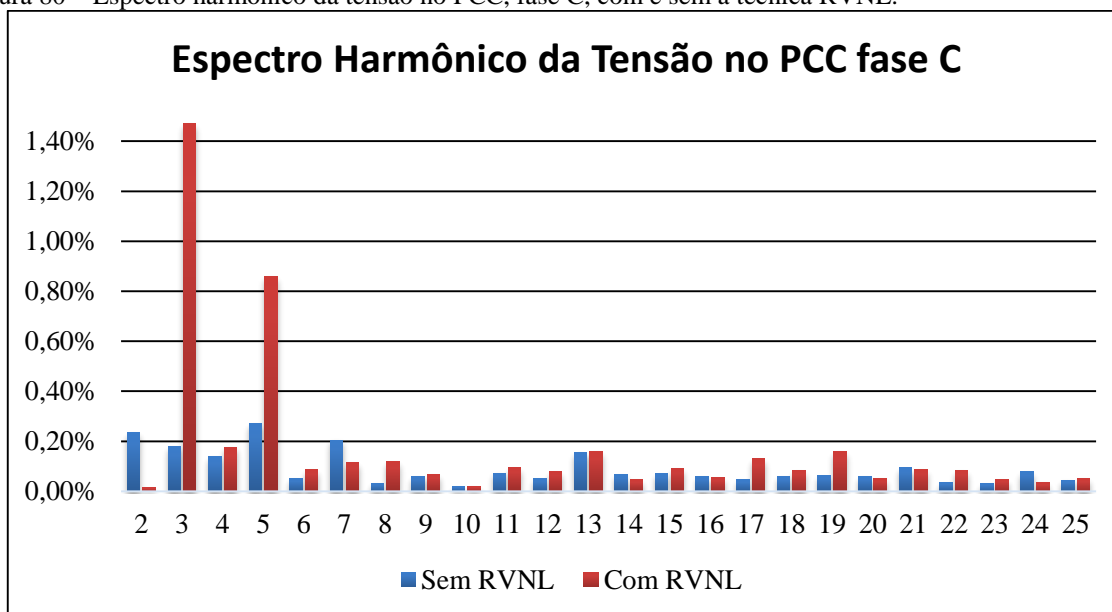
Tabela 8 – Níveis de referência para distorção harmônica individual de tensão em porcentagem da fundamental.

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