



UFCEG – Universidade Federal de Campina Grande
CEEI – Centro de Engenharia Elétrica e Informática
DEE – Departamento de Engenharia Elétrica

Localização e Operação Cooperativa de Filtros Ativos de Potência em Redes de Distribuição

Camila Seibel Gehrke

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenadoria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - Campus de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Energia

Orientadores

Antonio Marcus Nogueira Lima, Dr.

Alexandre Cunha Oliveira, Dr.

Campina Grande, Paraíba, Brasil

©Camila Seibel Gehrke, Agosto de 2010



UFCG – Universidade Federal de Campina Grande
CEEI – Centro de Engenharia Elétrica e Informática
DEE – Departamento de Engenharia Elétrica

Localização e Operação Cooperativa de Filtros Ativos de Potência em Redes de Distribuição

Camila Seibel Gehrke

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenadoria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande - Campus de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Energia

Orientadores

Antonio Marcus Nogueira Lima, Dr.

Alexandre Cunha Oliveira, Dr.

Campina Grande, Paraíba, Brasil

©Camila Seibel Gehrke, Agosto de 2010

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

G3111 Gehrke, Camila Seibel.
Localização e operação cooperativa de filtros ativos de potência em redes de distribuição / Camila Seibel Gehrke. — Campina Grande, 2010. 91f. : il.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática. Referências.

Orientadores: Prof^o. Dr. Antonio Marcus Nogueira Lima, Prof^o. Dr. Alexandre Cunha Oliveira.

1. Filtros Ativos de Potência. 2. Localização Ótima. 3. Redes de Distribuição. 4. Eletrônica de Potência. 5. Sistemas de Potência. I. Título.

~~CDU = 621.372.544(043)~~

UFCG - BIBLIOTECA - CAMPUS I	
2572	05-05-011

**LOCALIZAÇÃO E OPERAÇÃO COOPERATIVA DE FILTROS ATIVOS DE
POTÊNCIA EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

CAMILA SEIBEL GEHRKE

Dissertação Aprovada em 31.08.2010

ANTONIO MARCUS NOGUEIRA LIMA, Dr., UFCG
Orientador (Ausência Justificada)



ALEXANDRE CUNHA OLIVEIRA, D.Sc., UFCG
Orientador



CURSINO BRANDÃO JACOBINA, Dr.Ing., UFCG
Componente da Banca



MAURÍCIO BELTRÃO DE ROSSITER CORRÊA, D.Sc., UFCG
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
AGOSTO - 2010

Dedicatória

Dedico esse trabalho a minha família, Laerde, Ilaine e Bruna, que sempre me apoiaram durante minha caminhada.

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais pela educação que me deram e que me ajudaram a trilhar esse caminho.

Aos professores Antonio Marcus e Alexandre Oliveira que forma mais do que orientadores, e sim mestres, mostrando-me sempre o caminho que deveria seguir.

Aos professores da UNIJUI Fabiano Salvadori, e Mauricio de Campos que me auxiliaram e apoiaram para que este trabalho chegasse ao seu final.

A UFCG, e a UNIJUI por oportunizarem este trabalho de mestrado por meio do programa pró-engenharias.

Aos demais professores e colegas da UNIJUI e da UFCG que me acompanharam durante este período.

A Capes e ao CNPQ pelo apoio financeiro possibilitando assim a realização deste trabalho.

Resumo

Este trabalho tem como objetivo o estudo por meio de simulações e implementação prática, de técnicas de localização ótima e controle cooperativo para compensadores de potência em redes de distribuição. O estudo considera os limites de distorção harmônica total e distorção harmônica individual, definidos na norma IEEE-519. O filtro ativo de potência, na configuração “Shunt”, operando com controle por detecção de tensão, foi selecionado como compensador para os cenários avaliados. Por meio de simulações, desenvolveu-se um algoritmo simplificado de localização ótima, que determina uma solução de localização considerando os critérios de: i) menor esforço dos filtros, ii) quantidade de compensadores a serem instalados na rede de distribuição e iii) dimensionamento desses. A solução gerada pelo algoritmo simplificado de localização determina o ponto ótimo de acoplamento dos filtros ativos disponíveis, juntamente com o nível de corrente, por harmônica, considerado no problema de otimização, que cada filtro deverá injetar na rede de modo a satisfazer os critérios da norma IEEE-519. Análises realizadas comprovam a eficácia da técnica de localização ótima pelo algoritmo simplificado, bem como, a operação cooperativa dos filtros, no qual, a ação de controle deriva do algoritmo de localização ótima. Nessas análises, foi observado se os pontos ótimos e as correntes de compensação calculadas eram válidas, salientando que para que os dados sejam válidos os resultados devem satisfazer a norma.

Abstract

This work aims to study, through simulation and practical implementation, optimal location techniques and cooperative control for compensating power distribution networks. The study considers limits for total harmonic distortion and individual harmonic distortion, defined by IEEE-519. The active power filter, setting as "Shunt", operating by voltage detection, was selected as rewarding for the scenarios evaluated. Through simulations, we developed a simplified algorithm for optimal location, which determines a location solution considering the following criteria: i) filters less effort, ii) the compensators quantity to be installed in the distribution network and iii) filters dimension. The solution generated by the simplified location algorithm determines the optimum coupling point for the active filters available and current level, for each harmonic considered in the optimization problem, that the filter must inject into the network to meet the criteria of IEEE-519. Analyses demonstrate the efficiency of the optimal location, as well as the cooperative operation of the filters, in which the cooperative control algorithm is derived from the optimum simplified location algorithm. In these tests, it was observed if the optimal points and the calculated compensation currents were valid, underlining that the data is valid if the results meet the standard. In conclusion, the simplified algorithm successes as a solution for optimal allocation as cooperative control operation for active filters.

Sumário

1. Introdução	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Organização do Trabalho	3
2. Revisão Bibliográfica	4
2.1 Contexto	4
2.1.1 Sistema Elétrico de Potência	4
2.1.2 Limites de distorções em sistemas de potência.....	4
2.1.3 Compensadores	5
2.1.3.1 Banco de Capacitores e Filtros Passivos.....	5
2.1.3.2 Filtros Ativos de Potência.....	6
2.1.3.3 Filtro Ativo de Potência – Paralelo	8
2.2 Localização de FAPs em redes de distribuição	10
2.3 Filtros Cooperativos	11
2.4 Conclusões Parciais	12
3. Localização e Operação Cooperativa.....	14
3.1 Formulação do problema de localização.....	14
3.2 Solução do problema de localização	18
3.2.1 Problema sem restrição de corrente	21
3.2.1.1 Escolha do ponto ótimo.....	24
3.2.2 Problema com restrição de corrente.....	25
3.3 Algoritmo de localização	28
3.3.1 Algoritmo proposto	28
3.3.2 Algoritmo implementado por Chang.....	29
3.3.3 Comparação dos algoritmos – Estudo de Complexidade	31
3.4 Localização de Filtros Ativos considerando Cargas Variáveis no Tempo.....	34
3.5 Filtros Cooperativos	35
3.5.1 Por que Filtros Cooperativos?.....	35
3.5.2 Controle cooperativo	36
3.6 Conclusões Parciais	37

4. Resultados	38
4.1 Obtenção do modelo do Circuito de Potência Distribuído	38
4.2 Simulações.....	40
4.2.1 Localização.....	41
4.2.2 Operação Cooperativa.....	43
4.3 Resultados Práticos	54
4.3.1 Cenário um.....	56
4.3.2 Cenário dois.....	64
4.3.3 Cenário três	69
4.3.4 Estudo de Operação Cooperativa dos filtros.....	73
4.4 Conclusões Parciais	76
5. Conclusão	78
Trabalhos Futuros	79
Referências Bibliográficas	81
ANEXO A.....	85
ANEXO B.....	89

Lista de Símbolos

Símbolo	Descrição	(Unidade)
A_{k,m_q}^h	Matriz da função	
A_k^h	Matriz da função	
B_{k,m_q}^h	Matriz da função	
C_{k,m_q}^h	Matriz da função	
D_{k,m_q}^h	Matriz da função	
F_{x,m_q}^h	Matriz de Normalização	
G_{x,m_q}^h	Matriz de Normalização	
H_{k,m_q}^k	Matriz de Normalização	
I^0	Matriz da função	
I_h	Corrente da h-ésima harmônica da carga	(A)
I^h	Matriz da Corrente	
I_k	Matriz Identidade	
I_m	Corrente nos m-ésimos nós do circuito	(A)
$L_{k,m_q m_n}^k$	Matriz de Normalização	
L_m	Indutância Mútua	(H)
L_s	Auto-indutância	(H)
$M_{k,m_q m_n}^k$	Matriz de Normalização	
P_k^h	Matriz da função	
Q_k^h	Matriz da função	
R^h	Matriz da função	
S^h	Matriz da função	
SI_m	Índice de Prioridade	
SI_m^h	Índice de Prioridade por harmônico	
T^h	Matriz da função	
V_h	Tensão harmônica do h-ésimo harmônico	(V)
V_{ib}	Tensão de compensação	(V)
$X_{k,m_q m_n}^k$	Impedância entre filtros	(Ω)
$Y_{k,m_q m_n}^k$	Impedância entre filtros	(Ω)

Z_f	Impedância do filtro	(Ω)
Z_m	Reatância mútua	(Ω)
Z_p	Reatância de seqüência positiva	(Ω)
Z_s	Impedância da fonte	(Ω)
Z_s	Auto-reatância	(Ω)
Z_z	Reatância de seqüência zero	(Ω)
g_k	Função quadrática	(A)
$i_{m_q}^{h,i}$	Corrente do filtro imaginária	(A)
$i_{m_q}^{h,r}$	Corrente do filtro real	(A)
i_{af}	Corrente do filtro	(A)
r_p	Resistência de seqüência positiva	(Ω)
r_z	Resistência de seqüência zero	(Ω)
v_{af}	Tensão do filtro série	(V)
$v_{k,new}^h$	Tensão com filtro	(V)
$v_{k,old}^{h,i}$	Tensão sem filtro imaginária	(V)
$v_{k,old}^{h,r}$	Tensão sem filtro real	(V)
$v_{k,old}^h$	Tensão sem filtro	(V)
v_k	Tensão nos k-ésimos nós do circuito	(V)
v_k	Tensão nos nós do circuito	(V)
v_s	Tensão da fonte	(V)
Z_{eq}	Impedância Equivalente	(Ω)
$Z_{k,m_q}^{h,i}$	Impedância imaginária	(Ω)
$Z_{k,m_q}^{h,r}$	Impedância real	(Ω)
Z_n	Impedância do circuito	(Ω)
Z_{th}	Impedância equivalente de Thevenin	
$\alpha_m^{h,i}$	Multiplicador de Minimização imaginário	
$\alpha_m^{h,r}$	Multiplicador de Minimização real	
α_m^h	Multiplicador de Minimização	
$\gamma_{m_q}^h$	Ângulo da Corrente do filtro	
$\delta_{k,old}^h$	Ângulo da tensão	
θ_{k,m_q}^h	Ângulo da Impedância	
μ_1	Multiplicador de Lagrange	
CAA	Cabo de alumínio nu e alma de aço	
DNAE	Departamento Nacional de Água e Energia	
FAP	Filtro ativo de potência	
FFT	Transformada Rápida de Fourier	
f_{NOM}	Frequência nominal	(Hz)
FPA	Filtro Passa-Altas	

h	Ordem do harmônico	
IFFT	Transformada Rápida de Fourier Inversa	
PAC	Ponto de acoplamento	
PLL	<i>Phase Locked Loop</i>	
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>	
SEB	Sistema elétrico brasileiro	
SEP	Sistema elétrico de potência	
THD	Distorção harmônica total	(%)
VL	Distorção Harmônica Individual	
V_{NOM}	Tensão nominal	(V)
Δf_{NOM}	Variação de frequência	(Hz)
ΔV_{NOM}	Variação de tensão	(V)
H	Ordem máxima dos harmônicos	
L	Indutância	(H)
M	Número máximo de pontos para instalação de filtros	
N	Número máximo de barramentos	
Q	Número máximo de Filtros	
f	Função Objetivo	
i	Parte imaginária	
k	Número de nós do circuito	
k	Nós do circuito	
m	Ponto de instalação do filtro	
q	Número de filtros	
r	Parte real	
β	Coefficiente de normalização	
ψ	Coefficiente de ganho	
ω	Frequência nominal	

Lista de Tabelas

Tabela 1 –Quantidade das operações simplificadas ou suprimidas.	32
Tabela 2 – Quantidade das operações simplificadas ou suprimidas.	33
Tabela 3 – Combinação de acionamento de Cargas.....	42
Tabela 4 – Cenários x Pontos Ótimos.	43
Tabela 5 – Correntes de compensação calculadas para o ponto 2 e para o ponto 4 da rede de distribuição.....	63

Lista de Figuras

Figura1 – Banco de Capacitores.	5
Figura 2 - Filtro Passivo passa-altas.	6
Figura 3 - Filtro Passivo em confinamento para compensação de harmônicos de ordem “n”.6	
Figura 4 - Filtro Ativo de Potência do tipo série.	7
Figura 5 – Filtro Ativo de Potência do tipo híbrido (Ativo/Passivo).	7
Figura 6 - Filtro Universal.	8
Figura 7 - Filtro Ativo Paralelo.	8
Figura 8 - Circuito equivalente de um filtro ativo paralelo para compensar harmônicos de corrente da carga.	9
Figura 9 - Circuito equivalente de um filtro ativo paralelo para compensar harmônicos de tensão da fonte de alimentação.	9
Figura 10–Diagrama de blocos do controle cooperativo do Filtro Ativo Paralelo[29].	9
Figura 11– Circuito equivalente simplificado no qual são indicadas variáveis e parâmetros utilizados na formulação do problema.	15
Figura 12– Circuito equivalente para calculo da impedância z_m	19
Figura 13– Circuito equivalente para calculo da impedância z_k	19
Figura 14– Circuito de um cenário com dois compensadores instalados.	24
Figura 15 – Cabo de alumínio nu com alma de aço (CAA).	38
Figura 16–Diagrama de blocos do sistema simulado indicando a localização das cargas (acionadas por S1-retificada e S2-fonte controlada IC7,8,9), instrumentação ($V_{m1,2,3,4}$) e banco de capacitores.	40
Figura 17– Circuito equivalente simulado.	41
Figura 18– Corrente da Fonte com mudança na carga.	42
Figura 19– Circuito equivalente simulado, representando em amarelo as cargas e em laranja a localização dos filtros.	43
Figura 20– Diagrama de blocos do Filtro Ativo simulado. $V_{1,2,3,4}$ representam as entradas do controle. CTRL é o bloco de controle. IC2,4,5 são fontes de corrente controladas.	44
Figura 21– Corrente do Filtro com mudança na carga.	45
Figura 22– Corrente do Filtro com mudança na carga.	46
Figura 23–Tensão do cenário 1 no ponto 2 antes da instalação do filtro (gráfico superior) depois da instalação do filtro no ponto 4 (gráfico inferior).	47

Figura 24– Tensão do cenário 1 no ponto 3 antes da instalação do filtro (gráfico superior) depois da instalação do filtro no ponto 4 (gráfico inferior).....	47
Figura 25– Tensão do cenário 1 no ponto 4 antes da instalação do filtro (gráfico superior) depois da instalação do filtro no ponto 4 (gráfico inferior).....	48
Figura 26–Nível de THD do cenário 1 antes e depois da instalação do filtro.....	49
Figura 27– Tensão do cenário 2 no ponto 2 antes da instalação do filtro (gráfico superior) depois da instalação dos filtros nos pontos3 e 4 (gráfico inferior).....	49
Figura 28– Tensão do cenário 2 no ponto 3antes da instalação do filtro (gráfico superior) depois da instalação dos filtros nos pontos3 e 4 (gráfico inferior).....	50
Figura 29– Tensão do cenário 2 no ponto 4antes da instalação do filtro (gráfico superior) depois da instalação dos filtros nos pontos3 e 4 (gráfico inferior).....	50
Figura 30– Nível de THD do cenário 2 antes e depois da instalação dos 2 filtros.....	51
Figura 31– Tensão do cenário 3 no ponto 2 antes da instalação do filtro (gráfico superior) depois da instalação do filtro no ponto 4 (gráfico inferior).....	52
Figura 32– Tensão do cenário 3 no ponto 3 antes da instalação do filtro (gráfico superior) depois da instalação do filtro no ponto 4 (gráfico inferior).....	52
Figura 33– Tensão do cenário 3 no ponto 4 antes da instalação do filtro (gráfico superior) depois da instalação do filtro no ponto 4 (gráfico inferior).....	53
Figura 34– Nível de THD do cenário 3 antes e depois da instalação do filtro.....	54
Figura 35 – Diagrama de blocos do controle cooperativo.	55
Figura 36 – Tensão no ponto 2 antes da instalação do filtro.	56
Figura 37–Tensão no ponto 2 depois da instalação do filtro no ponto 4.....	56
Figura 38 - Tensão no ponto 3 antes da instalação do filtro.....	57
Figura 39 - Tensão no ponto 3 depois da instalação do filtro no ponto 4.....	57
Figura 40 - Tensão no ponto 4 antes da instalação do filtro.....	57
Figura 41 - Tensão no ponto 4 depois da instalação do filtro no ponto 4.....	58
Figura 42 – Nível de THD do cenário 1 antes e depois da instalação do filtro.....	58
Figura 43 - Tensão no ponto 2 depois da instalação do filtro no ponto 2 com corrente calculada para o ponto 4.....	59
Figura 44 - Tensão no ponto 3 depois da instalação do filtro no ponto 2 com corrente calculada para o ponto 4.....	59
Figura 45 - Tensão no ponto 4 depois da instalação do filtro no ponto 2 com corrente calculada para o ponto 4.....	60
Figura 46 - Nível de THD do cenário 1 antes e depois da instalação do filtro no ponto 2, com corrente calculada para o ponto 4, para comprovação do ponto ótimo do algoritmo de localização.....	60
Figura 47 - Tensão no ponto 2 depois da instalação do filtro no ponto 2 com corrente calculada para o ponto 2.....	61
Figura 48 - Tensão no ponto 3depois da instalação do filtro no ponto 2 com corrente calculada para o ponto 2.....	61

Figura 49 - Tensão no ponto 4 depois da instalação do filtro no ponto 2 com corrente calculada para o ponto 2.....	62
Figura 50 - Nível de THD do cenário 1 antes e depois da instalação do filtro no ponto 2 com corrente calculada para o ponto 2, para comprovação do ponto ótimo do algoritmo de localização.....	62
Figura 51 - Tensão no ponto 2 antes da instalação dos filtros.....	64
Figura 52 - Tensão no ponto 2 depois da instalação do filtro 1 no ponto 4.....	64
Figura 53 - Tensão no ponto 2 depois da instalação do filtro 1 no ponto 4 e do filtro 2 no ponto 3.....	65
Figura 54 - Tensão no ponto 3 antes da instalação dos filtros.....	65
Figura 55 - Tensão no ponto 3 depois da instalação do filtro 1 no ponto 4.....	65
Figura 56 - Tensão no ponto 2 depois da instalação do filtro 1 no ponto 4 e do filtro 2 no ponto 3.....	66
Figura 57 - Tensão no ponto 4 antes da instalação dos filtros.....	66
Figura 58 - Tensão no ponto 4 depois da instalação do filtro 1 no ponto 4.....	66
Figura 59 - Tensão no ponto 4 depois da instalação do filtro 1 no ponto 4 e do filtro 2 no ponto 3.....	67
Figura 60 - Nível de THD do cenário 2 com e sem filtros instalados.....	67
Figura 61 - Nível de distorção harmônica individual VL do cenário 2 antes e depois da instalação do filtro.....	68
Figura 62 - Nível de THD do cenário 2 antes e depois da instalação de um filtro e dois filtros.....	69
Figura 63 - Tensão no ponto 2 antes da instalação do filtro.....	69
Figura 64 - Tensão no ponto 2 depois da instalação do filtro no ponto 4.....	70
Figura 65 - Tensão no ponto 3 antes da instalação do filtro.....	70
Figura 66 - Tensão no ponto 3 depois da instalação do filtro no ponto 4.....	70
Figura 67 - Tensão no ponto 4 antes da instalação do filtro.....	71
Figura 68 - Tensão no ponto 4 depois da instalação do filtro no ponto 4.....	71
Figura 69 - Nível de THD do cenário 3 antes e depois da instalação do filtro.....	72
Figura 70 - Nível de distorção harmônica individual VL do cenário 3 antes e depois da instalação do filtro.....	72
Figura 71 - Nível de THD do cenário 3 antes e depois da instalação do filtro.....	73
Figura 72 - Tensão no ponto 2 antes da instalação do filtro.....	73
Figura 73 - Tensão no ponto 2 depois da instalação do filtro no ponto 4.....	74
Figura 74 - Tensão no ponto 3 antes da instalação do filtro.....	74
Figura 75 - Tensão no ponto 3 depois da instalação do filtro no ponto 4.....	74
Figura 76 - Tensão no ponto 4 antes da instalação do filtro.....	75
Figura 77 - Tensão no ponto 4 depois da instalação do filtro no ponto 4.....	75
Figura 78 - Nível de THD para o cenário de estudo da operação cooperativa antes e depois da corrente de compensação ser injetada.....	76

Figura 79 – Gráfico das possibilidades de círculos limitados por VL. a) Sem passar pela origem. b) Passando pela origem e com limite diferente.....85

Capítulo 1

Introdução

O sistema elétrico de potência (SEP) é formado por unidades de geração (usinas hidrelétricas, usinas nucleares, entre outras), linhas de transmissão e linhas de distribuição, assim possibilitando que os consumidores tenham acesso a energia elétrica.

Para a proteção dos equipamentos dos consumidores, existem normas que definem os níveis de tensão nominal e frequência nominal que os consumidores finais devem receber. No Brasil a tensão nominal monofásica mais usual é $V_{NOM}=220$ V e a frequência nominal é $f_{NOM}=60$ Hz. Para esses valores nominais admitem-se limites de variação máxima, para tensão de $\Delta V_{NOM} = \pm 5\%$, e para frequência de $\Delta f_{NOM} = \pm 0,1$ Hz. Além das diretrizes de variação existem normas internacionais, [1; 2], que estabelecem limites de distorção harmônica para equipamentos de baixa tensão, [3], que definem os limites de harmônicos no ponto de acoplamento do SEP.

A proliferação do uso de equipamentos elétricos e eletrônicos degrada a qualidade da energia do SEP. Para satisfazer os níveis de qualidade especificados nas normas, as concessionárias utilizam compensadores passivos (banco de capacitores ou filtros) e ativos. Os compensadores passivos objetivam manter os níveis de tensão e o fator de potência, sendo de baixa eficiência e com limitada capacidade de compensação de harmônicos. A limitada compensação de harmônicos é eficiente para cenários estáticos nos quais a carga é invariante no tempo. Entretanto, em redes de distribuição observam-se, de modo geral, cenários dinâmicos nos quais a carga é variante no tempo.

No caso de cenários dinâmicos, em que harmônicos e impedâncias variam no tempo, é necessário utilizar um compensador ativo, denominado de Filtro Ativo de Potência (FAP). A determinação da localização ótima do compensador passivo ou ativo e da sua potência é um problema relativamente complexo que demanda o estudo detalhado do trecho do SEP onde a compensação será efetuada.

O problema de determinar a localização e o dimensionamento de filtros ativos de potência requer o conhecimento do nível de distorção harmônica da instalação [4; 5; 6; 7; 8]. A solução do problema de localização é a determinação do ponto de acoplamento no qual

o filtro deve ser instalado para reduzir o nível de distorção harmônica de modo a satisfazer o limite estipulado nas normas pertinentes [3]. No caso do problema de dimensionamento para um filtro ativo, o objetivo consiste na determinação do mínimo valor de corrente a ser injetada no ponto de acoplamento.

A determinação da localização ótima de um FAP numa rede de distribuição é formulada como um problema de otimização [4; 5; 9; 10; 11]. No caso de redes de distribuição com muitos ramais de alimentação e elevado nível de distorção harmônica, de modo geral, a instalação de um único FAP não é suficiente para satisfazer nível de distorção harmônica estipulada nas normas pertinentes [3]. O problema de localização de múltiplos FAPs é mais complexo, porém pode ser formulado com uma extensão sequencial do problema de um filtro único. A resolução computacional do problema de localização ótima é relativamente elevada, sendo sensível a problemas de convergência e mínimos locais [11]. O estudo de técnicas que contribuam para reduzir a complexidade computacional do problema de localização ótima constitui-se num tema de pesquisa atual e relevante.

O conceito de FAPs cooperativos se aplica ao caso em que dois ou mais compensadores ativos são utilizados de forma coordenada para satisfazer os requisitos das normas pertinentes em cenários dinâmicos [12]. A operação cooperativa de FAPs é especialmente importante quando na solução do problema de localização ótima é considerada a restrição de mínima potência. A operação cooperativa de FAPs viabiliza uma compensação ativa mais efetiva, tendo em vista as características da rede de distribuição [13; 14]. Em certo sentido, a solução do problema de localização ótima precede a formulação do problema de operação cooperativa de FAPs. O estudo de técnicas para viabilizar a operação cooperativa de FAPs é relativamente recente, porém de grande relevância tendo em vista a expansão do SEP com aumento da quantidade de unidades de geração distribuídas e a proliferação de cargas consumidoras que interferem de modo ativo no fluxo de energia.

O problema de localização em conjunto com a operação cooperativa de filtros ativos, é um tema relevante e atual. Portanto, o objetivo desse trabalho busca solucionar esses dois problemas para cenários dinâmicos de uma rede de distribuição.

1.1 Objetivos

Em termos teóricos o trabalho tem por objetivos: (1) desenvolver uma versão simplificada do algoritmo de solução do problema de alocação ótima e de dimensionamento de FAPs do tipo paralelo em redes de distribuição de energia elétrica, principalmente no que concerne à escolha da solução de mínima corrente e (2) desenvolver uma técnica de operação cooperativa de FAPs do tipo paralelo baseada no método utilizado na solução do problema de localização ótima.

Em termos práticos o trabalho tem por objetivos: (1) Projetar e implementar uma plataforma de testes para avaliar a eficácia da solução obtida para o problema de alocação ótima, bem como técnica de operação cooperativa de FAPs, (2) Adquirir dados

experimentais de distorção harmônica de tensão para o algoritmo de alocação ótima e (3) Posicionar os compensadores e adquirir dados experimentais da interação de uma rede de distribuição de energia elétrica com os FAPs.

A plataforma na qual serão realizados os testes experimentais consiste de dois FAPs do tipo paralelo, um modelo reduzido de uma rede de distribuição com três segmentos de linha e duas cargas não lineares. As cargas não lineares são controláveis e, deste modo, a plataforma permite estudar tanto cenários de carga estáticos quanto dinâmicos.

1.2 Organização do Trabalho

O trabalho está organizado em cinco capítulos. No Capítulo 2 “Revisão Bibliográfica”, foi realizada uma contextualização para o problema de localização com o estudo das estruturas de filtros e uma revisão bibliográfica de trabalhos de localização de filtros em redes de distribuição e filtros cooperativos. No terceiro capítulo “Localização de Filtros Ativos em Redes de Distribuição” é apresentada a localização de filtros existente e o algoritmo proposto. No Capítulo 4 “Filtros Cooperativos” descreve-se a implementação e a verificação do algoritmo, implementando uma simulação de filtro cooperativo. As conclusões e os trabalhos futuros são apresentados no Capítulo 5.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Contexto

2.1.1 Sistema Elétrico de Potência

O sistema elétrico de potência (SEP) é responsável pela geração, transmissão e distribuição de energia elétrica para os consumidores. A geração provém de hidrelétricas, usinas nucleares, carvão entre outras. A transmissão e a distribuição são responsáveis pela disseminação dessa energia, sendo a transmissão a conexão entre a geração e a distribuição. A ligação direta com os consumidores é feita pela rede de distribuição.

Devido à ligação direta com os consumidores a rede de distribuição é a que apresenta maiores perdas na linha e maior distorção harmônica. A distorção harmônica é resultante das diversas cargas não lineares que são conectadas na rede. Normas reguladoras estabelecem os níveis máximos de distorção que os consumidores podem receber. Para garantir que as normas sejam satisfeitas, o estudo de localização de compensadores e estruturas de filtros é de suma importância.

2.1.2 Limites de distorções em sistemas de potência

No sistema de potência estão conectadas diferentes cargas, desde passivas (indutivas, capacitiva e resistiva) como ativas (conversores), o que faz com que o SEP deixe de fornecer a todos os consumidores uma tensão com limites mínimos de distorções. Para proteger os consumidores, existem normas para determinar quais os níveis de distorção máxima que as concessionárias podem fornecer.

No Brasil, a Aneel regula os procedimentos da distribuição de energia elétrica nacional, delineando alguns fatores sobre qualidade de energia como: tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão, variações de tensão de curta duração e variação de frequência.

Na norma é comentado sobre harmônicos, entretanto, não estabelece limites para níveis de distorções harmônicas, o que resulta em uma regra não esclarecedora. Existe somente a Portaria 1.569/93 do Departamento Nacional de Águas e Energia (DNAE) que define o valor mínimo para o fator de potência $FP=0,92$. Na ausência de normas nacionais, utilizaremos, neste trabalho, os níveis especificados nas normas internacionais [1; 2; 3]. De modo específico, considerar-se-á, para a distorção harmônica total no ponto de acoplamento o limite superior de 5% e distorção harmônica individual de 3% preconizado pela norma IEEE-519[3].

2.1.3 Compensadores

2.1.3.1 Banco de Capacitores e Filtros Passivos

Os bancos de capacitores são conectados na rede de distribuição como mostra a Figura 1. No qual, o PAC é o ponto de acoplamento entre rede e banco de capacitores. A rede está representada por um traço, demonstrando somente uma das fases. Esses compensadores são largamente utilizados em redes de distribuição[15]. Bancos de capacitores são instalados no sistema de potência para regular o nível de tensão, no ponto em que são instalados, e o fator de potência, que são alterados devido à indutância de linha (transmissão/distribuição), assim como das diversas cargas indutivas instaladas, e.g., como motores de corrente alternada.

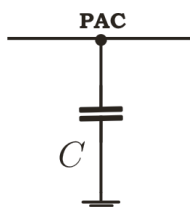


Figura 1 – Banco de Capacitores.

Filtros passivos, de modo geral, são filtros de segunda ordem constituídos, relativamente simples, de baixo custo e são tradicionalmente utilizados para melhorar o fator de potência e absorver harmônicos [11; 12; 13]. Os filtros passivos podem ser implementados em série com a fonte, operando como alta impedância, ou em paralelo, operando como baixa impedância para os harmônicos.

O funcionamento dos filtros passivos depende da sua configuração[16], que pode apresentar características de um filtro passa-alta, Figura 2, ou de um filtro sintonizado de ordem “n”, Figura 3, para diferentes ordens de harmônicos.

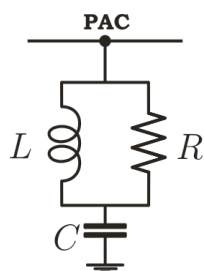


Figura 2 - Filtro Passivo passa-altas.

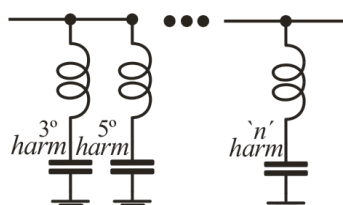


Figura 3 - Filtro Passivo em confinamento para compensação de harmônicos de ordem “n”.

A figura acima possui diferentes filtros para sintonizar ordens de frequência diferentes. O PAC é comum para os três filtros.

Os filtros passivos são soluções economicamente vantajosas por apresentarem somente componentes passivos, que são mais baratos que chaves de potência, além de não necessitarem de rotinas de controle. Contudo, componentes passivos são projetados para compensar harmônicos selecionados, e por não apresentarem controle, não se adequam a mudanças de níveis de harmônicos. A rede de distribuição é dinâmica com harmônicos que variam no tempo. Sendo assim, outras soluções devem ser estudadas.

2.1.3.2 Filtros Ativos de Potência

Os FAPs surgiram na década de 70 com Gyugyi e Strycula[17], sendo atualmente uma solução comercial, apresentada por fabricantes como a ABB. Filtros ativos são compostos por conversores estáticos cuja ação de controle visa suprimir harmônicos de corrente e/ou tensão presentes no circuito onde os mesmos estão instalados. Por operarem geralmente em malha fechada, conseguem se auto-regular as condições dinâmicas observadas nas redes de distribuição. Os filtros ativos são divididos em compensadores série, híbrido, universal e paralelo.

Os FAPs do tipo série, Figura 4, foram propostos em 1988 por Akagi, [18; 19; 20], esses filtros são conectados em série com a rede, entre a fonte e a carga, normalmente por intermédio de um transformador de acoplamento. Esses compensadores normalmente são a opção mais natural para a compensação de distorção harmônica de tensão. Filtros série eliminam harmônicos, regulam o nível e o ângulo de fase da tensão, além de corrigirem distúrbios como *sag* e *swell*.

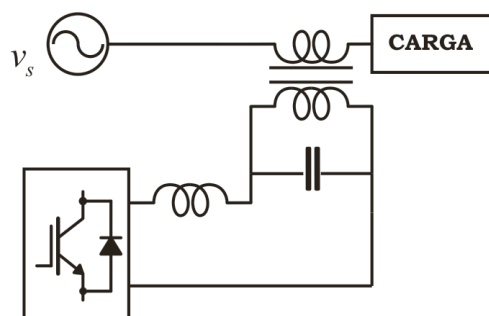


Figura 4 - Filtro Ativo de Potência do tipo série.

Como em uma rede de distribuição a compensação é necessária na tensão dos PACs, a solução de compensadores em série seria a ideal. Porém, a corrente, em um cenário distribuído é elevada. Os FAPs do tipo série, como descrito, estão conectados em série com a linha de distribuição. Portanto, os componentes do filtro precisariam suportar uma elevada potência. O que não é uma opção atrativa. Uma solução alternativa seriam os FAPs do tipo híbridos, [21], os quais misturam a simplicidade dos filtros passivos com a estrutura reduzida dos filtros ativos.

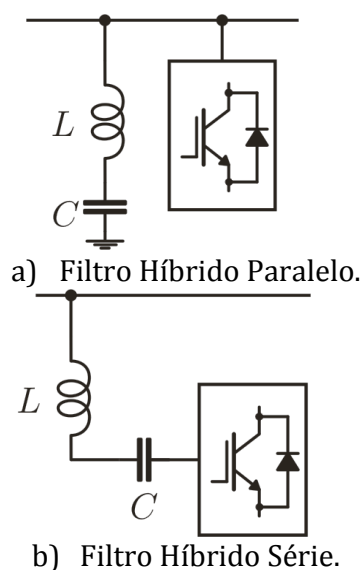


Figura 5 – Filtro Ativo de Potência do tipo híbrido (Ativo/Passivo).

Contudo, os FAPs do tipo híbridos apresentam mais componentes passivos que os filtros ativos série ou paralelo. O que acarreta num controle e um ajuste de sintonia mais complexos.

O filtro ativo de potência universal, [22], também conhecido como condicionador de qualidade de potência unificada, é composto por um filtro série e um paralelo, conforme Figura 6. O filtro série é responsável por isolar o sistema e por suprimir harmônicos de tensão, assim como suas distorções. Enquanto o filtro paralelo tem a função de compensar harmônicos de corrente, operando como uma fonte de corrente controlada. Por apresentara capacidade de regular a tensão e eliminar correntes de seqüência negativa é utilizado para fornecer energia para equipamentos críticos, como aparelhos médicos. Por sua

complexidade e componentes em série com a rede, não são uma solução viável para compensar a rede de distribuição.

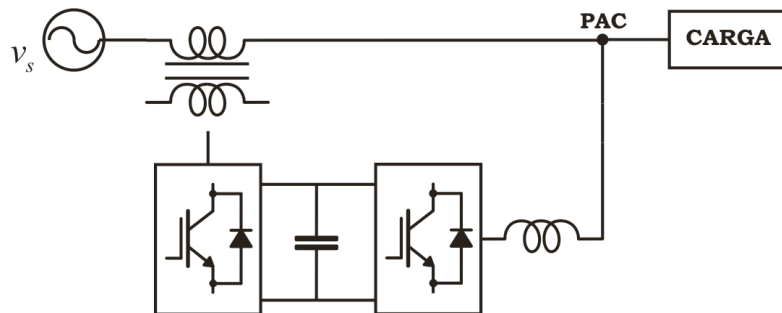


Figura 6 - Filtro Universal.

2.1.3.3 Filtro Ativo de Potência – Paralelo

Filtros ativos paralelos[23; 19; 20], ou *shunt*, foram introduzidos por [17], sendo que sua expansão ocorreu na década de 80 com trabalhos de Akagi e Nabae [24; 25; 26]. A configuração mais comum é para a compensação de harmônicos de corrente, Figura 7, porém, dependendo da localização de sensores e leis de controle, esse pode compensar também a tensão[27].

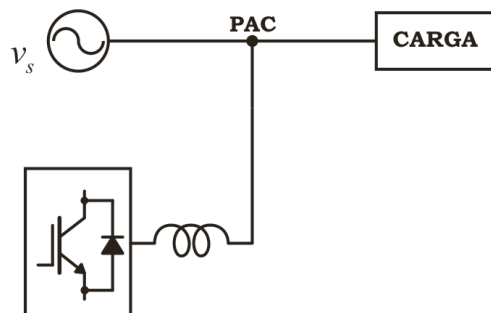


Figura 7 - Filtro Ativo Paralelo.

O filtro paralelo é o dual do filtro série e também apresenta a capacidade de eliminar a ressonância entre a rede e os filtros passivos. Além disso, pode apresentar duas estruturas, com tiristores e um barramento de indutores ou, a mais comum, um retificador por PWM com um barramento de capacitores. Porém uma grande diferença entre os compensadores série e paralelo é a potência que eles devem processar, o pico de tensão sobre as chaves do filtro série é aproximadamente um terço do pico sobre as chaves de potência do filtro paralelo, sendo o filtro paralelo operando como um compensador de harmônicos de corrente e o série de tensão.

A Figura 8 apresenta o circuito equivalente para compensar harmônicos de corrente, onde a drenagem de corrente se dá por $i_{af} = I_h$. A Figura 9 apresenta o filtro para eliminar harmônicos de tensão e corrente, seguindo a equação por $i_{af} = I_h - \frac{V_h}{Z_m}$. A estratégia para compensar harmônicos de tensão foi utilizada por [28; 29], em que a tensão no PAC é a referência para o cálculo das correntes de compensação.

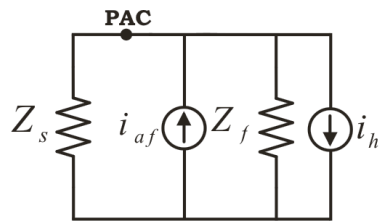


Figura 8 - Circuito equivalente de um filtro ativo paralelo para compensar harmônicos de corrente da carga.

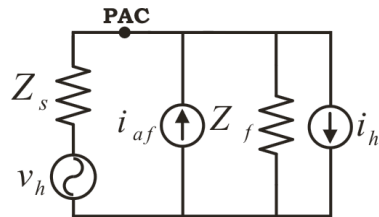


Figura 9 - Circuito equivalente de um filtro ativo paralelo para compensar harmônicos de tensão da fonte de alimentação.

A estratégia por detecção de tensão, diferente da estratégia de corrente, objetiva melhorar os níveis de tensão no PAC, que conseqüentemente melhora também a corrente. O controle apresentado na Figura 10 adquire dados de tensão do PAC e corrente do filtro, e a partir desses dados, impõem uma referência de corrente de compensação.

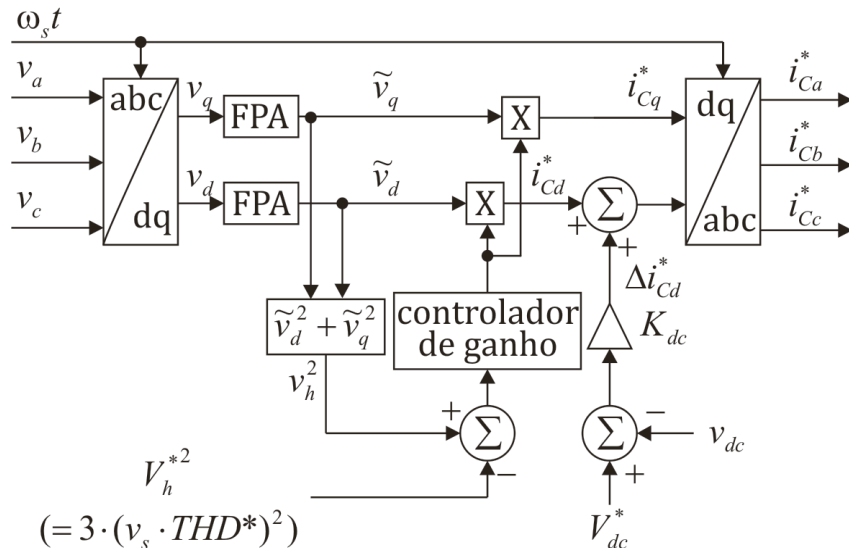


Figura 10–Diagrama de blocos do controle cooperativo do Filtro Ativo Paralelo[29].

As tensões adquiridas são filtradas por um filtro passa-altas (FPA). Os valores filtrados são referência para os cálculos de THD. O nível de THD opera no valor do ganho das correntes de referência, que somadas as correntes do erro de tensão de barramento, são as injetadas na rede de distribuição.

Independente da estratégia de controle utilizada, detecção de corrente ou tensão, os filtros ativos paralelos podem compensar a potência reativa do sistema e o desequilíbrio

das correntes. Segundo Linderke [30], um filtro ativo paralelo processa potência ativa somente para compensar suas perdas, utilizando somente potência reativa para compensar os harmônicos de corrente ou tensão da carga, ou o reativo de deslocamento da mesma.

O filtro paralelo com controle de corrente é o mais disseminado. Contudo, em cenários com propagação de harmônicos pode causar o efeito *whack-a-mole*, em que o filtro compensa a distorção harmônica em alguns pontos e aumenta em outros[31]. Sendo assim a solução com controle por detecção de tensão é a mais atrativa.

2.2 Localização de FAPs em redes de distribuição

A localização de filtros ativos de potência em redes de distribuição é um tema atual e relevante. As diversas cargas não lineares resultam em distorções harmônicas de corrente e conseqüentemente de tensão nos PACs. Contudo, normas internacionais estabelecem limites máximos de distorção harmônica que os consumidores podem receber. Como discutido anteriormente, soluções convencionais como banco de capacitores e filtros passivos já não conseguem reduzir as distorções aos níveis estabelecidos, portanto a localização de um ou mais filtros ativos de potência são uma opção atrativa e viável economicamente.

A norma IEEE-519, elaborada no ano de 1992, determina que os níveis de distorção harmônica total (THD) e tensão harmônica individual (VL) de tensão. O limite máximo a ser entregue aos consumidores não devem ultrapassar os 5% na THD e 3% no VL. Essa norma é a utilizada para a localização de filtros. A norma é o objetivo para que seja determinada a quantidade de filtros, o ponto ótimo de instalação e o dimensionamento do compensador.

O primeiro trabalho que tratou do problema de localização foi apresentado por Grady [4]. A localização de filtros nesse algoritmo considerou variáveis inteiras para potência do filtro. Estudou um cenário estático considerando corrente ilimitada, em que qualquer valor encontrado, mesmo que irreal pode ser considerado uma solução. O posicionamento é baseado em dados da impedância da rede de distribuição e distorção harmônica de tensão nos PACs. A formulação é feita por funções objetivo que são solucionadas por simplificações matemáticas. As funções objetivo são baseadas em cálculos de corrente para que o nível de distorção total seja reduzida para 5% e individual para 3%. O ponto ótimo é o ponto em que a menor corrente é necessária. A corrente encontra determina o dimensionamento do filtro.

O mesmo problema foi revisado e estendido considerando outras funções objetivo por Chang [5; 6]. Dados do nível de influência de motores e linhas telefônicas complementaram o algoritmo. Nesses estudos também são consideradas correntes ilimitadas. A corrente ilimitada não restringe o dimensionamento do filtro, o que pode resultar em níveis de potência irreais para os compensadores. A análise da redução de THD é analisada no ponto estudado e na média de todos os PACs, porém não são verificados os limites individuais de cada ponto.

Os algoritmos anteriores foram complementados com a restrição de limites de corrente para os filtros também por Chang em [7; 8]. Foram considerados limites de corrente para os filtros. O limite de corrente é formulado com o incremento de mais uma função objetivo, o que resulta em aumento de complexidade do algoritmo. Os trabalhos também posicionaram múltiplos filtros em um cenário estático. O estudo de alocação de mais de um compensador também acarreta em aumento da complexidade, pois a influência entre um filtro e outro deve ser considerada.

A localização baseada em área de influência foi implementado em [9]. A quantidade de filtros também é determinada. O ponto ótimo de cada filtro é encontrado quando toda a rede é influenciada por um ou mais filtros ativos.

Em todos os trabalhos anteriores foram utilizadas funções objetivo complexas com cenários estáticos. Solucionando as equações por otimização. Em contraponto a essa solução são utilizados algoritmos genéticos [10]. Entretanto, ainda utilizando cenários estáticos e rastreamento pelo menor injeção de corrente para definir o local ótimo. Em seqüência, aos algoritmos genéticos foi implementada uma alternativa para a solução baseada na técnica *Particle Swarn Optimization* (PSO), a qual demanda menor tempo para encontrar a solução de localização ótima [11].

Percebe-se que em todos os trabalhos a localização foi focada em cenários estáticos, ou seja, sem variação de cargas. Demonstram somente resultados teóricos, apresentando cálculos complexos. A avaliação da THD é pontual ou média e não em todos os pontos da rede. Utilizam *software* para a aquisição de parâmetros, assim não explicando como esses foram obtidos.

Resultados práticos não foram apresentados nos trabalhos discutidos acima. Os primeiros resultados práticos com a instalação de filtros ativos em rede de distribuição são apresentados por Jintakosonwit em [29]. São instalados dois compensadores operando em cooperação para reduzir os níveis de distorção harmônica. Os filtros adéquam a potência de acordo com a variação dos harmônicos, ou seja, a instalação foi feita em cenários dinâmicos. Entretanto, o trabalho não discute a correlação com a localização de filtros, nem o ponto ótimo desses. Esse foi o trabalho a introduzir a idéia de filtros cooperativos.

2.3 Filtros Cooperativos

Filtros cooperativos são dois ou mais compensadores operando em cooperação em uma rede distribuída. O controle objetiva regular a potência de operação dos filtros de acordo com a variação dos harmônicos. Os filtros com operação cooperativa evitam que compensadores instalados em uma mesma rede apresentem interferências de um com o outro [32; 13]. Entretanto, a localização dos compensadores não é discutida em conjunto com a operação cooperativa.

O primeiro trabalho que tratou do controle de filtros cooperativos foi proposta com dois filtros ativos paralelos com detecção de tensão e ajuste automático do ganho do controlador [29]. O ganho é ajustado baseado nos valores de nível THD no ponto em que os

filtros estão instalados, permitindo que a potência do filtro varie de acordo com as variações da rede distribuída. A detecção de tensão evita o efeito *whack-a-mole* causado pela propagação de harmônicos da rede de distribuição, pois o filtro funciona como um resistor.

A operação cooperativa é controlada por um computador mestre, o qual é o responsável por ajustar o ganho automático dos controladores dos filtros, que varia entre 0 e 1, quanto maior o ganho, maior a compensação, e vice-versa. O controle é baseado nos níveis de variação da distorção harmônica total medida nos pontos em que os filtros estão instalados. O controle do computador mestre é feito pela comunicação mestre/filtros, e os valores de THD obtidos pelos filtros são transmitidos pela comunicação filtros/mestre. Os ganhos ajustáveis controlam os filtros de modo que esses apresentem a mesma potência/esforço, reduzindo o THD para o menor nível possível. O ganho

Diversos estudos vêm sendo realizados em estratégias de controle cooperativo para filtros ativos instalados na rede de distribuição. Entre elas, a operação de filtros cooperativos sem a utilização de comunicação, usando somente as propriedades de potência complexa instantânea [13; 14]. Controle cooperativo baseado em potência reativa (VAR), [33]. O trabalho de operação cooperativa também foi implementado em redes distribuídas com diversas ramificações [34].

Compensadores com operação cooperativa reduzem a THD nos pontos em que estão instalados, sendo efetivos em cenários dinâmicos. A operação cooperativa permite adequar os níveis de potência de acordo com a variação da THD.

Filtros cooperativos é uma opção atrativa para as concessionárias satisfazerem os limites de distorção harmônica estabelecidos pela IEEE-519. Porém, sem o estudo de localização, os compensadores podem ser instalados em pontos que sejam sobre-dimensionados. O dimensionamento para potências altas acarreta no aumento de custo. Além do sobre-dimensionamento, a conexão de filtros em pontos não ótimos podem não compensar os harmônicos em todos os PACs.

2.4 Conclusões Parciais

A contextualização ajudou a entender o cenário estudado, sendo o sistema de potência o ambiente em que a localização de filtros é necessária. O conhecimento das estruturas dos filtros permite avaliar as restrições de cada uma, possibilitando uma melhor escolha daquela a ser utilizada para correção da distorção harmônica. Concluiu-se que as estruturas ativas são as melhores para a rede de distribuição, pois se adéquam de acordo com a dinâmica do sistema.

Das estruturas ativas a opção a princípio lógica para correção de tensão seriam os filtros série, porém, esses não são muito indicados pelo fato de sua conexão ao sistema exigir que o mesmo tenha especificações nominais equivalentes a do sistema. Então, os filtros paralelos foram selecionados por apresentarem menor complexidade de implementação e valores nominais de potência, desacoplados do sistema onde será

instalado. Na rede, comportam-se como fontes de corrente controladas, podendo gerar interações que levem ao surgimento do efeito *whack-a-mole*. Para corrigir esse efeito, aparecem os filtros paralelos por detecção de tensão, que atuam como resistores, reduzindo as distorções harmônicas de tensão para níveis abaixo dos estabelecidos pela norma IEEE-519.

A partir da revisão, observa-se que a localização dos FAPs em um sistema de distribuição é uma questão que ainda está sendo muito estudada, com uma parcela significativa dos trabalhos ainda voltados a cenários com cargas estáticas, sendo que o cenário real aponta para uma condição de cargas variáveis, onde a operação cooperativa de filtros tende a ser a mais adequada, em termos de uso eficiente da capacidade de compensação dos filtros instalados. Para isso, faz-se necessário avançar nos estudos de distribuição dos filtros na rede para reduzir os níveis de distorção harmônica.

Na próxima seção do trabalho são discutidas formas de localizações de filtros, identificadas em trabalhos científicos. Na seqüência será proposta uma técnica que considera a localização em cenários com cargas dinâmicas. Nesta, será analisado o posicionamento de mais de um filtro e a influência entre os mesmos. O controle do filtro é discutido em filtros cooperativos, que utilizam a estrutura paralela por detecção de tensão em conjunto com ganhos variáveis.

Capítulo 3

Localização e Operação Cooperativa

A localização de FAPs objetiva reduzir os níveis de distorção harmônica da rede de distribuição num dado cenário. A solução encontra os pontos ótimos para a instalação dos filtros e quantifica quantos compensadores são necessários.

O ponto ótimo mesmo em um cenário que tenha somente uma carga pode ser diferente do ponto de acoplamento da carga, pois ao falar em ponto ótimo busca-se uma boa relação para satisfazer a norma IEEE-519 com o menor esforço/corrente/potência dos compensadores.

A operação cooperativa é a forma de verificar a influência resultante dos FAPs instalados nos pontos que a localização encontrou. Analisando se os resultados, das correntes, do posicionamento e da quantidade de compensadores, encontrados satisfazem a norma.

A discussão de como a localização em redes de distribuição é solucionada e como o controle dos filtros cooperativos opera é apresentada a seguir.

3.1 Formulação do problema de localização

O ponto de acoplamento de filtros ativos de potência em circuitos distribuídos é determinado de acordo com a distorção de tensão causada pelas cargas não lineares instaladas. Contudo, o ponto ótimo de instalação pode variar considerando-se que as cargas são variantes no tempo, assim nesse trabalho é formulado um algoritmo de localização de filtros para cargas não estáticas.

Na formulação do problema de localização ótima são feitas algumas considerações: 1) Sistema com três fios, equilibrado e simétrico; 2) Impedâncias lineares e com valores fixos; 3) Medição das tensões nos PACs do sistema; 4) Número máximo de filtros menor ou igual ao número de pontos da rede de distribuição; 5) Dimensionamento do filtro limitado com variáveis reais.

O sistema com três fios simétrico e equilibrado simplifica a solução da localização pois permite que a medição seja feita em uma única fase. Sendo as demais calculadas com a adição dos ângulos de fase. As impedâncias são dados de entrada, e não são monitoradas em tempo real, portanto devem ser fixas para todos os cenários estudados. A medição da tensão é feita em tempo real, sendo uma variável necessária, pois objetiva-se reduzir os harmônicos de tensão do PAC. O dimensionamento é limitado para que as soluções encontradas sejam possíveis para a implementação real, ou seja, a potência do filtro é restrita a valores reais físicos.

O circuito simplificado apresentado na Figura 11 exemplifica os parâmetros das equações do algoritmo. Em que uma fonte “ v_s ”, um segmento de linha “ $Z_{k,m}$ ” e uma corrente de compensação “ i_m ” representam a rede de distribuição.

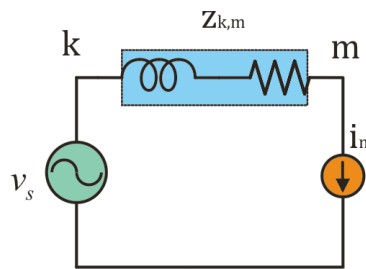


Figura 11- Circuito equivalente simplificado no qual são indicadas variáveis e parâmetros utilizados na formulação do problema.

Sem perda de generalidade, no desenvolvido que será apresentado em seguida, considera-se que a rede é representada por um circuito simplificado de potência monofásico.

A localização dos filtros é encontrada a partir de cálculos que resultam nas correntes necessárias para reduzir as distorções harmônicas presentes na rede. São consideradas “ m ” ($m < M$) posições para instalação de filtros em “ k ” ($k < N$) barramentos de uma rede de distribuição com “ q ” ($q < Q$) filtros. Sendo que, a distorção de tensão “ h ” harmônica no barramento “ k ”, após a instalação do filtro é dada por:

$$|v_{k,new}^h| = \left| v_{k,old}^h + \sum_{q=1}^M Z_{k,m_q}^h I_{m_q}^h \right| \quad (1)$$

Onde, $h = 1, 2, \dots, H$; $k = 1, 2, \dots, N$; $q = 1, 2, \dots, M$; $q < n \leq M$, $|v_{k,new}^h|$ é a tensão compensada, $v_{k,old}^h = |v_{k,old}^h| < \delta_{k,old}^h = v_{k,old}^{h,r} + v_{k,old}^{h,i}$ é a tensão harmônica no barramento sem compensação, sendo medida no PAC, $I_{m_q}^h = |I_{m_q}^h| < \gamma_{m_q}^h = i_{m_q}^{h,r} + i_{m_q}^{h,i}$ é a corrente de compensação do filtro e $Z_{k,m_q}^h = |Z_{k,m_q}^h| < \theta_{k,m_q}^h = z_{k,m_q}^{h,r} + z_{k,m_q}^{h,i}$ é a impedância harmônica entre os pontos estudados e o ponto de localização do filtro.

Para todas as variáveis e todos os parâmetros, o índice “ r ” indica a componente real e o índice “ i ” indica a componente imaginária. Ou seja, representação cartesiana das amplitudes e ângulos de cada variável ou parâmetro.

A equação representa as tensões antes e depois da instalação do filtro. O filtro injeta uma corrente de compensação que em conjunto com a impedância da rede resultam em uma variação de tensão. Essa variação é somada a tensão medida para o cálculo da nova tensão. O valor da nova tensão representa a influência do filtro nas tensões dos PACs. Sendo assim, o valor da corrente de compensação, determina se a influência do filtro reduz os níveis de distorção harmônica abaixo dos regulamentados pela norma IEEE-519. Contudo, a localização ótima é um problema de otimização. Para simplificar a resolução de otimização são utilizadas funções quadráticas, então:

$$g_k(I^h) = \left| v_{k,old}^h + \sum_{q=1}^M z_{k,m_q}^h I_{m_q}^h \right|^2 \quad (2)$$

Substituindo $v_{k,old}^h = v_{k,old}^{h,r} + jv_{k,old}^{h,i}$, $z_{k,m_q}^h = z_{k,m_M}^{h,r} + jz_{k,m_M}^{h,i}$ e $I_{m_q}^h = I_{m_M}^{h,r} + jI_{m_M}^{h,i}$ em $g_k(I^h)$, agrupando os termos reais e os termos imaginários para um filtro, $v_{k,old}^{h,r} + z_{k,m_M}^{h,r} I_{m_M}^{h,r} - z_{k,m_M}^{h,i} I_{m_M}^{h,i} + j(v_{k,old}^{h,i} + z_{k,m_M}^{h,i} I_{m_M}^{h,r} + z_{k,m_M}^{h,r} I_{m_M}^{h,i})$ e isolando $I_{m_M}^h$, resulta em $v_{k,old}^{h,r} + jv_{k,old}^{h,i} + I_{m_M}^{h,r}(z_{k,m_M}^{h,r} + z_{k,m_M}^{h,i}) + I_{m_M}^{h,i}(z_{k,m_M}^{h,r} - z_{k,m_M}^{h,i})$.

Assim,

$$I^h = \left[I_{m_q}^{h,r} \ I_{m_q}^{h,i} \ \dots \ I_{m_M}^{h,r} \ I_{m_M}^{h,i} \right]^T \quad (3)$$

$$A_k^h = A_{k,m_q}^h = (v_{k,old}^{h,r})^2 + (v_{k,old}^{h,i})^2 \quad (4)$$

$$B_{k,m_q}^h = 2(v_{k,old}^{h,r} z_{k,m}^{h,r} + v_{k,old}^{h,i} z_{k,m}^{h,i}) \quad (5)$$

$$C_{k,m_q}^h = 2(v_{k,old}^{h,i} z_{k,m}^{h,r} - v_{k,old}^{h,r} z_{k,m}^{h,i}) \quad (6)$$

$$D_{k,m_q}^h = (z_{k,m_q}^{h,r})^2 + (z_{k,m_q}^{h,i})^2 \quad (7)$$

Para um filtro a função objetivo resulta em,

$$f \left(I_{m_q}^{h,r}, I_{m_q}^{h,i} \right) = A_{k,m_q}^h + B_{k,m_q}^h I_{m_q}^{h,r} + C_{k,m_q}^h I_{m_q}^{h,i} + D_{k,m_q}^h \left((I_{m_q}^{h,r})^2 + (I_{m_q}^{h,i})^2 \right) \quad (8)$$

Continuando os passos para mais filtros, conforme soma,

$$P_k^h = \left[B_{k,m_q}^h \ C_{k,m_q}^h \ \dots \ B_{k,m_M}^h \ C_{k,m_M}^h \right]^T \quad (9)$$

$$Q_k^h = \begin{bmatrix} D_{k,m_q}^h & 0 & \cdot & X_{k,m_q m_M}^h & -Y_{k,m_q m_M}^h \\ 0 & D_{k,m_q}^h & \cdot & Y_{k,m_q m_M}^h & X_{k,m_q m_M}^h \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ X_{k,m_q m_n}^h & Y_{k,m_q m_n}^h & \cdot & D_{k,m_M}^h & 0 \\ -Y_{k,m_q m_n}^h & X_{k,m_q m_n}^h & \cdot & 0 & D_{k,m_M}^h \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$X_{k,m_q m_n}^h = z_{k,m_q}^{h,r} z_{k,m_n}^{h,r} + z_{k,m_q}^{h,i} z_{k,m_n}^{h,i} \quad (11)$$

$$Y_{k,m_q m_n}^h = z_{k,m_q}^{h,r} z_{k,m_n}^{h,i} - z_{k,m_q}^{h,r} z_{k,n}^{h,i} \quad (12)$$

Em que, $q < n \leq Q$.

A função quadrática da função objetivo para um ou mais filtros pode ser expressa por,

$$g_k(I^h) = A_k^h + (I^h)^T P_k^h + (I^h)^T Q_k^h (I^h) \quad (13)$$

A função objetivo demonstra como a corrente do(s) filtro(s) instalados no(s) ponto(s) ótimo(s) influencia na tensão do PAC. A corrente em conjunto com a resistência equivalente representa a variação da tensão, que somada com a tensão medida, resultam na tensão compensada.

Em outros trabalhos são estudadas funções objetivos para minimizar a influência de motores e linhas telefônicas [7]. Esses parâmetros também podem ser analisados pela solução proposta. Porém o estudo dessas não é objeto desse trabalho.

Assim, a corrente de compensação pode ser encontrada pela minimização da função objetivo. Considerando:

$$g_k(I^h) = A_k^h + (I^h)^T P_k^h + (I^h)^T Q_k^h (I^h) \leq VL_k^2 \quad (14)$$

$$h_k(I) = \sum_{h=2}^H g_k(I^h) \leq THD_k^2 \quad (15)$$

Em que os níveis de THD distorção harmônica total e VL tensão individual harmônica são calculados respectivamente por:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H |v_k^h|^2}}{|v_k^1|} \quad (16)$$

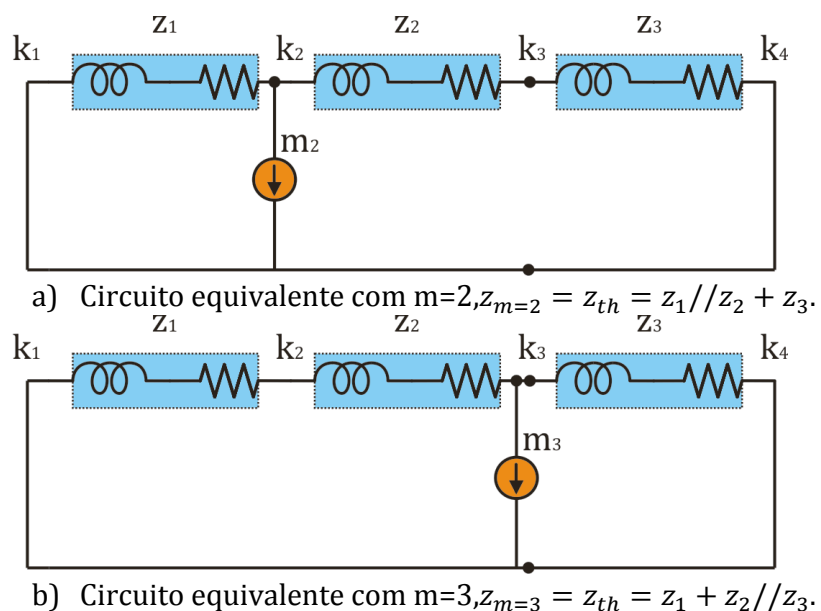
$$VL = \frac{|v_k^h|}{|v_k^1|} \quad (17)$$

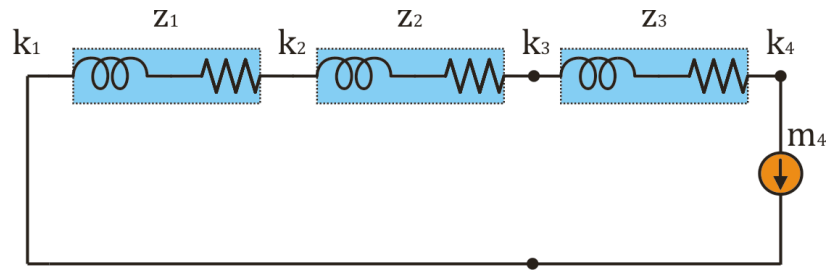
A determinação do ponto de instalação do FAP é tratada como um problema de otimização. São apresentadas duas soluções para a otimização, com e sem restrições para as respostas. Considerando que a formulação em questão objetiva encontrar as correntes para os pontos ótimos de localização dos filtros, a primeira solução apresentada não tem restrições. A corrente tem valor máximo ilimitado. Na segunda solução, é imposta a restrição de máxima corrente que um filtro pode compensar.

3.2 Solução do problema de localização

A solução para localizar compensadores em redes distribuídas é baseada em dados de entrada das impedâncias da rede estimadas para as frequências utilizadas e das tensões dos PACs. As impedâncias são dados reais dos segmentos da linha de distribuição. Cada impedância representa um segmento entre um PAC e outro. Para avaliar a impedância do circuito completo é necessária uma análise de Thevenin.

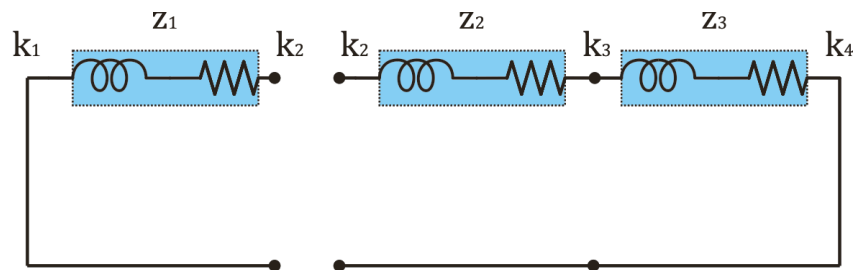
A impedância z_m^h considerada, é a impedância equivalente do circuito vista pelo filtro e pode ser determinada obtendo-se o equivalente de Thevenin do circuito, como mostra a Figura 12. Para melhor representação do cálculo das impedâncias o filtro foi posicionado em três pontos diferentes.



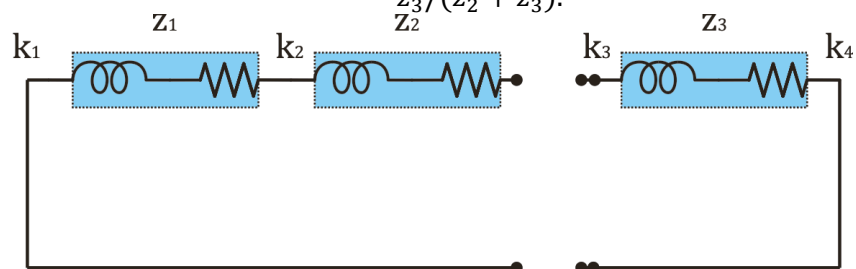


c) Circuito equivalente com $m=4, z_{m=4} = z_{th} = z_1 + z_2 + z_3$.
 Figura 12– Circuito equivalente para calculo da impedância z_m .

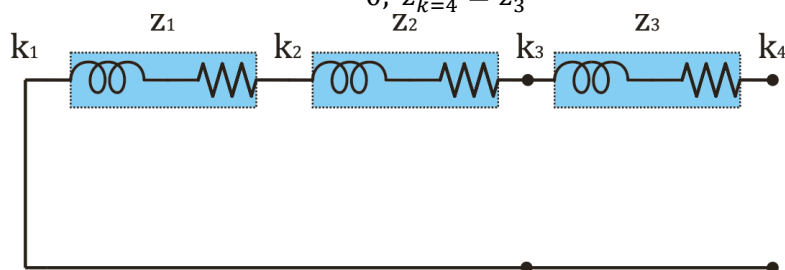
Enquanto a impedância z_k^h da linha pode ser representada pela análise de divisão de tensão entre as impedâncias, antes e depois do filtro, como mostra a Figura 13. Em que cada segmento de linha apresenta uma porcentagem de variação de tensão em relação a corrente injetada pelo filtro. O circuito aberto representa o ponto em o filtro está posicionado.



a) Circuito equivalente com $m=2, z_{k=1} = z_1; z_{k=2} = 0; z_{k=3} = z_2/(z_2 + z_3); z_{k=4} = z_3/(z_2 + z_3)$.



b) Circuito equivalente com $m=3, z_{k=1} = z_1/(z_1 + z_2); z_{k=2} = z_2/(z_1 + z_2); z_{k=3} = 0; z_{k=4} = z_3$



c) Circuito equivalente com $m=4, z_{k=1} = z_1/(z_1 + z_2 + z_3); z_{k=2} = z_2/(z_1 + z_2 + z_3); z_{k=3} = z_3/(z_1 + z_2 + z_3); z_{k=4} = 0$

Figura 13– Circuito equivalente para calculo da impedância z_k .

Obtendo z_m e z_k , chega-se a matriz (18)

$$z_{k,m} = \begin{bmatrix} 0 & (1 - z_{k=1})z_{m=2} & (1 - z_{k=1})z_{m=3} & \cdots & (1 - z_{k=1})z_{m=M} \\ 0 & (1 - z_{k=2})z_{m=2} & (1 - z_{k=2})z_{m=3} & \cdots & (1 - z_{k=2})z_{m=M} \\ 0 & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & (1 - z_{k=N})z_{m=2} & (1 - z_k)z_{m=3} & \cdots & (1 - z_{k=N})z_{m=M} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Sendo que para cada “h” existe um matriz $z_{k,m}$.

As impedâncias em conjunto com a matriz das correntes de compensação do filtro resultam em uma variação de tensão. Essa variação representa a influência que o filtro exerce na rede de distribuição.

Conhecidas e analisadas as impedâncias dos segmentos e as impedâncias equivalentes do circuito, é necessária uma explicação para obter as tensões no PAC.

As tensões adquiridas pela medição são valores no tempo e contínuos. Contudo, as tensões para localização devem ser discretas e na frequência, pois o algoritmo resolve separadamente cada harmônico. Para realizar a transformação do domínio do tempo para o domínio da frequência utiliza-se a Transformada Discreta de Fourier (DFT) definida por:

$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j)\omega_N^{(j-1)(k-1)} \quad (19)$$

com $\omega = e^{-j2\pi/N}$ e cuja inversa é dada por

$$x(j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N X(k)\omega^{-(j-1)(k-1)}. \quad (20)$$

Em que “ $x(j)$ ” são os valores de tensão no tempo e “ $X(k)$ ” a representação no domínio da frequência.

Para uma solução mais rápida da DFT o calculo é feito pelo algoritmo da Transformada Rápida de Fourier (FFT) e a inversa é calculada pela Transformada Rápida de Fourier Inversa (IFFT).

O resultando da FFT apresenta valores de amplitude e ângulo de fase para cada ordem de harmônico presente na tensão adquirida. Representando o dado de entrada “ $v_{k,old}^h$ ”. Saliendo que o algoritmo soluciona o problema separadamente para a parte real e imaginária dos dados obtidos, assim o resultado obtido pela FFT pode ser representado por “ $v_{k,old}^{h,r}$ ” e “ $v_{k,old}^{h,i}$ ”.

Entretanto, analisando as equações (14) e (15), percebe-se que o problema ainda possui muitas variáveis não conhecidas e equações não lineares, resultando em um processo de otimização complexo. Portanto, são feitas algumas considerações para simplificação do método. Na solução de localização formulada foi reduzido o número de variáveis não conhecidas e a inequação quadrática foi transformada em uma inequação linear [6].

3.2.1 Problema sem restrição de corrente

Na solução do problema sem restrição de corrente não se considera limites reais físicos para o resultado da localização. Considera-se qualquer valor de corrente encontrado uma solução factível. A solução obtida neste caso é ótima do ponto de vista teórico, porém pode não ser realizável em certos casos.

Para solução do problema sem restrição de corrente simplifica a função objetivo. Considera-se: harmônico único, barramento único e múltiplos filtros, assim reduzindo variáveis e linearizando a inequação. A solução é dada em função de (14) e (15). Considerando-se dois filtros para exemplificação. A explicação foi apresentada por [8]:

$$I^h = [I_{m_1}^{h,r} I_{m_1}^{h,i} I_{m_2}^{h,r} I_{m_2}^{h,i}] \quad (21)$$

$$S^h = [F_{x,m_1}^h G_{x,m_1}^h F_{x,m_2}^h G_{x,m_2}^h] \quad (22)$$

$$T^h = \begin{bmatrix} H_{x,m_1}^h & 0 & L_{x,m_1m_2}^h & -M_{x,m_1m_2}^h \\ 0 & H_{x,m_1}^h & M_{x,m_1m_2}^h & L_{x,m_1m_2}^h \\ L_{x,m_1m_2}^h & M_{x,m_1m_2}^h & H_{x,m_2}^h & 0 \\ -M_{x,m_1m_2}^h & L_{x,m_1m_2}^h & 0 & H_{x,m_2}^h \end{bmatrix} \quad (23)$$

Para o problema de barramento único e harmônico único a função objetivo é:

$$f(I^h) = \psi(h)\beta(k)g_k(I^h) \quad (24)$$

O mínimo do problema sem restrições é encontrado utilizando a condições de primeira ou segunda ordem de Kunh-Tucker [35], que apresentam condições necessárias para que uma solução não linear seja ótima. Pela condição em primeira ordem, considerando a derivada parcial de (2) a zero:

$$Q_k^h I^h = -\frac{1}{2} P_k^h \quad (25)$$

Para a condição de segunda ordem:

$$H = 2Q_k^h \quad (26)$$

Em que:

$$Q_k^h = \begin{bmatrix} D_{x,m_1}^h & 0 & X_{x,m_1m_2}^h & -Y_{x,m_1m_2}^h \\ 0 & D_{x,m_1}^h & Y_{x,m_1m_2}^h & X_{x,m_1m_2}^h \\ X_{x,m_1m_2}^h & Y_{x,m_1m_2}^h & D_{x,m_2}^h & 0 \\ -Y_{x,m_1m_2}^h & X_{x,m_1m_2}^h & 0 & D_{x,m_2}^h \end{bmatrix} \quad (27)$$

Sabendo que os auto-valores de (27) resultam:

$$\lambda_1 = \lambda_2 = D_{x,m_1}^h + D_{x,m_2}^h > 0 \quad (28)$$

E

$$\lambda_3 = \lambda_4 = 0 \quad (29)$$

Sendo Q_k^h e H positivas e semi-definidas, ou seja, todas as submatrizes principais são não-negativas. Estando todas as sub-matrizes no semi plano positivo e sabendo que as variáveis consideradas são reais positivas ilimitadas, significa que todas as soluções estão no conjunto de soluções possíveis. Se todas as soluções da matriz pertencem ao conjunto de soluções do intervalo considerado, significa que (24) é uma função convexa e possui mais de uma solução. Para resolver o problema singular, (25) é transformada em:

$$Q_o^h I^h = -\frac{1}{2} P_o^h \quad (30)$$

Por eliminação na ultimas duas colunas, onde:

$$P_o^h = \begin{bmatrix} B_{x,m_1}^h \\ C_{x,m_1}^h \end{bmatrix} \quad (31)$$

E

$$Q_o^h = \begin{bmatrix} D_{x,m_1}^h & 0 & X_{x,m_1m_2}^h & -Y_{x,m_1m_2}^h \\ 0 & D_{x,m_1}^h & Y_{x,m_1m_2}^h & X_{x,m_1m_2}^h \end{bmatrix} \quad (32)$$

Mesmo assim(30) possui mais de uma solução, porém como a mínima injeção de corrente do filtro é igual a solução da sua norma, então a inversa generalizada [36]:

$$(Q_o^h)^\chi = (Q_o^h)^T [Q_o^h (Q_o^h)^T]^{-1} \quad (33)$$

A solução é dada multiplicando ambos os lados de (33), o qual resulta em:

$$I_o^h = -\frac{1}{2} P_o^h (Q_o^h)^\chi \quad (34)$$

Substituindo, (31)-(33)em (34);

$$I_o^h = \begin{bmatrix} I_{m_1}^{h,r} \\ I_{m_1}^{h,i} \\ I_{m_2}^{h,r} \\ I_{m_2}^{h,i} \end{bmatrix} = -\frac{1}{2(D_{x,m_1}^h + D_{x,m_2}^h)} \begin{bmatrix} B_{x,m_1}^h \\ C_{x,m_1}^h \\ B_{x,m_2}^h \\ C_{x,m_2}^h \end{bmatrix} \quad (35)$$

A equação (35) obtida por [8], representa a corrente para dois pontos da rede de distribuição, entretanto pode ser estendida para todos os pontos. Essa corrente também pode ser comprovada pela análise física do circuito equivalente da Figura 11.

Percebe-se que:

$$I_m^h = \frac{v}{Z_{eq}} \quad (36)$$

Considerando,

$$v = v_{k,old}^{h,r} + v_{k,old}^{h,i} \quad (37)$$

E

$$Z_{eq} = Z_{k,m}^{h,r} + Z_{k,m}^{h,i} \quad (38)$$

Então,

$$I_m^h = \frac{v_{k,old}^{h,r} + jv_{k,old}^{h,i}}{Z_{k,m}^{h,r} + jZ_{k,m}^{h,i}} \quad (39)$$

Multiplicando por $\frac{Z_{k,m}^{h,r} - jZ_{k,m}^{h,i}}{Z_{k,m}^{h,r} - jZ_{k,m}^{h,i}}$,

$$I_m^h = \frac{(v_{k,old}^{h,r}Z_{k,m}^{h,r} + v_{k,old}^{h,i}Z_{k,m}^{h,i}) + j(v_{k,old}^{h,i}Z_{k,m}^{h,r} + v_{k,old}^{h,r}Z_{k,m}^{h,i})}{(Z_{k,m}^{h,r})^2 + (Z_{k,m}^{h,i})^2} \quad (40)$$

Então,

$$I_m^h = \frac{(v_{k,old}^{h,r}Z_{k,m}^{h,r} + v_{k,old}^{h,i}Z_{k,m}^{h,i})}{(Z_{k,m}^{h,r})^2 + (Z_{k,m}^{h,i})^2} = -\frac{B_{k,m}^h}{2D_{k,m}^h} \quad (41)$$

E

$$I_m^{h,i} = \frac{(v_{k,old}^{h,i} z_{k,m}^{h,r} + v_{k,old}^{h,r} z_{k,m}^{h,i})}{(z_{k,m}^{h,r})^2 + (z_{k,m}^{h,i})^2} = -\frac{C_{k,m}^h}{2D_{k,m}^h} \quad (42)$$

Onde $k = m$;

Considerando mais de um filtro como mostra o circuito da Figura 14.

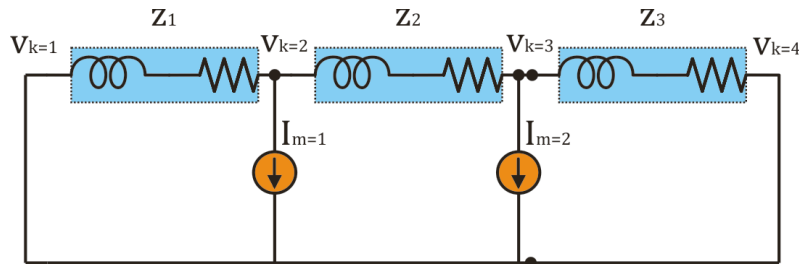


Figura 14– Circuito de um cenário com dois compensadores instalados.

$$I_m^{h,r} = \frac{(v_{k,old}^{h,r} z_{k,m}^{h,r} + v_{k,old}^{h,i} z_{k,m}^{h,i})}{((z_{k,m_1}^{h,r})^2 + (z_{k,m_1}^{h,i})^2) + ((z_{k,m_2}^{h,r})^2 + (z_{k,m_2}^{h,i})^2)} \quad (43)$$

E,

$$I_m^{h,i} = \frac{(v_{k,old}^{h,i} z_{k,m}^{h,r} + v_{k,old}^{h,r} z_{k,m}^{h,i})}{((z_{k,m_1}^{h,r})^2 + (z_{k,m_1}^{h,i})^2) + ((z_{k,m_2}^{h,r})^2 + (z_{k,m_2}^{h,i})^2)} \quad (44)$$

3.2.1.1 Escolha do ponto ótimo

Com o conhecimento das equações de corrente (41), (49) e (50), com análise das impedâncias equivalentes do circuito e obtendo as tensões dos PACs na frequência é possível resolver o problema de localização dos filtros. O ponto ótimo é determinado pela análise da menor corrente de injeção que reduz os níveis de THD abaixo de 5% e VL abaixo de 3%. As correntes são calculadas para todos os PACs. Verifica se a menor corrente entre todos os pontos satisfaz a IEEE-519. Em caso positivo o local de instalação do filtro corresponde ao ponto com a menor corrente.

Caso a menor corrente não satisfaça a norma, em ordem crescente as demais são analisadas. Em caso de todos os pontos terem sido avaliados e a norma não tenha sido satisfeita, serão calculadas novas correntes para dois, três ou mais filtros ativos.

Entretanto, as correntes encontradas podem não ser factíveis. Nestes casos, é necessário impor restrições de corrente ao problema de localização ótima de filtros em redes de distribuição.

3.2.2 Problema com restrição de corrente

A solução do problema considerando restrição para o valor da corrente de compensação ser injetada requer a utilização de um método de otimização [6]. O limite máximo de corrente é baseado na máxima potência física que o compensador suporta, ou a máxima potência disponível para filtros que serão localizados.

Para restringir a corrente aos valores limites a localização é baseada em mais uma equação:

$$\sum_{h=2}^H \left\{ \left(I_{m_q}^{h,r} \right)^2 + \left(I_{m_q}^{h,i} \right)^2 \right\} - \left(I_{m_q}^{max} \right)^2 \leq 0 \quad (45)$$

Em que,

$$I_{m_q}^{max} \in \{ I^o, 2I^o, \dots, LI^o \} \quad (46)$$

Sendo $I_{m_q}^{max}$ a máxima corrente que a estrutura do filtro permite, I^o a mínima corrente e L o parâmetro para maior base de corrente.

A solução para corrente limitada é baseada no resultado obtido para corrente ilimitada. O menor valor encontrado para corrente sem restrições é minimizado e limitado ao valor máximo de corrente estabelecido. O método e simplificações para encontrar a corrente mínima são apresentados por [4].

A solução da minimização pode ser encontrada analisando as condições de Kunh-Tucker [35]. Derivando a equação (8) para corrente:

$$\frac{\partial [I_m^{h,r}, I_m^{h,i}]}{\partial I_m^{h,r}} = B_m^h + 2D_m^h I_m^{h,r}$$

$$\frac{\partial [I_m^{h,r}, I_m^{h,i}]}{\partial I_m^{h,i}} = C_m^h + 2D_m^h I_m^{h,i}$$

Para a condição de primeira ordem de Kunh-Tucker obteve-se:

$$\frac{\partial [I_m^{h,r}, I_m^{h,i}, \mu_1]}{\partial I_m^{h,r}} = B_m^h + 2D_m^h I_m^{h,r} + 1\mu_1 I_m^{h,r} = 0 \quad (47)$$

$$\frac{\partial [I_m^{h,r}, I_m^{h,i}, \mu_1]}{\partial I_m^{h,i}} = C_m^h + 2D_m^h I_m^{h,i} + 1\mu_1 I_m^{h,i} = 0 \quad (48)$$

Em que,

$$\mu_1 > 0 \quad (49)$$

$$\mu_1 \left[\sum_{h=2}^H \left((I_m^{h,r})^2 + (I_m^{h,i})^2 \right) - (I_m^{max})^2 \right] = 0 \quad (50)$$

$$\sum_{h=2}^H \left((I_m^{h,r})^2 + (I_m^{h,i})^2 \right) - (I_m^{max})^2 < 0 \quad (51)$$

Pela segunda derivada parcial da função de Lagrange (função de coordenadas, taxa de variação destas e tempo [35]) chega-se uma matriz Hessiana (matriz em função de “n” variáveis, quadrada $n \times n$, das derivadas parciais de segunda ordem da função[35]) positiva definida. Note que há somente um multiplicador de Lagrange (método para encontrar extremos de uma função de uma ou mais variáveis suscetível a uma ou mais restrições [35]), μ_1 , porque a corrente eficaz limitada contém todos os harmônicos.

Considera-se para o cálculo iterativo um harmônico por vez. Reescrevendo (47) e (48).

$$I_m^{h,r} (D_{k,m}^h + \mu_1) = -\frac{B_{k,m}^h}{2} \quad (52)$$

$$I_m^{h,i} (D_{k,m}^h + \mu_1) = -\frac{C_{k,m}^h}{2} \quad (53)$$

Expressando a corrente limitada por um escalar da equação de corrente ilimitadas (35), chega-se em:

$$I_m^{h,r} = -\alpha_m^{h,r} \frac{B_{k,m}^h}{2D_{k,m}^h} \quad (54)$$

$$I_m^{h,i} = -\alpha_m^{h,i} \frac{C_{k,m}^h}{2D_{k,m}^h} \quad (55)$$

Substituindo (52)em (54) e (53)em (55), chega-se em:

$$\alpha_m^{h,r} (D_m^h + \mu_1) = \alpha_m^{h,i} (D_m^h + \mu_1) = D_m^h \quad (56)$$

A equação acima implica que o mesmo fator de escala α_m^h pode ser usado para ambas as correntes, reais e imaginárias, em qualquer “h” harmônico, onde

$$\alpha_m^h (D_m^h + \mu_1) = D_m^h \quad (57)$$

Resolvendo em função de μ_1

$$\mu_1 = \left(\frac{1}{\alpha_m^h} - 1 \right) \quad (58)$$

Como D_m^h é positivo, então μ_1 será positivo e irá satisfazer as condições de Kuhn-Tucker dada em (49), provando que α_m^h é um escalar entre 0 e 1.

O multiplicador de Lagrange μ_1 é o mesmo para todos os harmônicos. Por isso, α para qualquer harmônica em t está relacionada à α para “h” harmônica através (57), resulta:

$$\alpha_m^t = \left(\frac{1}{1 + \frac{D_m^h(1 - \alpha_m^h)}{D_m^t \alpha_m^h}} \right) \quad (59)$$

Desde que μ_1 seja diferente de zero, o estado de relaxamento complementar de (50) deve ser preenchida por:

$$\sum_{h=2}^H (I_m^{h,r^2} + I_m^{h,i^2}) = (I_m^{max})^2 \quad (60)$$

Substituindo (54) e (55) na expressão acima, enquanto é usado o mesmo fator de escala para ambas as correntes reais e imaginários para todo o h harmônico, produz:

$$\sum_{h=2}^H (\alpha_m^h)^2 \left((I_m^{h,r})^2 + (I_m^{h,i})^2 \right) = (I_m^{max})^2 \quad (61)$$

Substituindo (35) na expressão acima chegamos a:

$$\sum_{h=2}^H (\alpha_m^h)^2 \left(\frac{(B_m^h)^2 + (C_m^h)^2}{2(D_m^h)^2} \right) = (I_m^{max})^2 \quad (62)$$

Resolvendo o problema de otimização com restrição, é necessário determinar o conjunto que satisfaz (62). Isso é feito utilizando o método da bissecção da seguinte forma:

- 1- Escolha um valor inicial entre 0 e 1 para α do menor múltiplo harmônico de interesse (acima da fundamental).
 - 2- Use (59) para calcular os α para os harmônicos restantes.
 - 3- Substitua o conjunto de α encontrados nas etapas 1 e 2 em (38), e verifique para a igualdade.
 - 4- Se (62) está fora da tolerância desejada ($0,000001 \text{ pu}^2$), aumente ou diminua α na Etapa 1), utilizando o método da bisseção.
- Continue os passos 2 - 4 até (62)ser satisfeita dentro da tolerância. Então, use (54)e (55)para calcular a injeção de correntes dos filtros. Este processo iterativo obteve um bom resultado.

O método apresentado resulta em um valor de corrente minimizado. Entretanto, é necessário verificar se a corrente encontrada reduz os limites de THD abaixo de 5% e VL abaixo de 3%, satisfazendo a norma IEEE-519. Caso a corrente a corrente satisfaça a norma, o ponto ótimo é encontrado. No caso da THD resultante estar acima do limite de 5%, o estudo a localização da localização deve ser estendido para mais compensadores na rede de distribuição.

3.3 Algoritmo de localização

O algoritmo de localização foi elaborado para que as equações ficassem ordenadas de modo a resultarem numa solução ótima para a instalação dos filtros no cenário distribuído. A solução do algoritmo localiza e dimensiona os compensadores.

3.3.1 Algoritmo proposto

O método do algoritmo proposto localiza um único filtro, aumentando o número de compensadores seqüencialmente caso necessário. O algoritmo considera primeiro um filtro sem restrições de potência. Caso a corrente encontrada ultrapasse os limites estabelecidos, essa é minimizada para os limites de máxima corrente. Recalculando as tensões e verificando se a norma IEEE-519 para distorção harmônica foi satisfeita. Sendo esse resultado, a decisão de aumentar o número de filtros ou não. O número de filtros pode ser aumentado até o máximo número de PACs da rede de distribuição, ou até um máximo número estabelecido.

Os passos propostos são:

- 1) Medição das impedâncias de linhas entre os pontos de provável instalação dos filtros, fornecidos pelo comprimento dos segmentos de linha e características dos cabos.
- 2) Medição das tensões nos pontos de possível instalação dos filtros para a combinação de cargas estudadas, separando a amplitude de cada harmônico que a compõem a partir da realização da Transformada Rápida de Fourier (FFT). A FFT também apresenta os valores de ângulo de fase entre as tensões nos diferentes PACs.
- 3) Indique o número máximo de “q” filtros.

- 4) Calcule quantas M^q possibilidades de instalação de filtros existem e as possíveis combinações.
- 5) Calcule as correntes para cada PAC do cenário estudado de acordo com a equação (35). Verifique quais corrente encontradas estão abaixo do limite máximo estabelecido.
- 6) Caso nenhuma corrente estiver abaixo do limite, nenhum PAC é um possível ponto ótimo, item 7). Caso contrário, os pontos de possível instalação são os que apresentaram corrente restritas ao limite, item 9).
- 7) Posicione o filtro no ponto em que resultou na menor corrente calculada no item 4). Minimize a corrente de acordo com (62). Encontrando o valor de “ α ” ($0 \leq \alpha \leq 1$) pelo método de bissecção explicado na solução para corrente limitada, encontrando o erro do somatório com erro menor que 0,000001 pu².
- 8) Recalcule as tensões com a resposta obtida em 7). Retorne para o item 5).
- 9) Ordene as correntes calculadas no item 5) em ordem decrescente.
- 10) Ordene as possibilidades dos filtros calculadas no item 5), em ordem decrescente da soma total das correntes.
- 11) Utilize a combinação de filtro(s) com menor corrente.
- 12) Minimizar a função objetiva (13) de acordo com (14) e (15), verificando se os valores encontrados satisfazem a norma IEEE-519.
- 13) Caso os valores de THD e VL não satisfizerem a norma, item 14). Caso contrário item 17).
- 14) Atualize a lista de combinações de corrente(s) do(s) filtro(s), descartando a combinação utilizada.
- 15) Verifique se existe alguma combinação na lista do item 11). Caso sim, item 11). Caso contrário item 16).
- 16) Aumente o número de filtros utilizados. Caso o número máximo de filtros tenha sido alcançado, não há solução para as restrições de limite do número de filtro e de corrente impostas.
- 17) Armazene a localização encontrada.

3.3.2 Algoritmo implementado por Chang

O algoritmo implementado por Chang [8], considera corrente limitada e um cenário estático para representar a rede de distribuição. O método localiza um filtro e aumenta a quantidade de compensadores seqüencialmente.

- 1) Entrada dos dados das impedâncias de linhas entre os pontos de possível instalação dos filtros.
- 2) Entrada das tensões dos PACs.
- 3) Cálculo dos índices de prioridade para localização de um filtro a partir de (63)-(65).

$$SI_m^h = 2\psi(h) \sum_{k=1}^N \beta(k) |v_{k,m}^h| |z_{k,m}^h| \cos(\theta_{k,m}^h - \delta_{k,old}^h + \gamma_m^h) \quad (63)$$

$$SI_m = \sum_{h=2}^H SI_m^h \quad (64)$$

$$\gamma_m^h = \tan^{-1} \left\{ \frac{\sum_{k=1}^N \beta(k) |v_{k,old}^h| |z_{k,m}^h| \sin(\delta_{k,old}^h - \theta_{k,m}^h)}{\sum_{k=1}^N \beta(k) |v_{k,old}^h| |z_{k,m}^h| \cos(\delta_{k,old}^h - \theta_{k,m}^h)} \right\} \quad (65)$$

Considerando que a função tangente possui dois resultados para cada harmônico, deve ser adotado o valor que resulta em uma resposta mais negativa para (64).

- 4) Determinação dos possíveis pontos para a instalação de filtros [6]. Solução encontrada a partir de (14) a (45).
- 5) Verificação da existência de um possível ponto de instalação para o filtro. Se sim, pule para o item 8), caso contrário siga para o item 6).
- 6) Localize o filtro na posição com máxima prioridade encontrada no item 3) e solucione o problema por corrente limitada explicada em [4] de acordo com (13) e (45).
- 7) Cálculo das novas tensões de acordo com a corrente encontrada no item 6) a partir de (1). Prossiga para o passo 3).
- 8) Verifique se um filtro, com a menor injeção de corrente obtida no item 4) é suficiente para restringir os níveis de THDs, de acordo com a norma. Se não, item 6) caso contrário item 9).
- 9) Posicione o filtro na(s) posição(ões) encontradas.

No item 4) as funções objetivo determinam os possíveis pontos para a instalação do filtro. Para não utilizar métodos complicados de otimização o autor propõem considerações e simplificações matemáticas. As simplificações foram divididas em dois subproblemas, um para diminuir o número de variáveis, e outro para transformar uma inequação quadrática limitada em uma inequação linear limitada. Como explicado na solução para corrente ilimitada em que foi encontrada a equação (35).

Relacionando os valores das corrente reais e imaginarias da equação (35):

$$I_m^{h,i} = S_m^h I_m^{h,r} \quad (66)$$

Pela resolução detalha do ANEXO Achege-se a:

$$\alpha^h = \frac{I_m^{h,r}}{I_m^{h,c}} \quad (67)$$

E na função objetivo:

$$\sum_{h=2}^H (A^h + B^h \alpha^h + C^h \alpha^h) = THDL_k^2 \quad (68)$$

Sendo o ponto ótimo é dado por,

$$\lambda = \frac{\alpha^h}{D_{k,m}^h (1 - \alpha^h)} \quad (69)$$

Reorganizando,

$$\alpha^h = \frac{\lambda D_{k,m}^h}{1 + \lambda D_{k,m}^h} \quad (70)$$

Mostrando em (69) que λ é função convexa de α^h . Observando a Figura 79 do ANEXO A, analisa-se que α^h é inversamente proporcional a $g_k(I_m^{h,r} + I_m^{h,i})$ e também a $h_k(I_m^r + I_m^i)$. A solução ótima é encontrada pela iteração de Lambda e método de bisseção. Mantendo o limite de THD em relação a (68) versus λ , logo se encontra λ ótimo, e conseqüentemente através de (70), α^h é encontrado. A mínima corrente de injeção do filtro é encontrada resolvendo (66), (67) e (68).

3.3.3 Comparação dos algoritmos – Estudo de Complexidade

O algoritmo foi implementado baseando-se no algoritmo apresentado por[8], porém apresenta simplificações. A descrição de como obter os dados de impedâncias e tensões foram incluídas. A complexidade dos cálculos e o procedimento para obtenção do ponto ótimo foram simplificados, reduzindo o processamento computacional.

As impedâncias de linhas entre os pontos de provável instalação dos filtros, fornecidos pelo comprimento dos segmentos de linha e características dos cabos. As tensões nos pontos de possível instalação dos filtros para a combinação de cargas estudada, separando a amplitude de cada harmônico que a compõem a partir da realização da Transformada Rápida de Fourier (FFT). A FFT também apresenta os valores de ângulo de fase que as tensões apresentam em diferentes PACs.

A solução para a localização ótima de filtros em redes de distribuição apresentada por[8] apresenta a equação(35) para calcular a corrente dos filtros. A equação de corrente determina duas novas equações. As equações encontradas possuem parâmetros correlacionados e necessitam de métodos iterativos para determinar o ponto ótimo de instalação dos compensadores. Entretanto, o procedimento do algoritmo pode ser simplificado.

A simplificação consiste em utilizar a equação de corrente para calcular as correntes necessárias em cada PAC. Evitando as equações correlacionadas e o método iterativo. As correntes calculadas são comparadas com o limite máximo de corrente estabelecido. Sendo os pontos de possível instalação aqueles que apresentaram a corrente necessária abaixo do limite. O que reduzir os possíveis pontos de instalação a serem estudados.

Encontrados os possíveis pontos para a instalação de filtros, as correntes são ordenadas em ordem crescente. Analisa-se primeiro, o ponto que resultou na menor corrente necessária. Verifica se a mínima corrente reduziu a distorção harmônica e satisfaz a norma IEEE-519. Caso a menor corrente não satisfaça a norma, em ordem crescente as demais são analisadas. Em caso de todos os pontos terem sido avaliados e a norma não tenha sido satisfeita, serão calculadas novas correntes para dois, três ou mais filtros ativos.

A quantidade de filtros é determinada de acordo com a distorção apresentada pela rede de distribuição. Em casos de distorção pequena, um filtro pode satisfazer a norma.

Casos com altas distorções, dois ou mais filtros podem ser necessários. A quantidade de filtros aumenta de um em um de acordo com a necessidade apresentada.

Também no algoritmo apresentado por [8], no passo 3) é realizado o cálculo do índice de prioridade. Contudo, esse índice representa o ponto que necessita menor injeção de corrente. No algoritmo simplificado esse índice é determinado pelo cálculo das correntes, reduzindo o número de equações.

O algoritmo simplificado apresenta menor complexidade que os algoritmos apresentados. Reduzindo a complexidade pode-se adequar o algoritmo para cenários dinâmicos e controle da operação cooperativa de filtros. Para quantificar a simplificação foi feito um estudo de complexidade.

O estudo de complexidade objetiva definir o esforço computacional para resolver um problema. A complexidade avalia todos os passos de um algoritmo, verificando o número de instruções, o número de operações e os tipos de operações realizadas. Um estudo completo para comparação de complexidade de algoritmos avaliaria os todos os passos desses. Contudo, pretende-se avaliar a redução de complexidade do algoritmo simplificado. Portanto é analisada somente a complexidade dos passos que foram simplificados e/ou suprimidos.

Na Tabela 1 são mostradas as operações suprimidas e simplificadas do algoritmo [8]. Para isso são definidas as tarefas e suas correspondências no algoritmo:

- Tarefa 1 - Equação (63);
- Tarefa 2 - Equação (64);
- Tarefa 3 - Equação (65);
- Tarefa 4 – Rastreamento da melhor resposta para (63) em relação a (65).
- Tarefa 5 – Equação(68);
- Tarefa 6 – Equação (70);

Tabela 1 –Quantidade das operações simplificadas ou suprimidas.

	+	-	/	*	√	Equações Trigonômétricas	Repetições
Tarefa 1	3	1	0	8	2	1	$(N - 1)(M - 1)(H - 2)$
Tarefa 2	-	-	-	-	-	-	$(M - 1)(H - 2)$
Tarefa 3	4	2	1	14	4	3	$(M - 1)(H - 2)$
Tarefa 4	-	-	-	-	-	-	$(N - 1)(M - 1)(H - 2)$
Tarefa 5	2	-	-	2	-	-	$(N - 1)(M - 1)(H - 2)$
Tarefa 6	1	-	1	2	-	-	$(N - 1)(M - 1)(H - 2)$

Analisando a Tabela 1 é possível somar quantas operações existem em cada equação. Na Tarefa 1 são 15 operações, na Tarefa 3 são 28, na Tarefa 5 são 4 e na Tarefa 6 são 4. O total de operações considerando uma repetição para cada equação é igual a 51. Sendo a quantidade de repetições dependente da precisão que o algoritmo requer, e da complexidade da rede analisada. Porém percebe-se que as Tarefas 1, 4, 5 e 6 as repetições

são dependentes de três incógnitas, elevando a terceira ordem o tempo de processamento. Nas Tarefas 2 e 3 também há repetição de operações, entretanto com duas incógnitas, sendo o tempo de processamento elevado a segunda ordem.

Além das tarefas descritas acima, o algoritmo de [8] utiliza um método iterativo para encontrar os possíveis pontos ótimos. O algoritmo abrange um intervalo de $a \leq \alpha \leq b$ e para encontrar um “ λ ” real que satisfaça (68). Considerando que $a=0$ e $b=1$ são os pontos finais, n_o o número de iterações, e ϵ o erro, então:

$$n_o > \frac{\ln(b - a) - \ln \epsilon}{\ln 2} \tag{ 71 }$$

Substituindo a e b,

$$n_o > - \frac{\ln \epsilon}{\ln 2} \tag{ 72 }$$

O parâmetro “ n_o ” representa o número de iterações necessárias [37; 38]. Enfatizando que o método é repetido por $(H - 2)$ vezes.

No algoritmo simplificado são realizados alguns passos diferentes do algoritmo original. A complexidade desses passos é mostrada na

Tabela 2. Segue a definição das tarefas:

- Tarefa 1 – Equação (35);
- Tarefa 2 – Verificação das correntes abaixo do limite;

Tabela 2 – Quantidade das operações simplificadas ou suprimidas.

	+	-	/	*	√	Equações Trigonométricas	Repetições
Tarefa 1	-	1	1	1	-	-	$(M - 1)(H - 2)$
Tarefa 2	-	-	-	-	-	-	$(M - 1)(H - 2)$

Na Tabela 2, o número de tarefas foi reduzido. A Tarefa 1 possui 3 operações que é o a soma total de operações. As repetições de todas as Tarefas representam um tempo de processamento de segunda ordem.

Comparando as duas tabelas verifica-se que o número de tarefas foi reduzido em 4. Analisando o número de operações sem considerar as repetições, há uma redução de 48 operações no algoritmo simplificado. Também foi reduzida a quantidade de repetições, em que o algoritmo simplificado apresenta somente uma tarefa de segunda ordem de tempo de processamento a mais que o algoritmo original. Entretanto no algoritmo original são processadas quatro tarefas a mais de terceira ordem.

Conclui-se que o algoritmo original é mais complexo que o algoritmo simplificado. A redução do número de tarefas assim como a utilização de equações mais simples, reduziu a complexidade do algoritmo para a localização de filtros em redes de distribuição.

3.4 Localização de Filtros Ativos considerando Cargas Variáveis no Tempo

Para a definição problema do algoritmo, foram consideradas “ n ” localizações de cargas variantes no tempo, em que sua potência varia de mínima (0) a máxima (P), ou seja, avaliou-se perfil on/off. Assumindo esse perfil, foram consideradas 2^n possibilidades de combinações de cargas na rede distribuída estudada. Considerando-se que, em uma rede com uma vasta possibilidade de combinações podem ser utilizados parâmetros heurísticos, e assim excluir algumas combinações que geram distorções semelhantes ou iguais, e eliminar combinações que não sejam possíveis na rede estudada.

Sendo assim, o problema de localização em cenários dinâmicos resumidamente define: Em quais “ m ” pontos devem ser instalados os “ q ” filtros ativos de potência observando-se o resultado da distorção harmônica de tensão apresentada nos “ k ” pontos estudados, que satisfazem a norma IEEE-519 (THD<5% e VL<3%).

Para melhor explicar o algoritmo simplificado para cargas variantes no tempo foram descritos os passos abaixo:

- 1) Medição das impedâncias de linhas entre os pontos de provável instalação dos filtros, fornecidos pelo comprimento dos segmentos de linha e características dos cabos.
- 2) Indique, quantas “ n ” cargas existem na rede.
- 3) Calcule quantas 2^n possibilidades de mudanças de carga.
- 4) Medição das tensões nos pontos de possível instalação dos filtros para a combinação de cargas estudada, separando a amplitude de cada harmônico que a compõem a partir da realização da Transformada Rápida de Fourier (FFT) janelada. A FFT também apresenta os valores de ângulo de fase entre as tensões nos diferentes PACs.
- 5) Indique o número de “ q ” filtros utilizados.
- 6) Calcule quantas M^q possibilidades de instalação de filtros existem e as possíveis combinações.
- 7) Calcule as correntes para cada PAC do cenário estudado de acordo com a equação (35). Verifique quais corrente encontradas estão abaixo do limite máximo de corrente estabelecido.
- 8) Caso nenhuma corrente estiver abaixo do limite, nenhum PAC é um possível ponto ótimo, item 7). Caso contrário, os pontos de possível instalação são os que apresentaram corrente restritas ao limite, item 9).
- 9) Posicione o filtro no ponto em que resultou na menor corrente calculada no item 4). Minimizar a corrente de acordo com (62). Encontrando o valor de “ α ” ($0 \leq \alpha \leq 1$) pelo método de bissecção explicado na solução para corrente limitada, encontrando o erro do somatório com erro menor que $0,000001 \text{ pu}^2$.
- 10) Recalcule as tensões com a resposta obtida em 9). Retorne para o item 7).
- 11) Ordene as correntes calculadas no item 5) em ordem decrescente.
- 12) Ordene as possibilidades dos filtros calculadas no item 6), em ordem decrescente da soma total das correntes.
- 13) Utilize a combinação de filtro(s) com menor corrente.
- 18) Minimizar a função objetiva (13) de acordo com (14) e (15), verificando se os valores encontrados satisfazem a norma IEEE-519.
- 14) Caso os valores de THD e VL não satisfizerem a norma, item 15). Caso contrário item 18).

- 15) Atualize a lista de combinações de corrente(s) do(s) filtro(s), descartando a combinação utilizada.
- 16) Verifique se existe alguma combinação na lista do item 12). Caso sim, item 12). Caso contrário item 17).
- 17) Aumente o número de filtros utilizados. Caso o número máximo de filtros tenha sido alcançado, não há solução para as restrições de limite do número de filtro e de corrente impostas.
- 18) Armazene a localização encontrada.
- 19) Modifique a combinação de carga. Retorna para o item 4).

Analise as localizações encontradas e posicione os filtros na rede de distribuição.

O algoritmo proposto apresenta medição de tensão constante e apresenta simplificações, que reduzem a complexidade do algoritmo. Esses dois fatores permitem que o estudo da localização ótima implementado seja realizado em cenários dinâmicos. O estudo em cenários dinâmicos permite que o algoritmo também seja utilizado como controle cooperativo dos filtros em redes de distribuição.

3.5 Filtros Cooperativos

Filtro cooperativo é uma estratégia para redução de harmônicos em redes de distribuição, sendo sua estrutura composta por dois ou mais filtros ativos que atuam em cooperatividade para que os níveis de distorção harmônica na rede de distribuição satisfaçam os níveis recomendados pela norma IEEE-519 ou outras. Sendo seu controle o objeto de estudo nesse capítulo.

3.5.1 Por que Filtros Cooperativos?

O estudo de estruturas ativas cooperativas tem sido foco dos pesquisadores, porém há um questionamento se realmente são necessárias ou simplesmente é uma tendência. A primeira e mais barata alternativa para compensação da rede são os conhecidos bancos de capacitores, porém são estruturas mais utilizadas para correção local, ou seja, empregada em indústrias para corrigir o fator de potência exigido pelas concessionárias [39]. Antes de sua instalação, o banco de capacitores deve ser projetado cuidando para que não entre em ressonância com a rede elétrica, o que pode ser feito é utilizar reatores em série [40; 33]. Contudo, com a utilização de reatores aumentam o custo e requerem um trabalho mais preciso de engenheiros, sendo assim são estruturas não utilizadas para compensar harmônicos da rede de distribuição, pelo fato dessa ser muito variável.

Outra solução são os filtros passivos que são bem disseminados também em uso industrial para correção das distorções causadas pelas cargas [41]. São compostos por capacitores e indutores, o que os torna uma opção barata e eficiente para suprimir/absorver harmônicos [42]. Entretanto, dependem da impedância da rede o que os deixa sensíveis, variando a sintonia de acordo com as capacitâncias e indutâncias do sistema [41; 43; 44]. Como os parâmetros do filtro dependem da impedância para

determinar a ordem dos harmônicos a serem filtrados acabam sendo mal sintonizados. Além disso, assim como o banco de capacitores, também apresentam ressonância com a rede de distribuição, o que pode levar a instabilidade. Sendo assim, são estruturas que por necessitarem de cálculos muito precisos, são mais aconselhados para cenários estáticos.

Para evitar ressonâncias e comportamento dependente da impedância da rede distribuição surgem na década de 70 [17] os filtros ativos de potência. A utilização desses no sistema de potência é recente, e seu controle, diferente do implementado em filtros para utilização em cenários industriais que são baseados em corrente, opera com controle por detecção de tensão. Eles funcionam como resistores de baixa impedância fazendo que os harmônicos de tensão sejam reduzidos [39].

Contudo, em uma solução real para reduzir o nível de harmônicos da rede de distribuição para níveis estabelecidos pela norma, somente um filtro ativo não é o suficiente. Assim em um mesmo alimentador podem existir múltiplos filtros ativos. Como resultado há uma interferência mútua entre as estruturas, que podem, por consequência, compensar o sistema incorretamente. Ou seja, o controle independente das estruturas ativas pode não ser eficiente e efetivo para redução de harmônicos [39; 9].

Sendo assim, surgem os filtros cooperativos, que por operarem com o controle cooperativo, atuam no sistema sob qualquer cenário, com cargas dinâmicas e suscetibilidade de faltas [29]. Além de compensarem os harmônicos de forma eficiente e não entrarem em ressonância com o sistema de potência.

3.5.2 Controle cooperativo

O controle cooperativo de filtros foi introduzido por Jintakosonwit em [29]. O controle desses filtros é diferenciado, pois em uma rede distribuída, a potência é maior, comparada a potência de cargas isoladas a serem compensadas, além de existir o efeito *whack-a-mole*, em que uma indutância não intencional entra em ressonância com os harmônicos específicos que o filtro ativo está compensando [31].

O controle utiliza filtros por detecção de tensão combinados com uma comunicação de dados, que a partir de cálculos de THD, altera um ganho k_v dos filtros, assim se adequando as mudanças de carga que ocorrem no tempo. Porém ele não utilizou um algoritmo para determinação ótima de instalação dos filtros, e nem avalia todos os pontos em que a tensão esta distorcida, mas somente os pontos de distorção harmônica em que se encontram os filtros.

O controle cooperativo proposto nesse trabalho é uma modificação do algoritmo de localização de cargas variantes no tempo. O objetivo consiste em reduzir a distorção harmônica de tensão em todos os pontos da rede abaixo dos estabelecidos pela norma IEEE-519. Para isso, monitora constantemente as tensões nos diferentes pontos do barramento da rede de distribuição, combinado com um controle *online*, em que é determinada a corrente que deve ser injetada por cada filtro.

O controle cooperativo apresenta os seguintes passos:

- 1) Entrada dos dados de impedância do sistema.
- 2) Medição constante das tensões em todos os pontos do sistema, em que o PLL obtém constantemente as mudanças dos ângulos e a FFT janelada, a amplitude de cada harmônico.
- 3) Cálculo das correntes a serem injetadas pelos filtros posicionados na rede de distribuição, por (35). As correntes devem ser restringidas ao limite de corrente atribuído aos filtros.
- 4) Transformada inversa de Fourier (IFFT), para obtenção das correntes no tempo.

O algoritmo proposto para o controle cooperativo é para cenários dinâmicos. Para acompanhar a variação harmônica da rede as tensões devem ser medidas constantemente. Como a norma estabelece o nível de distorção harmônica total máxima em 5% e individual de 3%, o algoritmo recalcula as correntes somente quando o limite foi ultrapassado. Caso o cenário apresente distorção harmônica abaixo de 5% o filtro fica operante com corrente de compensação nula.

Como mencionado anteriormente, existe a possibilidade de coordenação dos filtros instalados, possibilitando a partir desse, organizar a operação dos filtros, dividindo potências, sobre/sub carregando um ou mais filtros, ou ainda deixar um ou mais filtros inoperantes.

3.6 Conclusões Parciais

Nessa seção foi demonstrado como localizar filtros em uma rede de distribuição, sendo que em um primeiro momento foi feita a formulação do problema e depois sua solução. A primeira solução apresenta a localização de filtros sem restrição de corrente. Com essa alternativa, poderiam resultar em correntes elevadas que impossibilitam a implementação prática.

Como segunda alternativa, é proposta uma solução com corrente com restrição, limitada. Em ambas as soluções foram estudados cenários estáticos. Como sabemos, a variação de cargas no tempo é constante, e esse estudo, apesar de ser efetivo para localizar filtros em uma situação, nas demais combinações de cargas pode não ser adequada.

Para solucionar os problemas apresentados nas soluções anteriores, foi proposta uma solução com corrente limitada e para diferentes combinações de cargas, ou seja, é estudado um algoritmo de localização ótima de filtros em redes de distribuição com comportamento dinâmico. Utilizando para a implementação equações simples para cálculo de corrente e localizando o filtro na solução com corrente mínima que atinja os requisitos da norma IEEE-519.

Na próxima seção é verificado se a localização é realmente efetiva e se as correntes encontradas pelo algoritmo de localização reduzem os níveis de THD aos limites esperados. As estruturas são chamadas de filtros cooperativos, visto que, uma vez que mais de um filtro está atuando na rede de distribuição, a corrente de um influencia no efeito do outro, precisando então que operarem em cooperação.

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo, serão apresentados os resultados de simulações e experimentais relativos aos estudos de localização e operação cooperativa de filtros ativos *Shunt*. As análises foram realizadas utilizando-se um modelo simplificado de uma rede de distribuição, representado por 3 segmentos, cujos parâmetros foram determinados a partir das características nominais de cabos reais utilizados em sistemas de distribuição. O circuito, ou sistema reduzido, foi dimensionado de modo a permitir sua reprodução real em laboratório, permitindo a realização das análises experimentais. Foram utilizados dois filtros ativos de potência e duas cargas não lineares controladas, acoplados ao modelo simplificado da rede.

4.1 Obtenção do modelo do Circuito de Potência Distribuído

O modelo para simulação da rede de distribuição normalmente utiliza parâmetros distribuídos para representação, no entanto, de forma bastante aproximada, pode-se fazer uso de representações a parâmetros concentrados, conforme indicado em[29].

A rede de distribuição brasileira tem normas reguladoras para os cabos que devem ser utilizados. A NBR 7270 determina que os condutores devem ser de alumínio nu com alma de aço (CAA), Figura 15. Para tornar o modelo simplificado da rede de distribuição mais próximo das características físicas de uma rede real, buscou-se reproduzir segmentos de 1 Km de rede, com parâmetros concentrado, determinados a partir de dados de um condutor típico usado em redes de distribuição, cabo LINNET 336MCM. As informações nominais desse condutor foram fornecidas pela empresa Energisa.



Figura 15 – Cabo de alumínio nu com alma de aço (CAA).

Definido o cabo pode-se chegar a especificações como:

- Reatância Indutiva de seqüência zero (Z_z): 2,14685 (Ω /km);
- Reatância Indutiva de seqüência positiva (Z_p): 0,379327 (Ω /km);

Utilizando somente indutores e resistores definidos pelas características do cabo, chega-se a uma boa representação para a rede de distribuição, e facilita a simplificação matemática [45]. A partir dos dados do cabo foi obtida a indutância mútua para um quilometro de extensão de linha, conforme desenvolvimento indicado a seguir.

Sendo Z_m , reatância mútua por fase, calculada a partir da reatância de seqüência zero e seqüência positiva, dado por (73),

$$Z_m = \frac{Z_z + Z_p}{3} \quad (73)$$

Substituindo os valores apresentados pelo cabo,

$$Z_m = \frac{2,14685 + 0,379327}{3} \quad (74)$$

Assim, $Z_m = 0,589167 \Omega/Km$

Para obter a indutância utiliza-se (75) ou (76).

$$Z = 2\pi fL \quad (75)$$

Reorganizando,

$$L = \frac{Z}{2\pi f} \quad (76)$$

Assim a indutância mútua por fase resulta em,

$$L_m = \frac{0,589167}{2\pi 60} = 0,0015 H/Km.$$

A partir de (77) é possível calcular a auto-reatância por fase.

$$Z_s = \frac{2Z_p - Z_z}{3} \quad (77)$$

Substituindo os valores apresentados pelo cabo,

$$Z_s = \frac{2 * 0,379327 - 2,14685}{3} = 0,9685 \Omega/Km$$

A auto-indutância calculada por (76) resulta em,

$$L_s = \frac{0,9685}{2\pi 60} = 0,00257 \text{ H/Km}$$

Esses parâmetros são utilizados no circuito de potência distribuído para representar segmento da rede de distribuição.

4.2 Simulações

A simulação da rede de distribuída, Figura 16, foi feita na ferramenta Matlab/Simulink usando segmentos de linha representados por indutores e resistores, quatro cargas não-lineares e um banco de capacitores. O sistema considerado é trifásico e simétrico.

As cargas instaladas possuem potência máxima de 1kW e o banco de capacitores é de 0,47uF.

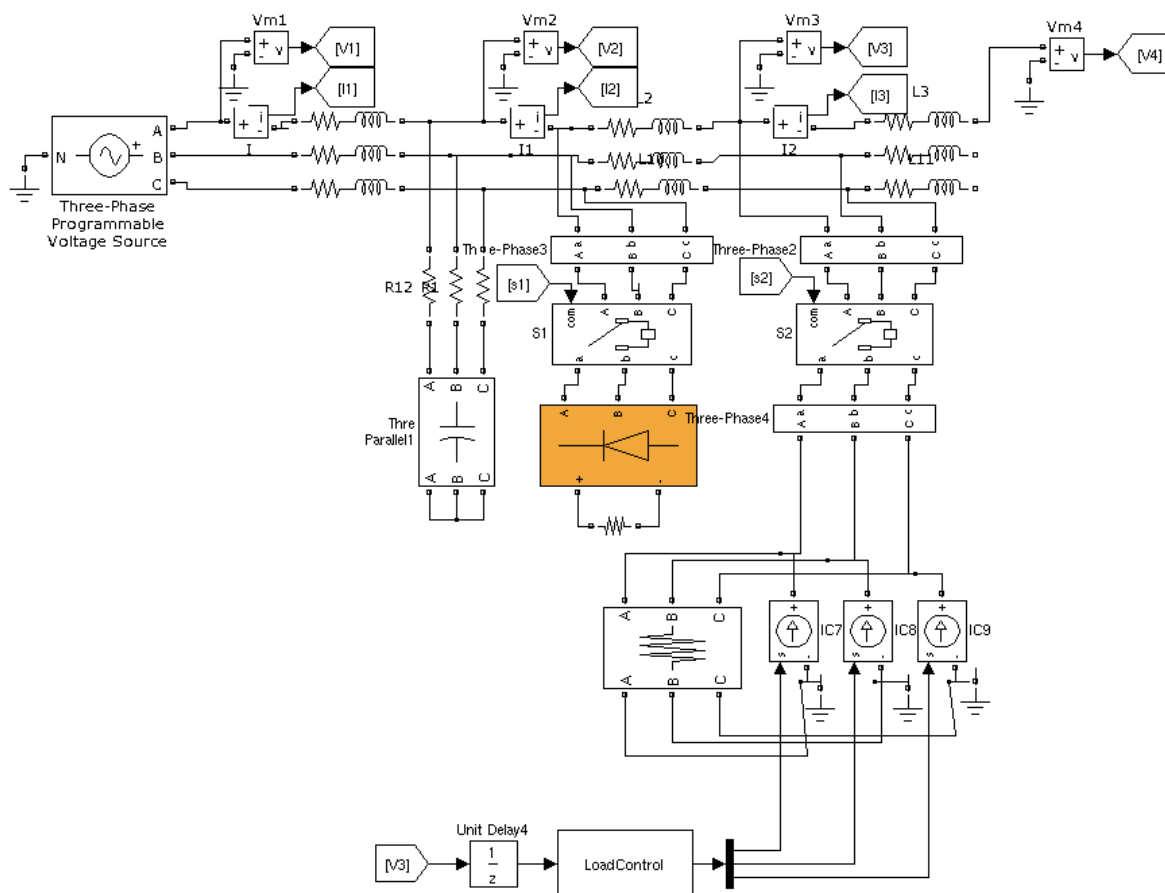


Figura 16–Diagrama de blocos do sistema simulado indicando a localização das cargas (acionadas por S1-retificada e S2-fonte controlada IC7,8,9), instrumentação (Vm1,2,3,4) e banco de capacitores.

No circuito, as indutâncias e resistências representam os segmentos de linha. Esses segmentos são representados pela variável “z” no algoritmo. Os harmônicos de corrente injetados na rede, provocam distorções nas tensões. Essas tensões distorcidas são lidas pelos voltímetros “Vm”, e após processadas, fornecem os dados de distorção harmônica de tensão para o algoritmo. Os pontos em que estão os voltímetros são os pontos em que é possível instalar filtro, com exceção do V₁. Um circuito simplificado é apresentado na Figura 17.

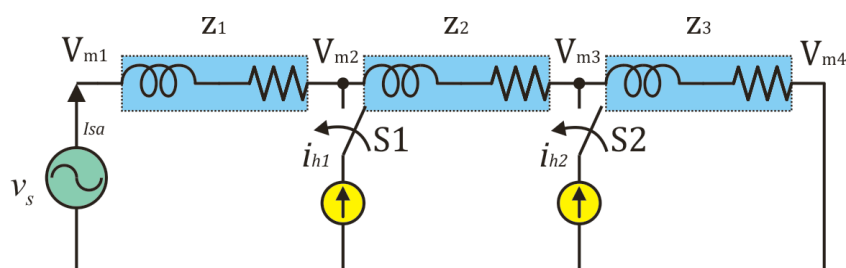


Figura 17– Circuito equivalente simulado.

Neste modelo, “ i_{h1} ” e “ i_{h2} ”, representam as duas cargas não-lineares (retificador e carga controlada), as chaves S_1 e S_2 , conectam as cargas a rede de acordo com a mudança de cenários (carga 1, carga 1 e 2, carga 2), “ v_s ” representa a fonte (3 fios, simétrica, equilibrada) e as resistências e indutâncias “z”, representam os segmentos da rede de distribuição.

O circuito proposto é a base para o algoritmo de localização, a partir dos dados obtidos dele é realizado um desenvolvimento matemático resultando na localização ótima do(s) filtro(s). O desenvolvimento pode ser visto no Anexo B.

4.2.1 Localização

Na simulação realizada com o algoritmo de localização do(s) filtro(s) ativo(s), utilizou-se os dados de indutância, calculados a partir das informações do cabo LINNET 336M. Valores de impedância foram calculados para todas as frequências, fundamental e harmônicas, consideradas na execução do algoritmo de localização. Em conjunto com a reatância indutiva foi somada uma resistência de 1Ω .

A ordem de harmônicos considerada para os cálculos foi de $H=7$. O número de PACS foi $N=4$, pois se considerou a conexão fonte e primeira impedância V1. O número máximo de pontos para possível instalação do filtro foi $M=3$. O número máximo de filtros foi $Q=2$.

A aquisição dos valores de distorção harmônica de tensão foi realizada com blocos condicionadores do Simulink. Os cálculos de posicionamento consideraram 2^n combinações de cargas. A ativação das cargas foi feito de acordo com a combinação binária como explicado no passo 3 do algoritmo para cargas variantes no tempo. Na tabela 3 são indicados os 4 cenários de carga avaliados.

No cenário 0 não há cargas acionadas, assim, a potência é zero. Já para 1, a carga está acionada com sua potência máxima. Considera-se S1 o acionamento da carga 1 e S2 o acionamento da carga 2. A combinação resultou na variação de corrente da fonte “ I_{sa} ”,

referente a Figura 17, mostrada na Figura 18. No intervalo de $t=0$ a $t=250\text{ms}$ não há cargas conectadas, sendo a corrente provocada somente pelas impedâncias do circuito. Em $t=250\text{ms}$, uma carga não linear é conectada, causando um pico de corrente, que depois é estabilizado. Na condição de regime permanente é possível observar a distorção harmônica causada pela carga. Em $t=500\text{ms}$, outra carga não linear é conectada. Resultando em mais um pico de corrente e aumentando o nível de distorção harmônica, assim como a amplitude da corrente. Em $t=750\text{ms}$, uma das cargas é retirada. Nesse caso não há pico de corrente, porém houve redução da amplitude e da distorção harmônica.

Tabela 3 – Combinação de acionamento de Cargas.

	S1	S2
Cenário 0	0	0
Cenário 1	1	0
Cenário 2	1	1
Cenário 3	0	1

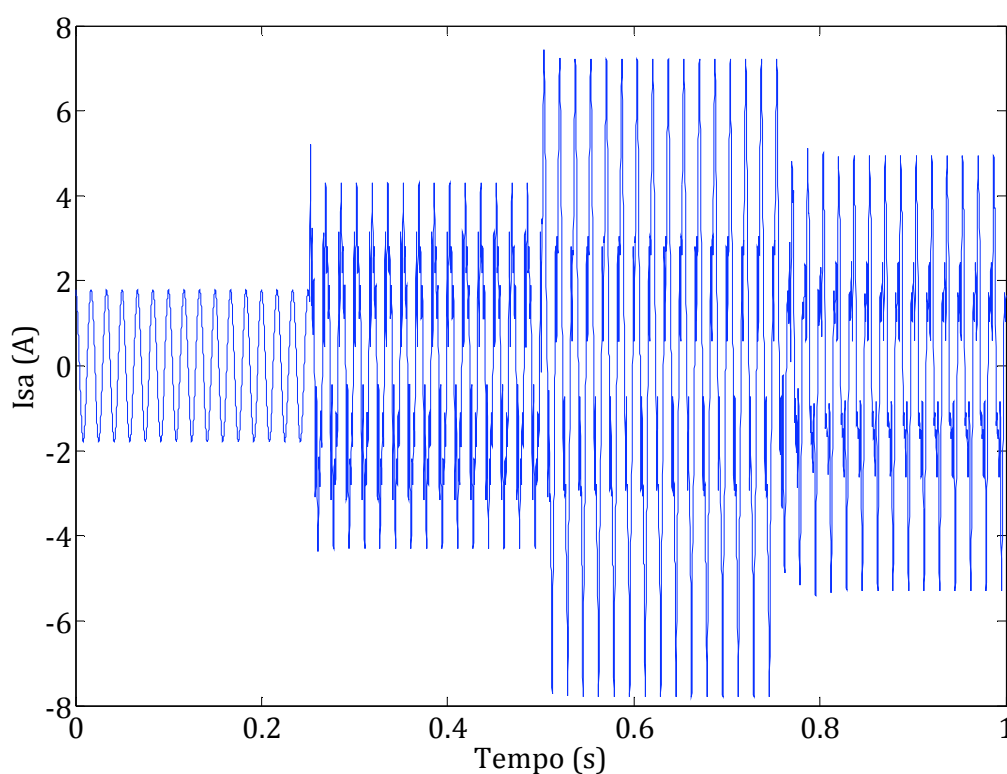


Figura 18– Corrente da Fonte com mudança na carga.

Para cada cenário é preciso solucionar a localização a partir do algoritmo. O objetivo é reduzir a distorção harmônica de tensão. Os pontos ótimos para cada combinação de carga são apresentados na Tabela 4. São apresentados dois pontos para a instalação dos filtros. Contudo, dependendo do nível de distorção harmônica não são necessários dois compensadores. Nesses casos, o resultado apresenta somente um ponto ótimo para alocação.

Tabela 4 – Cenários x Pontos Ótimos.

	Ponto(s) de instalação	
Cenário 0	-	-
Cenário 1	-	4
Cenário 2	3	4
Cenário 3	-	4

No cenário 0, percebe-se que não houve ponto de instalação para filtros, pois o nível de THD apresentado foi abaixo de 5%, ou seja, mesmo sem filtros os níveis estabelecidos pela IEEE-519 foram atendidos. Para o cenário 1, 2 e 3, o ponto de instalação com menor esforço para que o filtro atinja níveis de distorção harmônica menor que 5% foi o 4. Sendo que no cenário 2, também é necessária a instalação do segundo filtro, no ponto 3. Pode-se observar que o ponto ótimo para a instalação dos filtros não corresponde aos pontos em que as cargas estão instaladas.

Para melhor representar a localização dos filtros em relação a carga pode-se observar a Figura 19. Foram localizados dois compensadores para os cenários estudados, entretanto, no cenário 0 não há necessidade de filtro, nos cenários 1 a 3 é necessário filtro no ponto “Vm4” e somente no cenário 2 que necessita mais um filtro no ponto “Vm3”. Portanto, para representar que os filtros podem injetar ou não compensação de corrente dependendo do cenário, a linha dos compensadores foi representada pontilhada.

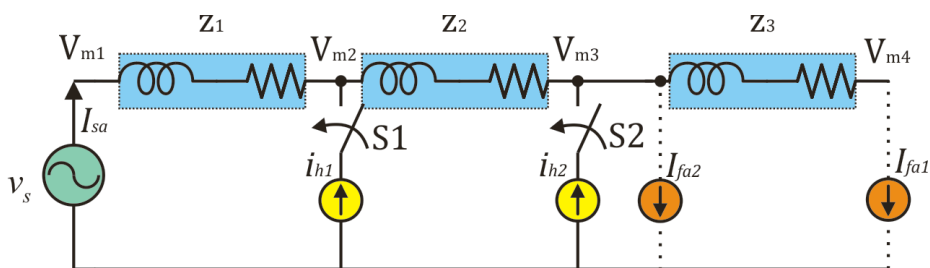


Figura 19– Circuito equivalente simulado, representando em amarelo as cargas e em laranja a localização dos filtros.

Calculados os pontos ótimos é necessário verificar se os níveis de distorção harmônica realmente foram reduzidos. Essa verificação ocorre com a instalação dos filtros nos pontos indicados e de injeção das correntes definidas pelo algoritmo de localização. Percebe-se no cenário 2 a necessidade de 2 filtros atuando conjuntamente, onde cada um deverá injetar na rede componentes harmônicas de corrente, contribuindo para uma compensação cooperativa.

4.2.2 Operação Cooperativa

A operação cooperativa pressupõe o controle e a coordenação das correntes injetadas pelos filtros. O algoritmo de controle cooperativo é baseado no algoritmo de

localização, apresentado no capítulo anterior. Portanto, as correntes de compensação são as mesmas e os pontos de conexão dos filtros foram os pontos obtidos pelo algoritmo.

A operação cooperativa tem a intenção de confirmar que os locais encontrados pela localização são ótimos e as correntes calculadas foram as mínimas necessárias para satisfazer os critérios da norma IEEE-519.

O filtro simulado está representado na Figura 20. O filtro shunt é simulado através de uma fonte de corrente controlada.

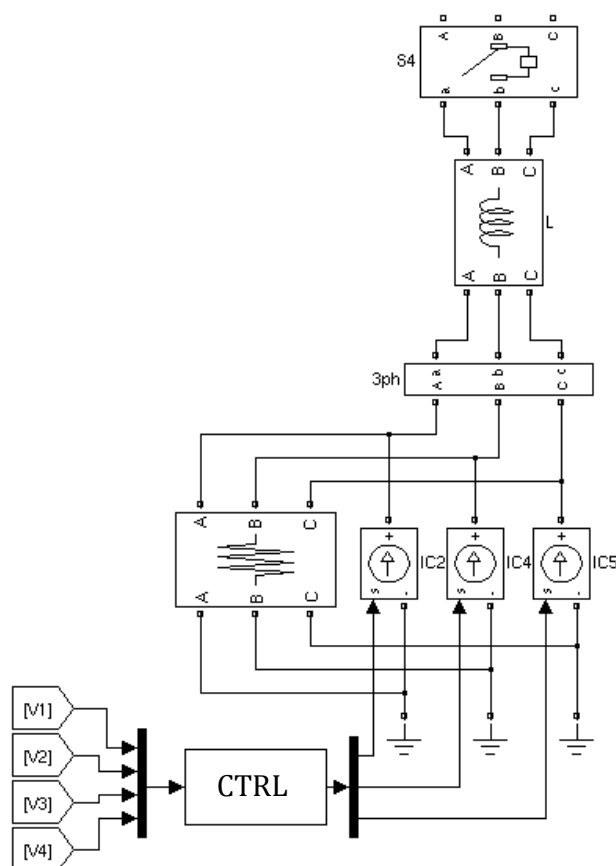


Figura 20– Diagrama de blocos do Filtro Ativo simulado. V1,2,3,4 representam as entradas do controle. CTRL é o bloco de controle. IC2,4,5 são fontes de corrente controladas.

O filtro simulado possui 4 entradas, que são os quatro pontos de tensão medidos na rede, sendo que, diferente da localização do filtro que a partir das tensões medidas define a posição de instalação, no controle a posição já está determinada e são calculadas somente as correntes a serem injetadas. Salientando que as correntes serão recalculadas somente quando o nível de distorção harmônica for maior que os limites estabelecidos pela norma.

O bloco CTRL é a unidade de controle das fontes de corrente. O controle realiza os cálculos das correntes necessárias para cada combinação de carga que ocorra no circuito de potência distribuído. No caso de mais de um filtro instalado, cada compensador terá seu controle de injeção de corrente.

A corrente calculada é imposta nas fontes de corrente controladas, que por sua vez, injetam as correntes na rede. Com as correntes calculadas é possível reduzir o nível de

distorção harmônica de tensão, resultante das cargas não-lineares. Lembrando que, assim como nos filtros paralelos, o acoplamento com a rede foi feito com indutores.

Na Figura 21 a corrente do filtro 1, “Ifa1” representada na Figura 19, é apresentada. Ela variou de acordo com a mudança da corrente de carga apresentada na Figura 18. No primeiro estágio não houve injeção de corrente, pois sem cargas acionadas o nível de THD ficou abaixo de 5%. A partir de $t=250\text{ms}$ houve injeção de corrente, que apresenta a forma de onda ampliada. A forma de onda da corrente é muito semelhante com as correntes compensadoras apresentadas por outras estratégias de controle de compensadores. Nos demais estágios a forma de onda da corrente é muito semelhante, pois as cargas são do mesmo tipo, ou seja, apresentam as mesmas ordens de harmônicos. Porém a amplitude dos harmônicos variou com a variação da carga.

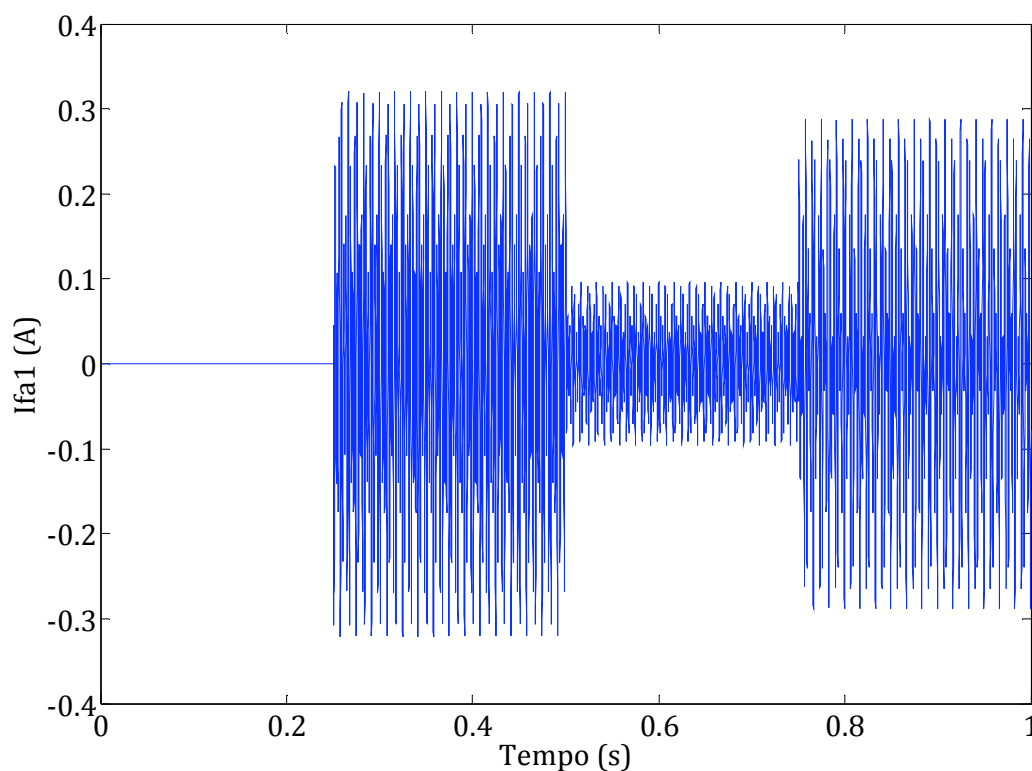


Figura 21– Corrente do Filtro com mudança na carga.

A corrente do filtro é imposta de acordo com os cálculos de THD realizados com os dados coletados nos pontos possíveis de acoplamento. O valor da THD é calculado a partir de (16) baseado nos dados de amplitude de tensão obtidos com uma FFT janelada. A janela tem o tamanho de um ciclo da rede, considerando a frequência nominal de 60Hz. A taxa de amostragem é de 10kHz.

A Figura 21 mostra as correntes que foram obtidas pelo algoritmo da localização, em regime permanente, portanto não corrigem picos da mudança de corrente. Como o controlador/supervisor que vai controlar as correntes de referência dos filtros ainda não

está implementado, nesse caso, a variação de corrente ocorre em instantes pré-determinados, de acordo com a introdução/retirada de carga(s).

Na Figura 22 é apresentada a corrente do Filtro 2, , “Ifa1” representada na Figura 19, que atua somente quando as duas cargas estão acionadas. A corrente começa a ser injetada em $t=0.5$ s. Com os dois filtros injetando corrente de compensação é possível reduzir os níveis de THD para os estabelecidos pela norma IEEE-519.

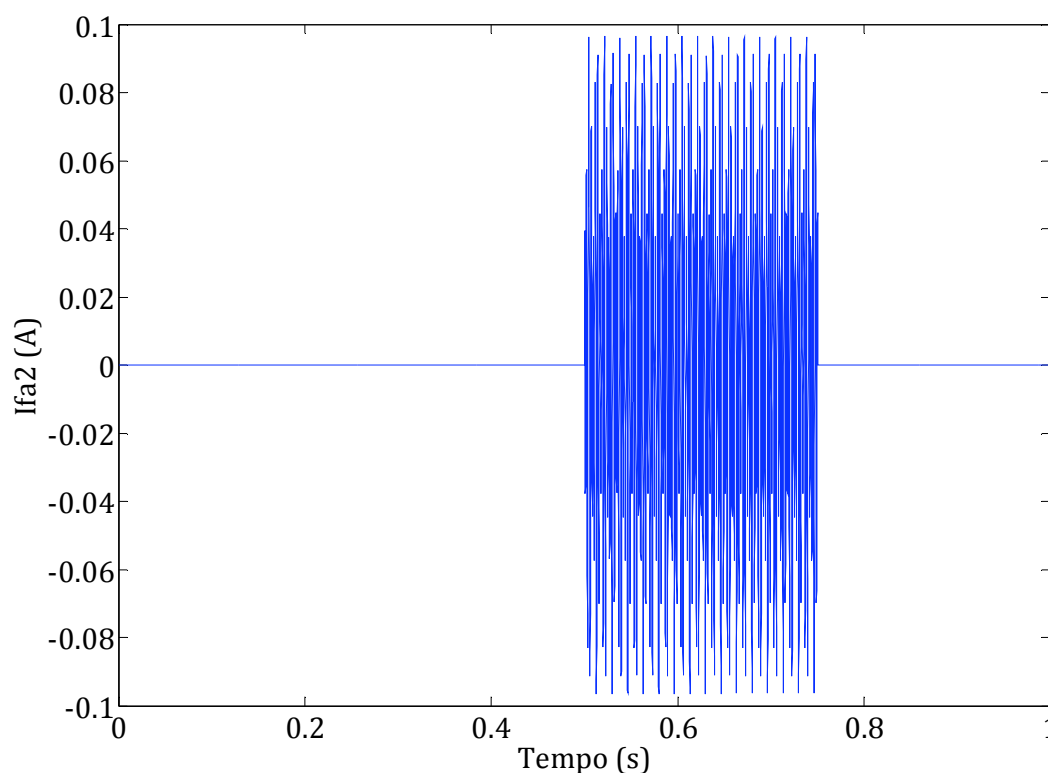


Figura 22– Corrente do Filtro com mudança na carga.

Nas figuras a seguir são mostradas as tensões antes e depois da instalação do(s) filtro(s) no circuito de potência e seus respectivos níveis de THD, os gráfico de VL que satisfazem a norma não são apresentados, somente são mostrados quando a norma não é satisfeita. Em cada figura, a parte superior representa a tensão antes da instalação do filtro e, a parte inferior a tensão compensada com as correntes de compensação do(s) filtro(s).

Nas figuras a serem apresentadas é possível observar que para cada cenário há um tempo inicial diferente, pois as tensões foram avaliadas em um cenário dinâmico. Ou seja, as cargas no circuito de potência variam em instantes pré-determinados resultando em variação nos harmônicos de tensão. Para cada variação de carga, o algoritmo redefiniu as correntes de cada filtro para compensação do cenário e redução do nível de THD e VL.

Na Figura 23, na Figura 24 e na Figura 25 são apresentadas as tensões para todos os pontos da rede de distribuição antes e depois do filtro, que foi instalado no ponto 4.

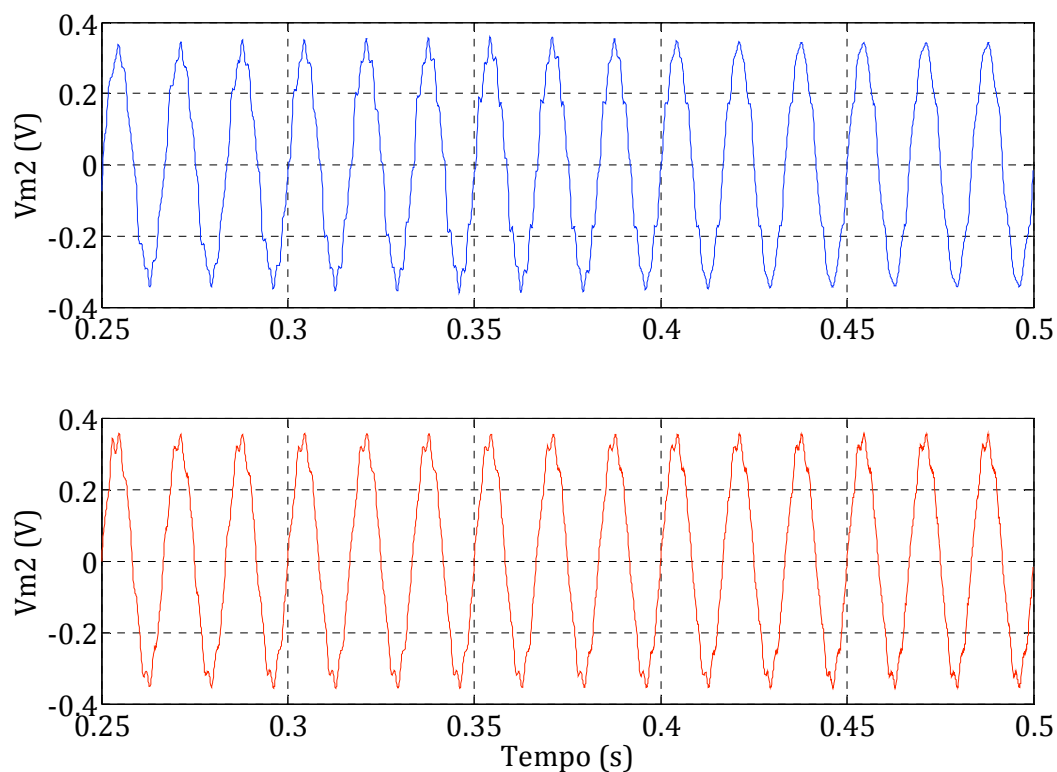


Figura 23–Tensão do cenário 1 no ponto 2 antes da instalação do filtro (gráfico superior) depois da instalação do filtro no ponto 4 (gráfico inferior).

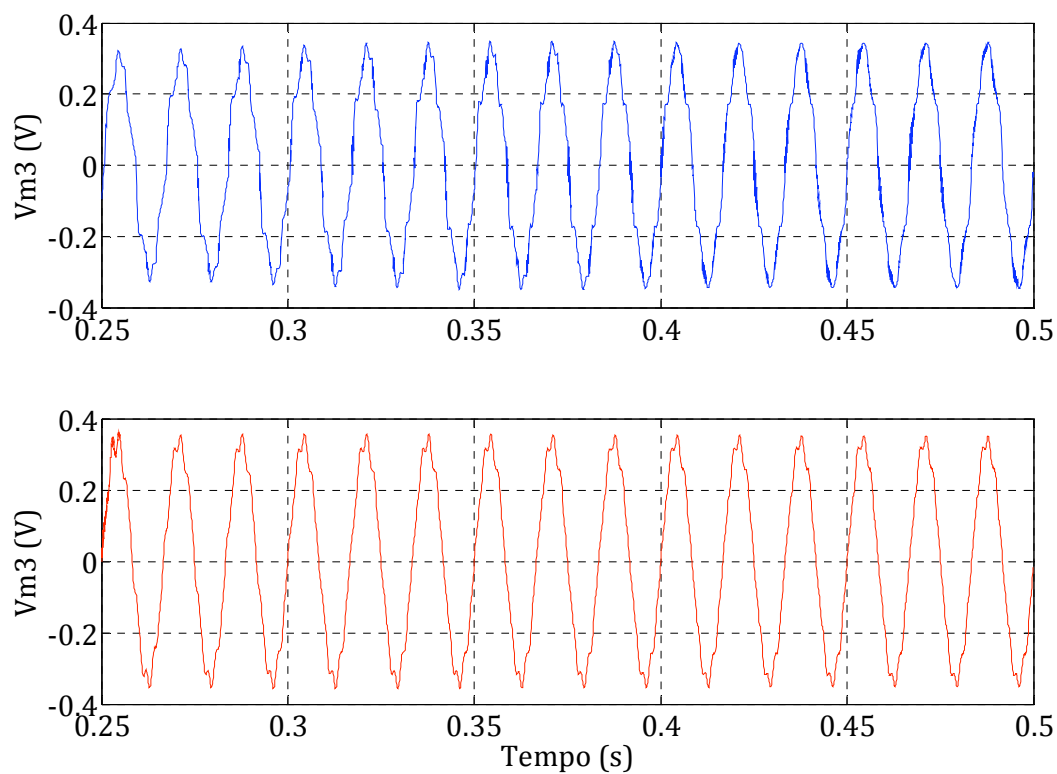


Figura 24– Tensão do cenário 1 no ponto 3 antes da instalação do filtro (gráfico superior) depois da instalação do filtro no ponto 4 (gráfico inferior).

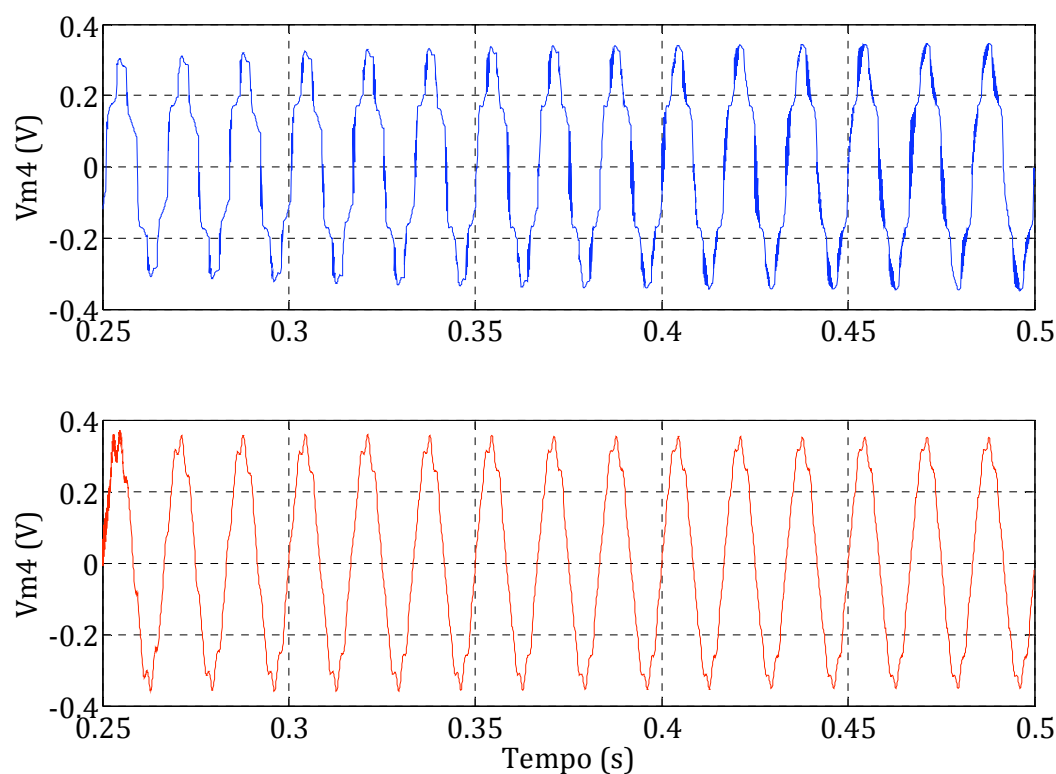


Figura 25– Tensão do cenário 1 no ponto 4 antes da instalação do filtro (gráfico superior) depois da instalação do filtro no ponto 4 (gráfico inferior).

Analisando as tensões depois da instalação dos compensadores percebe-se que as formas de onda não são perfeitamente senoidais, apresentando algumas deformações nos picos. Contudo, apresentam melhorias em relação as curvas antes da instalação do filtro. Esses gráficos com corrente de compensação eram esperados, pois se pretende reduzir a THD e VL e não zerar os harmônicos. Essa estratégia permite que a norma seja satisfeita e que os filtros operem com menor esforço/potência, ou seja, corrente mínima.

Na Figura 26 é mostrado o nível de THD do cenário 1. A THD é calculada de acordo com (16). A partir de $t=250$ ms, como foi mostrada nas Figura 23, 23 e 24, o nível de THD aumenta com a ativação da carga não linear, através do fechamento de S_1 . Na Figura 26 observa-se o nível de THD em 6,5%, com a mínima corrente injetada no ponto V4 já é possível reduzir o nível de distorção de tensão para menos de 3% em todos os pontos.

Na Figura 27, na Figura 28 e na Figura 29 são apresentadas as tensões para todos os pontos da rede de distribuição antes e depois do filtro, que foi instalado no ponto 4.

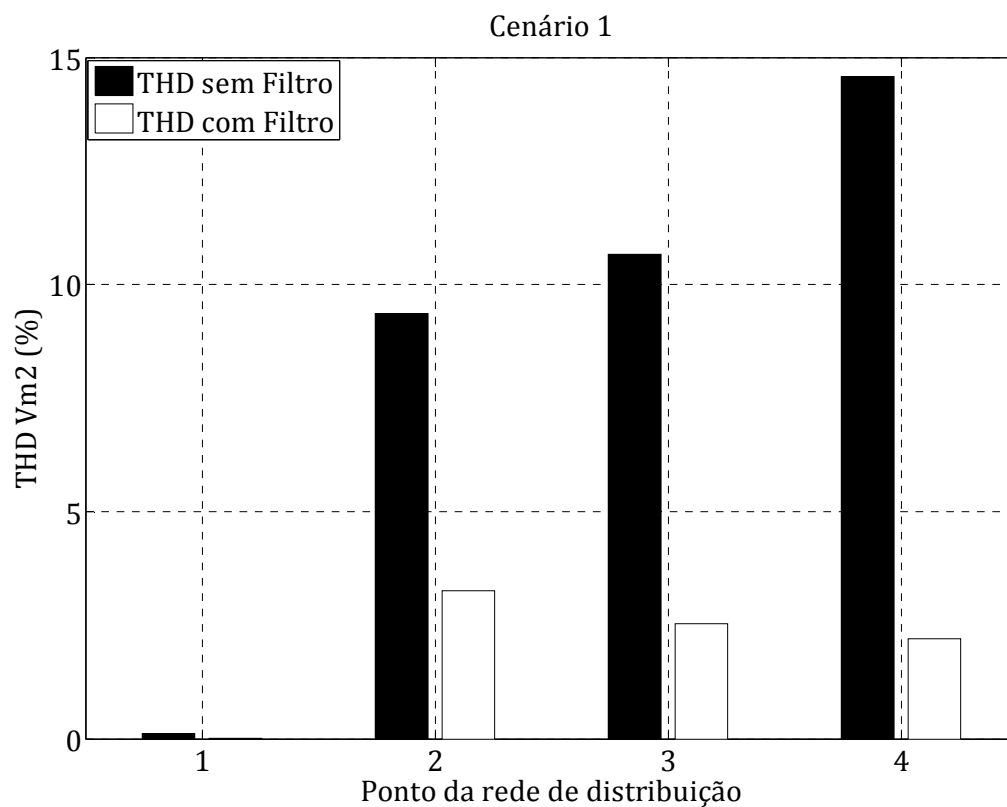


Figura 26–Nível de THD do cenário 1 antes e depois da instalação do filtro.

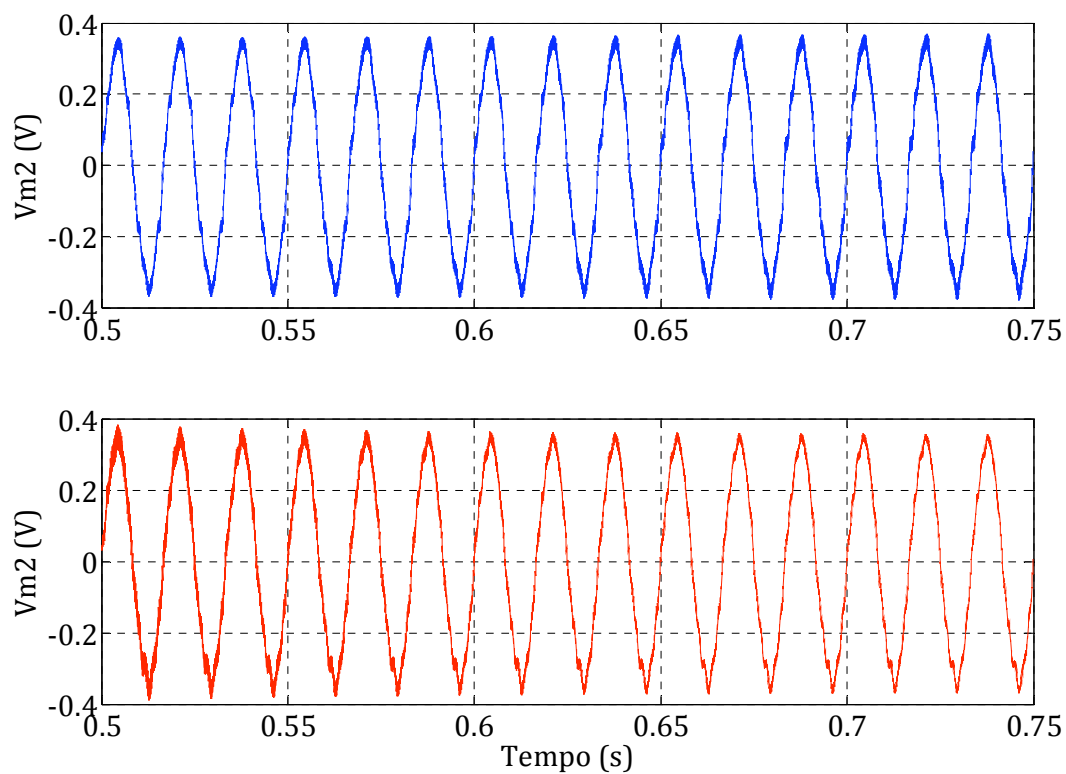


Figura 27– Tensão do cenário 2 no ponto 2 antes da instalação do filtro (gráfico superior) depois da instalação dos filtros nos pontos 3 e 4 (gráfico inferior).

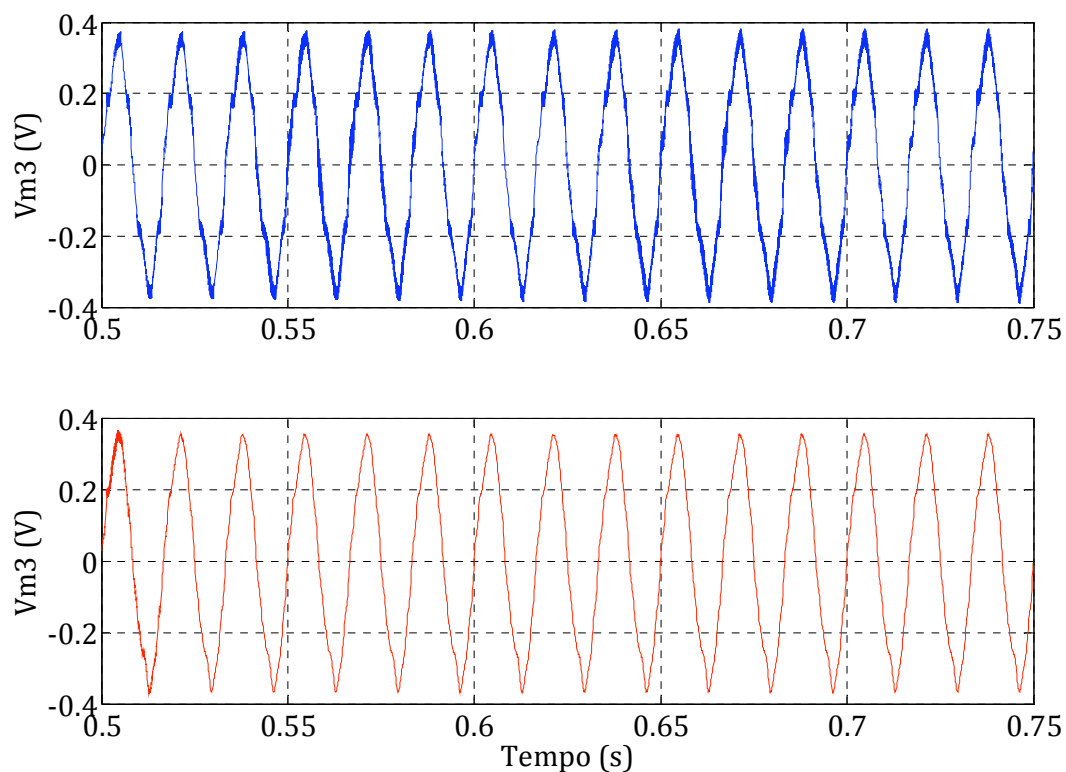


Figura 28– Tensão do cenário 2 no ponto 3 antes da instalação do filtro (gráfico superior) depois da instalação dos filtros nos pontos 3 e 4 (gráfico inferior).

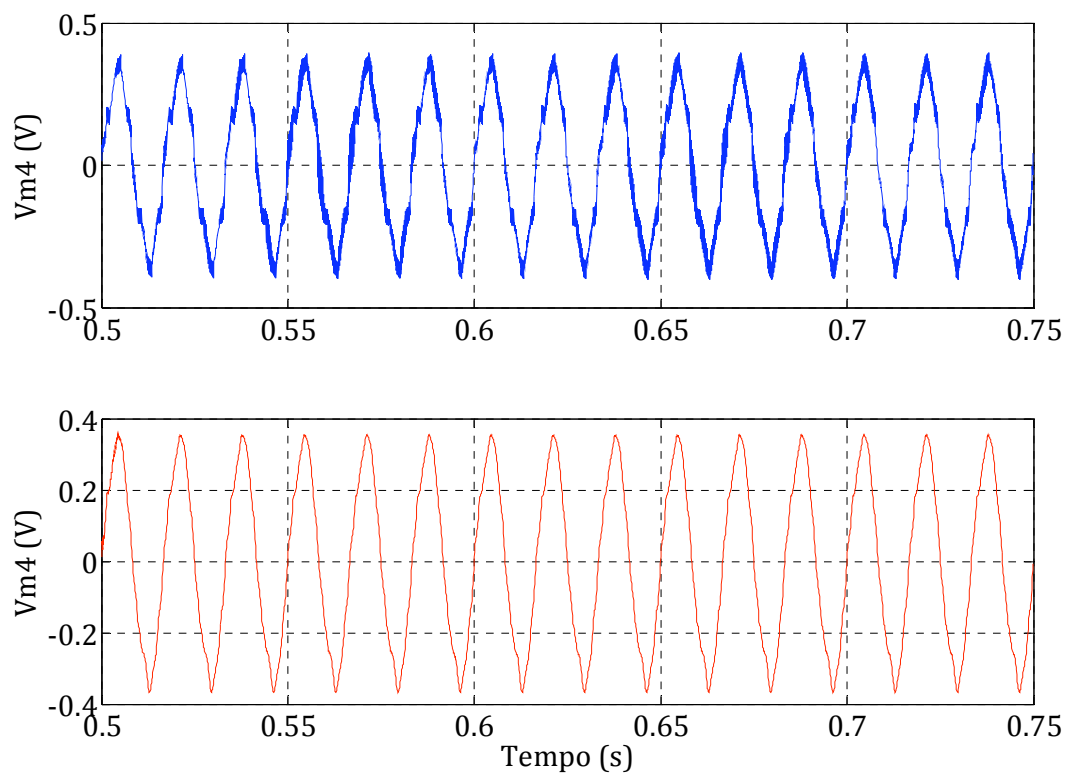


Figura 29– Tensão do cenário 2 no ponto 4 antes da instalação do filtro (gráfico superior) depois da instalação dos filtros nos pontos 3 e 4 (gráfico inferior).

Na Figura 30 é mostrado o perfil de THD para o cenário 2. Nesse cenário são acionadas uma carga formada por um retificador não controlado e uma carga não linear controlada. O instante em que essas cargas foram acionadas está compreendido entre $t=500$ ms e $t=750$ ms. O nível de THD está em aproximadamente 6,5% em V2, e 8,5% em V3 e V4. Com a instalação de uma filtro não foi possível reduzir os níveis de THD para satisfazer a norma, portanto foram instalados dois filtros. E assim, como mostra a figura, os níveis foram reduzidos para uma média de 2,5%.

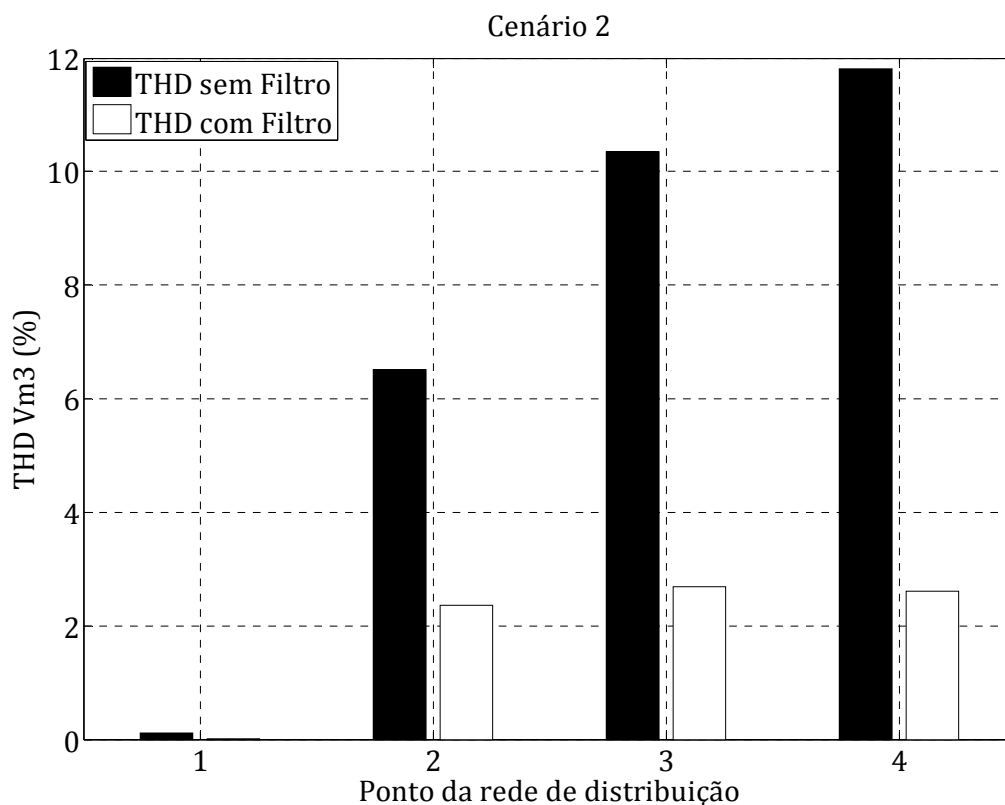


Figura 30- Nível de THD do cenário 2 antes e depois da instalação dos 2 filtros.

Na Figura 31, na Figura 32 e na Figura 33 são apresentadas as tensões para todos os pontos da rede de distribuição antes e depois do filtro, que foi instalado no ponto 4.

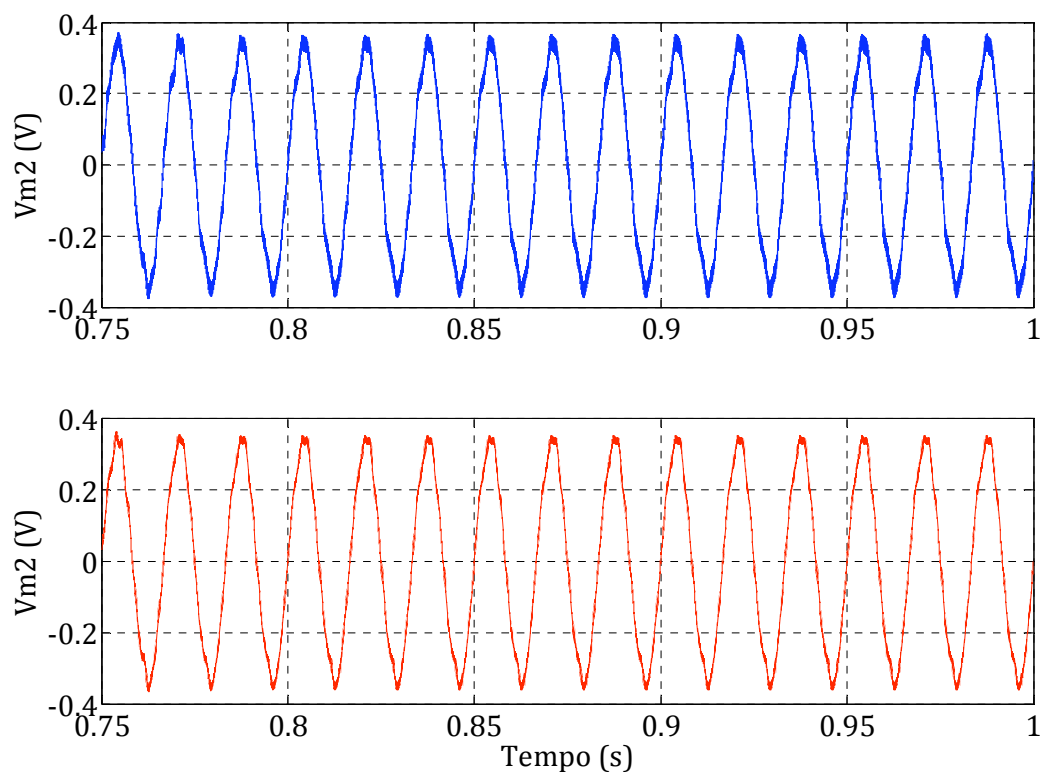


Figura 31– Tensão do cenário 3 no ponto 2 antes da instalação do filtro (gráfico superior) depois da instalação do filtro no ponto 4 (gráfico inferior).

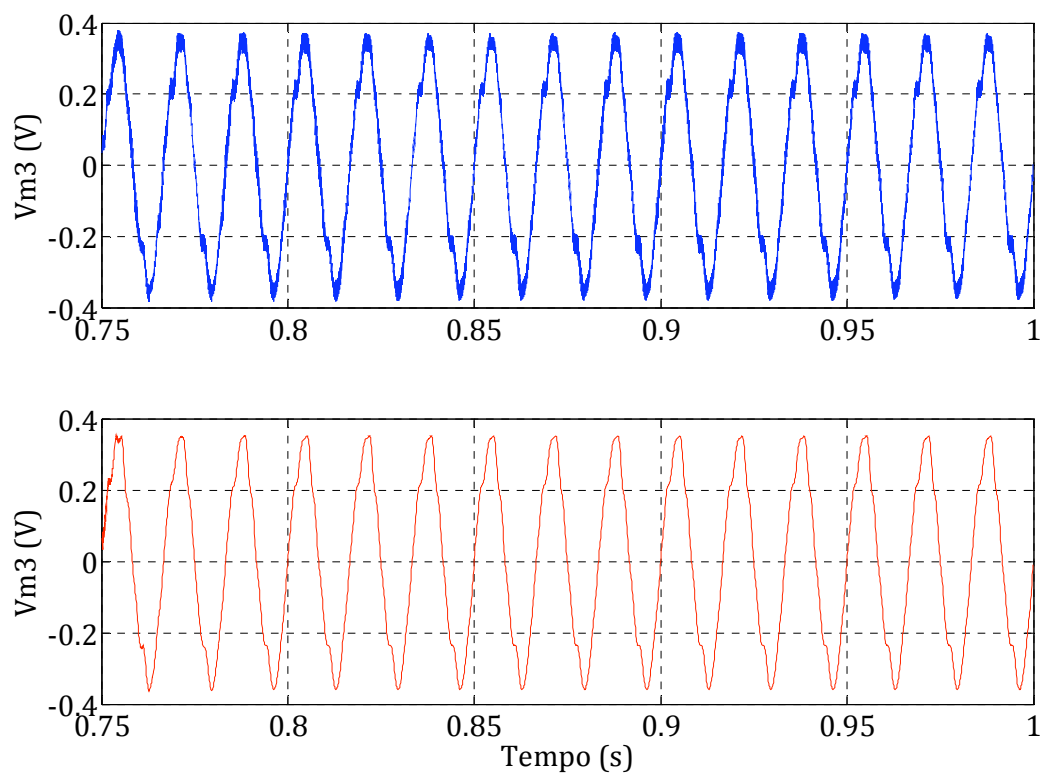


Figura 32– Tensão do cenário 3 no ponto 3 antes da instalação do filtro (gráfico superior) depois da instalação do filtro no ponto 4 (gráfico inferior).

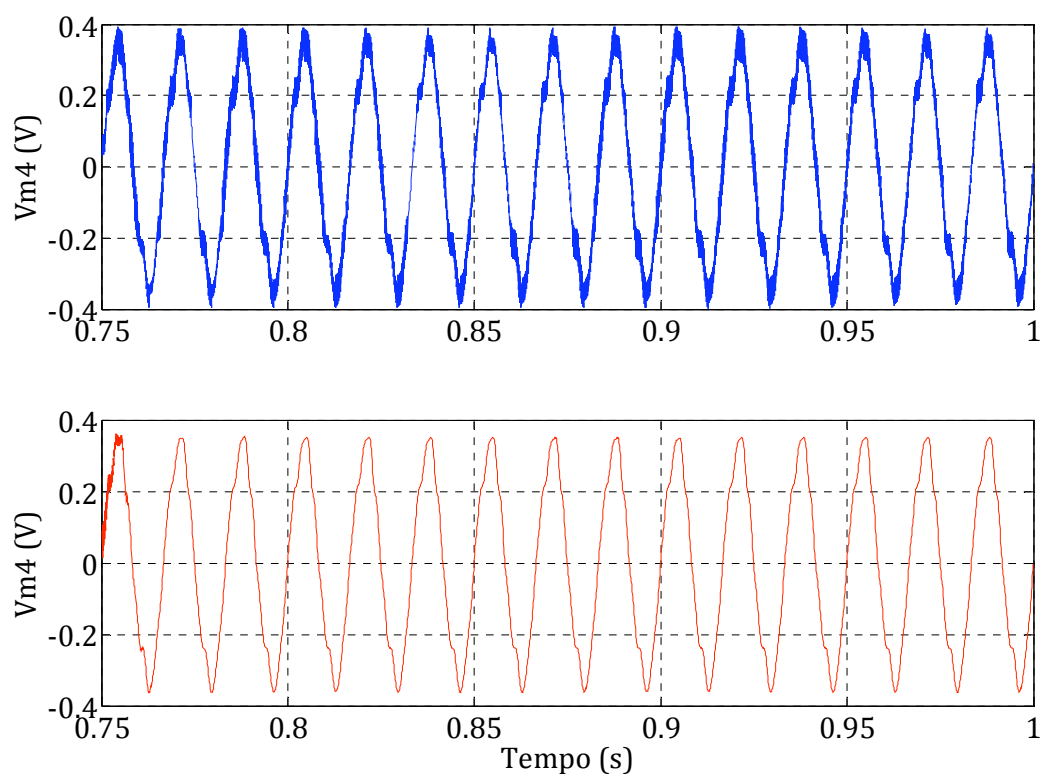


Figura 33– Tensão do cenário 3 no ponto 4 antes da instalação do filtro (gráfico superior) depois da instalação do filtro no ponto 4 (gráfico inferior).

O perfil de THD para o cenário 3 é mostrado na Figura 34. Este cenário é observado a partir de $t=750$ ms. Nesse cenário somente a carga não-linear controlada está acionada. Observa-se que os níveis de THD são semelhantes aos níveis do cenário 2. Entretanto, os níveis de cada harmônico são diferentes, assim como as correntes de compensação. Nesse caso, um compensador é suficiente para que os níveis de THD sejam reduzidos para satisfazer a norma. Sendo os níveis de THD de 6,5% em V2, e 8,5% em V3 e V4 reduzidos para 2,5% em V2 e 4% em V3 e V4.

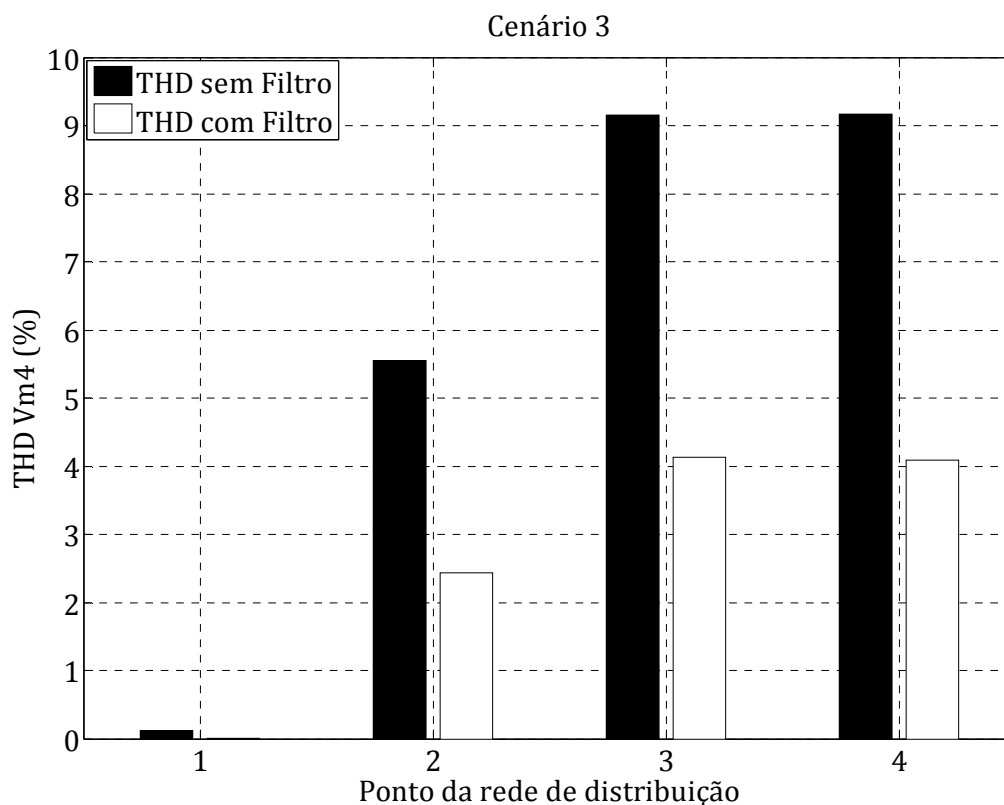


Figura 34– Nível de THD do cenário 3 antes e depois da instalação do filtro.

4.3 Resultados Práticos

A plataforma de teste é um circuito de potência que representa um modelo simplificado de uma rede de distribuição. O circuito é composto por três segmentos de linha, um banco de capacitores, duas cargas não-lineares e dois filtros ativos de potência operando de forma cooperativa.

Os segmentos de linha são representados por indutores de 2mH com resistência de 1 Ω . O banco de capacitores com capacitância de 47 μ F. Uma carga é um retificador não controlado conectado a um resistor de 75 Ω e a outra carga, é uma carga controlada, configurada para se comportar como uma carga não linear. Esta carga foi configurada com um fator de crista de 2 e um fator de potência de 0.8.

Os filtros ativos são acoplados com a rede por indutores de 2.6mH e capacitores entre fases de 100nF. São implementados com conversores de potência Semikron SKS-25-B6U+(B2CI)2-10V09, drives de acionamento Semikron SKHI-22, controlados pelo microprocessador DSP 320TMS28F335.

No DSP estão implementadas as malhas de controle, responsáveis pela regulação da tensão do barramento e das correntes de compensação dos filtros. Assim como na malha de controle apresentada na Figura 10 em que referências em conjunto com controladores controlam, o barramento e correntes de compensação, foi implementado para o filtro estudado uma estratégia, que utiliza IFFT, considera o sistema simétrico, portanto a partir

de uma fase as demais são calculadas e controlador de dupla-seqüência, conforme a Figura 35.

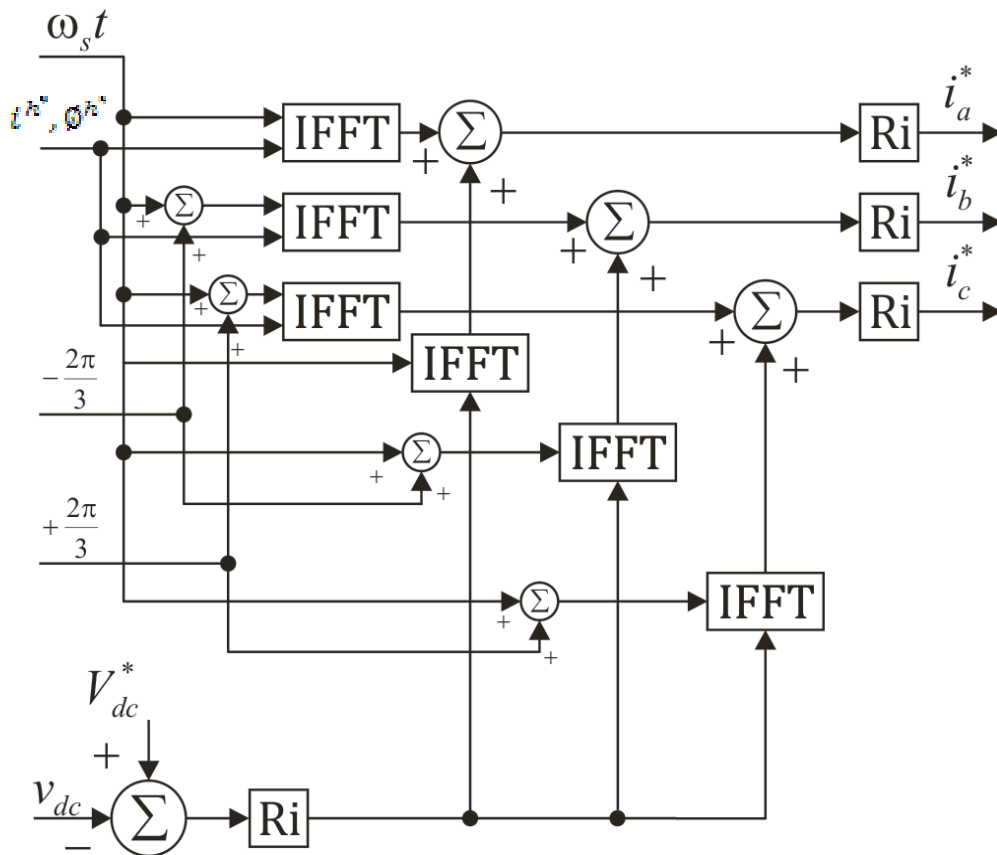


Figura 35 – Diagrama de blocos do controle cooperativo.

A tensão de barramento foi definida em 250V e as correntes de referência foram definidas pelo algoritmo de localização. O controlador, Ri, utilizado foi o controlador de dupla seqüência proposto por Jacobina [46]. O bloco IFFT é a Transformada Rápida de Fourier Inversa (20).

Foram estudados três cenários de cargas para avaliar se o algoritmo permite adequar os níveis de correntes aos níveis necessários de compensação. O primeiro cenário a carga retificador não controlado é acionada. No segundo cenário a carga retificadora não controlada e a carga controlada não linear são acionadas. No terceiro e último cenário a carga controlada não linear é acionada.

Os resultados para cada cenário são apresentados a seguir. Sendo apresentados os gráficos das tensões e os níveis de THD de todos os pontos antes e depois da instalação do filtro, gráficos do nível de VL são apresentados para verificação do atendimento do critério VL da norma IEEE-519.

4.3.1 Cenário um

No cenário um, uma carga formada por retificador não controlado alimentando uma resistência de 75Ω é conectada ao modelo simplificado da rede. Entre a Figura 36 e Figura 41 são mostrados os gráficos de tensão antes e depois da instalação do filtro.

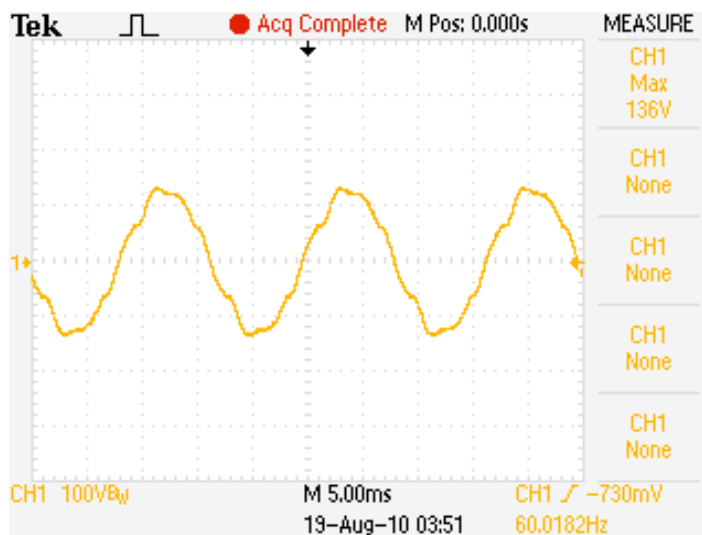


Figura 36 – Tensão no ponto 2 antes da instalação do filtro.

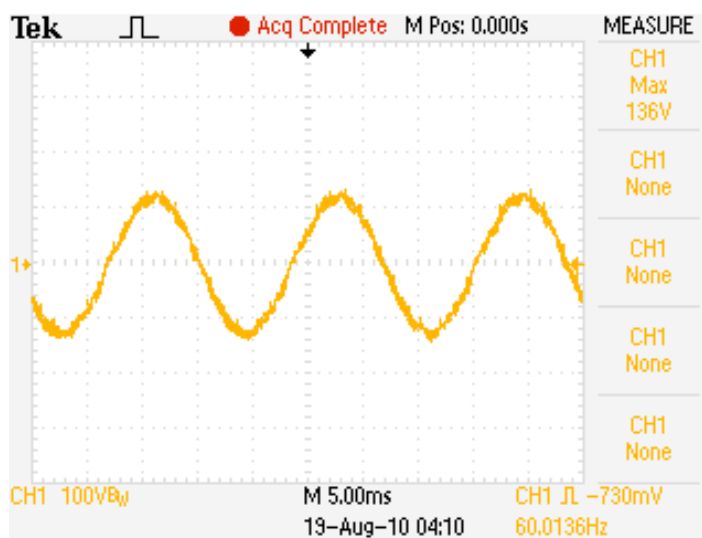


Figura 37–Tensão no ponto 2 depois da instalação do filtro no ponto 4.

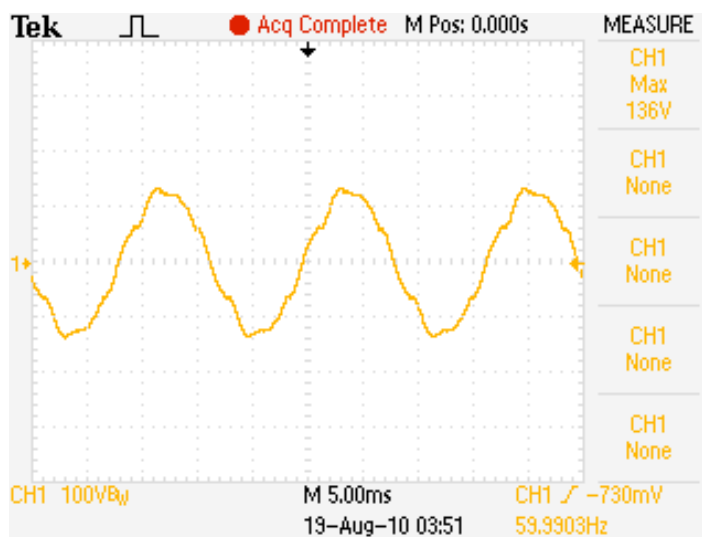


Figura 38 - Tensão no ponto 3 antes da instalação do filtro.

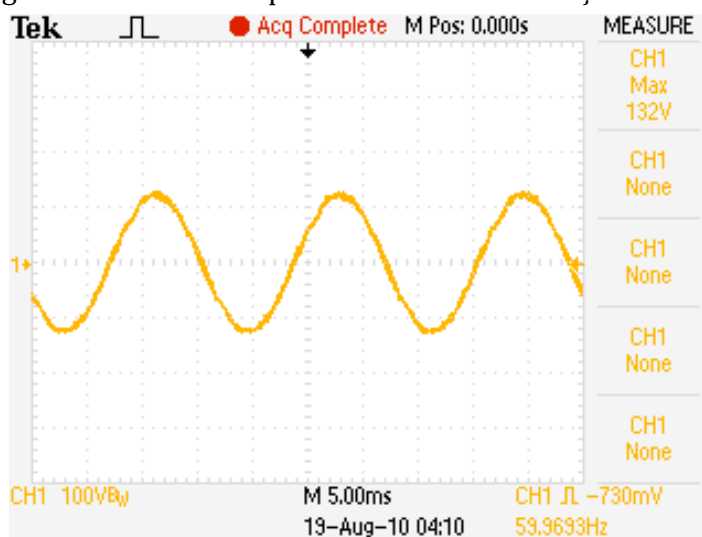


Figura 39 - Tensão no ponto 3 depois da instalação do filtro no ponto 4.

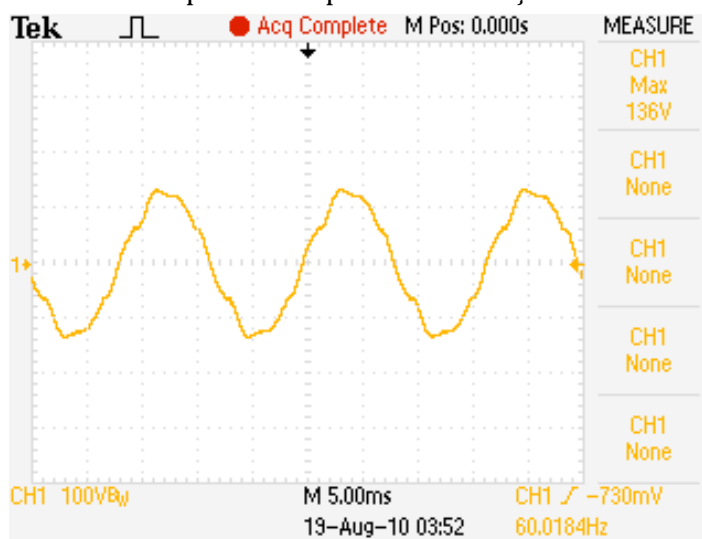


Figura 40 - Tensão no ponto 4 antes da instalação do filtro.

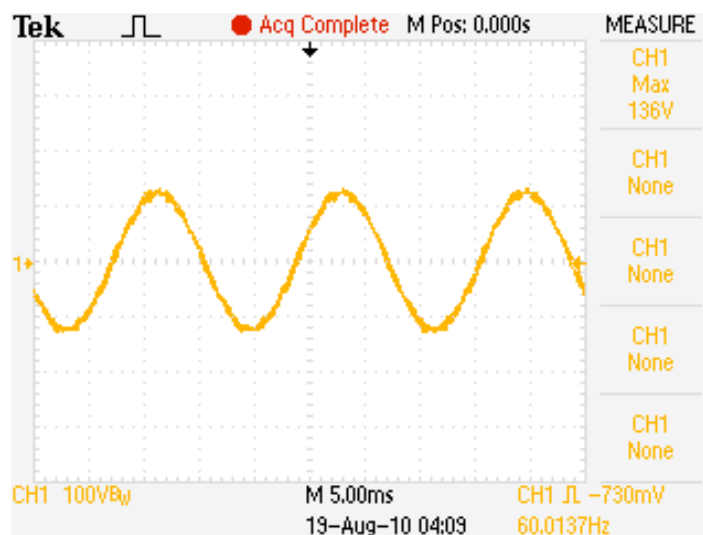


Figura 41 - Tensão no ponto 4 depois da instalação do filtro no ponto 4.

Observa-se que as formas de onda da tensão com a instalação do filtro são visualmente senoidais. Porém, apresentam componentes de alta frequência, principalmente no ponto 2, em que os harmônicos de alta frequência se propagaram a partir do ponto de instalação do filtro e amplificaram no decorrer da rede de distribuição. Para avaliar a redução dos harmônicos o cálculo de THD foi feito e os níveis de THD são apresentados na Figura 42.

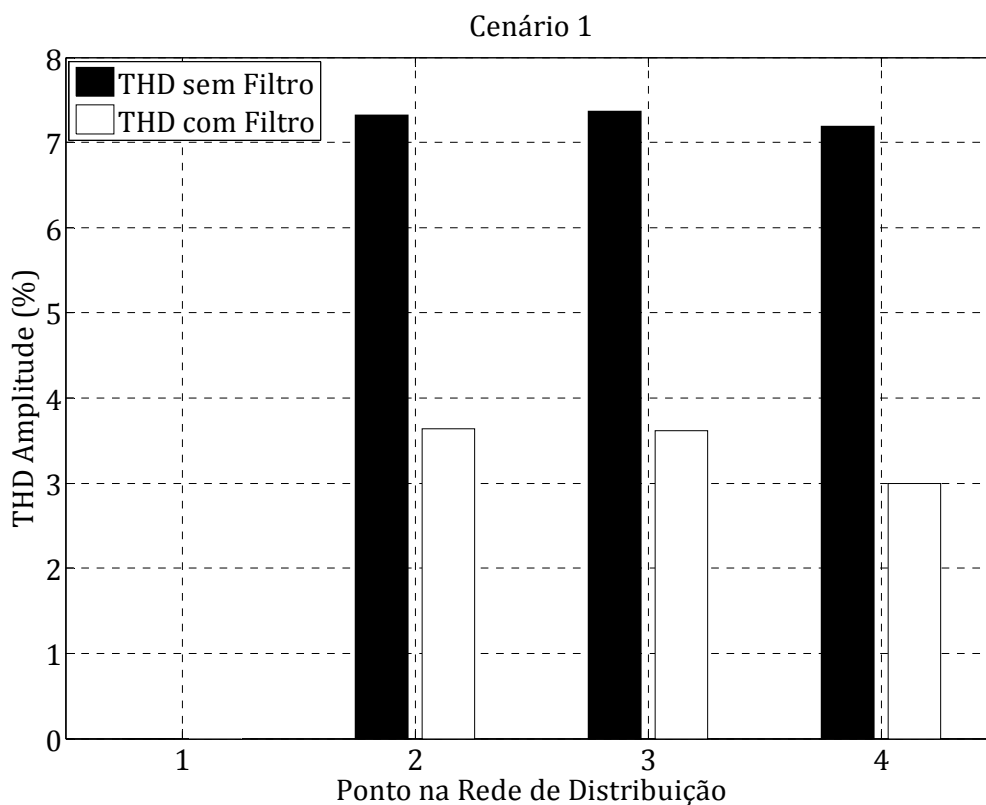


Figura 42 – Nível de THD do cenário 1 antes e depois da instalação do filtro.

No cenário um, em que o retificador não controlado é ativado, o nível de THD era 7,5%. Com a instalação de um filtro ativo a THD é reduzida para em média 3,5%. O nível de distorção com filtro satisfaz a norma IEEE-519, e assim como o algoritmo de localização identificou, um compensador no ponto 4 é o suficiente.

Para comprovar que o algoritmo de localização encontrou o ponto ótimo foi realizado na prática um teste. O filtro com o ajuste de corrente para o ponto 4 foi conectado ao ponto 2, onde está conectada a carga. Os resultados dessa avaliação são apresentados nas Figura 43 a 44.

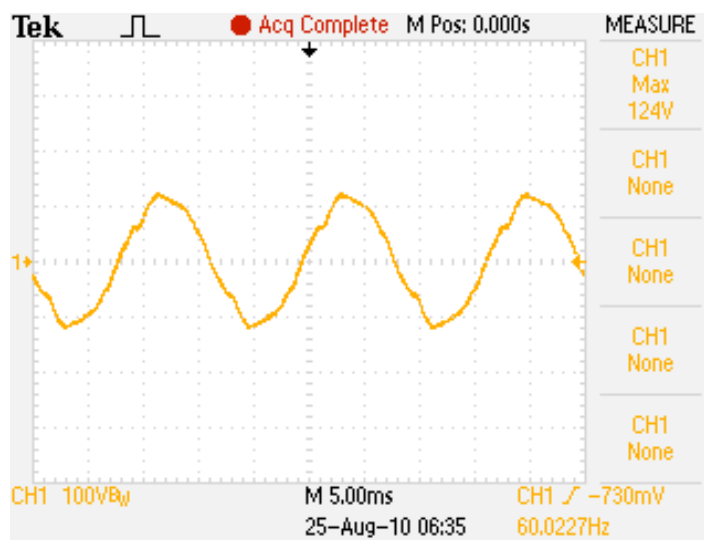


Figura 43 - Tensão no ponto 2 depois da instalação do filtro no ponto 2 com corrente calculada para o ponto 4.

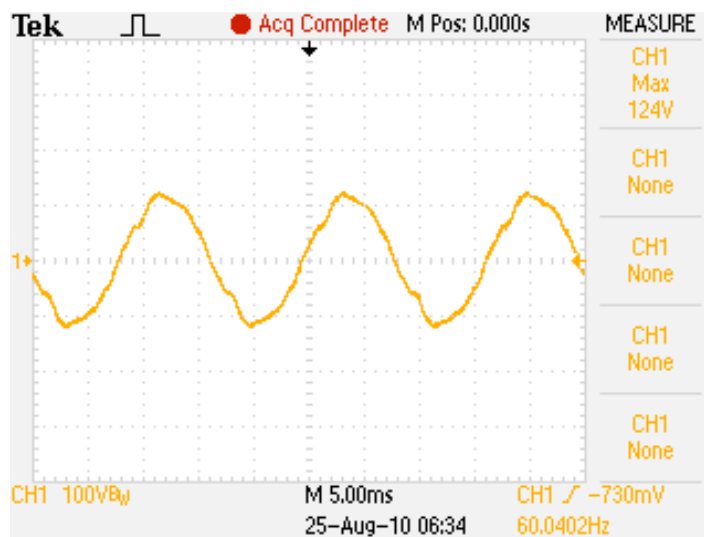


Figura 44 - Tensão no ponto 3 depois da instalação do filtro no ponto 2 com corrente calculada para o ponto 4.

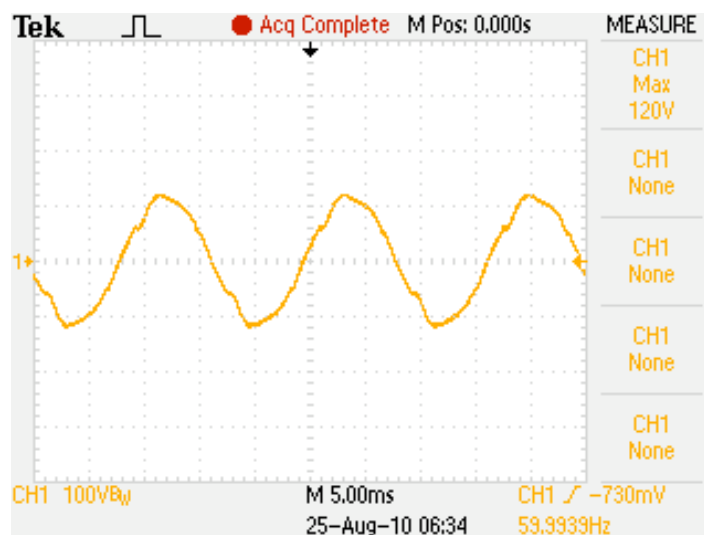


Figura 45 - Tensão no ponto 4 depois da instalação do filtro no ponto 2 com corrente calculada para o ponto 4.

Os resultados apresentados mostram que a corrente de compensação mínima que foi calculada para o ponto 4 e é injetada no ponto 2, não conseguiu compensar a tensão para satisfazer a norma IEEE-519. Sendo os níveis de THD apresentados na Figura 46.

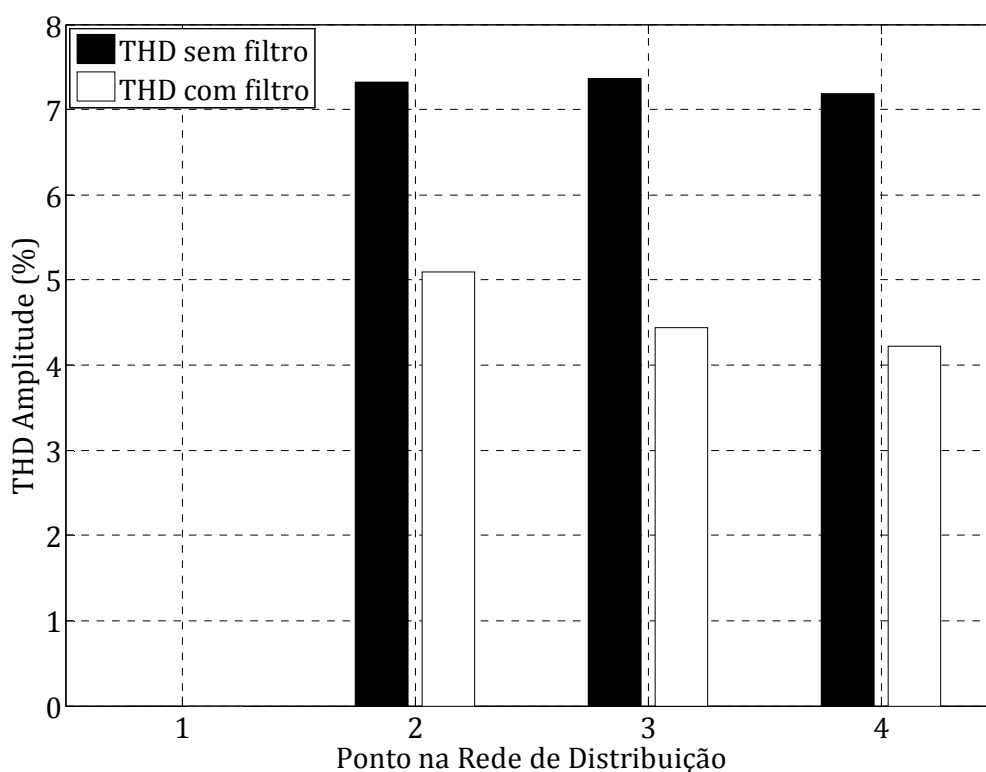


Figura 46 - Nível de THD do cenário 1 antes e depois da instalação do filtro no ponto 2, com corrente calculada para o ponto 4, para comprovação do ponto ótimo do algoritmo de localização.

O segundo teste foi feito utilizando a corrente de compensação calculada para o filtro na posição 2. Os resultados dessa avaliação são apresentados na Figura 47 e na Figura 49.

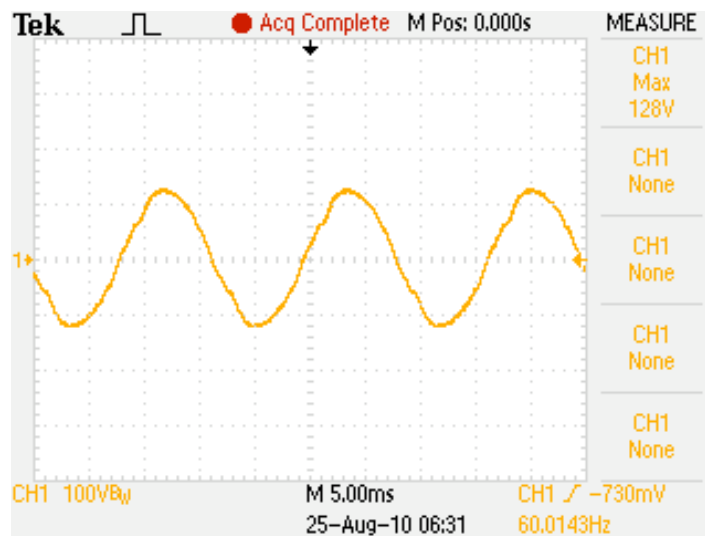


Figura 47 - Tensão no ponto 2 depois da instalação do filtro no ponto 2 com corrente calculada para o ponto 2.

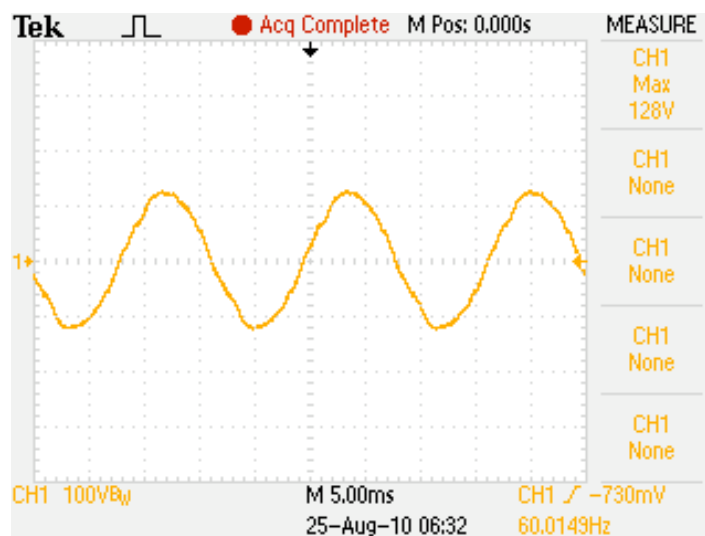


Figura 48 - Tensão no ponto 3 depois da instalação do filtro no ponto 2 com corrente calculada para o ponto 2.

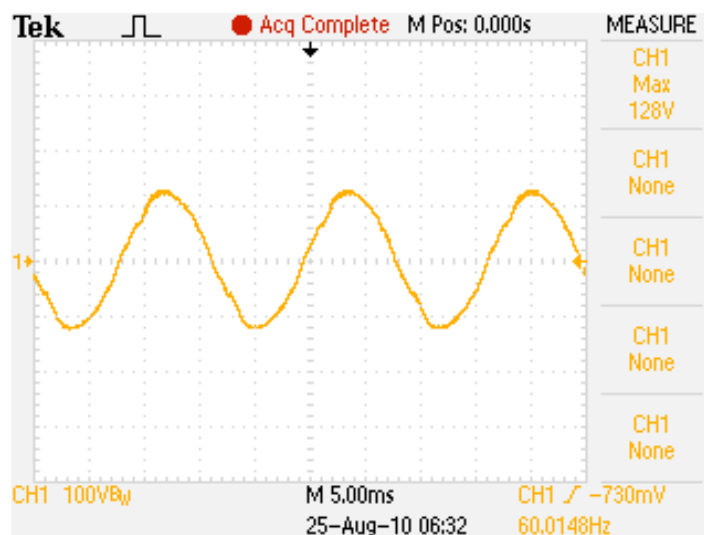


Figura 49 - Tensão no ponto 4 depois da instalação do filtro no ponto 2 com corrente calculada para o ponto 2.

Observando os gráficos das tensões percebe-se que em relação a corrente mínima injetada no primeiro teste, os harmônicos na forma de onda foram reduzidos. Para melhor demonstrar a redução de harmônicos os níveis de THD foram calculados e apresentados na Figura 50.

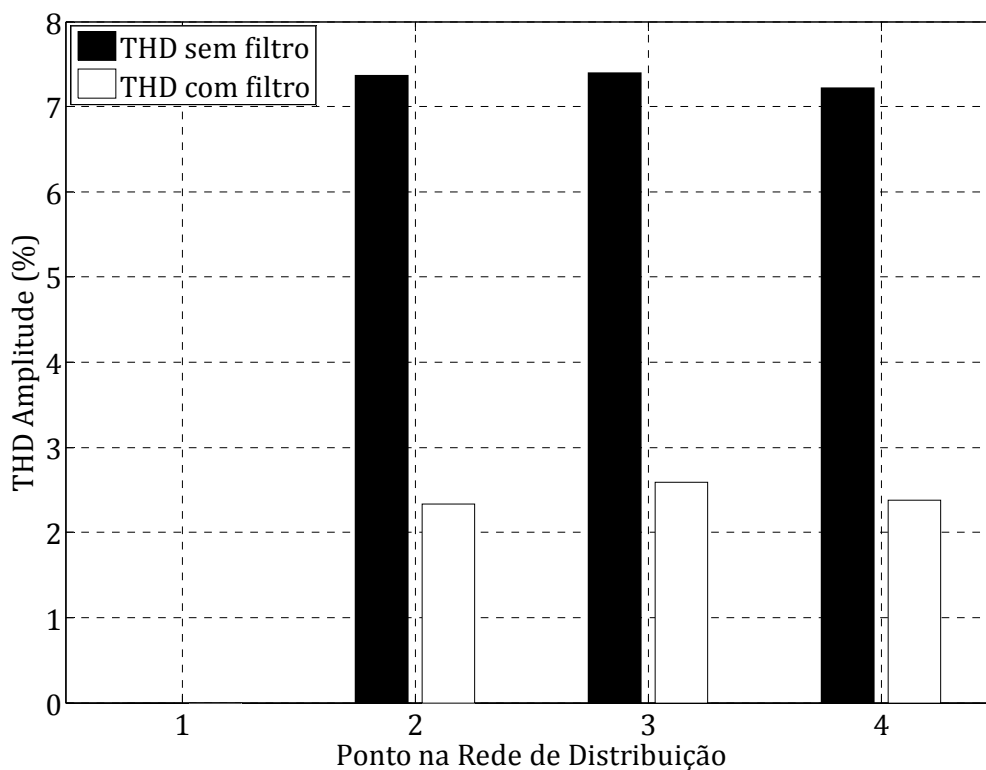


Figura 50 - Nível de THD do cenário 1 antes e depois da instalação do filtro no ponto 2 com corrente calculada para o ponto 2, para comprovação do ponto ótimo do algoritmo de localização.

Comparando as Figura 42, Figura 46 e 49 observa-se que o menor nível de THD foi apresentado no teste dois, em que o filtro está instalado no ponto 2 com corrente de compensação calculada para o ponto 2. Entretanto, para melhor avaliar o ponto ótimo deve-se estudar a relação do menor esforço do filtro e redução da distorção harmônica. Então, além da análise dos gráficos de distorção também deve ser avaliadas as amplitudes por harmônico conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Correntes de compensação calculadas para o ponto 2 e para o ponto 4 da rede de distribuição.

Ordem dos Harmônicos	Corrente de compensação		Diferença de corrente
	Ponto 4	Ponto 2	
2	-0,0000 + 0,0001i	-0,0001 + 0,0003i	0,0001+0,0002i
3	0,0001 + 0,0003i	0,0003 + 0,0015i	0,0002+0,0012i
4	-0,0001 + 0,0000i	-0,0003 + 0,0002i	0,0002+0,0002i
5	0,0276 - 0,0274i	0,1241 - 0,1232i	0,0965+0,0958i
6	-0,0002 + 0,0002i	-0,0011 + 0,0010i	0,0009+0,0008i
7	-0,0071 - 0,1132i	-0,0315 - 0,5095i	0,0244+0,3963i
8	-0,0001 - 0,0002i	-0,0004 - 0,0008i	0,0003+0,0006i
9	-0,0144 - 0,0198i	-0,0646 - 0,0890i	0,0502+0,0692i
10	0,0005 + 0,0003i	0,0020 + 0,0015i	0,0015+0,0012i
11	0,0394 - 0,0136i	0,1772 - 0,0606i	0,1378+0,047i
12	-0,0001 + 0,0002i	-0,0003 + 0,0008i	0,0002+0,0006i
13	-0,0083 - 0,0271i	-0,0371 - 0,1220i	0,0288+0,0949i

Analisando as amplitude da corrente para o ponto 4 e para o ponto 2 observa-se que a corrente para o ponto 4 é menor, sendo a diferença das amplitude apresentada na coluna de diferença de corrente. Por exemplo, para o 5º harmônico há uma diferença de $0,0965+0,0958i$, ou seja, a corrente para o ponto 4 é 3,5 vezes menor que a corrente de compensação para o ponto 2.

Observa-se que a corrente para o ponto 2 não apresenta o menor esforço para o filtro, pois é maior que a calculada para o ponto 4. Apesar de apresentar maior compensação não é o ponto ótimo, pois apesar da maior redução de harmônicos, não apresenta a corrente mínima. Assim, comprova-se que o ponto ótimo é o ponto 4, pois a melhor relação entre a mínima corrente calculada e a redução de THD foi apresentada com a corrente calculada para o ponto 4 e o filtro instalado no ponto 4.

4.3.2 Cenário dois

O cenário dois é composto por duas cargas, um retificador trifásico não controlado e uma carga controlada não linear. A Figura 51, Figura 54 e a Figura 57 mostram as tensões antes da instalação do filtro. A Figura 52, a Figura 55 e a Figura 58, apresentam as tensões com um filtro instalado e a Figura 53, a Figura 56 e a Figura 59, mostram as tensões com dois filtros.

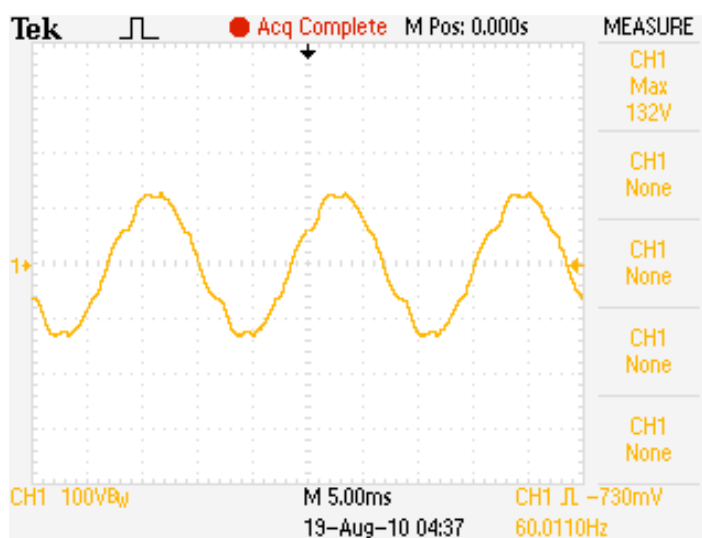


Figura 51 - Tensão no ponto 2 antes da instalação dos filtros.

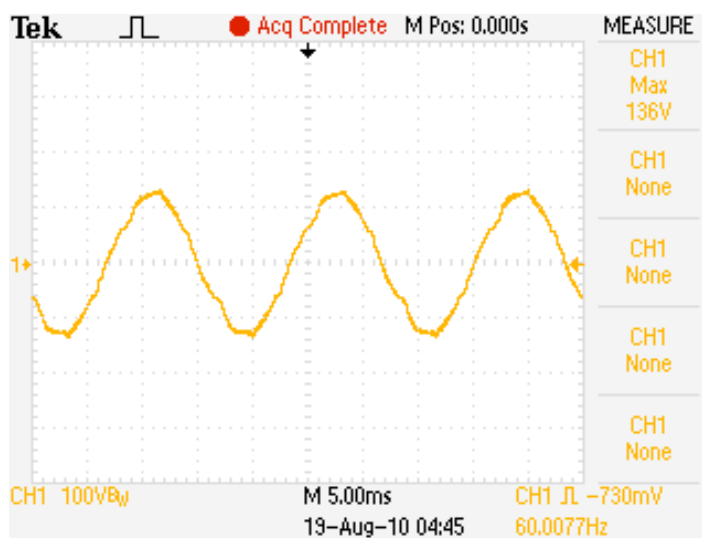


Figura 52 - Tensão no ponto 2 depois da instalação do filtro 1 no ponto 4.

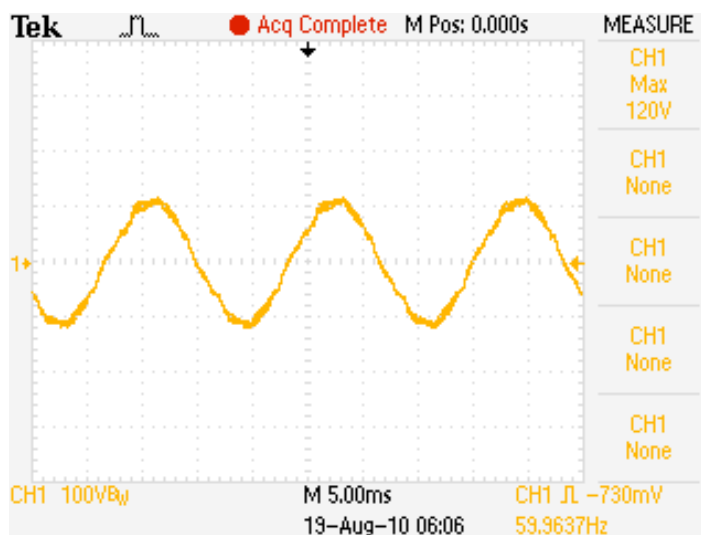


Figura 53 - Tensão no ponto 2 depois da instalação do filtro 1 no ponto 4 e do filtro 2 no ponto 3.

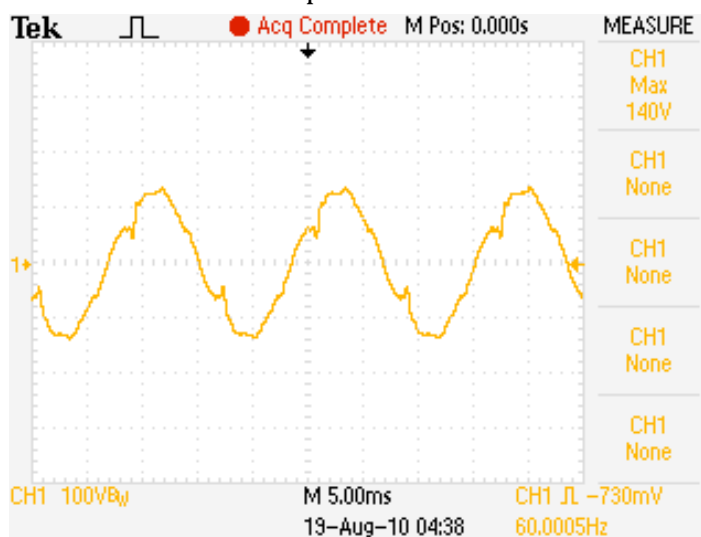


Figura 54 - Tensão no ponto 3 antes da instalação dos filtros.

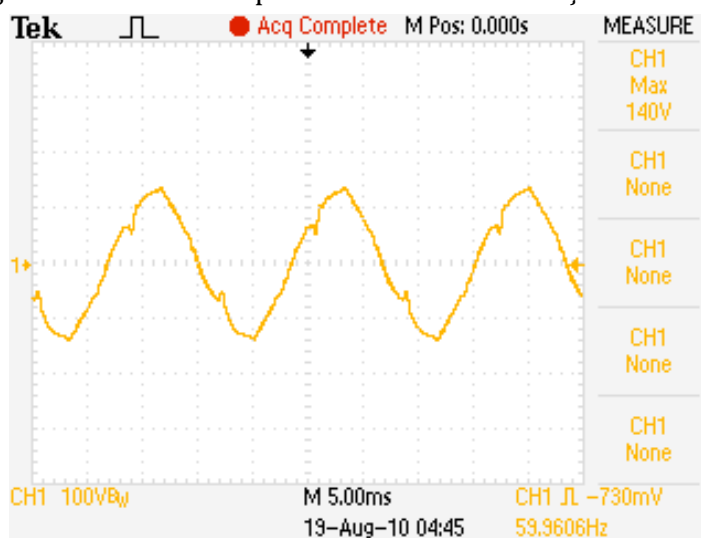


Figura 55 - Tensão no ponto 3 depois da instalação do filtro 1 no ponto 4.

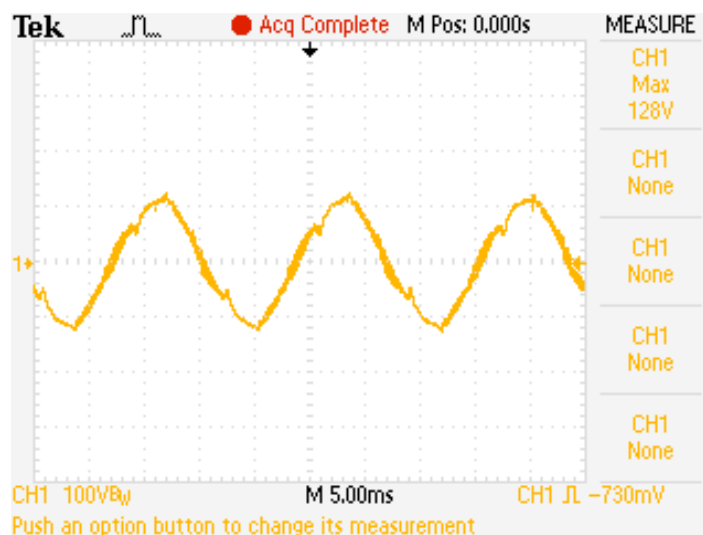


Figura 56 - Tensão no ponto 2 depois da instalação do filtro 1 no ponto 4 e do filtro 2 no ponto 3.

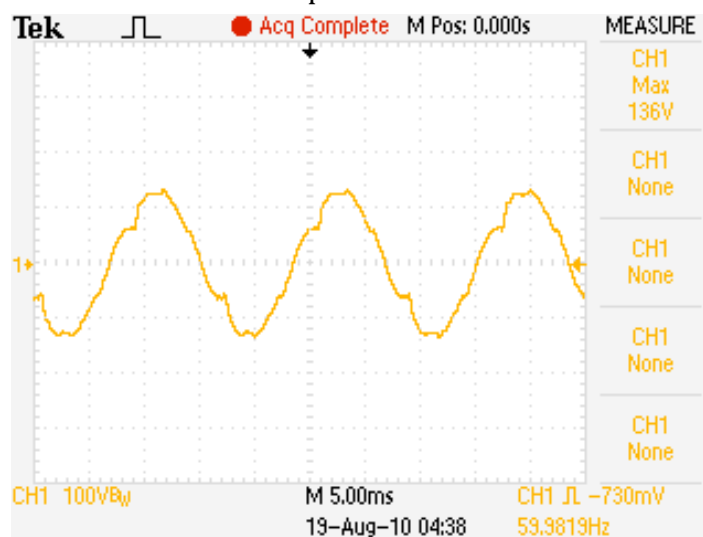


Figura 57 - Tensão no ponto 4 antes da instalação dos filtros.

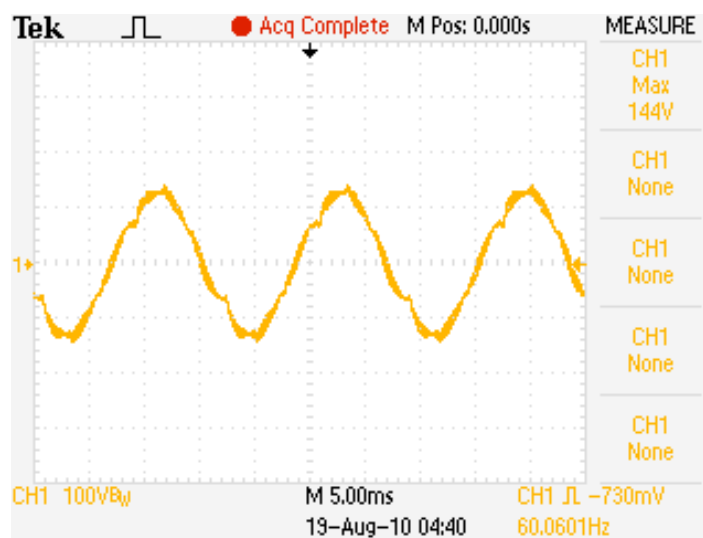


Figura 58 - Tensão no ponto 4 depois da instalação do filtro 1 no ponto 4.

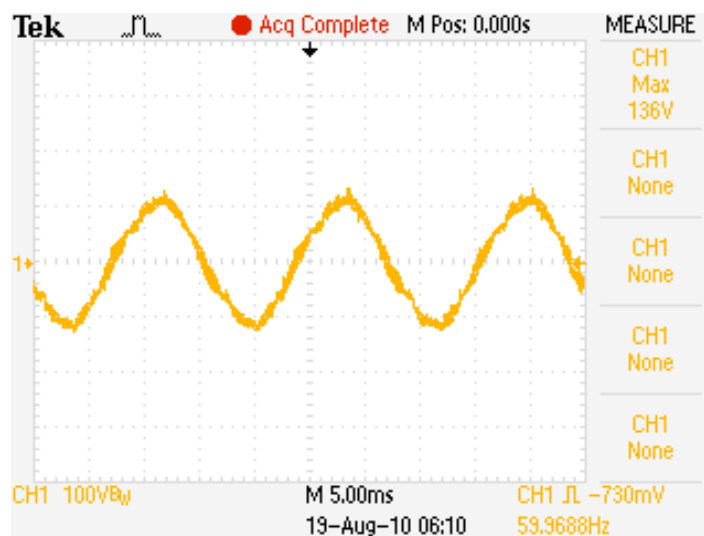


Figura 59 - Tensão no ponto 4 depois da instalação do filtro 1 no ponto 4 e do filtro 2 no ponto 3.

Observando os gráficos resultantes do cenário 2, antes e depois da instalação de um filtro, percebe-se que os harmônicos foram reduzidos. Para melhor analisar a THD resultante, no gráfico da Figura 60 é mostrada a THD calculada.

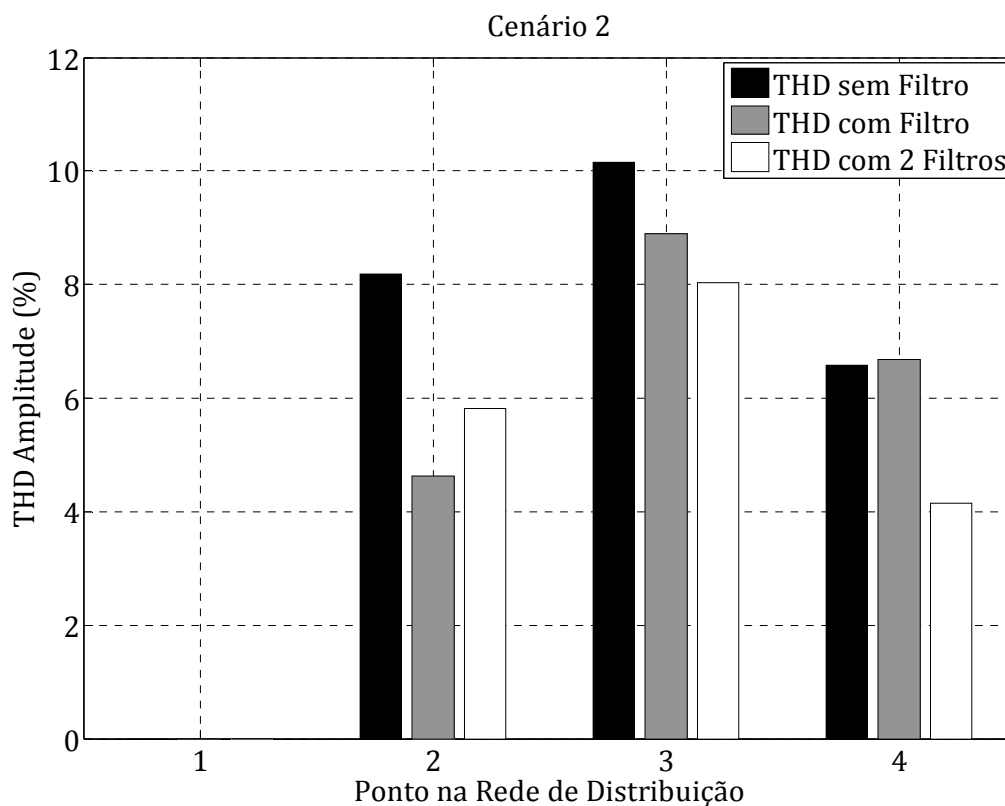


Figura 60 – Nível de THD do cenário 2 com e sem filtros instalados.

Os níveis de THD antes dos filtros eram 8%, 10% e 6,5%. Com a instalação de um filtro no ponto 4, os THDs foram reduzidos para 6,5%, 8,5% e 4,5%, mas a norma não foi satisfeita. Portanto mais um compensador foi instalado no ponto 3, reduzindo os níveis de distorção para 4%, 8,5% e 4,5%. Percebe-se que o THD ainda não satisfaz a norma. Assim foi avaliado os harmônicos individualmente para o cenário 2 em que a carga está acionada, como mostra a Figura 61.

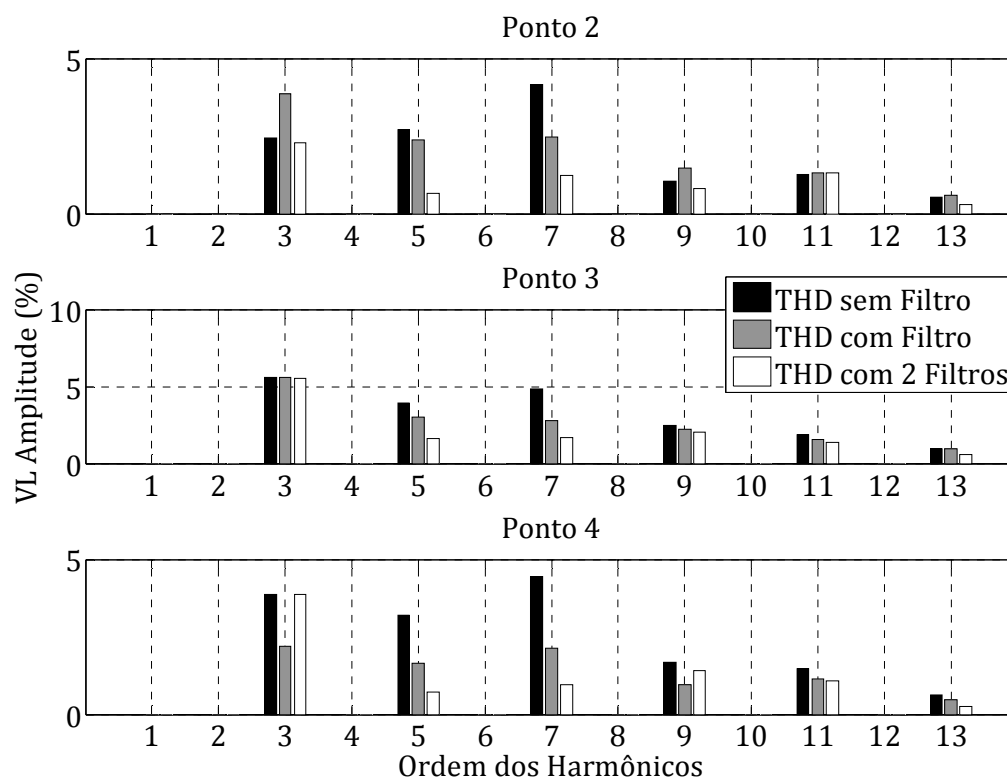


Figura 61 - Nível de distorção harmônica individual VL do cenário 2 antes e depois da instalação do filtro.

Analisando a Figura 61 é possível observar que os harmônicos 5, 7, 11 e 13 reduziram os valores de distorção individual significativamente. Contudo os harmônicos de seqüência zero, 3 e 9, não foram alterados. Esses harmônicos são resultantes da fonte de corrente controlada, que esta conectada ao neutro. Porém o filtro é de 3 fios e não possui neutro, assim não sendo possível compensar harmônicos de seqüência zero

A Figura 62 mostra o cenário 2 que, não considerando os harmônicos de seqüência zero, a THD de 7%, 8% e 6% foi reduzida para 4,5%, 6% e 4% com um filtro e satisfaz a norma com dois filtros. Sendo os níveis de THD iguais a 3%, 4,5% e 3%.

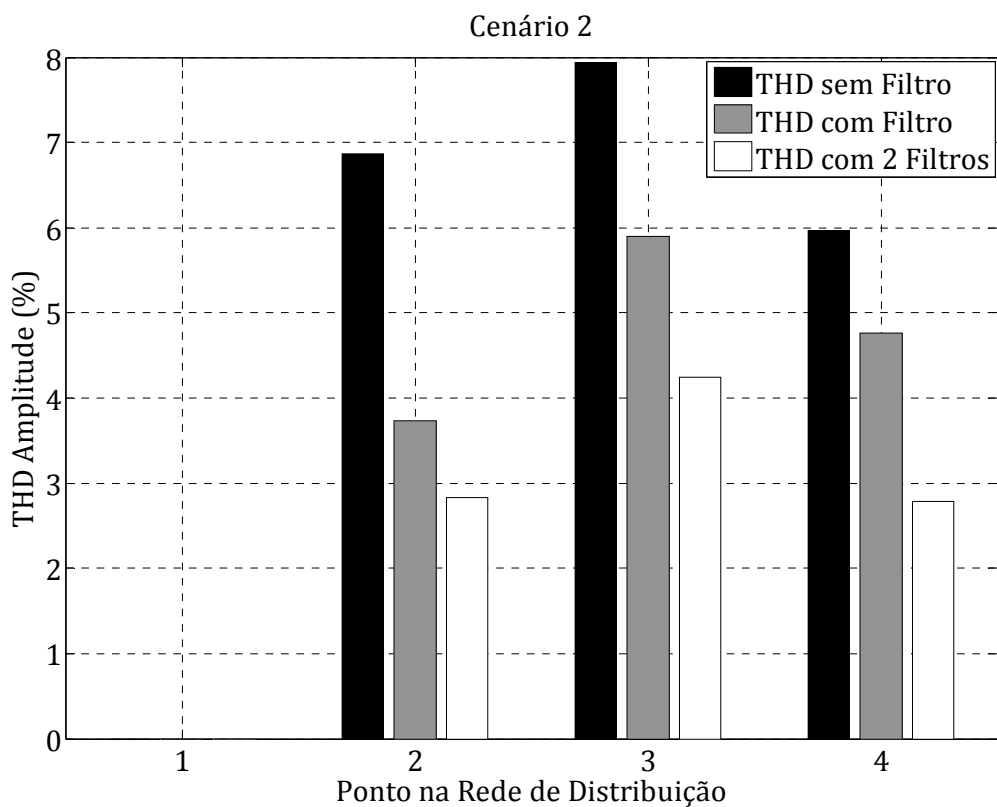


Figura 62 – Nível de THD do cenário 2 antes e depois da instalação de um filtro e dois filtros.

4.3.3 Cenário três

No cenário três somente a carga controlada não linear está ligada. Entre a Figura 63 e a Figura 68 são mostradas as tensões antes e depois do filtro em todos os pontos da rede.

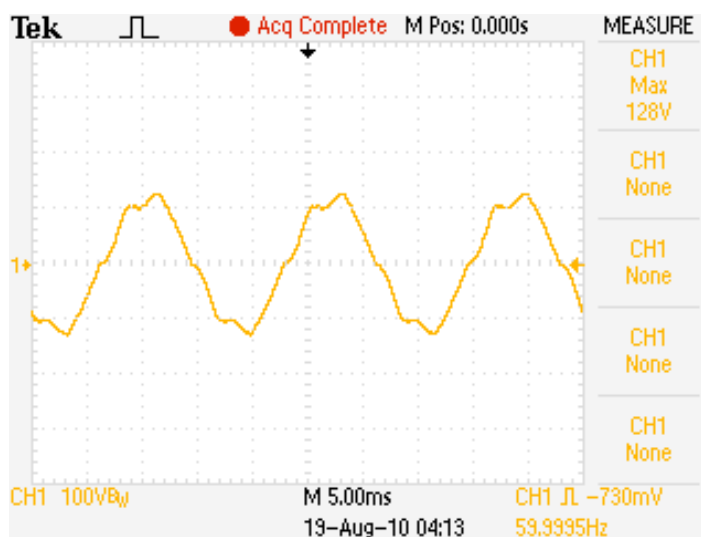


Figura 63 - Tensão no ponto 2 antes da instalação do filtro.

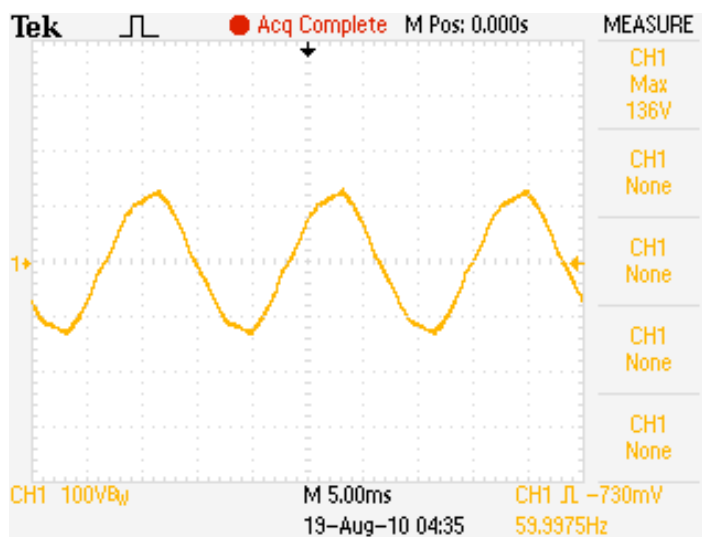


Figura 64 - Tensão no ponto 2 depois da instalação do filtro no ponto 4.

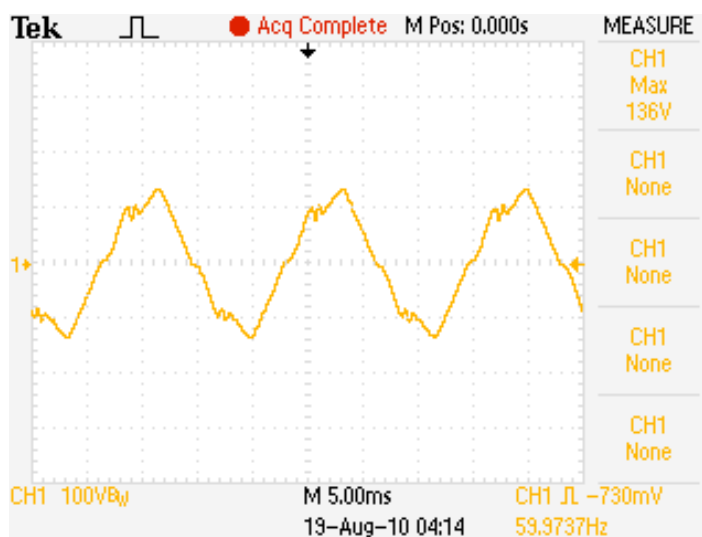


Figura 65 - Tensão no ponto 3 antes da instalação do filtro.

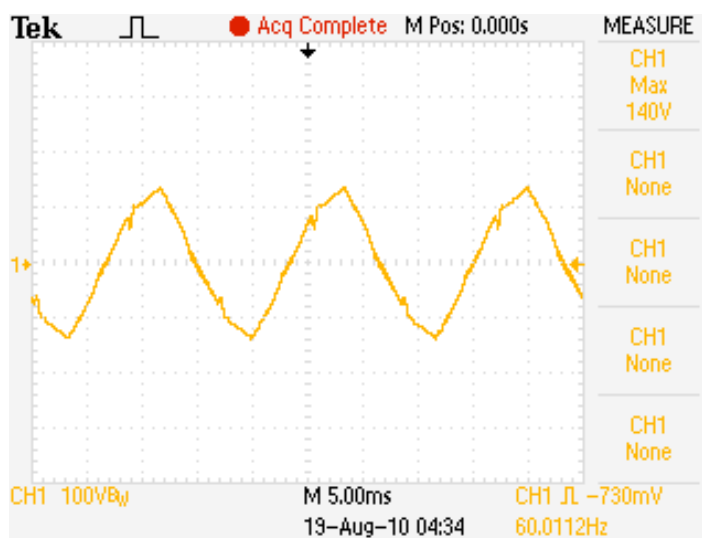


Figura 66 - Tensão no ponto 3 depois da instalação do filtro no ponto 4.

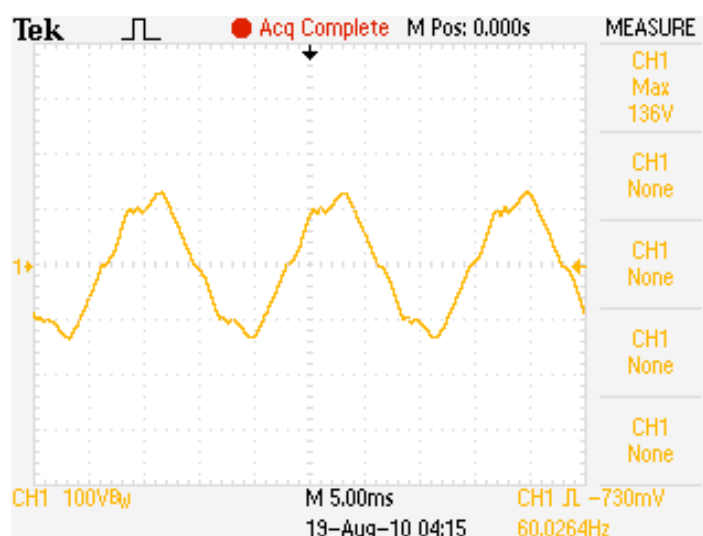


Figura 67 - Tensão no ponto 4 antes da instalação do filtro.

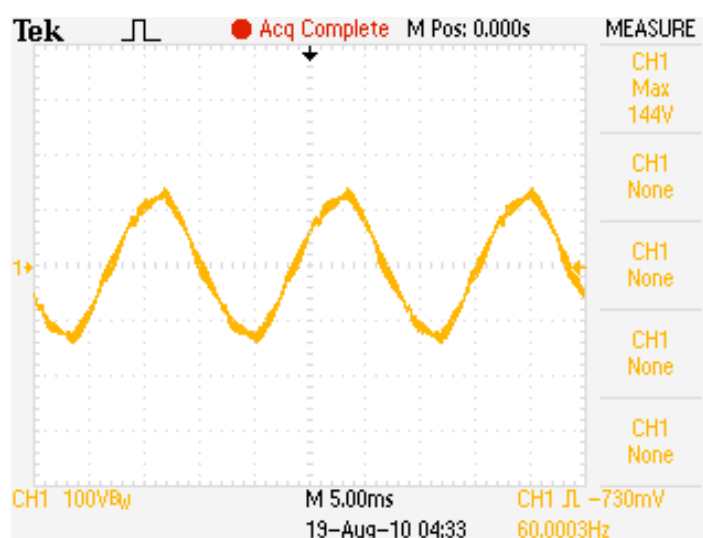


Figura 68 - Tensão no ponto 4 depois da instalação do filtro no ponto 4.

As formas de onda apresentadas depois da instalação do filtro visualmente reduziram os harmônicos. Na Figura 69 são apresentados os níveis de THD para a tensão antes e depois da instalação do filtro.

O cenário três, assim como o cenário dois, possui harmônicos de seqüência zero, como mostra a Figura 70, portanto um filtro não satisfaz a norma. Por isso foi avaliado o THD sem esses harmônicos. Resultando na Figura 71.

Pela Figura 71 observa-se que sem avaliar os harmônicos de seqüência zero, um compensador é o suficiente para reduzir o nível de THD de na média 7,5% para uma média de 4%, assim satisfazendo a norma.

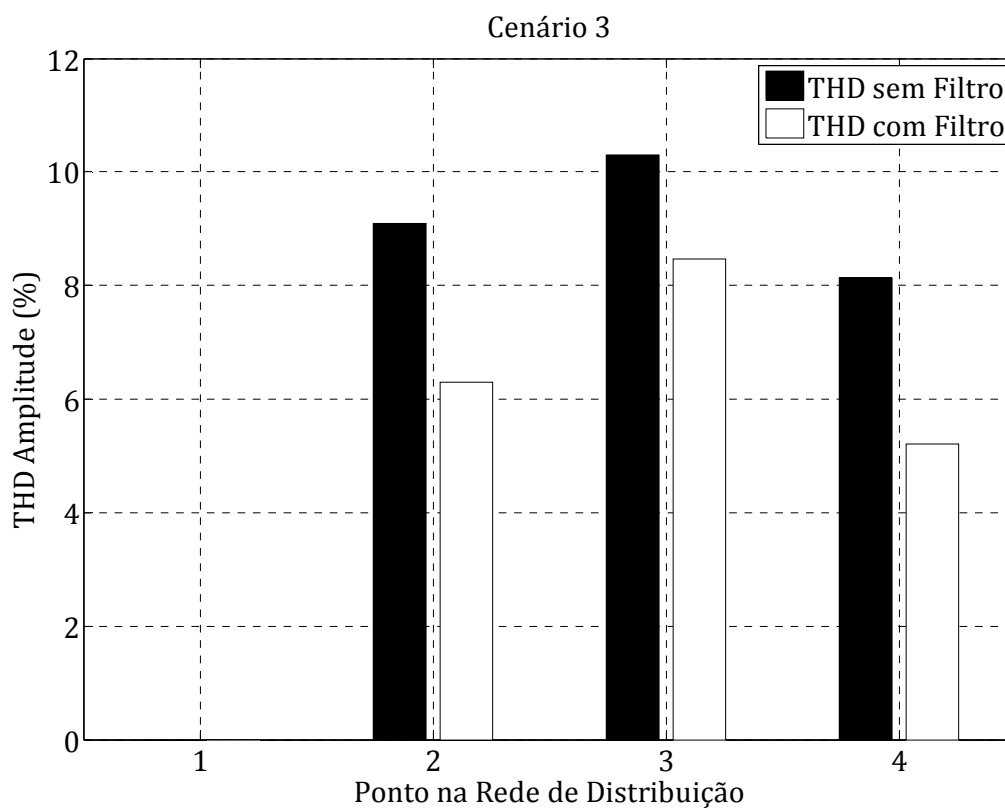


Figura 69 -Nível de THD do cenário 3 antes e depois da instalação do filtro.

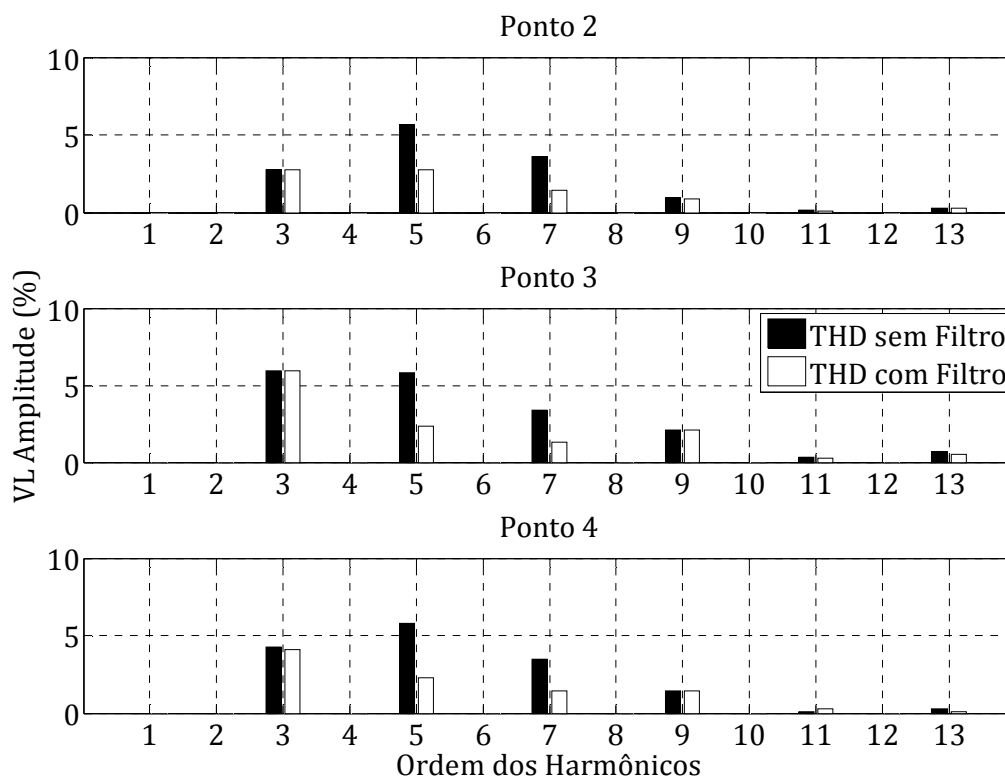


Figura 70 -Nível de distorção harmônica individual VL do cenário 3 antes e depois da instalação do filtro.

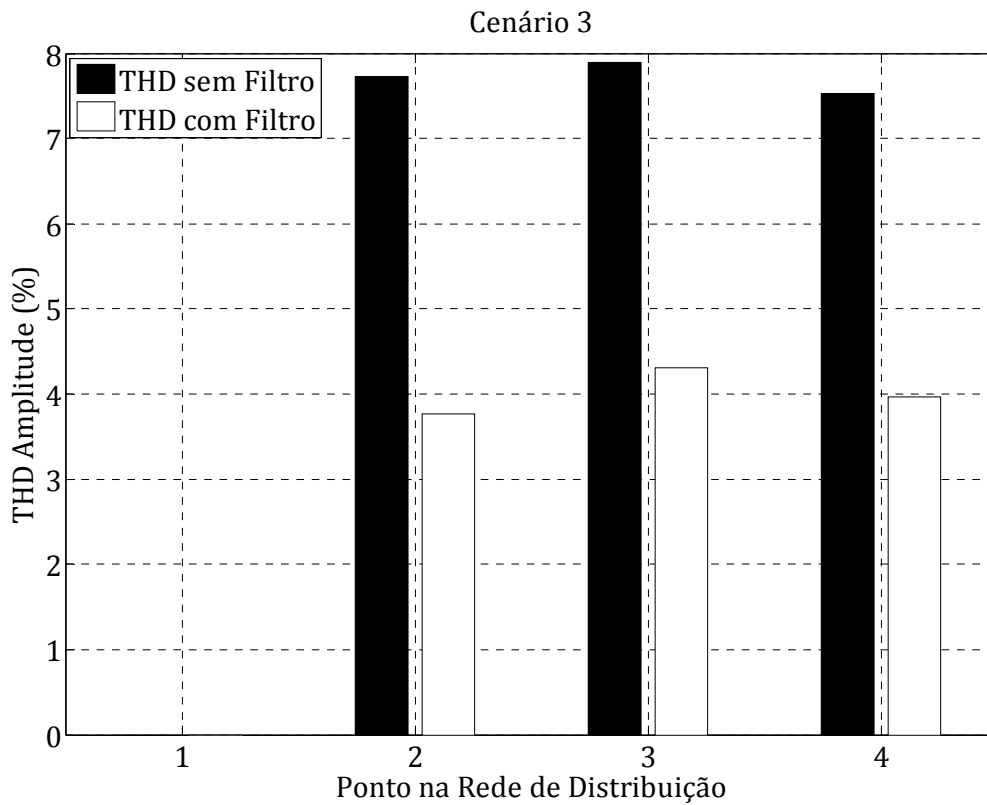


Figura 71 - Nível de THD do cenário 3 antes e depois da instalação do filtro.

4.3.4 Estudo de Operação Cooperativa dos filtros

Nesse cenário as cargas não estão na potência máxima como nos cenários 1, 2 e 3 realizados para a localização dos filtros na rede de distribuição. O retificar está na carga máxima, porém carga controlada não linear que solicitava uma corrente de 1A, foi ajustada para uma corrente de 0,5A. As tensões resultantes desse cenário antes e depois dos filtros estão mostradas nas Figura 72e 78.

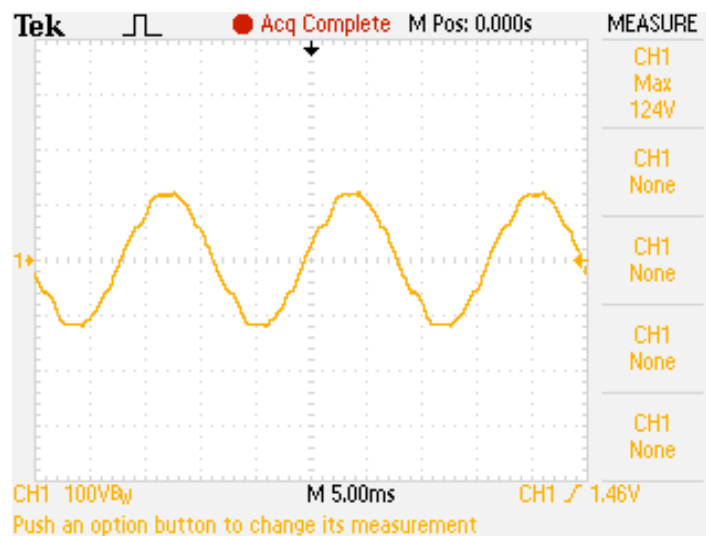


Figura 72 - Tensão no ponto2antes da instalação do filtro.

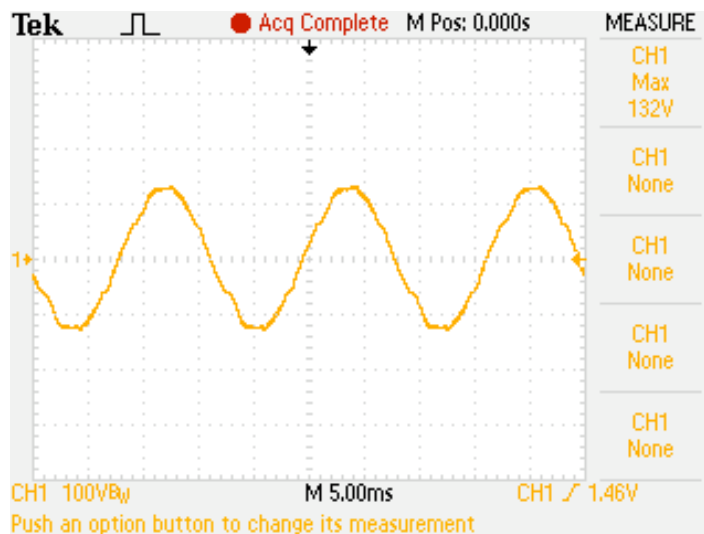


Figura 73 - Tensão no ponto 2 depois da instalação do filtro no ponto 4.

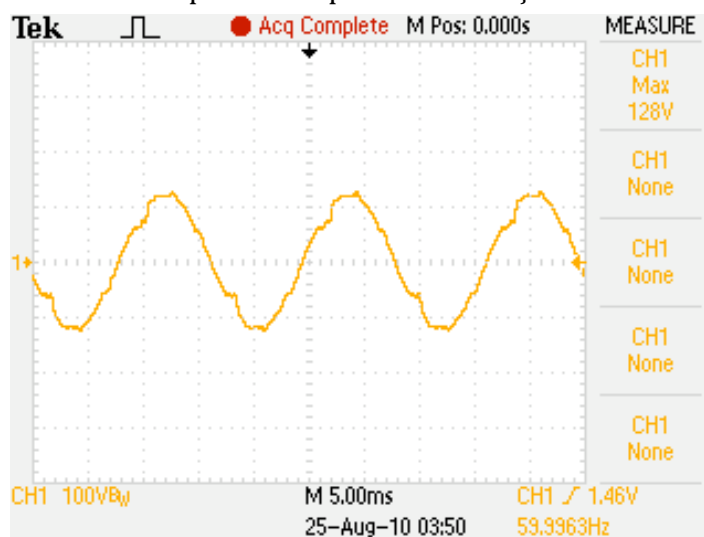


Figura 74 - Tensão no ponto 3 antes da instalação do filtro.

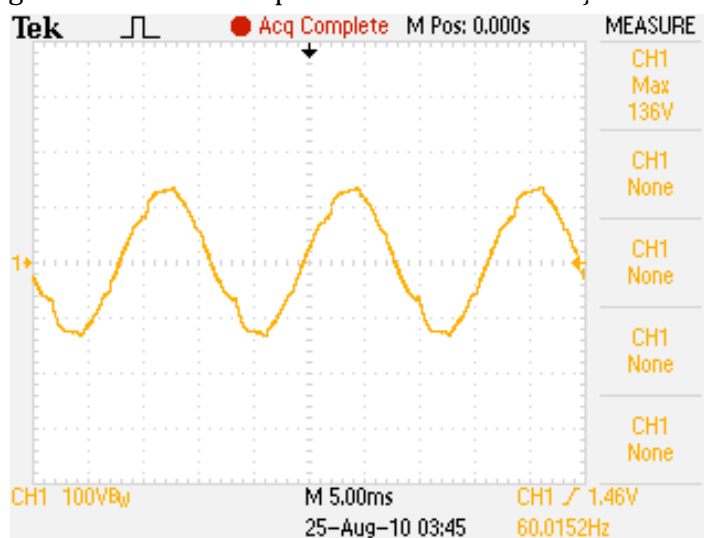


Figura 75 - Tensão no ponto 3 depois da instalação do filtro no ponto 4.

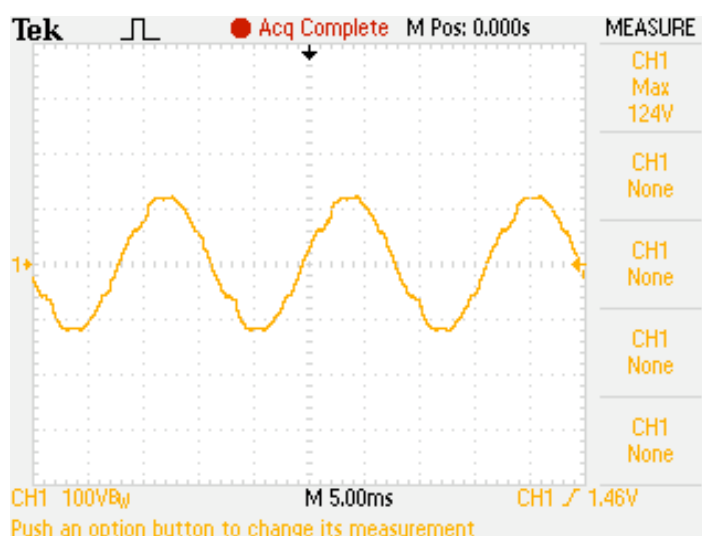


Figura 76 - Tensão no ponto 4 antes da instalação do filtro.

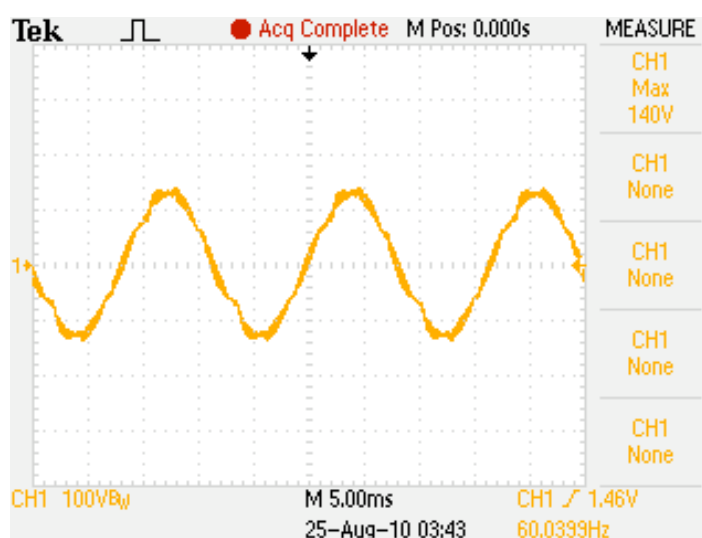


Figura 77 - Tensão no ponto 4 depois da instalação do filtro no ponto 4.

Os gráficos de tensão apresentados apresentam a minimização dos harmônicos com a injeção de corrente pelo filtro instalado no ponto 4. Percebe-se que com a redução da amplitude da corrente solicitada pela carga controlada não linear, a amplitude dos harmônicos foi reduzida de forma que somente um compensador foi necessário. Salientando que reduzindo a potência da carga controlada a amplitude dos harmônicos foi reduzida, conseqüentemente a amplitude dos harmônicos de seqüência zero também foi reduzida apresentando valor abaixo de 3%. Sendo assim, nesse caso os harmônicos de seqüência zero não precisaram ser compensados pelo filtro, pois já apresentavam valores abaixo de 3%.

O controle cooperativo analisou a nova THD da rede de distribuição, e alterou o ajuste de corrente dos filtros, definindo uma corrente zero para o filtro instalado no ponto 3 e uma corrente de compensação para o filtro instalado no ponto 4. Para verificar se a

redução de harmônicos com um filtro realmente atende os critérios da norma, foi realizado o estudo da THD, apresentado na Figura 78.

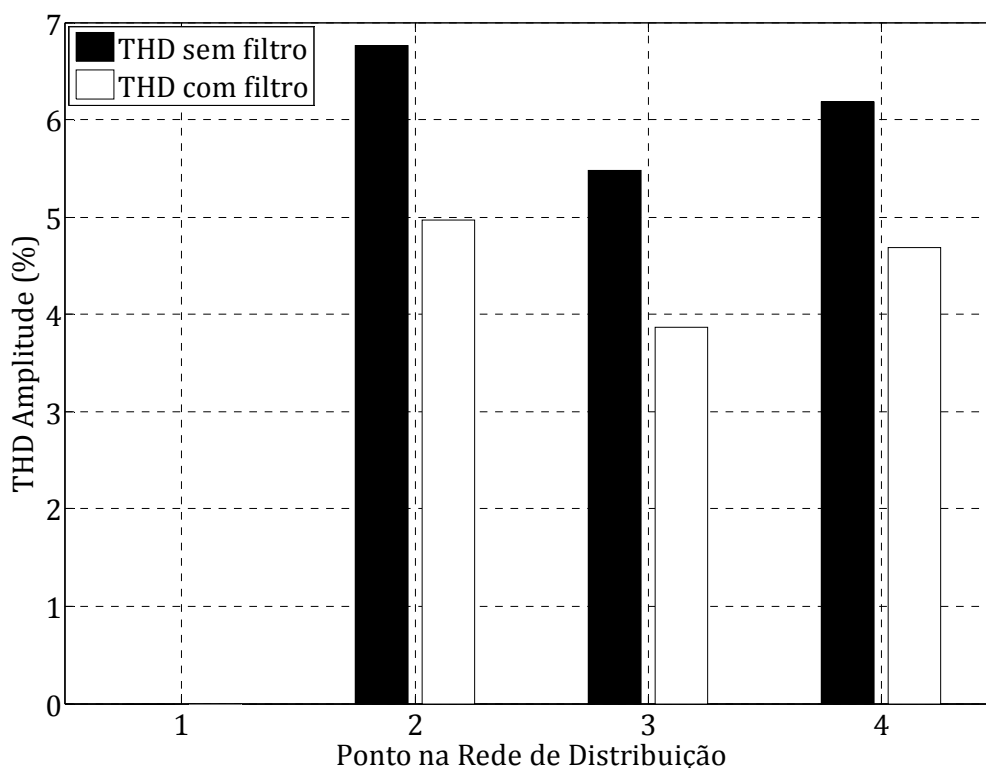


Figura 78–Nível de THD para o cenário de estudo da operação cooperativa antes e depois da corrente de compensação ser injetada.

Observa-se que a THD sem as correntes de compensação dos filtros é de 6,5%, 5,5% e 6%. Com a corrente de compensação do filtro localizado no ponto 4, a THD foi reduzida para 5%, 4% e 4,5%. Assim, conclui-se que além do algoritmo de localização a operação cooperativa é eficaz e encontra soluções para potência variadas da carga. Observa-se que o filtro conseguiu que todos os níveis de VL fossem abaixo de 3%. Entretanto, as componentes de seqüência zero que a carga apresentou não foram compensadas, porém com a redução da amplitude da corrente da carga controlada já apresentava valor abaixo de 3%.

4.4 Conclusões Parciais

Nesse capítulo foram apresentados os resultados de simulação e experimentais relativos ao estudo de localização ótima de filtros em um circuito de potência distribuído. O modelo de rede de distribuição construída para a realização do estudo foi minimizado de modo que fosse possível realizar uma representação real do mesmo. De modo a aproximar as características do modelo simplificado de rede as observadas em um sistema real, sobre o aspecto de parâmetros das linhas de distribuição, utilizou-se dados de cabos utilizados

pela empresa Energisa para determinação das indutâncias, mútua e própria, e da resistência, observadas em trechos de 1 Km.

Com o modelo de rede definido, estabeleceu-se os cenários de estudo em termos de cargas, pontos de acoplamento e filtros. Para cada cenário foi executado o algoritmo de localização, o qual determinou as localizações ótimas para instalação do(s) filtro(s) e respectiva(s) corrente(s) de compensação. O resultado encontrado demonstra que o ponto ótimo de localização dos filtros nem sempre é junto a carga. Também é possível verificar, que em casos, de reduzida distorção harmônica um filtro é suficiente para compensar a rede de distribuição.

As correntes encontradas na localização foram utilizadas para configuração do(s) filtro(s) simulado(s) através de fonte(s) de corrente controlada(s). O filtro foi posicionado no ponto indicado pelo algoritmo, e então para cada combinação de carga a corrente foi calculada e injetada no sistema. Como esperado o nível de THD e VL foi reduzido e limitada em 5% e 3% satisfazendo a norma IEEE-519. Salienta-se que nos casos em que os gráficos dos níveis de VL não foram apresentados, estes estavam abaixo dos níveis estabelecidos, sendo apresentados gráficos somente quando ultrapassaram o limite da norma.

Com os resultados práticos obtidos na seqüência do estudo, foi possível verificar os resultados obtidos através das simulações, comprovando validade da técnica de localização estudada. Nos resultados práticos são observados componentes de alta freqüência devido ao chaveamento do conversor, não observado nas simulações, pelo fato de que naquelas foram utilizadas fontes ideais de corrente para simulação dos filtros. Contudo, em ambos os resultados os níveis de THD foram reduzidos em todos os pontos do circuito de potência, sendo a norma satisfeita.

Nas conclusões finais são sugeridas melhorias e trabalhos futuros.

Conclusão

Nesse trabalho foi apresentado um algoritmo para localização ótima de filtros ativos de potência em uma rede de distribuição. A área de localização é muito vasta e vem ganhando grande destaque para estudo, devido ao aumento de cargas não lineares no sistema, assim como de normas regulamentadoras para níveis de distorções harmônicas de tensão.

Diferente dos demais trabalhos nessa área, que utilizam métodos de otimização complexos para solucionar o problema, são baseados em cenários estáticos e apresentam somente resultados teóricos. O algoritmo implementado simplifica a busca por uma localização ótima e pode ser utilizado em cenários de carga dinâmicos. Para verificação dos resultados foram utilizadas ferramentas conhecidas para simulação e uma plataforma experimental para testes práticos.

A simplificação resultou numa redução de complexidade do algoritmo de localização. Reduzindo o número de operações, assim como, o número de iterações para a solução da localização ótima. Possibilitando, desta forma, a implementação do algoritmo para a localização de compensadores em cenários dinâmicos e a implementação do algoritmo de controle da operação cooperativa dos filtros.

Quanto as cargas dinâmicas, avaliou-se que com qualquer combinação de carga que a rede de distribuição apresente, o algoritmo consegue encontrar uma localização adequada e nível de potência mínimo para os filtros. Também foi possível verificar que o ponto de instalação dos filtros, não é o mesmo ponto de acoplamento em que as cargas estão instaladas. O ponto ótimo de instalação do filtro normalmente é no final da linha, pois desta forma a corrente de compensação necessária é mínima.

A operação cooperativa permitiu que todos os filtros, independente do ponto de instalação, influenciassem positivamente para a rede e não negativamente um no outro, permitindo que a compensação cooperativa reduzisse de forma geral o nível de distorção harmônica em todos os pontos da rede de distribuição. Além disso, considerou-se que o sistema de distribuição tem comportamento dinâmico de cargas, portanto a característica de operação cooperativa apresentada pelo algoritmo permitiria o ajuste dos níveis de corrente de compensação dos filtros de acordo com as condições da rede.

O algoritmo de cooperação dos filtros não causou o efeito *whack-a-mole*, o que o torna uma alternativa atrativa para ser utilizada em redes de distribuição. O funcionamento

do filtro não propagou harmônicos negativamente para o sistema estudado. Sendo, isso comprovado teoricamente, pelo algoritmo, assim como por simulações e resultados experimentais.

A utilização do algoritmo simplificado apresentado nesse trabalho permitiu obter resultados práticos, que possibilitaram verificar a interação dos filtros com a rede distribuída. Os resultados experimentais foram obtidos em uma plataforma desenvolvida no laboratório. Esta plataforma possui três segmentos, duas cargas e dois filtros e um banco de capacitores, sendo que os filtros foram distribuídos de acordo como o algoritmo de localização.

Pela análise dos resultados práticos, realizados em plataforma experimental desenvolvida, foi possível confirmar que o ponto ótimo de localização dos filtros, para que o compensador opere com o menor esforço, não é necessariamente o ponto de acoplamento da carga. Salientado que, quando o filtro é instalado no ponto de acoplamento da carga a redução dos harmônicos é maior, porém o algoritmo objetiva somente atender a norma, avaliando a melhor relação de menor esforço com redução harmônica.

A resposta do algoritmo simplificado de localização ótima se mostrou eficiente, visto que foi possível verificar tanto em nível de simulação como experimentalmente, que para os cenários analisados as localizações indicadas, bem como as referências de corrente a serem injetadas pelos filtros quando aplicadas, permitiram atender os limites da norma IEEE-519 em termos de distorção harmônica total e das componentes harmônicas individuais.

Trabalhos Futuros

No trabalho foi apresentado um algoritmo de localização ótima de filtros em redes de distribuição. Os resultados foram satisfatórios, entretanto alguns pontos não foram suficientemente estudados ou não foi possível a análise, portanto, trabalhos futuros são sugeridos.

O filtro estudado é um compensador com três fios, entretanto, a fonte de corrente utilizadas como carga necessita uma conexão com o neutro, ou seja, quatro fios, gerando componentes de seqüência zero. Nos testes com o filtro implementado não foi possível encontrar uma solução para compensar esses harmônicos, propõem-se então, o estudo de métodos de compensação de componentes harmônicas de seqüência zero.

O algoritmo simplificado é menor complexidade do que o algoritmo apresentado por Chang [8], mas na literatura foram apresentados outros métodos para a solução do problema de localização ótima. Assim, o estudo desses métodos apresentados, e de novos métodos de otimização, bem como sua implementação e comparação são assuntos importantes a serem analisados futuramente.

A avaliação da interação dos filtros com a rede de distribuição foi realizada baseando-se no algoritmo de localização e na operação cooperativa implementada, assim como a redução da distorção harmônica foi avaliada globalmente com a injeção da mínima corrente do filtro. Estudos futuros podem ser realizados para avaliar as técnicas de controle

de filtros convencionais em comparação com as apresentadas nesse trabalho, bem como com o trabalho apresentado por Jintakosonwit [12].

Referências Bibliográficas

- [1] "IEC 61000-3-2." *IEC - Internacional Electrotechnical Commission*. 2005.
- [2] "IEC 61000-3-4." *IEC - Internacional Electrotechnical Commission*. 2005.
- [3] "IEEE 519." *Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*. 1992.
- [4] Grady, W. M., "Minimizing Network Harmonic Voltage Distortion with an Active Power Line Conditioner." *IEEE Transactions on Power Delivery*. 4, 1991, Vol. 6, pp. 1690-1697.
- [5] —. "The Application of Network Objective Functions for Actively Minimizing the Impact of Voltage Harmonics in Power Systems." *IEEE Transactions on Power Delivery*. 3, 1992, Vol. 7, pp. 1379-1386.
- [6] Chang, W. K., "Meeting IEEE-519 Harmonic Voltage and Voltage Distortion Constraints with an Active Power Line Conditioner." *IEEE Transactions on Power Delivery*. 3, 1994, Vol. 9, pp. 1531-1537.
- [7] —. "Controlling Harmonic Voltage and Voltage Distortion in a Power System with Multiple Active Power Line Conditioners." *IEEE Transactions on Power Delivery*. 3, 1995, Vol. 10, pp. 1670-1676.
- [8] —. "Minimizing Harmonic Voltage Distortion with Multiple Current-Constrained Active Power Line Conditioners." *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2, 1997, Vol. 12, pp. 837-843.
- [9] I. Ziari, A. Jalilian., "Optimal placement and mutual influence of active filter." *UPEC*. 2007, pp. 1-5.
- [10] Reza Keypour, Hossein Seifi, Ali Yazdian-Varjani., "Genetic based algorithm for active power filter allocation and sizing." *Electric Power Systems Research*. 2004, Vol. 71, pp. 41-49.
- [11] Iman Ziari, Alireza Jalilian., "A New Approach for Allocation and Sizing of Multiple Active Power-Line Conditioners." *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2, 2010, Vol. 25, pp. 1026-1035.
- [12] Jintakosonwit, Pichai., " Implementation and Performance of Automatic Gain Adjustment in a Shunt Active Filter for Harmonic Damping Throughout a Power Distribution System." *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2002.
- [13] Tedeschi, Elisabetta., "Cooperative Operation of Active Power Filters by Instantaneous Complex Power Control." *Conf. Rec. PEDS*. 2007, pp. 555-561.

- [14] Tedeschi, Elisabetta., "Cooperative Design and Control of Distributed Harmonic and Reactive Compensators." *Conf. Rec. ISNCC*. 2008, pp. 1-6.
- [15] D. V. Coury, C. J. dos Santos, M. Oleskovicz, M. C. Tavares., "Transient analysis concerning capacitor bank switching in a distribution system." *Electric Power Systems Research*. 1, 2003, Vol. 65, pp. 13-21.
- [16] Juha Turunen, Mika Salo, Heikki Tuusa., "Comparison of Series Hybrid Active Power Filters Based on Experimental Tests." *Conf. Rec. EPE*. 10-15 de September de 2005, pp. 1-10.
- [17] L. Gyugyi, E.C. Strycula., "Active AC Power Filters." *IEEE-IAS Conf. Rec.* 1976, pp. 529-535.
- [18] Fang Zheng Peng, Hirofumi Akagi, Akira Nabae., "A New Approach to Harmonic Compensation in Power Systems-A Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters." *IEEE Transactions on Industry Applications*. 6, November/December de 1990, Vol. 26, pp. 983-990.
- [19] Rashid, Muhammad H., *Uninterruptible Power Supplies and Active Filters*. Florida : CRC Press LLC, 2005.
- [20] P.J.M. Heskes, J.M.A. Myrzik, W.L. Kling., "Survey of Harmonic Reduction Techniques Applicable as Ancillary Service of Dispersed Generators (DG)." *Young Researchers Symposium*. 7-8 de February de 2008, pp. 1-6.
- [21] Bhim Singh, Kamal Al-Haddad, Senior Member, IEEE, and Amrisha Chandra, Member, IEEE., "A Review of Active Filters for Power Quality Improvement." *IEEE Transaction on Industrial Electronics*. October de 1999.
- [22] Bhim Singh, Kamal Al-Haddad, Amrisha Chandra., "A Review of Active Filters for Power Quality Improvement." *IEEE Transaction on Industrial Electronics*. 5, October de 1999, Vol. 46, pp. 960-971.
- [23] J.H. Marks, T.C. Green., "Ratings analysis of active power filter." *IEEE/PELS PESC*. 2001, pp. 1420-1425.
- [24] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae., "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components." *IEEE Transaction on Industry Application*. 1984, Vols. IA-20, pp. 625-630.
- [25] H. Akagi, A. Nabae, S. Atoh., "Control strategy of active power filters using multiple voltage-source PWM converters." *IEEE Transaction on Industry Application*. 1986, Vols. IA-22, pp. 460-465.
- [26] F. Z. Peng, H. Akagi, A. Nabae., "A novel harmonic power filter." *IEEE PESC*. 1988, pp. 1151-1159.
- [27] H. Akagi, H. Fujita, K. Wada., "A Shunt Active Filter Based on Voltage Detection for Harmonic Termination of Radial Power Distribution Line." *IEEE Transaction on Industry Applications*. 3, 1999, Vol. 35, pp. 638-645.
- [28] Akagi, H., "Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems." *IEEE Transactions on Power Delivery*. 1, January de 1997, Vol. 12, pp. 354-362.

- [29] Jintakosonwit, Pichai., "Implementation and Performance of Cooperative Control of Shunt Active Filters for Harmonic Damping Throughout a Power Distribution System." *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2, 2003, Vol. 39, pp. 556-564.
- [30] Linderke, D., "Projeto de um filtro ativo paralelo de 1kva usando técnicas de controle analógico e digital." *Master's thesis*. Florianópolis : Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2003.
- [31] K. Wada, H. Fujita, H. Akagi., "Considerations of a shunt active filter based on voltage detection for installation on a long distribution feeder." *IEEE Transactions on Industry Applications*. July/August de 2002, Vol. 38, 4, pp. 123-130.
- [32] P. Jintakosonwit, H. Akagi, H. Fujita., "Performance of Automatic Gain Adjustment in Shunt Active Filters for Harmonic Damping throughout Power Distribution Systems." *IEEE/PELS PESC*. 2001, pp. 1389-1395.
- [33] Lee, Tzung-Lin., "Design of a New Cooperative Harmonic Filtering Strategy for Distributed Generation Interface Converters in an Islanding Network." *IEEE Transaction on Power Electronics*. 5, 2007, Vol. 22, pp. 1919-1927.
- [34] Santarius, Pavel., " Harmonic Voltage Mitigation in Power Systems by Using Cooperative Control of Active Power Filters without Mutual Communication." *IEEE* . 2008.
- [35] Deb, Kalyanmoy., *Optimization for Engineering Design - Algorithms and Examples*. Nova Delhi : Prentice-Hall of India, 2005.
- [36] Hamilton Leckar, Rubens Sampaio., "Aproximando soluções de $AX=b$ com o MATLAB." *Matemática Universitária*. 2000, pp. 77-92.
- [37] W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling., *Bracketing and Bisection: §9.1 in Numerical Recipes in FORTRAN: The Art of Scientific Computing*. Cambridge : Cambridge University Press, 1992. pp. 343-347.
- [38] Arfkenp, G., *Mathematical Methods for Physicists*. 3. Orlando : Academic Press, 1985. pp. 964-965.
- [39] P. Jintakosonwit, S. Srianthumrong, P. Jintakosonwit., "Implementation and Performance of an Anti-Resonance Hybrid Delta-Connected Capacitor Bank for Power Factor Correction." *IEEE Transactions on Power Electronics*. 6, 2007, Vol. 22, pp. 2543-2551.
- [40] J. K. Phipps, J. P. Nelson, and P. K. Sen., "Power quality and harmonics on distribution system." *IEEE Transaction on Industry Applications*. 2, 1994, Vol. 30, pp. 476-484.
- [41] S. Bhattacharya, Po-Tai Cheng., "Hybrid Solution for Improving Passive Filter Performance in High Power Applications." *IEEE Transactions on Industry Applications*. 3, 1997, Vol. 33, pp. 732-747.
- [42] Z. Shuai, A. Luo, W. Zhu, R. Fan, K. Zhou., "Study on a Novel Hybrid Active Power Filter Applied to a High-Voltage Grid." *IEEE Transactions on Power Delivery*. 4, 2009, Vol. 24, pp. 2344-2352.
- [43] V. Verma, B. Singh., "Design and Implementation of a Current-Controlled Parallel Hybrid Power Filter." *IET Power Electronics*. 5, 2008, Vol. 45, pp. 1910-1917.
- [44] P. Rodriguez, J. I. Candela, A. Luna, L. Asiminoaei, R. Teodorescu, F. Blaabjerg., "Current Harmonics Cancellation in Three-Phase Four-Wire Systems by Using a Four-Branch

StarFiltering Topology." *IEEE Transactions on Power Electronics*. 8, 2008, Vol. 24, pp. 1939-1950.

[45] Kersting, W. H., "The Modeling and Analysis of Parallel Distribution Lines." *IEEE Transactions on Industry Applications*. 5, 2006, Vol. 42, pp. 1126-1132.

[46] C.B. Jacobina, M.B. de R. Correa, R.F. Pinheiro, A.M.N. Lima, E.R.C. da Silva., "Improved Fault Tolerance of Active Power Filter System." *Power Electronics Specialists Conference*. 2000, pp. 767-772.

ANEXO A

Por análise geométrica, cada sub-problema dos harmônicos individuais pode ser expresso como duas possibilidades, como mostra a Figura 79.

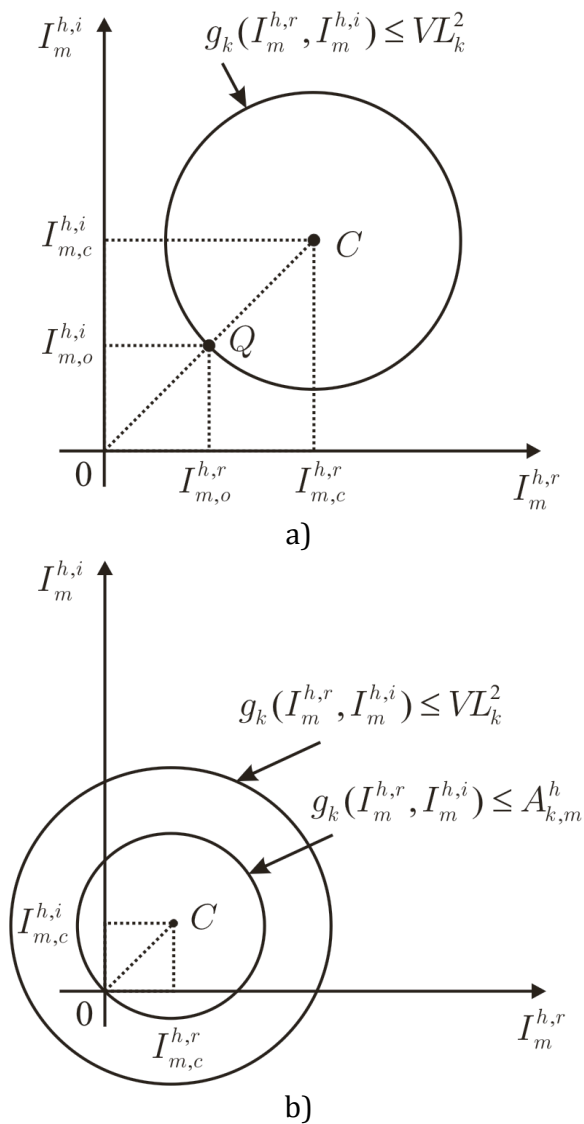


Figura 79 – Gráfico das possibilidades de círculos limitados por VL. a) Sem passar pela origem. b) Passando pela origem e com limite diferente.

Em que, a) mostra a tensão individual harmônica antes da instalação do filtro, possibilitando observar que o limite foi ultrapassado, pois o limite do círculo não atinge a origem. Porém, a corrente mínima que deve ser injetada, é $I_{m,o}^{h,r} + jI_{m,o}^{h,i}$ e a solução no ponto Q é ponto de intersecção entre OC e o círculo limite.

A tensão individual harmônica depois da instalação é mostrada em b), é menor que do que a recomendada, pois a origem está no limite do círculo. Portanto o ponto Q está em O, e não é necessária a injeção de corrente.

Percebe-se que, em a) a corrente de injeção necessária é dada por QC e b) por OC, entretanto em ambos os casos:

$$I_m^{h,i} = S_m^h I_m^{h,r}$$

Comparando a equação acima com (35), resulta em:

$$S_m^h = \frac{C_{k,m}^h}{B_{k,m}^h}$$

Reescrevendo então a função objetiva:

$$\sum_{h=2}^H \left(I_{m,c}^{2h,r} + I_{m,c}^{2h,i} \right) = \sum_{h=2}^H \left(1 + S_m^{2h} \right) I_{m,c}^{2h,r}$$

Onde cada harmônico limitado é expresso por,

$$I_{m,o}^{h,r} \leq I_m^{h,r} \leq I_{m,c}^{h,r}, \text{ para } I_{m,o}^{h,r} \geq 0$$

Ou

$$I_{m,o}^{h,r} \geq I_m^{h,r} \geq I_{m,c}^{h,r}, \text{ para } I_{m,o}^{h,r} \leq 0$$

Sabendo que ambos $I_{m,o}^{h,r}$ e $I_{m,c}^{h,r}$ tem o mesmo sinal nas duas condições acima, pode-se normalizar as correntes com a base $I_{m,c}^{h,r}$, assim:

$$\beta^h \leq \alpha^h \leq 1, \text{ onde } h = 1, 2, \dots, H$$

Em que

$$\beta^h = \frac{I_{m,o}^{h,r}}{I_{m,c}^{h,r}}$$

E

$$\alpha^h = \frac{I_m^{h,r}}{I_{m,c}^{h,r}}$$

Então, a função objetivo por ser reescrita por:

$$\sum_{h=2}^H (I_{m,c}^{2h,r} + I_{m,c}^{2h,i}) = \sum_{h=2}^H \gamma_m^h \alpha^{h^2}$$

Onde,

$$\gamma_m^h = (1 + S_m^{2h}) I_{m,c}^{2h,r}$$

A função objetiva em função de " α^h " é dada por:

$$\sum_{h=2}^H (A^h + B^h \alpha^h + C^h \alpha^h) = THDL_k^2$$

Onde,

$$A^h = A_{k,m}^h$$

$$B^h = (B_{k,m}^h + C_{k,m}^h S_m^h) I_{m,c}^{h,r}$$

$$C^h = \gamma_m^h D_{k,m}^h$$

Comparando as expressões acima para B^h com C^h , e substituindo as definições de S_m^h , γ_m^h e $I_{m,c}^{h,r}$ também pode ser visto que $B^h = -2C^h$.

Diferente da função objetiva dada inicialmente percebe-se que foram eliminadas variáveis e a inequação quadrática foi transformada em linear. Agora para a solução limitada aplica-se a função de Lagrange, resultando em:

$$L[\alpha^2, \alpha^3, \dots, \alpha^H, \lambda] = \sum_{h=2}^H \gamma_m^h \alpha^{h^2} + \lambda \left\{ \sum_{h=2}^H (A^h + B^h \alpha^h + C^h \alpha^h) - THDL_k^2 \right\}$$

Onde λ é o multiplicador de Lagrange.

Aplicando a condição de primeira ordem:

$$\frac{\partial L}{\partial \alpha^h} = 2\gamma_m^h \alpha^h + \lambda(B^h + 2C^h \alpha^h) = 0, \text{ onde } h = 1, 2, \dots, H$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = \sum_{h=2}^H (A^h + B^h \alpha^h + C^h \alpha^h) - THDL_k^2 = 0$$

Resolvendo,

$$\lambda = -\frac{2\gamma_m^h \alpha^h}{B^h + 2C^h \alpha^h}$$

Que também pode ser escrita como:

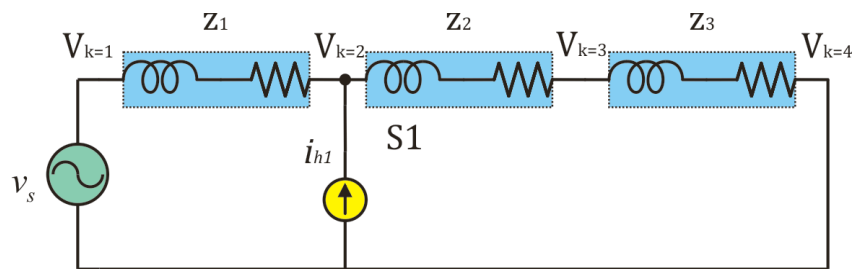
$$\lambda = \frac{\alpha^h}{D_{k,m}^h(1 - \alpha^h)}$$

Reorganizando,

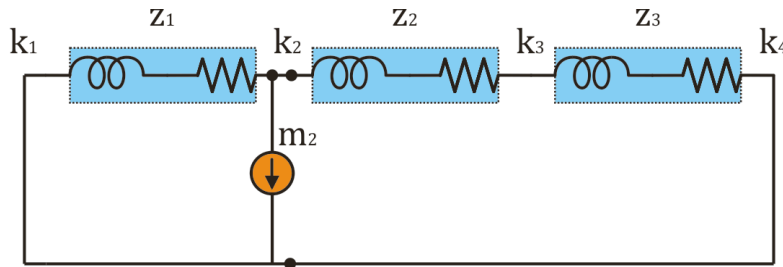
$$\alpha^h = \frac{\lambda D_{k,m}^h}{1 + \lambda D_{k,m}^h}$$

ANEXO B

Para a figura abaixo



Cálculo das correntes, para $m=2$.



Sendo a matriz de impedância

$$z_{k,m} = \begin{bmatrix} (1 - z_{k=1})z_{m=2} \\ (1 - z_{k=2})z_{m=2} \\ (1 - z_{k=3})z_{m=2} \\ (1 - z_{k=4})z_{m=2} \end{bmatrix}$$

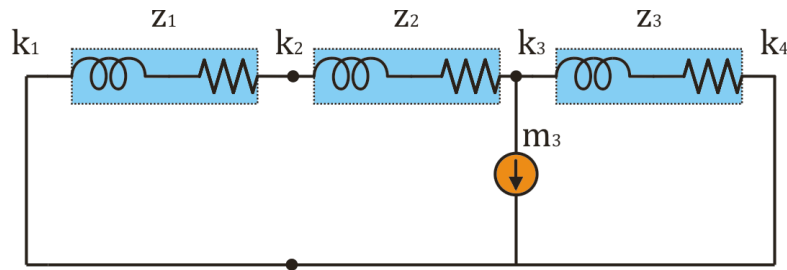
Salientando, que para cada harmônico estudado tem uma matriz de impedância.

E $v_{k,old}^h$ a tensão aquisitada

A equação de corrente do harmônico "h" estudado.

$$I_{m=2}^h = \frac{(v_{k=2,old}^{h,r} z_{k=2,m=2}^{h,r} + v_{k=2,old}^{h,i} z_{k=2,m=2}^{h,i}) + j(v_{k=2,old}^{h,i} z_{k,m=2}^{h,r} + v_{k=2,old}^{h,r} z_{k,m=2}^{h,i})}{(z_{k=2,m=2}^{h,r})^2 + (z_{k=2,m=2}^{h,i})^2}$$

Cálculo das correntes, para $m=3$.



Sendo a matriz de impedância

$$Z_{k,m} = \begin{bmatrix} (1 - Z_{k=1})Z_{m=3} \\ (1 - Z_{k=2})Z_{m=3} \\ (1 - Z_{k=3})Z_{m=3} \\ (1 - Z_{k=4})Z_{m=3} \end{bmatrix}$$

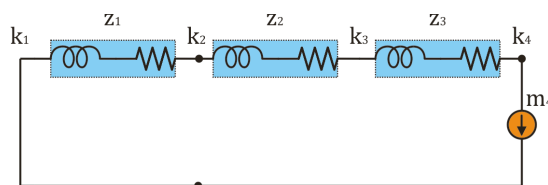
Salientando, que para cada harmônico estudado tem uma matriz de impedância.

E $v_{k,old}^h$ a tensão aquisitada

A equação de corrente do harmônico "h" estudado.

$$I_{m=3}^h = \frac{(v_{k=3,old}^{h,r} Z_{k=3,m=3}^{h,r} + v_{k=3,old}^{h,i} Z_{k=3,m=3}^{h,i}) + j(v_{k=3,old}^{h,i} Z_{k=3,m=3}^{h,r} + v_{k=3,old}^{h,r} Z_{k=3,m=3}^{h,i})}{(Z_{k=3,m=3}^{h,r})^2 + (Z_{k=3,m=3}^{h,i})^2}$$

Cálculo das correntes, para $m=4$.



Sendo a matriz de impedância

$$Z_{k,m} = \begin{bmatrix} (1 - Z_{k=1})Z_{m=4} \\ (1 - Z_{k=2})Z_{m=4} \\ (1 - Z_{k=3})Z_{m=4} \\ (1 - Z_{k=4})Z_{m=4} \end{bmatrix}$$

Salientando, que para cada harmônico estudado tem uma matriz de impedância.

E $v_{k,old}^h$ a tensão aquisitada

A equação de corrente do harmônico "h" estudado.

$$I_{m=4}^h = \frac{(v_{k=4,old}^{h,r} Z_{k=4,m=4}^{h,r} + v_{k=4,old}^{h,i} Z_{k=4,m=4}^{h,i}) + j(v_{k=4,old}^{h,i} Z_{k=4,m=4}^{h,r} + v_{k=4,old}^{h,r} Z_{k=4,m=4}^{h,i})}{(Z_{k=4,m=4}^{h,r})^2 + (Z_{k=4,m=4}^{h,i})^2}$$

Verifica as correntes que apresentaram valores abaixo do valor limite de corrente.
 Seleciona o ponto que apresentou menor valor de corrente e verifica pelas equações

$$g_k(I^h) = A_k^h + (I^h)^T P_k^h + (I^h)^T Q_k^h (I^h) \leq VL_k^2$$

$$h_k(I) = \sum_{h=2}^H g_k(I^h) \leq THD_k^2$$

se a norma foi satisfeita para todos os valores de "k".

Caso nenhuma das correntes encontradas satisfaça as equação acima, deve-se aumentar o número de filtros ativos.