

**FABIO JOSÉ BRAZ DA SILVA**

**Utilização de filtros de harmônicas passivos em plantas industriais de  
processo contínuo**

**São Paulo**

**2024**

**FABIO JOSÉ BRAZ DA SILVA**

**Utilização de filtros de harmônicas passivos em plantas industriais de  
processo contínuo**

**Versão Corrigida**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Sistemas de Potência

Orientador: Prof. Dr. Carlos Frederico Meschini Almeida

**São Paulo**

**2024**

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

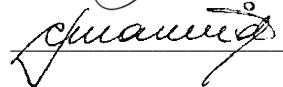
Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 15 de abril de 2024

Assinatura do autor:



Assinatura do orientador:



#### Catálogo-na-publicação

Silva, Fabio José Braz da  
Utilização de Filtros de Harmônicas Passivos em Plantas Industriais de  
Processo Contínuo / F. J. B. da Silva -- versão corr. -- São Paulo, 2014.  
137 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São  
Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1.Sistema de Potência 2.Qualidade de Energia 3.Distorções Harmônicas  
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de  
Engenharia de Energia e Automação Elétricas II.t.

*“Daria tudo que sei pela metade  
do que ignoro”*

*René Descartes (1596-1650)*

## **DEDICATÓRIA**

Dedico a presente dissertação à minha família, à minha esposa Lucimay e a meus filhos, Ana Carolina, Beatriz e Lucas, por todo o carinho, companheirismo, apoio e incentivo concedidos a mim durante esta caminhada. Nada disso seria possível sem vocês, eterna gratidão.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus amigos do Centro de Estudos em Regulação e Qualidade de Energia (Enerq-USP), por todo o suporte, auxílio e colaboração.

Aos professores Carlos Frederico Meschini Almeida, Lourenço Matakas Junior, Silvio Giuseppe Di Santo e Carlos Eduardo de Moraes Pereira por todo o tempo dedicado a mim e ao meu trabalho, expresse toda minha gratidão.

À minha família, em especial à minha esposa, Lucimary. Obrigado por sempre me incentivar. Este trabalho também é seu.

## RESUMO

Silva, Fabio José Braz da. **Utilização de Filtros de Harmônicas Passivos em Plantas Industriais de Processo Contínuo**. 2023. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

Nos últimos anos, com o crescente desenvolvimento e redução no custo dos filtros ativos para mitigação de distorções harmônicas, a tradicional solução baseada em filtros passivos passou a ser criticada e, até negligenciada.

A presente dissertação visa demonstrar que a utilização de filtros passivos podem ser a melhor solução, do ponto de vista técnico e econômico, em particular nas plantas industriais de processo contínuo, onde a demanda por energia elétrica tem comportamento mais estável.

O comportamento típico dessas instalações contorna uma das maiores desvantagens do filtro passivo, que é justamente devido a problemas na efetividade da mitigação causada pela variação da demanda por energia elétrica e, conseqüentemente, impedância do sistema elétrico.

**Palavras-chave:** Harmônicas em Sistemas de Potência, Filtros Passivos, Filtros Ativos, Qualidade de Energia Elétrica, Dimensionamento de Filtros.

## ABSTRACT

Silva, Fábio José Braz da Silva. **Passive Filter application at Continuous Industrial Plants**. 2022. Dissertation (Master's in Science and Electrical Engineering) – Polytechnic School, University of Sao Paulo, Sao Paulo, 2023.

In recent years, with the increasing development and reduction in the cost of active filters to mitigate harmonic distortions, the traditional solution based on passive filters has come to be criticized and even neglected.

This dissertation aims to demonstrate that the use of passive filters could be the a good solution, from a technical and economic point of view, particularly in continuous process industrial plants, where the demand for electrical energy has a more stable behavior.

The typical behavior of these installations cover one of the biggest disadvantages of the passive filter, which is precisely due to problems in the effectiveness of mitigation caused by the variation in demand for electrical energy and, consequently, impedance of the electrical system.

**Keywords:** Power System Harmonics, Passive Filters, Active Filters, Electrical Power Quality, Filter Sizing.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Demanda Elétrica de Três Processos Contínuos de Produção Organizada por Nível de Consumo.....	18
Figura 2. Demanda Elétrica de Três Processos Contínuos de Produção em Ordem Cronológica .....	18
Figura 3. Topologias de filtros passivos tipo <i>Shunt</i> : a) <i>Single-tuned</i> , b) Primeira ordem, c) Segunda ordem, d) Terceira ordem, e) Tipo-C .....	20
Figura 4. Respostas típicas dos tipos de filtros passivos. ....	21
Figura 5. Resposta em frequência típica, filtro <i>shunt, single-tuned</i> .....	38
Figura 6: Filtro sintonizado na 4,7ª ordem, conectado à rede, plotado comportamento típico, com diferentes valores de Q, conforme descrito em [7].....	41
Figura 7: Trecho da NBR IEC 60831-1, tabela 4, que traz níveis de tensão admissíveis em serviço. ....	42
Figura 8: Trecho da NBR IEC 60831-1, seção 21, que traz níveis de máxima corrente admitida.....	42
Figura 9: Trecho da NBR IEC 60831-1, apêndice A, que traz níveis de Sobrecarga permitida.....	43
Figura 10: Trecho de Catálogo de Capacitores de potência, Fabricante Schneider. ....	43
Figura 11: Diagrama de impedâncias do Circuito.....	49
Figura 12: Diagrama de impedâncias para uma fase, lado do secundário do transformador, extrato da Figura 11 “a)” e diagrama reorganizado “b)”, mostrando todos os elementos em paralelo.....	49
Figura 13: Fluxograma para dimensionamento de filtros. ....	65
Figura 14: Diagrama Unifilar Simulado: transformadores em paralelo variando conexões no primário. ....	68
Figura 15: CCMs com tensão em fase e defasados de 30° em relação ao primário, ambos Dyn. ....	69
Figura 16: CCMs com tensão em fase e defasados de 30° em relação ao primário, ambos Dyn. ....	70
Figura 17: Diagrama Unifilar Modelado no ATPDraw.....	71
Figura 18: Aspecto geral das correntes no barramento CCM1 da simulação com a entrada da carga não linear no instante 100ms e do filtro no instante 500ms .....	76

Figura 19: Distorção Harmônica de corrente com a conexão das cargas não lineares em 100ms. ....	77
Figura 20: Transitório de conexão do filtro em 500ms e aspecto geral da forma de onda corrigida.....	77
Figura 21: Leitura dos três trechos da simulação, entre 0 e 100ms, entre 100 e 500ms e após 500ms. a) Instante inicial até 100ms .....	78
Figura 22: Espectro das fontes de correntes, simulando a carga não linear.....	79
Figura 23: Comportamento do fator de potência nos três trechos da simulação. ....	80
Figura 24: Corrente da fase da carga não linear e do filtro de harmônicasr.....	81
Figura 25: Espectro das correntes da carga e do filtro de harmônicas. ....	81
Figura 26: Cenário 2 – Espectro de tensão, 13,8kV, antes e depois da conexão do filtro. ....	88
Figura 27: Potência demandada de 60% e fator de potência, válido para cenários de 1 a 7. ....	103
Figura 28: Potência demandada e fator de potência, Filtro de 600kVAr – demanda 60%. ....	104
Figura 29: Potência demandada e fator de potência, Filtro de 600kVAr – demanda 100% - comparar com Figura 23. ....	105
Figura 30: IEEE Std 519: 2014, Tabela 1 – Limite de distorção de tensão .....	121
Figura 31: IEEE Std 519: 2014, Tabela 1 – Limite de distorção de corrente .....	122
Figura 32: Estimativa de custo de Filtros Passivos: Potência x Custo [KR\$] .....	127
Figura 33: Estimativa de custo de Filtros Passivos: Potência x Custo [KR\$] .....	128
Figura 34: Custo de perda de produção por hora parada [kR\$] .....	130

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Espectro Harmônico para inversores 6 pulsos, exemplo.....	39
Tabela 2: Valores de impedância para o espectro considerado.....	51
Tabela 3: Valores de Corrente e Tensão para o espectro considerado. ....	52
Tabela 4: Componentes do ATPDraw utilizados na modelagem. ....	72
Tabela 5: Cenários de Composição dos filtros Simulados. ....	75
Tabela 6: Composição dos filtros Cenário 1, para modelagem no ATP. ....	76
Tabela 7: Resultado da Simulação para o Cenário 1, circuito Figura 13a.....	83
Tabela 8: Resultado da Simulação para o Cenário 1, circuito Figura 13b.....	84
Tabela 9: Cenário 2 - Composição dos componentes para o filtro Sintonizado em 7 <sup>a</sup> ordem. ....	85
Tabela 10: Resultado da Simulação para o Cenário 2, circuito Figura 13a.....	86
Tabela 11: Resultado da Simulação para o Cenário 2, circuito Figura 13b.....	87
Tabela 12: Cenário 3 - Composição dos componentes para o filtro Sintonizado em 11 <sup>a</sup> ordem.....	88
Tabela 13: Resultado da Simulação para o Cenário 3, circuito Figura 13a.....	89
Tabela 14: Resultado da Simulação para o Cenário 3, circuito Figura 13b.....	90
Tabela 15: Cenário 4 - Composição dos componentes para o filtro Sintonizado em 5 <sup>a</sup> e 7 ordens. ....	91
Tabela 16: Resultado da Simulação para o Cenário 4, circuito Figura 13a.....	92
Tabela 17: Resultado da Simulação para o Cenário 4, circuito Figura 13b.....	93
Tabela 18: Cenário 5 - Composição dos componentes para o filtro Sintonizado em 5 <sup>a</sup> e 7 ordens. ....	94
Tabela 19: Resultado da Simulação para o Cenário 5, circuito Figura 13a.....	95
Tabela 20: Resultado da Simulação para o Cenário 5, circuito Figura 13b.....	96
Tabela 21: Cenário 6 - Composição dos componentes para o filtro Sintonizado em 5 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> e 11 <sup>a</sup> ordens. ....	97
Tabela 22: Resultado da Simulação para o Cenário 6, circuito Figura 13a.....	98
Tabela 23: Resultado da Simulação para o Cenário 6, circuito Figura 13b.....	99
Tabela 24: Cenário 7 - Composição dos componentes para o filtro Sintonizado em 5 <sup>a</sup> , 7 <sup>a</sup> e 11 <sup>a</sup> ordens. ....	100
Tabela 25: Resultado da Simulação para o Cenário 7, circuito Figura 13a.....	101
Tabela 26: Resultado da Simulação para o Cenário 7, circuito Figura 13b.....	102

Tabela 27: Valores de Corrente e Tensão Harmônicos para os cenários de demanda 60%.....	106
Tabela 28: Cenário 8 - Composição dos componentes para o filtro Sintonizado em 5ª ordem.....	106
Tabela 29: Resultado da Simulação para o Cenário 8, circuito Figura 13a.....	107
Tabela 30: Resultado da Simulação para o Cenário 8, circuito Figura 13b.....	108
Tabela 31: Cenário 9 - Composição dos componentes para o filtro sintonizado em 5ª e 7 ordens.....	109
Tabela 32: Resultado da Simulação para o Cenário 9, circuito Figura 13a.....	110
Tabela 33: Resultado da Simulação para o Cenário 9, circuito Figura 13b.....	111
Tabela 34: Cenário 10 - Composição dos componentes para o filtro Sintonizado em 5ª e 7 ordens.....	112
Tabela 35: Resultado da Simulação para o Cenário 10, circuito Figura 13a.....	113
Tabela 36: Resultado da Simulação para o Cenário 10, circuito Figura 13b.....	114
Tabela 37: Cenário 11 - Composição dos componentes para o filtro Sintonizado em 5ª, 7 e 11ª ordens.....	115
Tabela 38: Resultado da Simulação para o Cenário 11, circuito Figura 13a.....	116
Tabela 39: Resultado da Simulação para o Cenário 11, circuito Figura 13b.....	117
Tabela 40: Cenário 12 - Composição dos componentes para o filtro Sintonizado em 5ª, 7 e 11ª ordens.....	118
Tabela 41: Resultado da Simulação para o Cenário 12, circuito Figura 13a.....	119
Tabela 42: Resultado da Simulação para o Cenário 12, circuito Figura 13b.....	120
Tabela 43: Resumo dos resultados totais, no nível de 480V e 13,8kV – Cenários de 1 a 12.....	124
Tabela 44: Resultados totais no nível de 13,8kV com 20 transformadores conectados.....	125
Tabela 45: Tomada de preço Filtro de Harmônicas 600kVAr, passivo <i>single-tuned</i> e ativo.....	126

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
<b>1.1.</b>	<b>Motivação.....</b>	<b>19</b>
<b>2.</b>	<b>PESQUISA BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1.</b>	<b>An Investigation on the Selection of Filter Topologies for Passive Filter Applications - Alexandre B. Nassif, Student Member, IEEE, Wilsun Xu, Fellow, IEEE, and Walmir Freitas, Member, IEEE, 2003. ....</b>	<b>20</b>
<b>2.2.</b>	<b>Passive Filters - Potentialities and Limitations - J. C. Das, Senior Member, IEEE, 2004. ....</b>	<b>22</b>
<b>2.3.</b>	<b>Harmonics Mitigation of Industrial Power System Using Passive Filters - ZUBAIR AHMED MEMON, MOHAMMAD ASLAM UQUAILI, AND MUKHTIAR ALI UNAR, 2012.....</b>	<b>23</b>
<b>2.4.</b>	<b>Implementation of Different Passive Filter Designs for Harmonic Mitigation - S.N. AL. Yousif, M. Z. C. Wanik, Mohamed, 2004.....</b>	<b>23</b>
<b>2.5.</b>	<b>Performance for Passive and Active Power Filter in Reducing Harmonics in the Distribution System - M.Izhar, C.M.Hadzer, SyafrudinM, S.Taib and S. Idris, 2004.....</b>	<b>24</b>
<b>2.6.</b>	<b>PASSIVE SHUNT HARMONIC FILTERS FOR LOW AND MEDIUM VOLTAGE: A COST COMPARISON STUDY - Cornelia Kawann, Graz University of Technology Austria, 1996.....</b>	<b>24</b>
<b>2.7.</b>	<b>Design of Filters to Reduce Harmonic Distortion in Industrial Power Systems – DAMIANA, GONZALEZ. AND JOHNC. MCCALL, 1987.....</b>	<b>25</b>
<b>2.8.</b>	<b>Optimal Capacitor Placement and Sizing in Distorted Radial Distribution Systems Part I: System Modeling and Harmonic Power Flow Studies - A. A. Eajal, Student Member, IEEE, and M. E. El-Hawary, Fellow, IEEE, 2010</b>	<b>25</b>
<b>2.9.</b>	<b>A New Approach for Placement of Single-Tuned Passive Harmonic Filters in a Power System - G. W. Chang, S. Y. Chu, H. L. Wang, 2002.....</b>	<b>25</b>

<b>2.10. A Study of the Fundamental Principles to Power System Harmonic - M. Jzhar, C. M. Hadzer, S. Masri and S. Idris, 2003.....</b>	<b>26</b>
<b>2.11. Elimination of Supply Harmonics – S. L. CLARK, P. FAMOURI, 1997 ...</b>	<b>26</b>
<b>2.12. Distribution System Harmonic Filter Planning - Thomas H. Ortmeyer, Takashi Hiyama, 1996 .....</b>	<b>27</b>
<b>2.13. The Optimal Passive Filters to Minimize Voltage Harmonic Distortion at a Load Bus - Ahmed Faheem Zobaa, 2005.....</b>	<b>27</b>
<b>2.14. Optimal Planning of Large Passive-Harmonic-Filters Set at High Voltage Level - Chih-Ju Chou, Chih-Wen Lio, June-Yawn Lee, and Kune-Da Lee, 2000</b>	<b>27</b>
<b>2.15. Harmonic Passive Filter Planning in Radial Distribution Systems Using Genetic Algorithms - Franklin M. P. Pamplona and Benemar A. Souza, 2004 ...</b>	<b>28</b>
<b>2.16. Passive Harmonic Filter Design Scheme - XIAODONG LIANG &amp;OBINNA ILOCHONWU, 2011 .....</b>	<b>28</b>
<b>2.17. Optimal C-Type Passive Filter Based on Minimization of the Voltage Harmonic Distortion for Nonlinear Loads - Shady Hossam Eldeen Abdel Aleem, Ahmed Faheem Zobaa, Senior and Mohamed Mamdouh Abdel Aziz, 2012 .....</b>	<b>29</b>
<b>2.18. Advanced Configuration of Hybrid Passive Filter for Reactive Power and Harmonic Compensation - O. Fatih Kececioglu, Hakan Acikgoz and Mustafa Sekkeli, 2016 .....</b>	<b>29</b>
<b>2.19. Investigate Quality Factor of Single Tuned Passive Filter to Reduce Harmonic of LED Lamp - Edi Sarwono, Esa Apriaskar and Nur Azis Salim, 2020</b>	<b>29</b>
<b>2.20. Single Tuned Harmonic Shunt Passive Filter Design for Suppressing Dominant Odd Order Harmonics to Improve Energy Efficiency - Mansoor Ahmed Soomro, Anwar Ali Sahito, Irfan Ahmed Halepoto and Kamran Kazi, 2016</b>	<b>30</b>
<b>2.21. Design and Application of a Single-Tuned Passive Harmonic Filter to Suppress Harmonic Distortion and Resonance for Railway Traction Power Systems - A Case Study - Wei-Hsiang Ko, Martti Tuomainen, 2021 .....</b>	<b>30</b>

2.22. Strategic Placement and Sizing of Passive Filters in a Power System for Controlling Voltage Distortion - Gary W. Chang, Hung-Lu Wang, and Shou-Yung Chu, 2004 .....	31
2.23. High-Voltage Passive Harmonic Filter Design - Jakkapong Tupsa-ard, Chaiya Chamchoy and Thavatchai Tayjasant, 2011 .....	31
2.24. Effective Harmonic Cancellation Technique for a Three-Phase Four-Wire System - Buddhadeva Sahoo, Mohammed M. Alhaider and Pravat Kumar Rout, 2022 .....	31
2.25. Optimal Harmonic Mitigation in Distribution Systems with Inverter Based Distributed Generation - Ahmed S. Abbas, Ragab A. El-Sehiemy, Adel Abou El-Ela, Eman Salah Ali, Karar Mahmoud, Matti Lehtonen and Mohamed M. F. Darwish, 2021 .....	32
2.26. Analysis and Mitigation of Harmonic Resonances in Multi-Parallel Grid-Connected Inverters: A Review - Ramy Ali and Terence O'Donnell, 2022	33
2.27. IEC Standard 60871-1: Shunt Capacitors for A.C. Power System Having a Rated Voltage Above 1000 V (2014).....	33
2.28. Power Capacitors – Low-Voltage Power Factor Correction Banks (2017)	33
2.29. IEEE Std 3002.8 - Recommended Practice for Conducting Harmonic Studies and Analysis of Industrial and Commercial Power Systems (2018). ....	34
2.30. Power System Harmonics Research: A Survey – G. K. Singh, 2009 .....	34
3. OBJETIVO .....	34
4. POSSÍVEIS ABORDAGENS PARA MITIGAÇÃO DE DISTORÇÕES HARMONICAS.....	35
5. DIMENSIONAMENTO DOS FILTROS .....	37
5.1. Critério de desempenho das soluções.....	39
5.1.1. Mitigação das distorções: .....	39
5.1.2. Correção do Fator de Potência: .....	40

5.1.3.	Fator de qualidade: .....	40
5.2.	Critérios de aprovação do dimensionamento do Banco de Capacitores 41	
5.2.1.	Corrente eficaz .....	44
5.2.2.	Tensão eficaz Capacitores .....	44
5.2.3.	Potência eficaz Capacitores .....	45
5.2.4.	Tensão de pico Capacitores.....	45
5.3.	Dimensionamento dos Filtros .....	45
5.3.1.	Determinação da potência do banco de capacitores:.....	46
5.3.2.	Seleção da ordem de sintonia.....	46
5.3.3.	Dimensionando os capacitores .....	47
5.3.3.1.	Calcular as tensões e correntes RMS nos capacitores:.....	47
5.3.3.2.	Verificação do Fator de potência com o Banco de Capacitores: .....	55
5.3.3.3.	Verificar o Risco de Ressonância do Banco de capacitores .....	56
5.3.3.4.	Passando de Banco de Capacitores para Filtro de Harmônicas .....	57
5.3.3.5.	Seleção dos Capacitores – Componentes comerciais e Verificação/Aprovação.....	59
5.3.3.5.1.	Corrente Eficaz .....	60
5.3.3.5.2.	Tensão Eficaz nos Capacitores .....	60
5.3.3.5.3.	Potência Eficaz Capacitores .....	61
5.3.3.5.4.	Tensão de Pico Capacitores .....	62
5.4.	Verificação/Definição do Fator de Qualidade .....	62
5.5.	Sumário e Síntese da metodologia.....	63
6.	SIMULAÇÃO .....	66



6.1.	MODELAGEM .....	70
6.2.	Cenário 1 – Comentários gerais e validação do modelo – Filtro sintonizado em 5ª ordem – Demanda 100%.....	76
6.3.	Cenário 2 – Filtro sintonizado em 7ª ordem – Demanda 100%.....	85
6.4.	Cenário 3 – Filtro sintonizado em 11ª ordem – Demanda 100%.....	88
6.5.	Cenário 4 – Filtro sintonizado em 5ª e 7ª ordens – 2 x 280 kVAr – Demanda 100%.....	91
6.6.	Cenário 5 – Filtro sintonizado em 5ª e 7ª ordens – 350 kVAr e 210 kVAr – Demanda 100%.....	94
6.7.	Cenário 6 – Filtro sintonizado em 5ª, 7ª e 11ª ordens – 285 kVAr, 185 kVAr e 90 kVAr – Demanda 100% .....	97
6.8.	Cenário 7 – Filtro sintonizado em 5ª, 7ª e 11ª ordens – 3 x 186,6 kVAr – Demanda 100%.....	100
6.9.	Cenário 8 – Filtro sintonizado em 5ª ordem – Demanda 60%.....	103
6.10.	Cenário 9 – Filtro sintonizado em 5ª e 7ª ordens – 2 x 300 kVAr - Demanda 60%.....	109
6.11.	Cenário 10 – Filtro sintonizado em 5ª e 7ª ordens – 360 kVAr e 240 kVAr - Demanda 60%.....	112
6.12.	Cenário 11 – Filtro sintonizado em 5ª, 7ª e 11 ordens – 300 kVAr, 200 kVAr e 100 kVAr - Demanda 60% .....	115
6.13.	Cenário 12 – Filtro sintonizado em 5ª, 7ª e 11 ordens – 3 x 200 kVAr - Demanda 60%.....	118
7.	RESULTADOS .....	121
8.	ANÁLISE ECONOMICA .....	126
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	133

## 1. INTRODUÇÃO

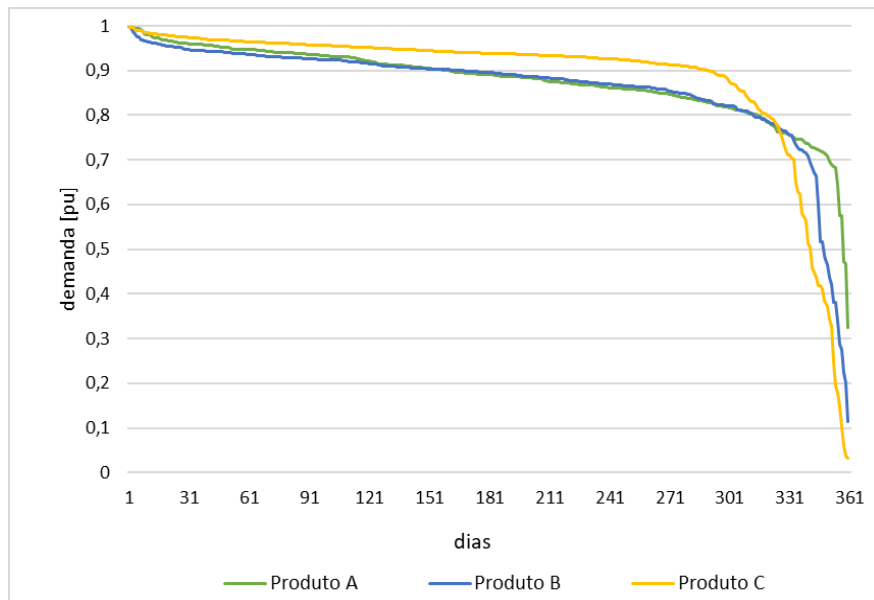
Nas últimas décadas a mitigação das distorções harmônicas se tornaram uma preocupação e objeto de discussões sempre presentes no setor elétrico, especialmente na distribuição de energia elétrica, tanto pública quanto industrial [5]. Muitas técnicas para solução desse problema foram desenvolvidas, no entanto, essas técnicas normalmente se baseiam em torno de duas abordagens: aplicação de filtros passivos e aplicação de filtros ativos, [2][5]. Cada solução desenvolvida naturalmente tem sua virtude. A grande dificuldade recai em encontrar a solução mais adequada para cada caso.

Neste trabalho a análise foca na mitigação das distorções harmônicas em indústrias de processo contínuo, cujo comportamento característico de consumo de energia elétrica contorna as maiores dificuldades da aplicação de filtros passivos e permite a adoção de premissas que favorecem o dimensionamento dos filtros. No entanto, os conceitos aqui apresentados são válidos para qualquer estudo e qualquer tipo de planta. A característica da demanda elétrica em processos contínuos tende a ter comportamentos típicos. Processos industriais desse tipo diferem dos demais por conta, principalmente, da pequena variação de demanda elétrica, como pode ser observado na Figura 1. Já em plantas de processos por batelada têm características de demandas elétricas com grandes variações ao longo do dia (baixos fatores de carga) e comportamentos sazonais mais evidentes. Embora este trabalho foque em indústrias de Papel e Celulose, o método e conceitos aqui discutidos se aplicam a qualquer indústria de processo contínuo, como por exemplo, refinarias, linhas de envasamento, siderúrgicas, etc.

Tomando como exemplo, casos reais de três linhas de produção em uma planta industrial de papel e celulose, com medições diárias, é possível notar que as demandas elétricas diárias ilustram os comportamentos típicos das rotinas de produção, Figura 2, e que não oferecem evidência de uma grande variação. Mas, quando se observa a Figura 1, que representa as mesmas linhas de produção organizadas de forma decrescente dos níveis de demanda elétrica, é possível constatar que durante a maior parte do tempo, cerca de 90% ao longo de um ano de medição, a carga permanece dentro de uma faixa estável. Essas características indicam que a aplicação de filtros

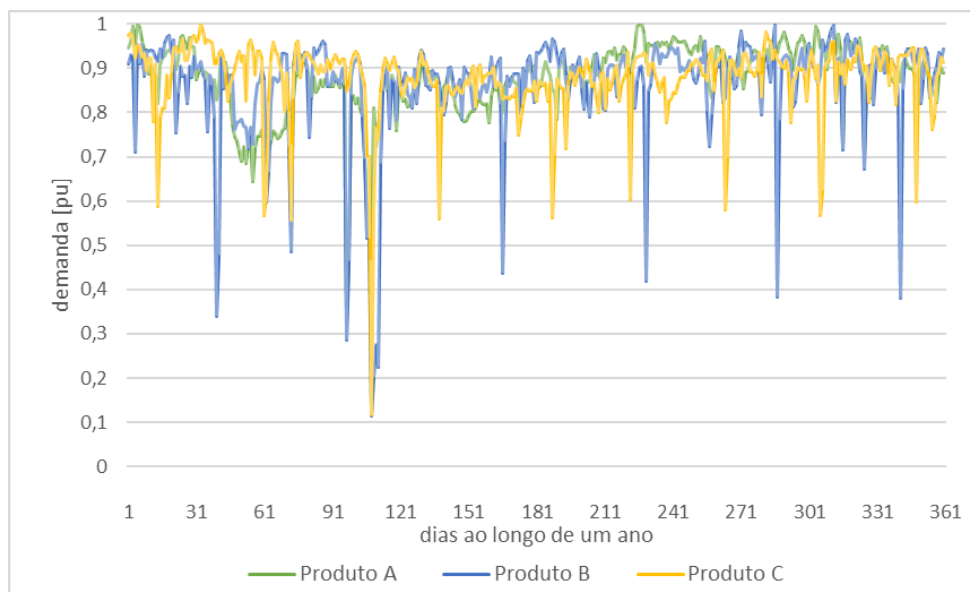
passivos pode ser uma alternativa interessante, uma vez que uma das maiores dificuldades do dimensionamento dos filtros passivos, a variação da carga, acontece de forma pouco significativa.

Figura 1. Demanda Elétrica de Três Processos Contínuos de Produção Organizada por Nível de Consumo



Fonte: Autor

Figura 2. Demanda Elétrica de Três Processos Contínuos de Produção em Ordem Cronológica



Fonte: Autor

As curvas ilustradas na Figura 1 permitem ter uma visão estatística do tempo em que a carga permanece maior ou menor do que um determinado patamar. Assim, pode-se determinar de maneira segura os valores máximos e mínimos a serem utilizados nos dimensionamentos dos filtros.

Este trabalho inclui uma análise das soluções baseadas em filtros passivos, aborda seu dimensionamento, faz simulações para demonstrar a eficácia da solução e finalmente demonstra um comparativo de custo da solução com filtro passivo e com filtro ativo.

### **1.1. Motivação**

Os processos industriais demandam muita energia, conseqüentemente, muita potência reativa. Tendo a obrigação de garantir a qualidade de energia no ponto de conexão, as indústrias têm a possibilidade de proceder a correção com filtros ativos ou passivos. Este trabalho pretende responder à questão: filtros passivos têm resposta suficientemente boa, de modo a ter um resultado com melhor custo-benefício, em comparação com os filtros ativos?

## **2. PESQUISA BIBLIOGRÁFICA**

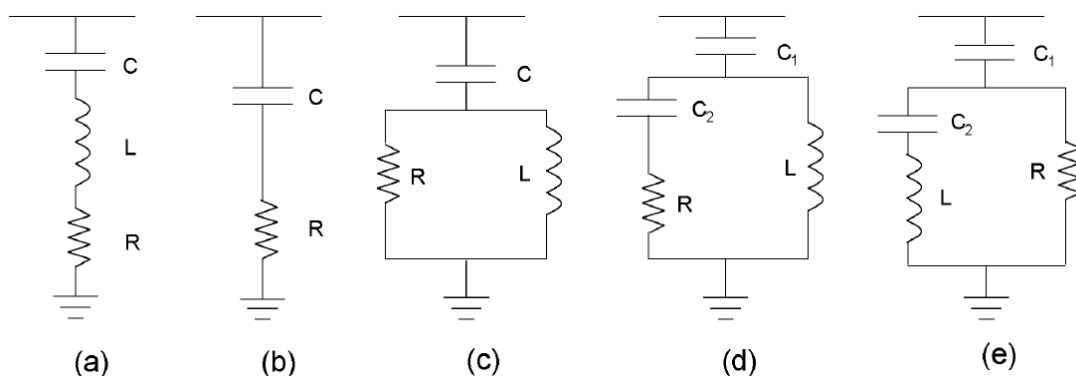
A discussão sobre utilização de filtros para mitigar ação de distorções harmônicas é um tema que vem sendo desenvolvido há décadas, no entanto ainda há espaço para discussão das soluções. A seguir algumas ponderações sobre o tema serão apresentadas, para melhor embasar este trabalho e dar direcionamento para encontrar as respostas necessárias e trazer à tona questões que ainda merecem estudo. As referências não seguiram ordem cronológica de publicação, mas seguiram por assunto, conforme os conceitos ou pontos tratados forem necessários são trazidos os trabalhos correspondentes, de modo a ir construindo as bases para o desenvolvimento das ideias. Há, entretanto, artigos recentes e outros com mais tempo de publicação sendo discutidos juntos, com intuito de favorecer o tema discorrido. Deve-se observar que de uma maneira ampla os autores concordam que a aplicação de filtros sintonizados simples, os chamados "*single-tuned*", constituem a solução mais comum e mais recomendada dentre grande parte da literatura que desenvolve este tema [1]-[120]. Este trabalho pretende demonstrar e desenvolver soluções para cenários industriais,

cujas características específicas e dificuldades encontradas serão discutidas no desenvolvimento da solução.

**2.1. An Investigation on the Selection of Filter Topologies for Passive Filter Applications - Alexandre B. Nassif, Student Member, IEEE, Wilsun Xu, Fellow, IEEE, and Walmir Freitas, Member, IEEE, 2003.**

Esta excelente publicação discorre sobre os diversos tipos de filtros e topologias, resgata o conceito e princípio de funcionamento dos arranjos topológicos e como eles variam do ponto de vista de resposta em frequência.

Figura 3. Topologias de filtros passivos tipo *Shunt*: a) *Single-tuned*, b) Primeira ordem, c) Segunda ordem, d) Terceira ordem, e) Tipo-C



Fonte: Publicação em referência, item 2.1

Seguindo a Figura 3 o filtro de primeira ordem (b) tem somente um componente reativo, o que o torna um filtro de primeira ordem, a seleção do capacitor é feita conforme a frequência de corte, e não conforme a potência reativa desejada, portanto, do ponto de vista da solução de correção de distorção harmônica esta característica faz com que esse tipo de filtro seja descartado.

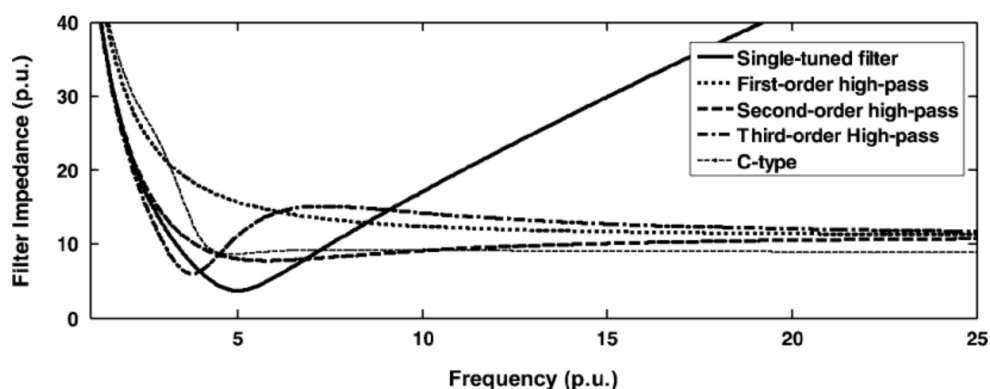
O filtro de segunda ordem (c) tem dois componentes reativos, um capacitor e um indutor. Ele é dimensionado de tal modo que se comporta como um *single-tuned* abaixo da frequência de sintonia e similar a um de primeira ordem para frequências altas. Isso ocorre por conta da reatância indutiva que tem valor baixo nas frequências baixas, de modo que absorve a maior parte da corrente em detrimento do resistor e valor alto nas

frequências altas, transferindo a corrente para o resistor. Na frequência de sintonia tem um afundamento na impedância, porém menos eficaz do que no filtro *single-tuned*.

O filtro de terceira ordem (d) tem três componentes reativos, dois capacitores e um indutor, como os demais apresenta alta impedância na frequência fundamental em seguida vai diminuindo gradativamente até próximo da frequência de sintonia, nas bandas de frequências mais altas tem comportamento equivalente aos filtros de primeira e segunda ordem. Os capacitores C1 e C2 são sintonizados na ordem desejada junto com o Indutor, por isso tem comportamento ao similar ao filtro *single-tuned* na até pouco antes da frequência de sintonia, onde apresenta um pico anti-ressonante, ver Figura 4. Esse filtro tem perdas menores do que o filtro de segunda ordem devido a inserção do capacitor C2 em série com o resistor. Essa característica faz com que este filtro tenha uma eficiência maior na região da frequência de sintonia, como também demonstrado em [11] e [33].

O filtro tipo C (e) se encontra entre o filtro de primeira e de terceira ordem. O segmento LC em paralelo com o resistor é sintonizado na fundamental, de modo que que nesse cenário se comporta como um capacitor, pois o segmento LC anula o efeito do resistor. Assim, a pequena corrente que flui pelo resistor garante uma baixa perda na fundamental. À medida que a frequência aumenta o conjunto C1+C2 e indutor tendem para um filtro *single-tuned* com resistor de amortecimento. Nas frequências mais altas, o indutor passa a transferir corrente para o resistor, se comportando como um filtro de primeira ordem, o mesmo que ocorre no filtro de segunda ordem.

Figura 4. Respostas típicas dos tipos de filtros passivos.



Fonte: Publicação em referência, item 2.1

O filtro *single-tuned* (filtro sintonizado simples), é composto por um capacitor e um indutor e dimensionados de tal forma que a impedância na frequência selecionada é mínima. Por esta razão, ele é comumente utilizado para filtrar uma frequência específica. Outra característica, talvez a mais importante, é que este tipo permite instalar a aplicação de banco de capacitores para corrigir o fator de potência em múltiplos estágios, e, então, sintonizá-lo, através do indutor, para a ordem desejada. Essa característica é muito apreciada em projetos industriais, onde existe a obrigação de corrigir o fator de potência. Como muitos projetos exigem a correção de mais de uma ordem específica, o filtro sintonizado simples se mostra uma solução boa por garantir alta eficiência em cada ordem selecionada e ainda tem, conseqüentemente, menor custo e menor espaço físico. Além disso, ele é mais fácil de ser implementado do que os demais tipos. Muitas publicações ratificam e corroboram para essa conclusão, como em [2]-[10].

A publicação abrange as principais aplicações e quais as ordens harmônicas críticas no sistema elétrico, aborda estratégias de seleção dos tipos de filtros, defende a combinação de topologias de filtros, embora indique o filtro *single-tuned* como a melhor solução quando são aplicados conjuntos de filtros para conjunto de ordens harmônicas selecionadas para serem corrigidas, de maneira geral 3 ou 4 ordens. O artigo recomenda que eles tenham o mesmo dimensionamento, embora sugira que sejam dimensionados conforme a contribuição de cada ordem selecionada, esse é o ponto que foi analisado neste trabalho. O artigo fala sobre a utilização dos filtros no nível de média tensão, mas não apresenta justificativa, como que sugerindo como uma boa prática. O autor não é taxativo com relação a nenhuma conclusão, embora o artigo dê margem para conclusões mais específicas.

O trabalho proposto aqui visa explorar potenciais conclusões específicas para aplicação industrial, evitando conclusões superficiais, mas definindo claramente direções a serem seguidas.

## **2.2. Passive Filters - Potentialities and Limitations - J. C. Das, Senior Member, IEEE, 2004.**

Este é um autor clássico do tema de distorções harmônicas e filtros passivos. Ele tem um livro publicado pelo IEEE, *Power System Harmonics and Passive Filters Designs*, de conteúdo bem completo e qualidade incontestável. O título desse artigo já indica que

aplicação de filtros tem suas limitações. Entretanto, nesse trabalho ele discorre sobre as limitações dos diferentes tipos de topologias, não exatamente às limitações da solução de utilização de filtros passivos. O tema é desenvolvido de maneira bem pragmática, apresentando cenários reais, como a descrição das fontes de distorção harmônica na indústria, baseada em retificadores e inversores de frequência. O artigo conclui que uma combinação de filtros *single-tuned* se mostra como a melhor alternativa prática para aplicação no sistema elétrico industrial, corroborando a conclusão do artigo descrito no item 2.1.

### **2.3. Harmonics Mitigation of Industrial Power System Using Passive Filters - ZUBAIR AHMED MEMON, MOHAMMAD ASLAM UQUAILI, AND MUKHTIAR ALI UNAR, 2012**

Neste artigo o autor faz desenvolvimentos equivalentes aos anteriores para decidir sobre a seleção do tipo de filtro, dentre as diversas topologias são selecionadas duas, *single-tuned* e segunda ordem, este último é sintonizado para 17ª para garantir a atenuação de distorções de altas frequências para evitar interferências em redes telefônicas, que hoje se tornou desnecessário, uma vez que a rede telefônica via cabos metálicos caiu em desuso. No final a solução apresentada utiliza filtros *single-tuned* para mitigar distorções de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª. O artigo, de uma maneira ampla, recomenda a aplicação de filtros *single-tuned*, ou combinação deles, como uma das mais eficientes e efetivas para solucionar distorção harmônica.

### **2.4. Implementation of Different Passive Filter Designs for Harmonic Mitigation - S.N. AL. Yousif, M. Z. C. Wanik, Mohamed, 2004**

Este artigo apresenta desenvolvimentos teóricos e análise a respeito de diferentes tipos de filtros e faz uma seleção de dois tipos, dentre uma variedade grande de topologias, comparando 6 diferentes arranjos de filtros. Por fim, aplica o *single-tuned* e o *double-tuned*. A conclusão é convergente aos anteriores. Esse artigo apresenta questões relevantes do ponto de vista prático, o autor demonstra experiência robusta aplicação de filtros, os critérios utilizados para dimensionamento vão além das recomendações de normas. O filtro *double-tuned* funciona como dois filtros sintonizados em duas diferentes ordens, com a vantagem de que somente um único reator fica sujeito a



tensão nominal, de maneira que o conjunto fica fisicamente menor quando comparado a dois filtros *single-tuned*. O autor desenvolve uma simulação em um sistema com 13 pontos de monitoramento de tensão e corrente, simulando o sistema com e sem filtros. À medida que as distorções são identificadas os filtros são posicionados em diversos pontos e resultados são apresentados. Esse artigo é de grande interesse e tem bastante afinidade com o estudo desenvolvido neste trabalho.

**2.5. Performance for Passive and Active Power Filter in Reducing Harmonics in the Distribution System - M.Izhar, C.M.Hadzer, SyafrudinM, S.Taib and S. Idris, 2004**

Esse artigo compara tecnicamente o desempenho dos filtros passivos e ativos, nas tabelas comparativas se verifica que para um mesmo cenário o filtro ativo sempre tem corrente maior do que o filtro passivo, demonstrando que o filtro ativo filtra as distorções com mais eficiência, filtra também uma gama maior de ordens harmônicas. Os resultados do artigo são esperados, naturalmente os filtros ativos devem ter precisão e performance tecnicamente melhor. No entanto, o artigo não faz análise técnico-econômica.

**2.6. PASSIVE SHUNT HARMONIC FILTERS FOR LOW AND MEDIUM VOLTAGE: A COST COMPARISON STUDY - Cornelia Kawann, Graz University of Technology Austria, 1996**

Esse artigo faz uma abordagem interessante do ponto de vista econômico, faz uma análise do custo dos filtros em \$/kVAr, além de uma estimativa em kVA de carga, de modo a analisar um grupo de cargas. O objetivo é verificar se vale a pena colocar filtro para determinado montante de cargas. São feitas comparações de posicionamento na baixa e média tensão. O autor conclui que acima de 1MVA é mais econômico instalar filtros na média tensão. Esse artigo traz uma contribuição interessante, sugerindo criar índices de preço por tamanho de filtro, tanto para baixa como para média tensão, podendo ser uma ferramenta para análise preliminar de custo de possibilidade de soluções. A contribuição importante nesse trabalho está no que concerne a análise técnico-econômica.

Há trabalhos que comparam a performance de filtro ativo versus filtro passivo, sob o ponto de vista técnico. É certo que os filtros ativos terão performance melhor, não há

dúvida. No entanto a análise técnico-econômica é que, na prática, pode determinar seguir com uma solução ou outra.

### **2.7. Design of Filters to Reduce Harmonic Distortion in Industrial Power Systems – DAMIANA, GONZALEZ. AND JOHNC. MCCALL, 1987**

O artigo desenvolve os princípios dos filtros passivos em várias topologias possíveis, *single-tuned*, primeira-ordem passa-alta, segunda ordem passa-alta, terceira ordem passa-alta. A discussão abrange critério de utilização, avaliação de perdas, valores de corrente e tensão, características dos componentes e efeito dos filtros no sistema elétrico. Um dos melhores artigos sobre o tema, embora tenha sido publicado em 1987. Discorre sobre os conceitos principais, fator de qualidade, resposta em frequência, sintonia e influência da rede. No estudo de caso apresentado no artigo o filtro empregado é do tipo *single-tuned*.

### **2.8. Optimal Capacitor Placement and Sizing in Distorted Radial Distribution Systems Part I: System Modeling and Harmonic Power Flow Studies - A. A. Eajal, Student Member, IEEE, and M. E. El-Hawary, Fellow, IEEE, 2010**

Esse artigo desenvolve um algoritmo para otimização de posicionamento de filtros. O desenvolvimento é interessante. O resultado traz uma contribuição intuitiva, de que os filtros devem ser posicionados o mais próximo possível das fontes de distorção. independente de se ter uma ferramenta de otimização de posicionamento, pode-se concluir intuitivamente as melhores posições para os filtros.

### **2.9. A New Approach for Placement of Single-Tuned Passive Harmonic Filters in a Power System - G. W. Chang, S. Y. Chu, H. L. Wang, 2002**

Esse artigo apresenta um método para fazer dimensionamento de filtro através de método iterativo, partindo da premissa que de que o filtro aplicável é o tipo *single-tuned*. As equações testam filtros utilizando componentes com valores de mercado para resistência e capacitância até encontrar o melhor resultado para cada ordem e carga em cada barra do sistema. O artigo foca em apresentar um método para determinação dos filtros, mas não discute a teoria dos filtros, simplesmente parte de premissas

consagradas pelo uso. Esse trabalho traz uma contribuição interessante do ponto de vista de otimizar uma solução. No entanto, como utiliza um método computacional, ao invés de métodos que seguem os conceitos de sistemas elétricos de potência, ele pode ser utilizado como método de validação, para verificar se uma solução determinada está conforme as características do sistema de potência. Tal aspecto é tecnicamente recomendável por garantir que normas, regulações e boas práticas estão sendo seguidas.

#### **2.10. A Study of the Fundamental Principles to Power System Harmonic - M. Jzhar, C. M. Hadzer, S. Masri and S. Idris, 2003**

Esse artigo desenvolve os princípios dos filtros passivos, seus efeitos, vantagens e desvantagem da aplicação, parte da premissa de que o filtro a ser utilizado é do tipo *single-tuned*. O artigo pontua que mesmo em face a várias desvantagens o filtro passivo é um dos mais confiáveis e mais largamente aplicado. O artigo apresenta como alternativa os filtros ativos e faz uma breve discussão a respeito do funcionamento deste equipamento, abrangendo também suas vantagens e desvantagens. Faz uma abordagem sobre a possibilidade de combinar filtros ativos e passivos, os chamados filtros híbridos, de maneira a obter melhores resultados.

#### **2.11. Elimination of Supply Harmonics – S. L. CLARK, P. FAMOURI, 1997**

Abordando os efeitos e danos causados pelas distorções harmônicas, esse artigo dá boas contribuições para formar um bom entendimento sobre estes efeitos e sobre a real necessidade de combater as distorções. Ele discorre sobre as fontes de distorções harmônicas e seus efeitos, um dos artigos que mais fala sobre os efeitos de sobre aquecimento, potência pulsante, etc. Ele cita publicações que tratam da utilização de componentes elétricos submetidos a fontes poluídas com distorções harmônicas. Aborda também o fenômeno de ressonância da frequência natural da rede. Sobre os métodos de compensação, o artigo foca na utilização de filtros ativos, abordando alguns métodos de monitoramento e injeção de corrente no sistema elétrico, mostrando como o filtro ativo evoluiu ao longo das décadas, desde seus primeiros estudos com B.M. Bird, J.F. Marsh, and P.R. McLellan, "Harmonic Reduction in Multiplex Converters by Triple-frequency Current Injection," Proc. IEE, 116 (10), pp. 1730-1734, Oct. 1969, onde é defendida injeção de corrente de 3ª ordem através de conversores de frequência

como método de compensação. Ele é considerado um dos pioneiros no desenvolvimento de filtros ativos.

#### **2.12. Distribution System Harmonic Filter Planning - Thomas H. Ortmeyer, Takashi Hiyama, 1996**

Esse artigo discorre sobre a maneira como as distorções harmônicas se propagam no sistema elétrico, a discussão se desenvolve em torno do planejamento do combate aos efeitos olhando para o sistema de distribuição como um todo, ponderando as variações de carga e como isso influencia a sintonia dos filtros. O artigo propõe que filtros pequenos sejam distribuídos na rede ao invés de colocar filtros maiores nos pontos de alimentação. Esse método converge para a conclusão de vários outros artigos, como [2], [3], [5], [7], [8], [9], [10], [17] que defendem que a melhor posição para os filtros é o mais próximo possível da origem, ou seja, das cargas geradoras de distorção. É recomendada utilização de filtros *single-tuned*.

#### **2.13. The Optimal Passive Filters to Minimize Voltage Harmonic Distortion at a Load Bus - Ahmed Faheem Zobaa, 2005**

Esse artigo apresenta um método que propõe otimização no dimensionamento dos filtros balanceando os riscos de ressonância com o objetivo de utilizar capacitores para corrigir fator de potência e seleção do reator de sintonização. É apresentado um comparativo entre colocar o fator de potência no valor desejado ou manter fator de potência de deslocamento, isto é, o fator de potência resultante do efeito dos capacitores do filtro de harmônicas. O autor conclui que vale a pena utilizar bancos de capacitores para corrigir o fator de potência e sintonizá-los para mitigar distorções harmônicas. No entanto, pontua que esse método depende do conhecimento do sistema elétrico, uma vez que pode haver casos que este método pode não ser a solução ótima.

#### **2.14. Optimal Planning of Large Passive-Harmonic-Filters Set at High Voltage Level - Chih-Ju Chou, Chih-Wen Lio, June-Yawn Lee, and Kune-Da Lee, 2000**

Esse artigo propõe o planejamento ótimo de grandes filtros passivos conectados em nível de média tensão com base em múltiplos tipos e conjuntos de filtros, a partir dos

quais, tipos, conjuntos, capacidades e parâmetros importantes dos filtros são determinados para satisfazer os requisitos de filtro harmônico e fator de potência. Quatro tipos de filtros são selecionados para o planejamento. Primeiramente, são analisadas as características dos filtros. A função de custo e as restrições de filtros e sistema são construídas para solucionar o problema de otimização do dimensionamento de filtros. Em segundo lugar, é desenvolvido o algoritmo de dimensionamento para busca da solução ótima dos filtros. Finalmente, três casos de dimensionamento de filtros são apresentados para mostrar a eficácia dos resultados do método proposto. O artigo não considera componentes com valores de capacitância de mercado, o que torna resultados pouco aderentes à aplicação prática, no entanto as ponderações são boas contribuições.

**2.15. Harmonic Passive Filter Planning in Radial Distribution Systems Using Genetic Algorithms - Franklin M. P. Pamplona and Benemar A. Souza, 2004**

Esse artigo discute as dificuldades no dimensionamento dos filtros resultantes das características do sistema elétrico, a rede, o artigo propõe um algoritmo para encontrar dimensionamento otimizado, levando em consideração, a localização do filtro, tamanho, redução de perdas, níveis de tensão e corrente e os níveis de distorção. A simulação descrita mostra que os níveis de distorção são minimizados, em um sistema de 15 barras, mostrando a eficiência do método, são utilizados filtros *single-tuned*.

**2.16. Passive Harmonic Filter Design Scheme - XIAODONG LIANG & OBINNA ILOCHONWU, 2011**

Esse artigo declara que os tradicionais filtros passivos *single-tuned* para conversores de frequência 6 pulsos são de maneira geral aceitáveis, não apresentando restrições de utilização. O artigo discorre sobre o problema da ressonância e mostra a teoria tradicional já consagrada para aplicação e dimensionamento de filtros se confirmam como soluções adequadas para resolver os problemas de distorção harmônica. O tipo de planta discutida são plataformas offshore, abrangendo dimensionamento de cabos submarinos.

**2.17. Optimal C-Type Passive Filter Based on Minimization of the Voltage Harmonic Distortion for Nonlinear Loads - Shady Hossam Eldeen Abdel Aleem, Ahmed Faheem Zobaa, Senior and Mohamed Mamdouh Abdel Aziz, 2012**

Esse artigo defende a aplicação de filtro tipo C por meio de um algoritmo, implementado em Fortran, que apresenta essa solução como alternativa à solução tradicional de filtros *single-tuned*. O artigo se refere aos filtros passivos como uma técnica muito poderosa para supressão de distorções harmônicas. O filtro tipo C é recomendado nesse artigo por ser aplicado em rede de transmissão sujeita a grande variação da carga, conseqüentemente, oferecendo grande variação na impedância do sistema. O estudo apresentado abrange, inclusive, variação na potência de curto-circuito. O filtro tipo C tem boa resposta para evitar ressonância paralela. Apesar da presente dissertação visar aplicações em sistemas com baixa variação de carga, o artigo é muito útil do ponto de vista do método de análise, em virtude do algoritmo apresentado, e por ser facilmente implementado, uma vez que se utiliza método numérico.

**2.18. Advanced Configuration of Hybrid Passive Filter for Reactive Power and Harmonic Compensation - O. Fatih Kececioglu, Hakan Acikgoz and Mustafa Sekkeli, 2016**

Esse artigo propõe uma melhoria na solução dos tradicionais filtros passivos, podendo ser aplicado em plantas com filtros já instalados. A configuração proposta é inovadora, acrescenta filtro ativo em combinação com filtros passivos. A grande contribuição desse artigo é trazer contribuição sobre o dimensionamento da variação de carga e impedância, e aplicar o filtro passivo para a grande massa de carga e um filtro ativo para a parcela variável, de modo que o filtro ativo fica com a menor potência possível, otimizando o custo de implementação, e resolvendo o problema da variação de carga.

**2.19. Investigate Quality Factor of Single Tuned Passive Filter to Reduce Harmonic of LED Lamp - Edi Sarwono, Esa Apriaskar and Nur Azis Salim, 2020**

Esse artigo desenvolve o tema de distorções provocadas pela crescente aplicação de lâmpadas LED. O artigo afirma que os filtros *single-tuned* constituem a melhor solução para mitigação de distorções harmônicas provocadas por cargas não lineares. O artigo aborda cargas baixas em comparação com cargas e acionamentos industriais, porém

traz importantes contribuições sobre o tema, aborda conceitos importantes sobre o fator de qualidade dos filtros, o chamado fator Q, indicando que, quanto menor o valor de R do filtro, melhor será o fator Q. Ele discute as consequências de um fator Q adequado como perdas elétricas e aquecimento. Esses conceitos são universais quando se trata de filtros passivos, ainda que o tema principal, lâmpadas LED, possa não ser interessante para segmentos diversos, as contribuições feitas pelo artigo são de grande valor para qualquer cenário em que a mitigação de distorções harmônicas se faça necessária.

**2.20. Single Tuned Harmonic Shunt Passive Filter Design for Suppressing Dominant Odd Order Harmonics to Improve Energy Efficiency - Mansoor Ahmed Soomro, Anwar Ali Sahito, Irfan Ahmed Halepoto and Kamran Kazi, 2016**

Esse artigo aborda a questão da mitigação de distorções sob o aspecto da eficiência energética, uma vez que a mitigação das distorções reduz perdas incorridas no sistema elétrico. O trabalho traz uma discussão interessante sobre as consequências da presença de distorções harmônicas no sistema elétrico. A solução proposta é composta por filtros *single-tuned*, e apresenta bons resultados com base nos limites estabelecidos no IEEE 519.

**2.21. Design and Application of a Single - Tuned Passive Harmonic Filter to Suppress Harmonic Distortion and Resonance for Railway Traction Power Systems - A Case Study - Wei-Hsiang Ko, Martti Tuomainen, 2021**

Esse artigo aborda a presença de distorções harmônicas em linhas ferroviárias. A solução é inusitada, pois em redes ferroviárias a demanda é intermitente, há composições partindo e parando periodicamente, provocando grande variação de impedância, de maneira que filtros passivos não parecem representar uma boa solução justamente pela grande variação de impedância. No estudo de caso o autor demonstra que é possível implementar a solução utilizando filtros com diferentes potências, de modo a modificar e fazer variar a frequência de ressonância. O artigo desenvolve bem os conceitos de dimensionamento dos filtros, abordando a definição das distorções a serem compensadas e os limites dos componentes dos filtros, especialmente dos capacitores, além do dimensionamento do filtro propriamente dito, constituindo assim uma boa referência.

### **2.22. Strategic Placement and Sizing of Passive Filters in a Power System for Controlling Voltage Distortion - Gary W. Chang, Hung-Lu Wang, and Shou-Yung Chu, 2004**

Esse artigo aborda a determinação ótima de filtros em termos de localização/posicionamento e dimensionamento, aproveitando inclusive bancos de capacitores existentes. O trabalho leva em consideração as limitações dos componentes de mercado, e foca no controle de distorções de tensão. O controle é baseado em método de otimização utilizando algoritmos genéticos. Uma rede de distribuição real é utilizada para rodar um estudo de caso, e mostra que o método é efetivo, e pode ser utilizado como ferramenta para planejamento de controle de distorções harmônicas. A solução proposta utiliza filtro *single-tuned*, pontuando ser a solução mais utilizada e mais economicamente interessante. É explanado que a maior parte dos trabalhos faz dimensionamento dos filtros visando corrigir uma única barra, e esse artigo propõe o planejamento para rede como um todo. Esse aspecto constitui uma excelente contribuição para o estudo de sistemas elétricos.

### **2.23. High-Voltage Passive Harmonic Filter Design - Jakkapong Tupsa-ard, Chaiya Chamchoy and Thavatchai Tayjanant, 2011**

Trata-se de um artigo metódico a respeito de dimensionamento de filtros, trazendo onze passos bem estabelecidos e um fluxograma de atividades com intuito de conduzir o estudo de análise e definição dos filtros de harmônicas. O artigo faz um circuito equivalente resumindo treze barras de um sistema existente, com duas conexões a rede, além de três geradores, constituindo um sistema com bom grau de complexidade e possibilidades de variação de impedância e demanda. O artigo é interessante do ponto de vista do método.

### **2.24. Effective Harmonic Cancellation Technique for a Three-Phase Four-Wire System - Buddhadeva Sahoo, Mohammed M. Alhaider and Pravat Kumar Rout, 2022**

Uma técnica de controle e aplicação de filtro ativo é apresentada nesse artigo, com inovações interessantes, fazendo inclusive o monitoramento da corrente de neutro, o que normalmente não é feito, pois, se as distorções de fase são compensadas, a corrente de neutro é naturalmente corrigida. No entanto, esse artigo mostra que é importante incluir no modelo matemático a corrente do neutro. A técnica se baseia na



leitura de corrente nas bases PQ e propõe uma melhoria na transformada  $\alpha\beta$ . O artigo discute os problemas associados a análise das distorções, como cargas desbalanceadas, variações de demanda, e absorção de reativos. Uma vez que o trabalho desenvolve a solução para aplicação de filtros ativos, os aspectos relacionados a esse tipo de aplicação são abordados, como por exemplo a identificação de ordens harmônicas positivas e negativas. O artigo aborda pontos negativos da aplicação de filtros ativos, e menciona principalmente o aumento crescente de cargas não lineares, pontuando que a solução sendo definida para um cenário em um momento determinado será diferente depois de algum tempo, aumentando a necessidade de compensação, além de modificar a impedância de sintonia. Enfim, o artigo é de grande interesse no desenvolvimento do controle e modelo matemático. No entanto, ainda que traga importantes inovações, as desvantagens apontadas não são aplicáveis em cenários distintos, como plantas industriais, especialmente aquelas com processo de produção contínuo, onde as cargas não sofrem variação e não há aumento de cargas não lineares ao longo do tempo.

**2.25. Optimal Harmonic Mitigation in Distribution Systems with Inverter Based Distributed Generation - Ahmed S. Abbas, Ragab A. El-Sehiemy, Adel Abou El-Ela, Eman Salah Ali, Karar Mahmoud, Matti Lehtonen and Mohamed M. F. Darwish, 2021**

Esse artigo é muito interessante. Ele discute o problema da conexão de conversores de frequência conectados à rede, aplicação que tem provocado impacto importante na rede, devido ao aumento da conexão de fontes renováveis, como painéis solares, turbinas eólicas etc. O artigo discorre sobre os princípios de análise, escreve o circuito de distribuição em forma de diagrama de impedância, com base no sistema teste IEEE 69 barras. O artigo mostra um aspecto pouco discutido nas inúmeras publicações sobre esse tema: a diferença na queda de tensão do sistema em operação com e sem filtros e o resultado é bem interessante o sistema sai de um cenário com 7% de queda em regime permanente passando para um cenário com 2%. A solução proposta utiliza filtros passivos, apresentando excelentes resultados, mostrando que aplicações modernas não descartam métodos tradicionais.

### **2.26. Analysis and Mitigation of Harmonic Resonances in Multi-Parallel Grid-Connected Inverters: A Review - Ramy Ali and Terence O'Donnell, 2022**

Esse artigo desenvolve uma análise a respeito da interação dos inversores conectados as fontes e os inversores conectados aos consumidores, apresentando que essa interação provoca crescente instabilidade no sistema elétrico. O artigo faz uma revisão da literatura recente que discute esse mesmo tema. O modelo matemático é apresentado, um conjunto de simulações são apresentadas, a faixa de ressonância é demonstrada graficamente, e finalmente o método proposto é aplicado e as devidas correções são também apresentadas graficamente. Uma comparação entre soluções é discutida, apresentando-se as vantagens e desvantagens de cada uma. O artigo se propõe a fazer uma revisão dos tópicos que envolvem o tema principal e entrega isso com robustez. Na comparação com filtro passivo as desvantagens ou desafios a serem superados são: a variação de impedância que pode provocar movimentação da frequência de ressonância, o deslocamento do ponto de sintonia como consequência da variação e impedância. Novamente, as principais desvantagens são atenuadas quando se aplica filtros passivos em circuitos com baixo potencial de variação da carga.

### **2.27. IEC Standard 60871 - 1: Shunt Capacitors for A.C. Power System Having a Rated Voltage Above 1000 V (2014)**

Essa norma aborda a especificação e limitações de capacitores no sistema elétrico. A norma tem objetivo de estabelecer regras para o desempenho e avaliação de bancos de capacitores, assim como estabelecer critérios de especificação e fornecer um guia para instalação, testes e operação. A ABNT tem a norma ABNT NBR 12479:1992 - Capacitores de Potência em Derivação, para Sistema de Tensão Nominal Acima de 1000 V - Características Elétricas e Construtivas - Padronização.

### **2.28. Power Capacitors – Low-Voltage Power Factor Correction Banks (2017)**

Norma equivalente a anterior, porém para baixa tensão.

### **2.29. IEEE Std 3002.8 - Recommended Practice for Conducting Harmonic Studies and Analysis of Industrial and Commercial Power Systems (2018).**

Trata-se de uma norma específica sobre recomendações e diretrizes para condução de estudo de harmônicas em sistemas elétricos de potência. A série 3000 substituiu os *Color Books*, além de trazer temas que não eram abrangidos na coleção anterior, como esse em particular.

### **2.30. Power System Harmonics Research: A Survey – G. K. Singh, 2009**

Esse artigo faz uma revisão sobre todo o desenvolvimento do tema, desde a definição do que é uma componente harmônica, a análise e identificação das distorções no sistema elétrico, suas consequências, cinco diferentes técnicas para mitigação de distorções, sua seleção, dimensionamento e aplicação. O artigo traz um levantamento de 145 publicações a respeito do tema, constituindo uma boa contribuição para a pesquisa do tema.

## **3. OBJETIVO**

Com base na motivação, item 1.1, e com informações adquiridas na pesquisa bibliográfica, a meta deste trabalho consiste em formular possíveis soluções adotando como premissa que o filtro *single-tuned* é o tipo de filtro passivo mais indicado mitigar distorções harmônicas no sistema elétrico. A partir de então, serão selecionados cenários típicos para instalações industriais de modo que seja permitido avaliar tecnicamente as soluções potenciais. A experiência mostra que os maiores desafios da utilização dos filtros passivos são: variação de demanda e impedância. Serão discutidas situações reais, limitações, objetivos a serem alcançados. A regulação vigente exige que plantas industriais tenham níveis determinados de fator de potência e distorção harmônica no ponto de conexão, portanto a indústria tem a preocupação de atender os requisitos estabelecidos, especialmente a IEEE 519 [36], como padrão internacional e no território nacional o PRODIST [34]. Sendo assim, além de discorrer sobre a solução técnica, fez-se também uma avaliação técnico-econômica para indicar um caminho para seleção da melhor solução para mitigar distorções harmônicas no sistema elétrico de potência.

#### 4. POSSÍVEIS ABORDAGENS PARA MITIGAÇÃO DE DISTORÇÕES HARMONICAS

Distorções harmônicas causam grandes inconvenientes nas instalações, como aquecimento e vibração, podendo ocasionar danos graves, perdas de produção por atuação indevida de relés de proteção, etc. [10]-[12]. Filtros são os considerados como meios mais efetivos para eliminação das distorções harmônicas [1]-[9]. A aplicação de filtros exige um estudo para avaliar o grau de distorção presente no sistema elétrico. Avaliações desse tipo devem ser iniciadas por meio de medições em campo, preferencialmente, registrando as condições operacionais da planta, tais como a situação de plena carga, as variações por alterações de controle, e até aquelas correspondentes a fase de projeto, quando a planta industrial ainda está sendo projetada e seus equipamentos ainda estão sendo definidos. Através das informações de fornecedores de inversores de frequência, retificadores e demais cargas não lineares, pode-se fazer uma estimativa de distorção harmônica a ser injetada com boa precisão, viabilizando-se o dimensionamento de filtros adequados. Dessa forma, permite-se colocar a planta industrial em operação já com as devidas medidas de compensação, mitigando os efeitos das distorções harmônicas, de modo a atender os limites determinados por órgãos reguladores [34] e normas vigentes [35].

As possíveis abordagens para mitigação das distorções harmônicas abrangem a maneira como se planeja aplicação das diferentes topologias de filtros, no entanto, como partiu-se da premissa de utilizar filtros *single-tuned*, a abordagem para mitigação das distorções se limita a análise da aplicação de diferentes conjuntos de filtros para determinados cenários. Existe também a abordagem para aplicação filtros ativos, que tem resultado efetivo, eliminando as distorções harmônicas em tempo real, uma vez que a compensação proporcionada por ele é feita com base em medições online no circuito ao qual o mesmo está conectado. Este trabalho não pretende comparar o desempenho de filtros ativos e passivos, entre estas duas possíveis soluções a comparação que faz mais sentido é de ordem econômica, cuja avaliação será apresentada mais adiante.

Outros aspectos devem ser observados na aplicação dos filtros, que são as questões físicas, tais como: tamanho do equipamento, no que tange o espaço requerido, dissipação térmica do equipamento, ventilação ou climatização adequada, e custo.

Há também os filtros híbridos, aqueles que utilizam uma combinação de filtros passivos tipo série e *shunt* [7]. Essa solução é muito engenhosa, pois prevê um filtro série sintonizado na frequência fundamental, isto é, um filtro com impedância mínima na fundamental e impedâncias crescentes para as demais ordens, o que atenua as demais ordens harmônicas relevantes. Essa alternativa tem um grande inconveniente: o filtro série deve ser dimensionado para a corrente total do circuito de potência, tornando o filtro demasiado grande e com incremento significativo de perdas elétricas. Para aplicação em plantas industriais, esse tipo de filtro acaba se tornando inviável, pois as correntes envolvidas, de um modo geral, são muito elevadas. A aplicação de filtros do tipo *shunt* permite que a definição incorra em equipamentos menores, dimensionados com potência suficiente para compensar as distorções harmônicas a serem corrigidas. Eles também oferecem a vantagem de fornecer reativos para compensação de fator de potência. Em geral, essa vantagem é uma premissa para o dimensionamento, tornando a solução preferencial em relação às demais [6]. Há diversas publicações que discutem as topologias de filtros e as vantagens de cada um [1]-[4].

Para a mesma solução adotada, isto é, aplicação de filtros *single-tuned*, pode-se estudar diferentes maneiras para posicionamento e composição do equipamento:

- a. No lado da média tensão: nesse caso a solução entrega energia dentro dos limites estabelecidos no ponto de conexão ([11] e [35]), mas não elimina os inconvenientes das distorções na rede de baixa tensão: sobreaquecimento, vibração, risco de atuação indevida de relés de proteção, etc.
- b. No lado da baixa tensão: nesse caso, os filtros são dimensionados levando em consideração a potência nominal do transformador, os níveis de demanda mínimos e máximos, o fator de potência da carga e claro, o espectro harmônico identificado. Então, o problema é eliminado no nível do consumidor, na sua origem, salvaguardando os equipamentos: transformadores, barramentos, cabos e motores; e eliminando os inconvenientes da instalação no lado da média tensão, tanto do ponto de vista das distorções como do fator de potência. A solução é tecnicamente mais abrangente.
- c. Composição dos filtros: filtros de potências diferentes, respeitando a proporção de contribuição de cada ordem do espectro harmônico.

## 5. PLANEJAMENTO DOS FILTROS

O princípio de funcionamento dos filtros passivos do tipo *shunt* se baseia em criar um caminho de impedância “zero”, no ramo do banco de capacitores, para a frequência na qual se pretende sintonizar o mesmo. A sintonização se dá através da combinação de reatâncias indutivas com o banco de capacitores, de modo que a impedância do filtro pode ser calculada através da Equação (1).

$$\bar{Z} = R + j \left[ n\omega L - \frac{1}{n\omega C} \right] \quad (1)$$

Onde:

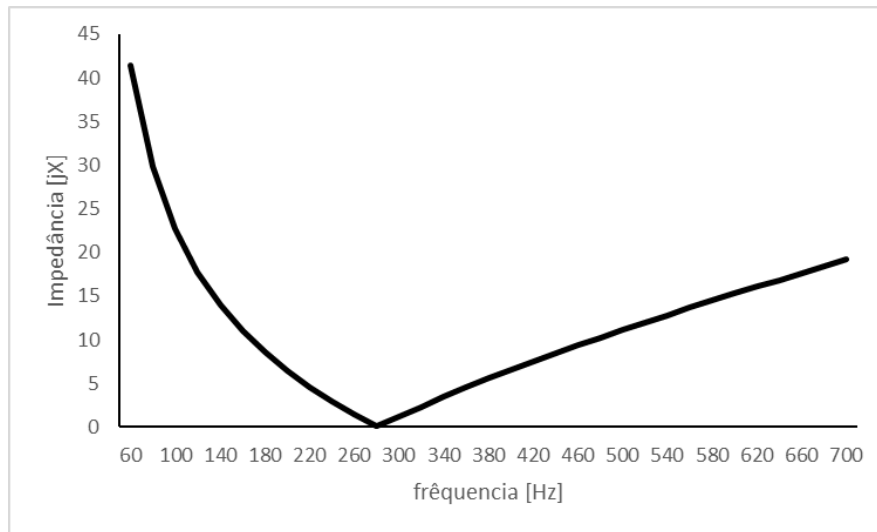
- *Z*: Impedância [ohm]
- *R*: resistência [ohm]
- *n*: ordem harmônica desejada (para fundamental  $n = 1$ )
- $\omega$ : velocidade angular em rad/s ( $\omega = 2\pi f$ , sendo *f* a frequência fundamental do sistema)
- *L*: indutância [H]
- *C*: capacitância [F]

A resposta em frequência típica desses tipos de filtros é ilustrada na Figura 5. A frequência de sintonia do filtro é aquela em que a impedância é mínima, pois é limitada pela resistência do indutor, do capacitor, conexões, e demais materiais componentes do filtro. A resposta em frequência pode ser obtida analiticamente pelo desenvolvimento a equação (1), e obtendo a equação abaixo:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

Colocando diferentes combinações de *L* e *C* obtém-se filtros sintonizados na frequência desejada.

Figura 5. Resposta em frequência típica, filtro *shunt, single-tuned*



Fonte: Autor

Em projetos de plantas industriais observa-se a aplicação muito frequente de filtros do tipo *shunt, single-tuned*. Como demonstrado em [1] e [6], as cargas não lineares em plantas industriais que mais contribuem para as distorções harmônicas são os inversores de frequência. Esses equipamentos geram distorções harmônicas mais significativas na 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup> e 11<sup>a</sup> ordens. A correção dessas normalmente, na grande maioria dos casos, é suficiente para atender aos requisitos presentes em normas internacionais.

A maior parte das aplicações utilizam inversores de 6 pulsos, cujo espectro padrão é apresentado na Tabela 1. Para o estudo de caso apresentado nas seções seguintes, foi considerado o espectro padrão IEEE para inversores de 6 pulsos.

Uma alternativa aos filtros *single-tuned* são os filtros passa-alta. No entanto, esse tipo de filtro implica na utilização de capacitores sobredimensionados para abranger todas as faixas de alta frequência. Tal aspecto, além de fazer com que o filtro tenha custo maior, considerando a correção do fator de potência, pode fazer com que seja excedida a injeção de reativos capacitivos pelo filtro, podendo ser um grande inconveniente.

Tabela 1: Espectro Harmônico para inversores 6 pulsos, exemplo.

Harmonic order	Percent	Relative angle
1	100.00	0.00
5	18.24	-55.68
7	11.90	-84.11
11	5.73	-143.56
13	4.01	-175.58
17	1.93	111.39
19	1.39	68.30
23	0.94	-24.61
25	0.86	-67.64
29	0.71	-145.46
31	0.62	176.83
35	0.44	97.40
37	0.38	54.36

Fonte: [37]

No projeto do filtro deve ser levada em consideração a variação de demanda e, conseqüentemente, a variação da impedância da fonte que pode até causar dessintonização do filtro. Como medida de segurança, os filtros podem ser comutados com base em uma programação pré-estabelecida para ser ligado ou desligado, conforme a demanda solicitada. No início do processo industrial, isto é, quando a planta está partindo, a demanda aumenta gradativamente. Então, o filtro pode ser acionado a partir de determinado patamar. O mesmo pode ser feito no caso inverso. Na desativação do processo industrial, ou redução da produção, o filtro é desconectado a partir de determinado patamar de demanda pré-estabelecido.

### 5.1. Critério de desempenho das soluções

Para avaliar o desempenho das alternativas de filtros dimensionados, utilizou-se os seguintes critérios:

#### 5.1.1. Mitigação das distorções:

Esse critério visa observar o resultado proporcionado pelo filtro na barra de conexão, e verificar sua capacidade de reduzir a distorção harmônica. O filtro, em princípio, deverá reduzir as correntes e tensões harmônicas. A Distorção Harmônica Total de Tensão ( $DHT_V$ ) e a Distorção Harmônica Total de Corrente ( $DHT_I$ ) são calculadas conforme o estabelecido em [35].



### 5.1.2. Correção do Fator de Potência:

O filtro deve ser dimensionado com capacitância adequada para fornecer a potência reativa necessária para corrigir o fator de potência para o valor de 0,92, de modo a atender critérios estabelecidos em [34] considerando a capacidade de cada transformador com carga conectada cujo fator de potência natural é de 0,8, depois o resultado deverá ser avaliado através do resultado do fluxo de potência. O conjunto do filtro (capacitor/indutor) se dará com o dimensionamento do indutor que sintoniza os capacitores para a ordem harmônica desejada, em resumo, primeiro se dimensiona o banco de capacitores para correção do fator de potência e então o indutor sintoniza na frequência alvo. Levando em consideração a corrente necessária para mitigar as distorções nas ordens selecionadas.

### 5.1.3. Fator de qualidade:

O fator de qualidade deverá ser, sempre que possível, maior que 25 ( $Q > 25$ ) [7]. A qualidade do filtro é a medida da nitidez da sintonia. Matematicamente, o fator de qualidade (Q), é definido como indicado na Equação (3):

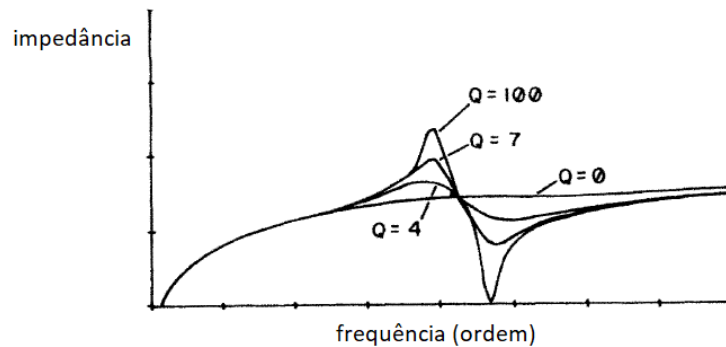
$$Q = \frac{\sqrt{L}}{R} \quad (3)$$

Os seguintes pontos de interesse referente ao fator de qualidade (Q) devem ser observados:

- O valor de Q é raramente considerado em relação a ação do filtro, isso se deve ao fato que os valores de R, que devem ser usados para alterar a resposta do filtro, geralmente resultam em um aumento significativo das perdas do filtro.
- O valor de Q calculado sempre se refere à frequência sintonizada.
- Normalmente, o valor de R consiste apenas na resistência natural do indutor. Assim, o valor de Q é o resultado do projeto do indutor, e resulta em R vezes a razão X/R do indutor de sintonia. Em geral, esse método resulta em uma boa nitidez do filtro.

- A resposta do filtro para valores de  $Q$  acima de 25 é essencialmente indistinguível em relação ao  $Q = 100$ , por esta razão é definido que  $Q$  tem de ser maior que 25. A Figura 6 mostra que o aspecto a característica do Fator  $Q$  numa curva impedância x frequência.

Figura 6: Filtro sintonizado na 4,7ª ordem, conectado à rede, plotado comportamento típico, com diferentes valores de  $Q$ , conforme descrito em [7].



Fonte: Publicação em referência, item 2.1

## 5.2. Critérios de aprovação do dimensionamento do Banco de Capacitores

O dimensionamento dos bancos de capacitores deve seguir as recomendações da NBR IEC 60831-1 [35]. Essa norma dá parâmetros mínimos para serem admitidos no dimensionamento dos capacitores. Assim como instruções para instalação, testes, etc. A Figura 7 e Figura 8 mostram trechos que indicam alguns destes parâmetros mínimos para validação do banco de capacitores.

Figura 7: Trecho da NBR IEC 60831-1, tabela 4, que traz níveis de tensão admissíveis em serviço.

ABNT NBR IEC 60831-1:2009

**Seção 3: Sobrecargas****20 Tensão máxima admitida****20.1 Tensão de longa duração**

As unidades de capacitores devem estar adequadas para operação nos níveis de tensão de acordo com a Tabela 3 (ver também as seções 29 e 32).

**Tabela 5 — Níveis de tensão admissíveis em serviço**

Tipo	Fator de tensão $\times U_N$ eficaz	Duração máxima	Observações
Frequência fundamental	1,00	Contínua	Maior valor médio durante qualquer período de energização do capacitor. Para períodos de energização inferiores a 24 h, exceções são aplicadas conforme indicado abaixo (ver seção 29)
Frequência fundamental	1,10	8 h a cada 24 h	Flutuações da tensão da rede
Frequência fundamental	1,15	30 min a cada 24 h	Flutuações da tensão da rede
Frequência fundamental	1,20	5 min	Aumento na tensão em condições de baixa carga (ver seção 29)
Frequência fundamental	1,30	1 min	
Frequência fundamental mais harmônicas	A corrente não excede o valor dado na seção 21 (ver também seções 33 e 34)		

A amplitude da sobretensão que pode ser tolerada sem deterioração significativa do capacitor depende de sua duração, número de aplicações e temperatura do capacitor (ver seção 29). Supõe-se que as sobretensões dadas na Tabela 3 e com um valor superior a 1,15  $U_N$  ocorrem 200 vezes na vida de um capacitor.

Figura 8: Trecho da NBR IEC 60831-1, seção 21, que traz níveis de máxima corrente admitida.

ABNT NBR IEC 60831-1:2009

**21 Máxima corrente admitida**

Os capacitores devem ser aptos a funcionar permanentemente com uma corrente de linha de valor eficaz de 1,3 vez a corrente correspondente na tensão senoidal nominal e frequência nominal, exceção feita aos regimes transitórios. Tomando-se em conta a tolerância da capacitância de 1,15  $C_N$ , a corrente máxima pode alcançar 1,5  $I_N$  (ver anexo A).

Figura 9: Trecho da NBR IEC 60831-1, apêndice A, que traz níveis de Sobrecarga permitida.

### A.3 Sobrecargas – Máxima corrente permitida (ver seção 21)

Para capacitores de filtros, a corrente máxima permitida deve ser acordada entre cliente e fabricante.

Figura 10: Trecho de Catálogo de Capacitores de potência, Fabricante Schneider.

Capacitores  
de Baixa Tensão

VarplusCan

Especificações técnicas		
Características gerais		
Normas	ABNT NBR IEC 60831-1/-2	
Faixa de tensão	480 a 690 V	
Frequência	60 Hz	
Gama de potências	1 a 35 kvar	
Perdas (dielétrico)	< 0,2 W/kvar	
Perdas (total)	< 0,5 W/kvar	
Tolerância de capacitância	-5%, +10%	
Teste da tensão	Entre terminais	2,15 x U <sub>N</sub> (AC), 10s
	Entre terminal e contêiner	≤ 525 V: 3 kV (AC), 10s ou 3,66 kV (AC), 2s > 525 V: 3,66 kV (AC), 10s ou 4,4 kV (AC), 2s
	Tensão de impulso	≤ 690 V: 8 kV > 690 V: 12 kV
Resistor de descarga	Tempo de descarga padrão de 60s	
Condições de operação		
Temperatura ambiente	-25/55° C (Classe D)	
Umidade	95%	
Altitude	2.000 m acima do nível do mar	
Sobretensão	1,1 x U <sub>N</sub> 8h a cada 24h	
Sobrecorrente	Até 1,8 x I <sub>N</sub>	
Pico de corrente de inrush	250 x I <sub>N</sub>	
Operações de chaveamento (máx.)	Até 7.000 operações de chaveamento por ano	
Expectativa média de vida útil	Até 130.000h	
Conteúdo de harmônicas	N <sub>LL</sub> ≤ 20%*	



VarPlusCan

Embora os requisitos mínimos sejam declarados na norma, a própria dá abertura para que esses valores estejam em acordo com o fabricante, ver Figura 9. Então, é mandatório que sempre se consulte catálogos dos componentes dos potenciais fornecedores para verificar suas capacidades e então proceder a seleção. Cada fabricante publica em seus catálogos os parâmetros de seus componentes. Nos itens a seguir estão compilados critérios que satisfazem a maior parte dos componentes encontrados no mercado brasileiro. Portanto, os bancos de capacitores serão verificados/aprovados conforme os critérios expostos nas subseções a seguir. Os critério serão somente apresentados a seguir, mas sua utilização ficará mais clara, um pouco mais adiante quanto os testes de validação forem desenvolvidos.

### 5.2.1. Corrente eficaz

O filtro deve ser dimensionado levando em consideração a potência necessária para correção do fator de potência e potência necessária para compensação das distorções harmônicas.

A corrente eficaz ( $I_{rms}$ ) no filtro será a somatória da corrente na frequência fundamental mais a corrente distorcida da ordem de sintonia do filtro, em amperes, conforme indicado na Equação (4). A corrente  $I_{rms}$  representa a corrente à qual o filtro está submetido efetivamente.

$$I_{rms} = \sqrt{HDi(h)^2 + Infund^2} \quad (4)$$

A corrente nominal ( $I_n$ ) se refere a corrente nominal do banco de capacitores que foi dimensionado, que pode ser obtida através da Equação (5).

$$I_n = \frac{Q [VAr]}{V * \sqrt{3}} \quad (5)$$

O critério para aprovação por capacidade de corrente é conforme Equação (6).

$$I_{rms} < 1,8 * I_n \quad (6)$$

### 5.2.2. Tensão eficaz Capacitores

A circulação da corrente total pelos capacitores em função da reatância dos mesmos resultará em uma tensão que deve ser menor do que sua tensão nominal, recomendável considerar ao menos 10%, conforme indicado na equação (8).

$$V_{rms} = \sqrt{V_{cap}^2 + V_h^2} \quad (7)$$

$$V_{rms} < V_n * 1,1 \quad (8)$$

Onde:

$V_{rms}$ : tensão à qual o banco de capacitores está submetido;

$V_{cap}$ : Tensão no capacitor em virtude da corrente com o indutor combinado, 60Hz;

$V_h$ : Tensão na ordem de sintonia;

$V_n$ : Tensão nominal do capacitor, valor de catálogo do fabricante selecionado;

### 5.2.3. Potência eficaz Capacitores

A potência eficaz de referência deve ser aquela baseada na tensão nominal dos capacitores. Calcula-se a potência demandada no filtro e se compara com a potência nominal dos capacitores, a potência demandada deve ser menor do que a potência de referência acrescida de 35%, conforme indicado na equação (11).

$$S = I_{rms} * V_{rms} * \sqrt{3} \quad (9)$$

$$S_n = \left( \frac{V_{cap}^2}{\frac{V_{rede}^2}{Q_{filtro}}} \right) \quad (10)$$

$$S < S_n * 1,35 \quad (11)$$

Onde:

$I_{rms}$ : corrente calculada no item 5.2.1, conforme Equação (4);

$V_{rms}$ : tensão calculada no item 5.2.2, conforme Equação (7);

$S$ : Potência à qual o banco de capacitores está sendo demandado;

$S_n$ : Potência nominal ou Potência nova, eventualmente corrigida, conforme nova tensão dos capacitores [kVAr];

### 5.2.4. Tensão de pico Capacitores

Os capacitores devem ter uma folga de ao menos 20% na tensão de pico suportável em relação tensão de pico resultante da circulação de corrente pela reatância capacitiva do componente, conforme indicado na equação (14).

$$V_p = \sqrt{2} * (V_f + V_h) \quad (12)$$

$$V_{pcap} = \sqrt{2} * V_{ncap} \quad (13)$$

$$V_p \leq V_{pcap} * 1,2 \quad (14)$$

Onde:

$V_p$ : Tensão de pico à qual o banco de capacitores está submetido;

$V_{pcap}$ : tensão de pico nominal do banco de capacitores;

### 5.3. Dimensionamento dos Filtros

Esta seção apresenta os procedimentos para dimensionamento dos filtros. Demonstra-se o dimensionamento para um filtro. Os demais serão dimensionados seguindo os mesmos procedimentos, o quais podem ser seguidos para qualquer filtro sintonizado (*single-tuned*).

A demonstração do dimensionamento foi realizada para um filtro de 560kVAr, 480V, sintonizado na ordem  $h=4,7$ . O intuito desse filtro é eliminar as distorções de 5ª ordem. No entanto, o filtro é dimensionado com um ligeiro deslocamento. A razão disso é evitar que o filtro seja sintonizado exatamente em uma frequência múltipla da fundamental, expondo o circuito ao risco de ressonância.

#### 5.3.1. Determinação da potência do banco de capacitores:

Uma boa prática é dimensionar os filtros considerando que a demanda máxima seja a potência nominal do transformador, pois expansões ao longo do tempo são muito comuns. Essa é uma premissa que pode ser válida para a maior parte dos casos, no entanto, é importante analisar cada caso e verificar se há alguma característica particular que faça mais sentido e, então, adotar premissas conforme o caso. Neste estudo foi considerado como um caso geral, os filtros foram dimensionados para atender a potência nominal do transformador, 2500kVA, corrigindo o fator de potência da carga de 0,82 para 0,92.

$$Q_{filtro} = P * [\tan(\arccos \varphi_1) - \tan(\arccos \varphi_2)] \quad (15)$$

$$P = 2500 * 0,82 = 2050 \text{ kW}$$

$$Q_{filtro} = 2050 * [0,6980 - 0,4259] = 557,61 \text{ kVAr}$$

#### 5.3.2. Seleção da ordem de sintonia

A ordem de sintonia deve ser selecionada conforme o espectro resultante da instalação no barramento. Esse espectro pode ser levantado em campo, no caso de se tratar de uma instalação existente, ou pode ser calculado, no caso de um projeto de uma nova planta. Este trabalho pretende fazer uma abordagem mais abrangente pressupondo um projeto novo, uma vez que os procedimentos de cálculo são mais completos e cobrem o cenário com dados levantados em campo. Normalmente, os fabricantes informam o

espectro característico das suas linhas de produto, mas como não foi adotada nenhuma marca particular, considerou-se o espectro apresentado na Tabela 1. Para esta demonstração adotou-se  $h=4,7$ , tendo como alvo a 5ª ordem, conforme descrito no item 6.1.

### 5.3.3. Dimensionando os capacitores

A potência do filtro considerado é de 560 kVAr, tendo sido arredondada para valores comerciais conforme o cálculo ilustrado em 5.3.1. Fabricantes de capacitores de potência apresentam em seus catálogos componentes por kVAr e tensão nominal. Portanto, é importante ficar atento ao selecionar o componente e chegar as características reais no projeto do filtro. O filtro pode ser composto por qualquer combinação, 22x 25 +10kVAr, 11x 50 +10 kVAr etc., conforme for mais conveniente para o projeto, tecnicamente é indiferente. Tendo definida a potência deve-se verificar as características a que o capacitor será submetido, procedendo os passos descritos nos itens seguintes.

#### 5.3.3.1. Calcular os parâmetros elétricos do Circuito

Para desenvolver o projeto do filtro será necessário ter à disposição todos os parâmetros elétricos do circuito, então deve-se antes de tudo calcular todas as impedâncias do circuito para 60Hz, frequência fundamental, e em seguida as impedâncias para todas as ordens do espectro.

Reatância do Transformador na frequência fundamental:

Dados do transformador:

S: 2500kVAr

Vn: 480V

Z: 6%

$$X_{TR} = Z\% \cdot \frac{V^2}{S}$$

$$X_{TR} = 0.06 \frac{480^2}{2500 \cdot 10^3} = +j 0,0055 \text{ } [\Omega] \quad (16)$$

Reatância dos Capacitores na frequência fundamental:

Dados do banco de capacitores:



$$Q = 560\text{kVAr}$$

$$V_n = 480\text{V}$$

$$X_{\text{cap}} = \frac{V^2}{Q}$$

$$X_{\text{cap}} = \frac{480^2}{560 \cdot 10^3} = -j 0,4114 \text{ } [\Omega] \quad (17)$$

Reatância da Carga Não Linear na frequência fundamental:

Dados da carga:

$$S: 1250\text{kVA}$$

$$V_n: 460\text{V}$$

$$\text{FP: } 0,82$$

Nota: Foi calculado para demanda máxima, sendo igual a potência nominal do transformador, permitindo assim que a planta possa utilizar toda a capacidade do equipamento, em geral é deixada uma reserva em relação a potência nominal, no entanto, com o passar do tempo, pequenas expansões acontecem, de maneira que o projeto deve prever que o transformador seja utilizado integralmente.

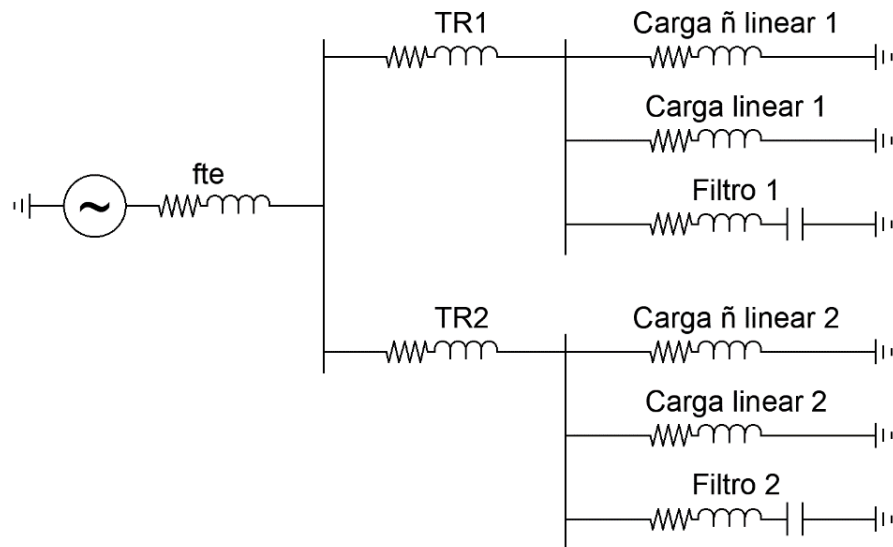
Deve-se observar ainda, que a tensão nominal da carga é 460V, ligeiramente baixo da tensão nominal do transformador, medida adotada comumente para compensar a queda de tensão em regime permanente.

$$X_{\text{carga}} = \frac{V^2}{S}$$

$$X_{\text{carga}} = \frac{460^2}{S} = 0,1388 + j 0,0969 \text{ } [\Omega] \quad (18)$$

Com os resultados das Equações (16), (17) e (18) pode-se escrever um diagrama de impedância, Figura 11, para a frequência fundamental e para cada ordem do espectro a ser considerado no projeto.

Figura 11: Diagrama de impedâncias do Circuito.



Fonte: Autor

Uma vez que as reatâncias dependem da frequência em proporção direta para as indutivas e inversa para as capacitivas, respeitando as Equações (19) e (20), os valores para cada ordem harmônica são obtidos da seguinte forma:

$$XL = 2\pi fL \quad (19)$$

$$XC = \frac{1}{2\pi fC} \quad (20)$$

Para Xtr e Xcarga:

$$X(h) = X(1) \cdot h \quad [\Omega] \quad (21)$$

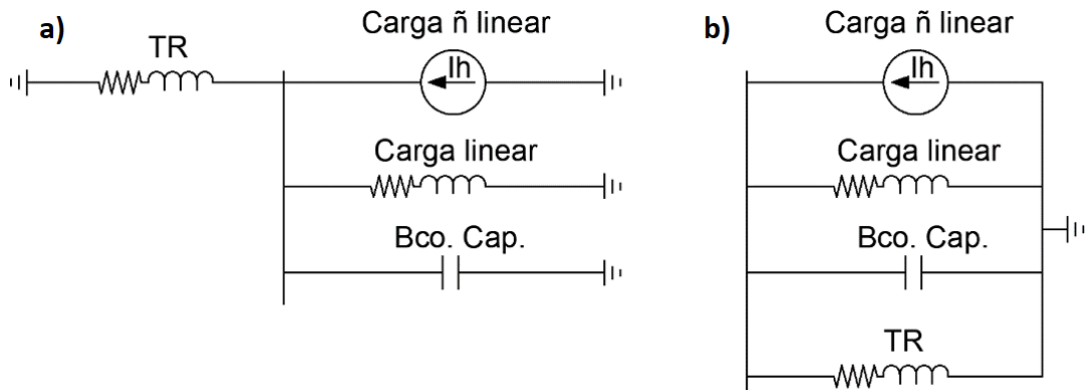
Para Xcap:

$$X(h) = \frac{X(1)}{h} \quad [\Omega] \quad (22)$$

Tomando um ramo do circuito da .

e considerando o diagrama para uma fase, e a partir do ponto de vista do secundário do transformador, que está ligado em estrela, conclui-se que todos os elementos do circuito estão em paralelo. Este fato implica em nos maiores riscos a que o circuito está submetido, que é a ressonância paralela, que será discutida um pouco mais adiante, no item 5.3.3.3.

Figura 12: Diagrama de impedâncias para uma fase, lado do secundário do transformador, extrato da Figura 11 “a)” e diagrama reorganizado “b)”, mostrando todos os elementos em paralelo.



Fonte: Autor

A parcela de impedância relativa à potência ativa da carga não depende da frequência e permanece constante. O circuito equivalente é, então, a resultante dos paralelos dos elementos da barra: carga com o banco de capacitores; e o resultado em paralelo com transformador, poderia também se considerar a impedância da fonte, no entanto a impedância do transformador é muito maior do que a da rede, de modo que pode ser desprezada:

$$Z_{\text{barra}}(h) = \frac{[-X_{\text{Cap}}(h) \cdot (R_{\text{carga}} + jX_{\text{carga}}(h))]}{[-X_{\text{Cap}}(h) + R_{\text{carga}} + jX_{\text{carga}}(h)]} \quad (23)$$

$$Z_{\text{eq}}(h) = \frac{[Z_{\text{barra}}(h) \cdot (X_{\text{tr}}(h))]}{[Z_{\text{barra}}(h) + X_{\text{tr}}(h)]} \quad (24)$$

Tomando como base os valores de impedância na fundamental, (16), (17) e (18) e aplicando as Equações (21), (22), (23) e (24), pode-se calcular as impedâncias para todo o espectro, conforme Tabela 2. Observar que neste exemplo a carga não linear e a carga linear são iguais, isto é, 1250kVA/FP:0,82, de maneira que suas impedâncias são iguais.

Tabela 2: Valores de impedância para o espectro considerado.

<b>h</b>	<b>Xc [Ω]</b>	<b>Xcg [Ω]</b>	<b>Xtr [Ω]</b>	<b>Zeq [Ω]</b>
5	-0,08229j	0,1388+0,48444j	0,0276j	0,002334120+0,0371982j
7	-0,05877j	0,1388+0,67822j	0,0387j	0,007964078+0,0894267j
11	-0,03740j	0,1388+1,06578j	0,0608j	0,005825804-0,1146729j
13	-0,03164j	0,1388+1,25956j	0,0719j	0,001213902-0,0613017j
17	-0,02420j	0,1388+1,64712j	0,0940j	0,000220205-0,0337787j
19	-0,02165j	0,1388+1,84090j	0,1051j	0,000122032-0,0280172j
23	-0,01788j	0,1388+2,22846j	0,1272j	0,000047936-0,0211721j
25	-0,01645j	0,1388+2,42224j	0,1382j	0,000032572-0,0189449j
29	-0,01418j	0,1388+2,80980j	0,1604j	0,000016734-0,0157220j
31	-0,01327j	0,1388+3,00358j	0,1714j	0,000012495-0,0145118j
35	-0,01175j	0,1388+3,39113j	0,1935j	0,000007403-0,0125998j
37	-0,01111j	0,1388+3,58491j	0,2046j	0,000005845-0,0118294j

Fonte: Autor

Para se calcular a corrente  $I(h)$  de cada ordem toma-se o valor da corrente nominal da carga não linear, pois esta é a fonte das distorções, e portanto, a causadora das correntes distorcidas, multiplica-se a fundamental pela contribuição de cada ordem do espectro seguindo a Tabela 1.

$$I_{carga} = \frac{1250 \cdot 10^3}{460 \cdot \sqrt{3}} = 1568,88 < 34,9^\circ [A]$$

A partir dos valores de impedância do espectro, Tabela 1, tomando como base somente a impedância da carga não linear, pode-se calcular as corrente  $I(h)$  em cada ordem do espectro, isto é:

$$I(h) = I_n * \%espectro \quad (25)$$

Cada  $I(h)$ , em cada ordem, causa uma queda de tensão correspondente quando circula pelo circuito, e esta tensão se soma a tensão nominal do circuito, é daqui que surge a distorção de tensão no circuito. Para calcular as tensões  $V(h)$  que surgirão no circuito em virtude da circulação das correntes  $I(h)$ , basta calcular o seguinte produto:

$$V(h) = Z_{eq}(h) * I(h) \quad (26)$$

As impedâncias  $Z_{eq}(h)$  estão apresentadas na Tabela 2, as correntes  $I(h)$ , resultam da Equação (25).

A Tabela 3 mostra as correntes  $I(h)$  e as tensões  $V(h)$ .

Qualquer outra carga no barramento será submetida à tensão distorcida em função dessas componentes de corrente, que implicam em distorção da tensão como consequência. Este é o efeito que se busca combater e que as concessionárias exigem dos consumidores que façam a devida correção.

Tabela 3: Valores de Corrente e Tensão para o espectro considerado.

h	I(h) [A]	V [V]
5	286,1649	11,0362
7	186,6975	18,2316
11	89,8972	9,5903
13	62,9124	3,7222
17	30,5933	1,0171
19	21,8075	0,6037
23	14,7475	0,3099
25	13,4924	0,2540
29	11,1391	0,1743
31	9,7271	0,1406
35	6,9031	0,0867
37	5,9618	0,0703

Fonte: Autor

Cada filtro absorverá a componente harmônica cuja frequência seja sintonizada, por exemplo, um filtro de 5ª ordem foi submetido a tensão fundamental mais a componente de 5ª harmônica, o mesmo para 7ª, 11ª e assim sucessivamente.

Para o banco de capacitores dimensionado nessa demonstração, 560kVAr, supondo que ele seja sintonizado em 5ª, 7ª ou 11ª, a corrente e tensão submetida ao banco seria dada pela Equação (27) .

$$THDi = \sqrt{I_{h(1)}^2 + I_{(sintonia)}^2} \quad (27)$$

Onde:

$I_{h(1)}$ : Corrente Fundamental do Banco de Capacitores

$I_{(sintonia)}$  : Corrente da ordem a selecionada, Tabela 3, que se deseja que seja absorvida pelo filtro.

Para 5ª ordem tem-se:

$$I_h(1) = \frac{(560 \cdot 10^3)}{(480 \cdot \sqrt{3})} = 673,57 \text{ [A]} \quad (28)$$

Então:

$$THDi(5) = \sqrt{673,57^2 + 286,1649^2} = 731,8429 \text{ [A]} \quad (29)$$

O mesmo deve ser feito para tensão, conforme segue:

$$THDv(5) = \sqrt{480^2 + 11,0392^2} = 480,1269 \text{ [V]} \quad (30)$$

Esses são os valores de corrente e tensão que devem ser suportados pelo banco de capacitores caso sejam sintonizados em 5ª ordem.

Repetindo o mesmo cálculo para 7ª e 11ª ordem, tem-se:

$$THDi(7) = \sqrt{673,57^2 + 186,6975^2} = 698,9704 \text{ [A]}$$

$$THDv(7) = \sqrt{480^2 + 16,7618^2} = 480,3461 \text{ [V]}$$

$$THDi(11) = \sqrt{673,57^2 + 89,8972^2} = 679,5478 \text{ [A]}$$

$$THDv(11) = \sqrt{480^2 + 10,3221^2} = 480,0958 \text{ [V]}$$

Um detalhe importante a ser observado, a título de verificação, é a distorção total percentual do espectro informado em comparação com a distorção calculada. No caso em questão, trata-se de conversores conectados à carga, então, o espectro informado se aplica à corrente, a distorção causada na tensão será em consequência da distorção da corrente, o procedimento é ilustrado através das ações seguintes.

Calcula-se a distorção harmônica total de corrente em porcentagem, referente ao espectro informado, Tabela 1 e comparar com as correntes calculadas Tabela 3:

$$THDi\% = 100 \cdot \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} Ih^2}}{Ih1} \quad (31)$$

Para o espectro tem-se:

$$THDi\%$$

$$= \sqrt{18,24^2 + 11,9^2 + 5,73^2 + 4,01^2 + 1,95^2 + 1,39^2 + 0,94^2 + 0,86^2 + 0,71^2 + 0,62^2 + 0,44^2 + 0,38^2}$$

$$THDi\% = 23,06\%$$

Para a Corrente tem-se:

$$THDi\% = \frac{\sqrt{286,1649^2 + 186,6975^2 + 89,8972^2 + 62,9124^2 + \dots + 5,9618^2}}{673,57}$$

$$THDi\% = 23,06\%$$

Observe que se for tomado os valores do espectro, Tabela 1, ou os valores numéricos em ampere o resultado do THDi% é o mesmo.

Tomando somente o numerador, pode-se obter a distorção harmônica total de corrente em ampere [A], este valor não será utilizado no desenvolvimento deste estudo, está sendo mostrado a título de informação:

$$THDi = \sqrt{286,1649^2 + 186,6975^2 + 89,8972^2 + 62,9124^2 + \dots + 5,9618^2} = 361,79 \text{ [A]}$$

Pode ser feito o cálculo para a distorção harmônica total de tensão, para conhecimento, no projeto. A equação (31) é equivalente para tensão:

$$THDv\% = \frac{\sqrt{(11,0362^2 + 18,2316^2 + 9,5903^2 + 3,7222^2 + \dots + 0,0703^2)}}{480}$$

$$THDv\% = 8,92\%$$

Tomando somente o numerador, tem-se a distorção harmônica total de tensão em Volts [V]:

$$THDv = \sqrt{(11,0362^2 + 18,2316^2 + 9,5903^2 + 3,7222^2 + \dots + 0,0703^2)} = 23,6989 \text{ [V]}$$

Essas são as distorções totais projetadas e poderão ser verificadas na simulação. Nesse ponto termina a diferença entre fazer o levantamento de campo para se obter o espectro harmônico numa planta existente em operação e obter o espectro a partir dos cálculos apresentados até aqui, pois o medidor dá resultados equivalentes aos obtidos até então, isto é, correntes e tensões em cada ordem o espectro e a distorção total de corrente e tensão. Daqui para diante o procedimento de cálculo/dimensionamento são os mesmos.

### 5.3.3.2. Verificação do Fator de potência com o Banco de Capacitores:

Para selecionar os capacitores é importante levar em consideração os critérios citados em 5.2, onde compara-se os valores calculados com a capacidade real do componente. A potência da carga total, linear e não linear, é de 2500kVA com fator de potência 0,82, ou seja:

$$P = 2500 \cdot 0,82 = 2050 \text{ kW}$$

$$Q = 2500 \cdot \text{sen}(\text{acos}(0,82)) = 1430,9 \text{ kVAr}$$

$$Q_{\text{corrigido}} = 1430,9 - 560 \text{ kVAr (potência do banco deduzindo do Q da carga)}$$

$$Q_{\text{corrigido}} = 870,9 \text{ kVAr}$$

$$S_{\text{corrigido}} = 2050 \text{ kW} + 870,9 \text{ kVAr}$$

$$S_{\text{corrigido}} = 2272,32 < 23,017^\circ$$

$$\text{Cos}\varphi = 0,9204$$

O banco de capacitores está satisfazendo o requerido para 60Hz, portanto é necessário verificar como ficaria o fator de potência com a presença das distorções harmônicas encontradas:

$$FP_{\text{distorção}} = \text{Cos}\varphi(1) \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + DHTv^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + DHTi^2}} \quad (32)$$

$$FP_{\text{distorção}} = 0,9204 \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 0,0892^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 0,2306^2}}$$

$$FP_{\text{distorção}} = 0,8933$$



Fica, então, constatado que banco de capacitores com presença de corrente harmônica prejudica o fator de potência, conforme verificado com a aplicação da equação (32).

### 5.3.3.3. Verificar o Risco de Ressonância Paralela do Banco de capacitores

A ressonância paralela acontecerá caso a impedância do banco de capacitores coincida com a impedância do transformador, veja .

, a impedância do transformador, olhando fase por fase, estão em paralelo com o banco de capacitores. Esta verificação precisa ser feita para o caso de o banco de capacitores operar sem o reator de sintonia, isto é, o filtro operando como banco de capacitores. Para verificar se há risco de ressonância paralela observa-se seguintes características e condições:

$X_L = X_{cap}$ , então:

$$2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (33)$$

$X_L$ , será o do transformador;

$X_{Ltr} = j 0,0055 \text{ } [\Omega]$ , conforme equação (16)

$L_{tr} = j 14.667.10^{-6} \text{ } [H]$

$X_{cap} = - j 0,4114 \text{ } [\Omega]$ , conforme (17)

Obtendo  $L$  do transformador e  $C$  do banco de capacitores e substituindo em (33), obtém-se a frequência de ressonância:

$$f = 517,55 \text{ } Hz \quad (34)$$

A ressonância ocorre em  $h=8,626$ , mais próximo a componente harmônica de 8ª ordem.

No espectro da carga, Tabela 1, não existe corrente nessa componente, portanto, não há risco de ocorrência de ressonância entre o transformador e o banco de capacitores.

#### 5.3.3.4. Passando de Banco de Capacitores para Filtro de Harmônicas

Uma vez definido o banco de capacitores, é necessário sintonizá-lo na frequência desejada. Como definido o banco será sintonizado em frequência múltipla de 4,7. Para proceder o cálculo da indutância do reator basta seguir o desenvolvimento da equação (1), então chega-se na equação (35).

Para o indutor:

$$XL = \frac{X_{cap}}{h^2} \quad (35)$$

$$XL = \frac{0,4114}{4,7h^2}$$

$$XL = 0,01863 [\Omega]$$

$$L = 0,0494 [mH]$$

Para o Capacitor:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad (36)$$

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot 60 \cdot 0,4114}$$

$$C = 6447,2488 [\mu F]$$

Tendo os valores individuais dos capacitores e reator, é importante dispor das grandezas relativas à combinação série para se verificar o conjunto:

- a. A reatância do filtro: é a somatória das reatâncias capacitiva e indutiva:

$$X_{filtro} = XL - XC \quad (37)$$

$$X_{filtro} = 0,01863 - 0,4114 = -0,3928 [\Omega]$$

b. A corrente do filtro: a qual ele é submetido na frequência fundamental:

$$I_{filtro} = \frac{480/\sqrt{3}}{|X_{filtro}|} \quad (38)$$

$$I_{filtro} = \frac{480/\sqrt{3}}{|-0,395|} = 701,64 [A]$$

c. A tensão no capacitor: submetido à frequência fundamental:

$$V_{cap} = I_{filtro} \cdot X_{cap} \quad (39)$$

$$V_{cap} = 701,64 \cdot 0,4114 = 288,67 [Vf] \therefore 288,67 \cdot \sqrt{3} = 500 [Vl]$$

d. A potência reativa total do filtro:

$$Q_{filtro} = V_n \cdot I_{filtro} \cdot \sqrt{3} \quad (40)$$

$$Q_{filtro} = 480 \cdot 701,64 \cdot \sqrt{3}$$

$$Q_{filtro} = 583,33 [kVAr]$$

e. A potência reativa total do capacitor, que se faz do mesmo modo que no filtro, porém tomando a tensão no capacitor:

$$Q_{cap} = V_l \cdot I_{filtro} \cdot \sqrt{3} \quad (41)$$

$$Q_{cap} = 500 \cdot 701,64 \cdot \sqrt{3}$$

$$Q_{cap} = 607,64 [kVAr]$$

f. Corrente total no filtro: aquela corrente que o filtro deve absorver na frequência sintonizada, neste exemplo será a de 5ª ordem:

A expectativa de sintonizar o filtro numa determinada frequência é que ele absorva a componente correspondente presente no barramento, neste caso espera-se que o filtro absorva a corrente de 5ª ordem gerada pela carga, indicada na Tabela 3, isto é:

$$I(5) = 286,16[A]$$

Adicionalmente deve-se obter a corrente de 5ª harmônica demandada pela interação das impedâncias do transformador, do capacitor e do reator,  $I(5)_{sys}$ , conforme segue:

$$I(5)_{sys} = \frac{v(5)}{Z_{tr} - Z_{cap} + Z_{ind}}$$

$$I(5)_{sys} = \frac{11,04}{0,0276 - 0,08229 + (2 \cdot \pi \cdot 300 \cdot 0,0494 \cdot 10E-3)} = 399,17[A]$$

Onde:

- $I(5)$ : Corrente de 5ª ordem gerada pela carga, conforme Tabela 2;;
- $I(5)_{sys}$  : Corrente de 5ª ordem demanda na interação das impedâncias do transformador, do capacitor e do reator;
- $v(5)$ : Tensão de 5ª ordem gerada pela carga, conforme Tabela 2;;
- $Z_{tr}$ : Impedância de 5ª ordem do transformador, conforme Tabela 2;
- $Z_{cap}$ : Impedância de 5ª ordem do banco de capacitores, conf. Tabela 2;;
- $Z_{ind}$ : Impedância do indutor;

Para efeito de dimensionamento, devem ser somadas as correntes  $I(5)$  e  $I(5)_{sys}$ :

$$I(5)_{total} = 286,16 + 399,17 = 685,33 [A] \quad (42)$$

### 5.3.3.5. Seleção dos Capacitores – Componentes comerciais e Verificação/Aprovação

Para selecionar os capacitores é importante levar em consideração os critérios citados em 5.2, onde compara-se os valores calculados com a capacidade real do componente, calculados no item anterior, 5.3.3.4 e nos resultados da Tabela 3.

O dimensionamento deve ser sempre verificado, qualquer violação dos critérios implica em elevar a tensão nominal dos capacitores.

### 5.3.3.5.1. Corrente Eficaz

Tomando a componente de corrente de 5ª ordem total da equação (42) e somando com a corrente nominal do banco de capacitores, equação (38), obtém-se a corrente RMS, item b de 5.3.3.4, da ordem em questão, 5ª:

$$I_{rms} = \sqrt{I(5)_{total}^2 + I_{ncap}^2} \quad (43)$$

$$I_{rms} = \sqrt{685,33^2 + 701,64^2}$$

$$I_{rms} = 980,81 \text{ [A]}$$

Onde:

- *I<sub>rms</sub>*: é a corrente RMS, à qual o banco de capacitores será submetido na presença das correntes harmônicas do circuito.

Conforme o critério de aprovação, item 5.2.1, a corrente *I<sub>rms</sub>* do filtro, equação (43), deve ser menor ou igual a 1,8 vezes a corrente nominal do Banco, equação (28), conforme segue:

$$I_{rsm} < 1,8 * I_n$$

$$980,81 < 1,8 * 673,57$$

» » » **Aprovado**

### 5.3.3.5.2. Tensão Eficaz nos Capacitores

A tensão de 5ª ordem no capacitor será o produto da corrente total de 5ª ordem, equação (42) pela Impedância de 5ª ordem do Banco de Capacitores, Tabela 2 e Tabela 3:

$$V(5) = I(5) \cdot Z_{cap}(5)$$

$$V(5) = 685,33 \cdot 0,08229 = 56,39 \text{ [V]} - (\text{tensão de fase})$$

$$V(5) = 56,39 \cdot \sqrt{3} = 97,68 \text{ [V]}$$

A tensão no capacitor na frequência fundamental, foi calculada na equação (39).

$$V_{cap} = 500 \text{ [V]}$$

Seguindo equações (7) e (8):

$$V_{rms} = \sqrt{500^2 + 97,68^2} = 509,45 \text{ [V]}$$

$$V_{rms} < V_{nfiltro} * 1,1$$

$$509,45 < 480 * 1,1 = 528$$

» » » **Aprovado**

### 5.3.3.5.3. Potência Eficaz Capacitores

A Potência eficaz é o produto de  $I_{rms}$  e  $V_{rms}$ , calculadas nos itens anteriores:

$$S_{efic} = 980,81 \cdot 509,45 \cdot \sqrt{3} = 865,46 \text{ [kVA]} \text{ (Potência trifásica)}$$

Seguindo equações (9) e (10):

$$S_{efic} < S_{nom} * 1,35$$

$$865,46 < 560 * 1,35 = 756$$

» » » **REPROVADO**

É necessário aumentar a tensão nominal do banco de capacitores, para a próxima classe de tensão comercial seria 575V, para se obter esta informação é necessário consultar o catálogo do fornecedor de capacitores considerado, para este exemplo foi considerado o fabricante Schneider que tem as seguintes tensões nominais de capacitores: 220, 380, 440, 480, 575, 690 e 800 [V]. Caso continue sendo reprovado deve-se adotar a próxima tensão nominal e assim sucessivamente. Esta medida busca manter a mesma capacitância, porém pegando um componente mais robusto; a mesma capacitância submetida a uma tensão mais alta resulta num componente de maior potência, no entanto quando submetido a tensão nominal do projeto, vai entregar a mesma potência, ao mesmo tempo que é robusto o suficiente para suportar a corrente harmônica presente no circuito.

Resumindo este conceito: o banco de capacitores será especificado para uma tensão de maior, 575V neste caso, porém continuará operando em 480V, com intuito de que o componente tenha potência tal que suporte a absorção das distorções harmônicas.

A potência nominal deve ser calculada para esta nova tensão, através da Equação (10).

$$S_{nomnova} = (575^2) / \left( \frac{480^2}{560 \cdot 10^3} \right) = 803,6 \text{ [kVAr]}$$

Realizando uma nova verificação, tem-se:

$$S_{efic} < S_{nonNova} * 1,35$$

$$865,46 < 803,6 * 1,35 = 1085$$

» » » **Aprovado**

#### 5.3.3.5.4. Tensão de Pico Capacitores

A tensão de pico nos capacitores é o produto da somatória das tensões  $V_{rms}$  e Distorção total de tensão ( $V(5)$ ), calculadas no item 5.3.3.5.2:

Seguindo as Equações (11), (12) e (13):

$$V_p = \sqrt{2} * (509,45 + 97,68) = 865,46 [V]$$

$$V_{pcap} = \sqrt{2} * 575 = 813,17 [V]$$

$$V_p < V_{pcap} * 1,2$$

$$865,46 \leq 813,17 * 1,2 = 975$$

» » » **Aprovado**

Observação: se considera as tensões de linha, pois os capacitores são especificados pelos fabricantes desta forma.

#### 5.4. Verificação/Definição do Fator de Qualidade

O valor da resistência definitivamente não faz parte do filtro. No entanto, é de fundamental importância dar atenção a esta grandeza, pois a presença desse componente é inevitável pela própria característica física dos componentes e pode ser fator favorável ou desfavorável no desempenho do filtro.

O valor de R constitui um tema com um pouco de divergências entre os projetistas de filtros. Há aqueles que defendem a adição de um resistor, com propósito, de atenuar os efeitos de sobretensão de chaveamento que ocorre na energização dos capacitores, porque valores adicionais de resistência melhoram significativamente a atenuação de sobretensões. Em contrapartida, há aqueles que defendem um valor de R naturalmente resultante da construção do indutor, pois ele já proporciona um amortecimento suficientemente bom para preservar os capacitores. Inclusive, um dos critérios para aprovação do projeto do filtro é a verificação da tensão de isolamento do componente.

Verificando o valor de R a partir do fator de qualidade desejado, conforme descrito no item 5.1.3, e aplicando a Equação (3), tem-se:

Para  $Q = 25$ , tem-se  $R = 4,36 [m\Omega]$

Para  $Q = 20$ , tem-se  $R = 5,45 [m\Omega]$

Embora seja recomendável manter o valor de Q acima de 25, pode ser conveniente admitir um valor um pouco inferior, em favor de uma boa construção, ou simplesmente porque os materiais envolvidos resultam em valores menores. A própria resistência resultante da construção do indutor pode já resultar em fator de qualidade mais próximo de 20 do que de 25, por exemplo.

O valor de R na impedância é um valor que depende unicamente do material condutor, não é influenciado pela frequência, é simplesmente, resultado do valor ôhmico dos componentes e materiais, conseqüentemente, quando as reatâncias indutiva e capacitiva se anularem mutuamente, restará o valor da resistência. Ou seja, a impedância do filtro é limitada pelo valor da resistência. O fator de qualidade menor que 20 é um indicativo de que o valor da resistência está de tal modo elevado, fazendo com que a eficiência do filtro comece a ser comprometida. Esse efeito pode ser observado na Figura 6, afastando cada vez mais o ponto de impedância “zero”, que seria o ideal.

Foi simulado neste estudo o filtro com resistor de amortecimento e sem amortecimento. Para esse caso, foi adotado fator de qualidade 25, e o valor de R representa somente a resistência dos materiais do capacitor e indutor.

### **5.5. Sumário e Síntese da metodologia**

Antes de avançar para o desenvolvimento do estudo, objeto deste trabalho, é importante se ter um quadro geral do que foi exposto até aqui, para que se tenha em mente de maneira sintética o passo a passo a ser seguido. Para se dimensionar qualquer filtro *single tuned* basta seguir os passos já desenvolvidos, porém ter um guia do passo a passo pode ser de grande utilidade para não se perder pelo caminho.

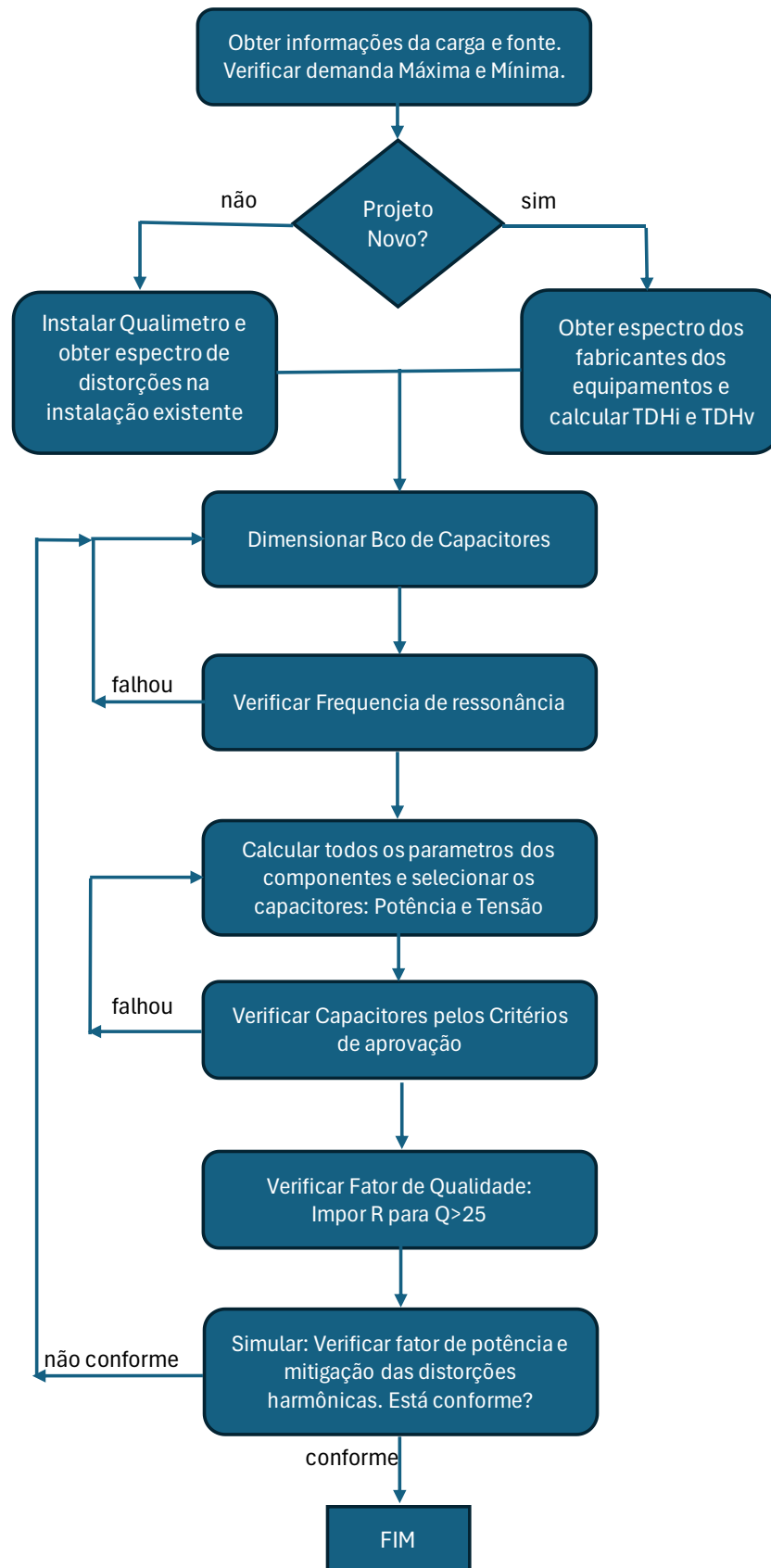
A Figura 12 a seguir, ilustra o passo a passo e serve para se compreender a ideia geral do plano do dimensionamento e em quais pontos será necessário retornar caso algo dê errado ao longo do desenvolvimento.



No caso desenvolvido como exemplo, foi dimensionando um banco de capacitores de 560kVAr e durante a simulação conta-se a utilidade do fluxograma, pois nem sempre é preciso reiniciar desde o início, se o capacitor não passa no teste de potência, basta selecionar um componente equivalente de uma classe de tensão acima e fazer o teste; se na simulação com o filtro o fator de potência ou a mitigação das distorções não for satisfatória, então sim, será necessário retornar aos passos iniciais.

A partir do item 6. Simulação, o circuito será desenvolvido para este fim e então o fluxograma será naturalmente seguido.

Figura 12: Fluxograma para dimensionamento de filtros.



Fonte: Autor

## 6. SIMULAÇÃO

A fim de simular as soluções propostas, foi adotado um diagrama unifilar com propósito de verificar o desempenho de cada alternativa, em topologia radial, podendo ser considerada como um unifilar típico de plantas industriais, Figura 13.

A distribuição principal é feita no nível de 13,8 kV. Cada circuito alimenta um conjunto de 2 transformadores. Esse padrão de distribuição permite avaliar uma série de abordagens diferentes. Pode-se analisar o desempenho por área, considerando cada circuito, e o desempenho geral, considerando a planta como um todo. Chama-se atenção para os seguintes aspectos dos equipamentos que compõem o circuito:

- a. Transformadores de distribuição de baixa tensão: 2500 kVA, 480 V, 3 fases, 60 Hz; serão simulados dois cenários base de operação, a saber:
  - i. potência demandada de 100% em relação a potência nominal do transformador: 2500kVA, divididos da seguinte forma:
    - 1250 kVA, FP 0,82 – Motores de Indução, partida direta;
    - 1250 kVA, FP 0,82 – Motores de Indução, partida através inversores de frequência 6 pulsos, representando 50% da demanda no transformador.
  - ii. potência demandada de 60% em relação a potência nominal do transformador, demanda adotada com base em ponderação da Figura 2 para decisão de demanda mínima, a qual indica que o nível de 60% é um nível razoável para se considerar como demanda mínima, dando um range de operação bem conservativo para ser testado, quanto maior for a variação de demanda maior é o risco de se perder a sintonia do filtro. Portanto, demanda de 1500 kVA, divididos da seguinte forma:
    - 750 kVA, FP 0,82 – Motores de Indução, partida direta;
    - 750 kVA, FP 0,82 – Motores de Indução, partida através inversores de frequência 6 pulsos, representando 50% da demanda no transformador.
- b. Bancos de capacitores trifásicos de 560kVAr, conectados no nível de 480 V, dimensionados para corrigir o fator de potência relativo à capacidade nominal do transformador de 2500 kVA, partindo de um fator de potência de 0,82 indutivo para um

novo fator de potência de 0,92 indutivo. Os bancos devem atender a condição de maior demanda dos transformadores e proverão reativos adicionais quando a planta estiver operando com demanda de 60%, contribuindo também para fator de potência no barramento de 13,8 kV. Esse critério determina as impedâncias máxima e mínima para serem consideradas no dimensionamento dos filtros. Logo, o filtro deve ser dimensionado para a potência nominal do transformador, uma vez adotado este critério adotado deve-se avaliar e considerar o cenário de demanda mínima, 60%, como descrito acima.

Para cada cenário de filtro, todo o procedimento de dimensionamento apresentado ao longo de todo item 0 deve ser executado. As tabelas correspondentes com as grandezas de cada um serão apresentadas, na simulação de cada cenário.

c. Com relação à sintonia dos filtros, quando eles são conectados à rede, nota-se um ligeiro deslocamento na frequência de sintonia, devido à interação com a impedância da rede. Por essa razão, os filtros são dimensionados um pouco abaixo da frequência desejada [6], além da razão já mencionada de se evitar que a sintonia do filtro esteja exatamente numa frequência múltipla da fundamental, esta medida evita ou ao menos dificulta algum eventual caso de ressonância, é uma medida preventiva e conservadora, toda e qualquer medida a favor da segurança é importante ser considerada. Quando conectado à rede a seguinte correção deve ser considerada, aplicando a equação (2), porém abrindo o termo da indutância  $L$ , conforme equação (44) abaixo:

$$f_{sys} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L + L_s) * C}} \quad (44)$$

Onde:

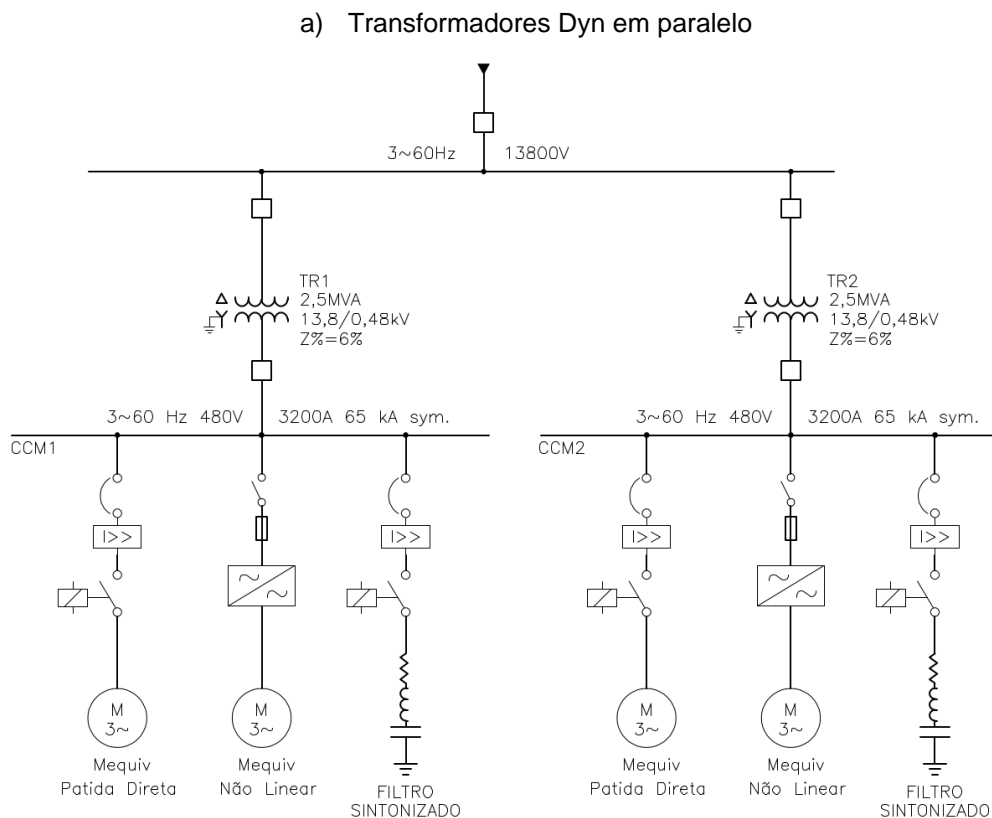
- $f_{sys}$ : frequência de ressonância com o filtro conectado à rede;
- $L$ : indutância do filtro;
- $L_s$ : indutância da rede;
- $C$ : capacitância do filtro.

O diagrama unifilar foi definido conforme as premissas e critérios descritos, Figura 13. A diferença entre cada circuito é devido à combinação de arranjo de filtros e esquema de ligação dos transformadores:

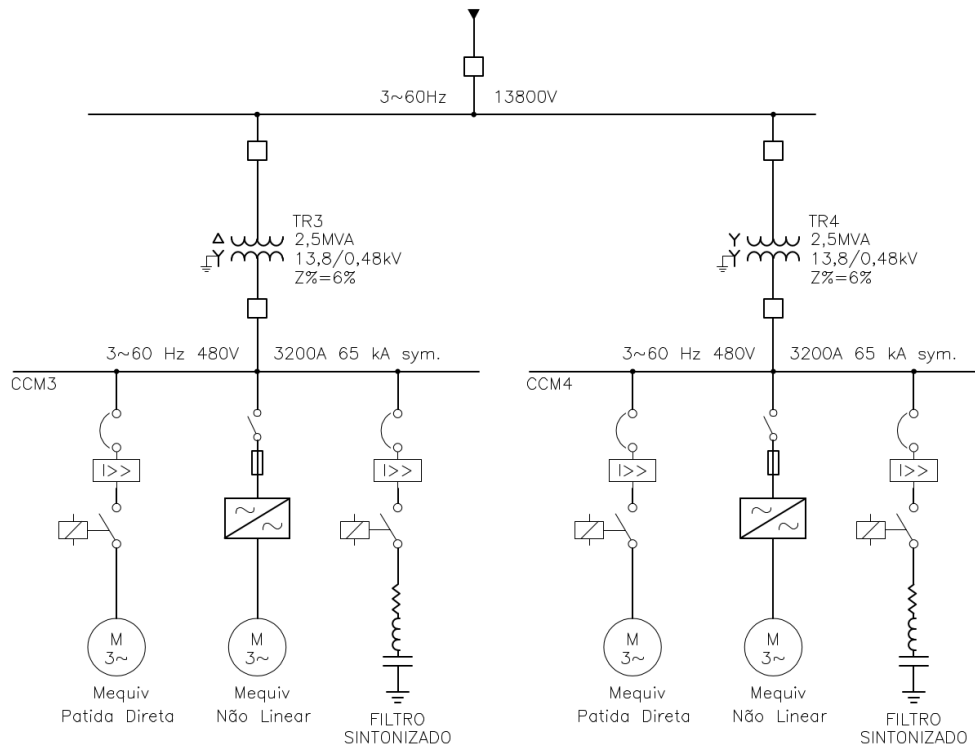
- Circuito 1: Alimenta o ponto de conexão comum onde estão conectados dois transformadores 2500kVA, 13,8-0,48 kV, Dyn. Nos barramentos de 480 V (chamados de CCM no diagrama) estão conectadas as cargas equivalentes. Em cada um dos transformadores conecta-se um filtro sintonizado.
- Circuito 2: Alimenta o ponto de conexão comum onde estão conectados dois transformadores 2500kVA, 13,8-0,48 kV, um Dyn e outro Yyn. Nos CCM 480 V estão conectadas as cargas equivalentes. Em cada um dos transformadores conecta-se um filtro sintonizado, análogo ao circuito 1.

Foram feitas variações na aplicação dos filtros, as quais serão discutidas na simulação.

Figura 13: Diagrama Unifilar Simulado: transformadores em paralelo variando conexões no primário.



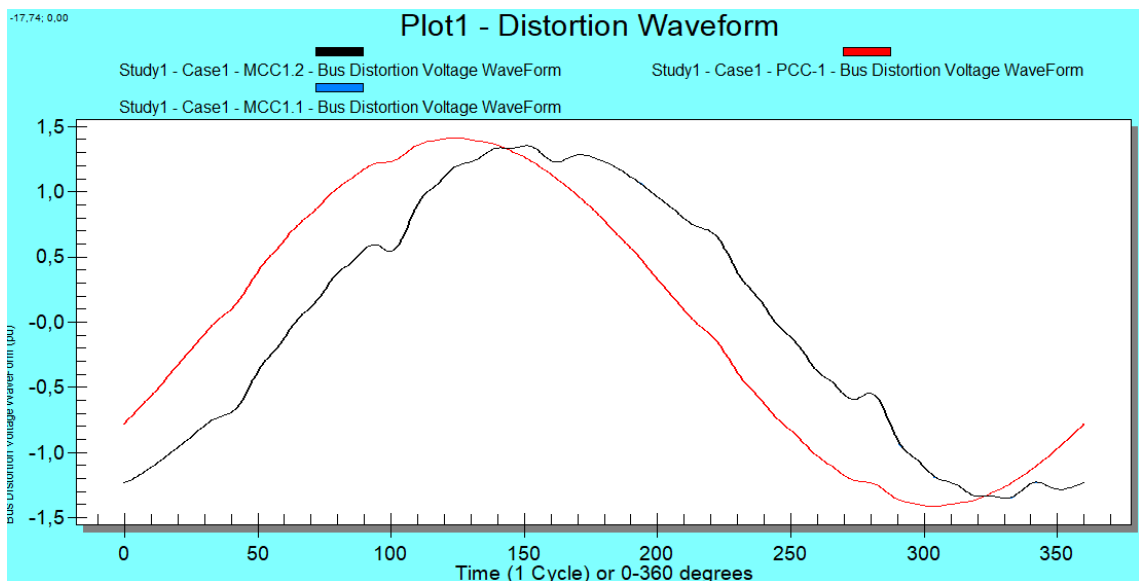
b) Transformadores Dyn e Yyn em paralelo



Fonte: Autor

A ideia por trás da estratégia de alternar as ligações dos primários dos transformadores é testar o efeito da defasagem resultante no secundário. Na Figura 13a ambos os transformadores Delta-Estrela, resultam em secundários defasados de 30° em relação ao primário, conforme ilustrado na Figura 14, cujos barramentos CCM1.1 e CCM1.2 estão sobrepostos, pois não há defasagem entre eles.

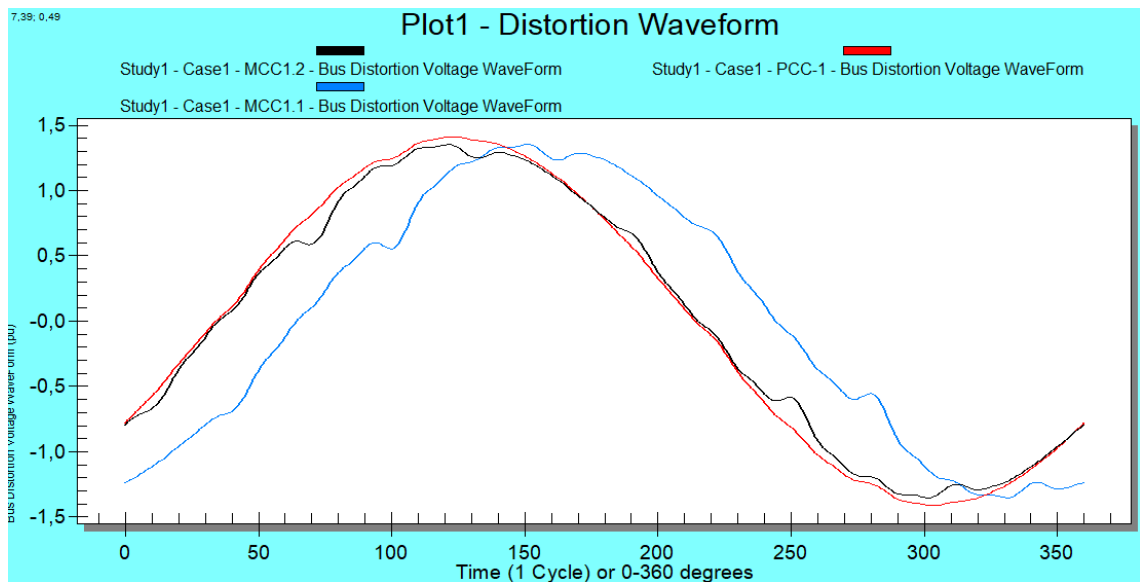
Figura 14: CCMs com tensão em fase e defasados de 30° em relação ao primário, ambos Dyn.



Fonte: Autor

No entanto na Figura 13b um dos transformadores está conectado em Estrela-Estrela, de modo que um dos CCM está em fase com o primário enquanto o outro mantém a defasagem de  $30^\circ$ , conforme se verifica na Figura 15. Intenciona-se verificar se a defasagem no secundário resulta em mitigação natural das distorções quando medida no primário.

Figura 15: CCMs com tensão em fase e defasados de  $30^\circ$  em relação ao primário, ambos Dyn.

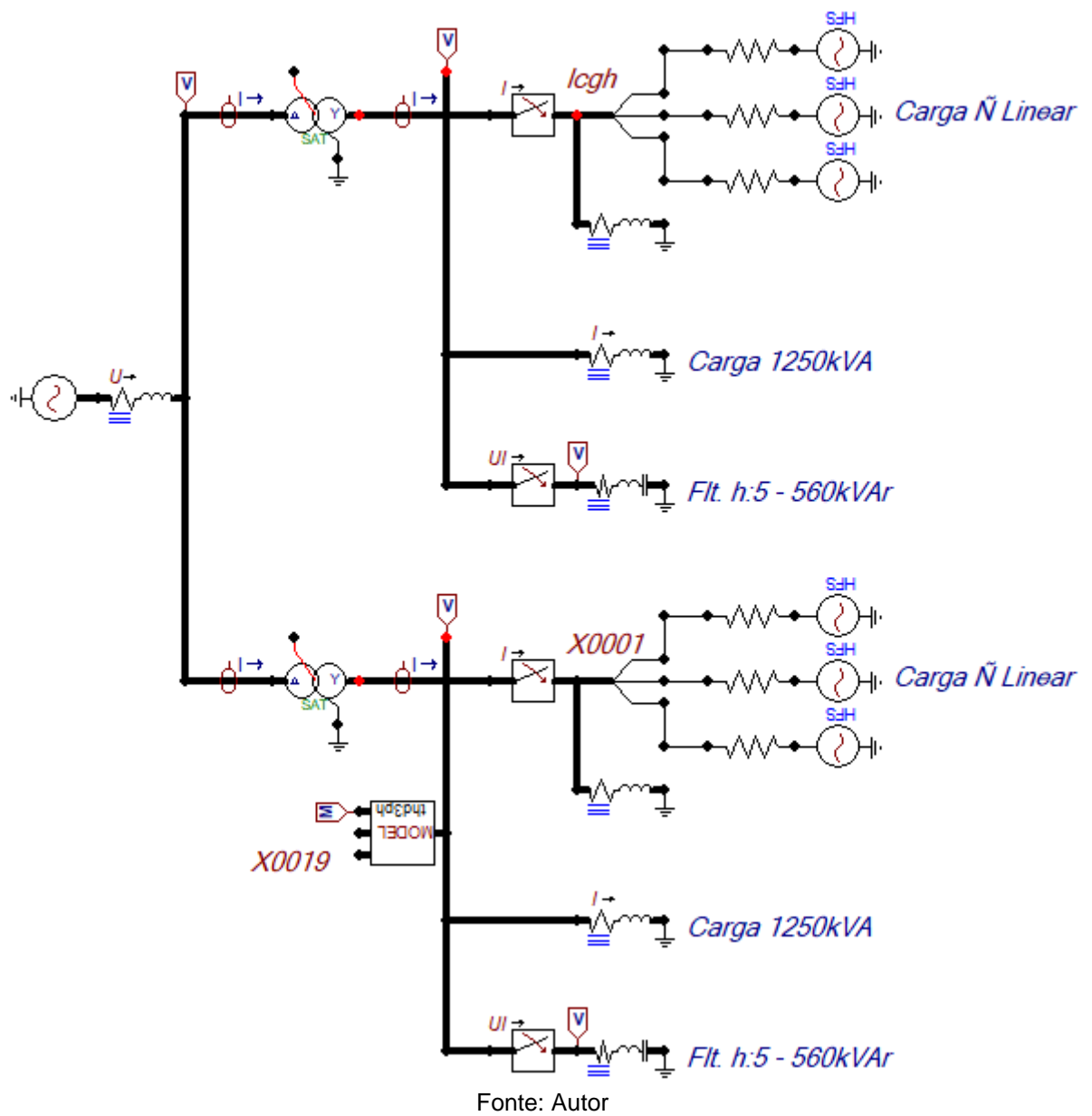


Fonte: Autor

## 6.1. MODELAGEM

O diagrama unifilar foi modelado no software ETM ATP Draw v.7.3 [40], conforme diagrama a seguir, Figura 17, que representa o diagrama conceitual, Figura 13a, cujas cargas e filtro serão parametrizados para cada cenário a ser simulado, inicialmente foi simulado o exemplo desenvolvido no item 0.

Figura 16: Diagrama Unifilar Modelado no ATPDraw.

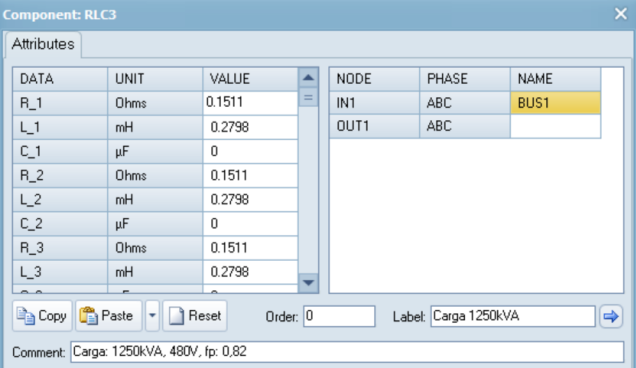
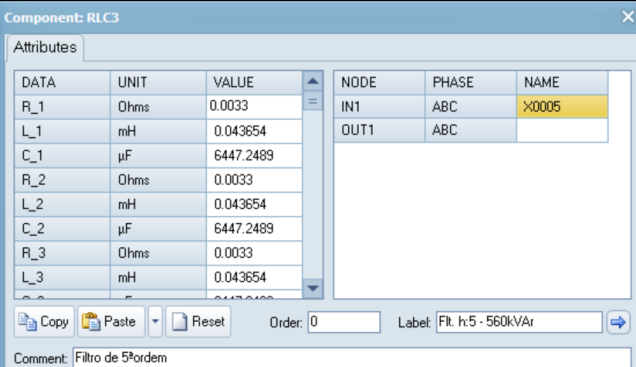


Foram utilizados componentes nativos do ATPDraw, conforme Tabela 4.



Tabela 4: Componentes do ATPDraw utilizados na modelagem.

Equipamento	Componente ATPDraw	Parâmetros																																				
Fonte:	ACSOURCE	<p>Component: ACSOURCE</p> <p>Attributes</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>DATA</th> <th>UNIT</th> <th>VALUE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AmplitudeA</td> <td>Volt</td> <td>13800</td> </tr> <tr> <td>Frequency</td> <td>Hz</td> <td>60</td> </tr> <tr> <td>PhaseAngleA</td> <td>degrees</td> <td>90</td> </tr> <tr> <td>StartA</td> <td>sec</td> <td>-10</td> </tr> <tr> <td>StopA</td> <td>sec</td> <td>100</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th>NODE</th> <th>PHASE</th> <th>NAME</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AC</td> <td>ABC</td> <td>X0002</td> </tr> </tbody> </table> <p>Type of source: <input type="radio"/> Current <input checked="" type="radio"/> Voltage</p> <p>Num phases: <input type="radio"/> Single <input checked="" type="radio"/> 3-phase <input type="radio"/> 3*1-phase</p> <p>Angle units: <input checked="" type="radio"/> Degrees <input type="radio"/> Seconds</p> <p>Amplitude: <input type="radio"/> Peak L-G <input type="radio"/> RMS L-G <input checked="" type="radio"/> RMS L-L</p> <p>Grounding: <input checked="" type="radio"/> Grounded <input type="radio"/> Floating</p> <p>Order: 0 Label: <input type="text"/></p> <p>Comment: <input type="text"/></p>	DATA	UNIT	VALUE	AmplitudeA	Volt	13800	Frequency	Hz	60	PhaseAngleA	degrees	90	StartA	sec	-10	StopA	sec	100	NODE	PHASE	NAME	AC	ABC	X0002												
DATA	UNIT	VALUE																																				
AmplitudeA	Volt	13800																																				
Frequency	Hz	60																																				
PhaseAngleA	degrees	90																																				
StartA	sec	-10																																				
StopA	sec	100																																				
NODE	PHASE	NAME																																				
AC	ABC	X0002																																				
Z da Fonte:	RLC3	<p>Component: RLC3</p> <p>Attributes</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>DATA</th> <th>UNIT</th> <th>VALUE</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>R_1</td> <td>Ohms</td> <td>0.00659</td> </tr> <tr> <td>L_1</td> <td>mH</td> <td>0.0527</td> </tr> <tr> <td>C_1</td> <td>µF</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>R_2</td> <td>Ohms</td> <td>0.00659</td> </tr> <tr> <td>L_2</td> <td>mH</td> <td>0.0527</td> </tr> <tr> <td>C_2</td> <td>µF</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>R_3</td> <td>Ohms</td> <td>0.00659</td> </tr> <tr> <td>L_3</td> <td>mH</td> <td>0.0527</td> </tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr> <th>NODE</th> <th>PHASE</th> <th>NAME</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>IN1</td> <td>ABC</td> <td>X0002</td> </tr> <tr> <td>OUT1</td> <td>ABC</td> <td>X0002</td> </tr> </tbody> </table>	DATA	UNIT	VALUE	R_1	Ohms	0.00659	L_1	mH	0.0527	C_1	µF	0	R_2	Ohms	0.00659	L_2	mH	0.0527	C_2	µF	0	R_3	Ohms	0.00659	L_3	mH	0.0527	NODE	PHASE	NAME	IN1	ABC	X0002	OUT1	ABC	X0002
DATA	UNIT	VALUE																																				
R_1	Ohms	0.00659																																				
L_1	mH	0.0527																																				
C_1	µF	0																																				
R_2	Ohms	0.00659																																				
L_2	mH	0.0527																																				
C_2	µF	0																																				
R_3	Ohms	0.00659																																				
L_3	mH	0.0527																																				
NODE	PHASE	NAME																																				
IN1	ABC	X0002																																				
OUT1	ABC	X0002																																				
Trafo:	SATTRAFO	<p>Saturable transformer: SATTRAFO</p> <p>Attributes Characteristic</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Prim.</th> <th>Sec.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>U [V]</td> <td>13800</td> <td>277.128</td> </tr> <tr> <td>R [ohm]</td> <td>1.1426</td> <td>0.0005</td> </tr> <tr> <td>L [mH]</td> <td>17.9313</td> <td>0.0072</td> </tr> </tbody> </table> <p>Coupling: D Y</p> <p>Phase shift: 30</p> <p>I(0)= 1.195591 Rm= 27205.71 <input type="checkbox"/> RMS <input type="checkbox"/> 3-winding <input type="checkbox"/> 3-leg core</p> <p>F(0)= 51.802</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>NODE</th> <th>PHASE</th> <th>NAME</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Primary</td> <td>ABC</td> <td>X0003</td> </tr> <tr> <td>Secondary</td> <td>ABC</td> <td>TR1S</td> </tr> <tr> <td>Starpoint</td> <td>ABC</td> <td>X0004</td> </tr> <tr> <td>Sec-N</td> <td>1</td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>Order: 0 Label: <input type="text"/></p> <p>Comment: TR 2,5MVA - 13,8/0.48kV - 6% - WEG</p>		Prim.	Sec.	U [V]	13800	277.128	R [ohm]	1.1426	0.0005	L [mH]	17.9313	0.0072	NODE	PHASE	NAME	Primary	ABC	X0003	Secondary	ABC	TR1S	Starpoint	ABC	X0004	Sec-N	1										
	Prim.	Sec.																																				
U [V]	13800	277.128																																				
R [ohm]	1.1426	0.0005																																				
L [mH]	17.9313	0.0072																																				
NODE	PHASE	NAME																																				
Primary	ABC	X0003																																				
Secondary	ABC	TR1S																																				
Starpoint	ABC	X0004																																				
Sec-N	1																																					

Equipamento	Componente ATPDraw	Parâmetros																																							
Carga 1250kVA	RLC3																																								
Carga não Linear	HFS_SOUR	<p>Modelado o espectro apresentado na Tabela 1, para fase A. deve ser modelada uma fonte de corrente por fase, para fase B desse ser acrescido 120° e para fase C mais 120°. Observar que no ATP devem ser colocadas as correntes com o valor de pico.</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>F/n</th> <th>Amplitude</th> <th>Angle</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>300</td><td>404.7</td><td>30</td></tr> <tr><td>420</td><td>264</td><td>30</td></tr> <tr><td>660</td><td>127.13</td><td>30</td></tr> <tr><td>780</td><td>88.97</td><td>30</td></tr> <tr><td>1020</td><td>43.3</td><td>30</td></tr> <tr><td>1140</td><td>30.8</td><td>30</td></tr> <tr><td>1380</td><td>20.85</td><td>30</td></tr> <tr><td>1500</td><td>19.08</td><td>30</td></tr> <tr><td>1740</td><td>15.75</td><td>30</td></tr> <tr><td>1860</td><td>13.75</td><td>30</td></tr> <tr><td>2100</td><td>9.76</td><td>30</td></tr> <tr><td>2220</td><td>8.43</td><td>30</td></tr> </tbody> </table>	F/n	Amplitude	Angle	300	404.7	30	420	264	30	660	127.13	30	780	88.97	30	1020	43.3	30	1140	30.8	30	1380	20.85	30	1500	19.08	30	1740	15.75	30	1860	13.75	30	2100	9.76	30	2220	8.43	30
F/n	Amplitude	Angle																																							
300	404.7	30																																							
420	264	30																																							
660	127.13	30																																							
780	88.97	30																																							
1020	43.3	30																																							
1140	30.8	30																																							
1380	20.85	30																																							
1500	19.08	30																																							
1740	15.75	30																																							
1860	13.75	30																																							
2100	9.76	30																																							
2220	8.43	30																																							
Filtro	RLC3																																								

Fonte: Autor

Para todos os cenários foram simulados o sistema com os filtros desligados, com intuito de verificar a distorção modelada nas cargas. Então, foi simulado com os filtros conectados para verificar sua atuação.

As simulações tiveram duração de 1 segundo, seguindo o diagrama,

Figura 166, a chave no ponto lcgH será fechada no instante 100ms, conectando a carga não linear e a chave do filtro no instante 500ms, o conjunto de cargas regulares já estará em operação desde o instante 0 segundos. Essa sequência permite observar a condição das correntes e tensões com a carga regular, então, com a adição das cargas não lineares e, então, o resultado com a conexão do filtro.

Foram aplicadas variadas composições de banco de filtros. Tabela 5, ilustra os cenários elaborados para que seja avaliada as melhores soluções para o caso. Primeiramente, foram simulados filtros sintonizados nas ordens com maior contribuição de distorção, 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup> e 11<sup>a</sup> ordens. Em seguida, considerou-se combinações de conjuntos com potências iguais ou com potências que seguem aproximadamente a proporção de contribuição entre as ordens do espectro. Por exemplo, o cenário 7 aplica 3 conjuntos de 186,66 kVAr, sintonizados nas 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup> e 11<sup>a</sup> ordens harmônicas, conforme recomendação de [1]. Para uma alternativa, cenário 6, considerou-se 3 conjuntos dimensionamentos com potências diferentes, seguindo a proporção do espectro típico, conforme disposto na Tabela 1, sendo 285 kVAr, 185 kVAr e 90 kVAr, para as 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup> e 11<sup>a</sup> ordens harmônicas, respectivamente. A variação de “a” e “b” visa verificar se a mudança de grupo de ligação no primário dos transformadores contribui na solução, uma vez que a corrente distorcida no primário estará defasada de 30°, um em relação ao outro, conforme ilustrado na Figura 13 e Figura 15.

Na coluna “Carga Equiv.” está indicando o nível de demanda no transformador, primeiro simulando demanda de 100% da potência nominal do transformador e segundo 60%, respectivamente. Lembrando que foi considerado cargas lineares como metade da demanda e a outra metade de cargas não lineares. Ou seja, os cenários de demanda de 100% terão uma carga linear de 1250 kVA e uma carga não linear de 1250 kVA, à qual foi associada a fontes de correntes que injetaram as correntes harmônicas. Todos os cenários foram simulados com bancos de 560 kVAr, distribuídos conforme indicado na coluna “Filtro [kVAr]”.

Tabela 5: Cenários de Composição dos filtros Simulados.

Cenário	Potência Nominal		Grupo Ligação	Carga Equiv. 1&2 [kVA]	Filtro [kVAr]		
					5ª	7ª	11ª
1a	TR1	2500	Dy	1250 & 1250	560	---	---
	TR2	2500	Dy	1250 & 1250	560	---	---
1b	TR1	2500	Dy	1250 & 1250	560	---	---
	TR2	2500	<b>Yy</b>	1250 & 1250	560	---	---
2a	TR1	2500	Dy	1250 & 1250	---	560	---
	TR2	2500	<b>Yy</b>	1250 & 1250	---	560	---
2b	TR1	2500	Dy	1250 & 1250	---	560	---
	TR2	2500	<b>Yy</b>	1250 & 1250	---	560	---
3a	TR1	2500	Dy	1250 & 1250	---	---	560
	TR2	2500	Dy	1250 & 1250	---	---	560
3b	TR1	2500	Dy	1250 & 1250	---	---	560
	TR2	2500	<b>Yy</b>	1250 & 1250	---	---	560
4a	TR1	2500	Dy	1250 & 1250	280	280	---
	TR2	2500	Dy	1250 & 1250	280	280	---
4b	TR1	2500	Dy	1250 & 1250	280	280	---
	TR2	2500	<b>Yy</b>	1250 & 1250	280	280	---
5a	TR1	2500	Dy	1250 & 1250	350	210	---
	TR2	2500	Dy	1250 & 1250	350	210	---
5b	TR1	2500	Dy	1250 & 1250	350	210	---
	TR2	2500	<b>Yy</b>	1250 & 1250	350	210	---
6a	TR1	2500	Dy	1250 & 1250	285	185	90
	TR2	2500	Dy	1250 & 1250	285	185	90
6b	TR1	2500	Dy	1250 & 1250	285	185	90
	TR2	2500	<b>Yy</b>	1250 & 1250	285	185	90
7a	TR1	2500	Dy	1250 & 1250	186,6	186,6	186,6
	TR2	2500	Dy	1250 & 1250	186,6	186,6	186,6
7b	TR1	2500	Dy	1250 & 1250	186,6	186,6	186,6
	TR2	2500	<b>Yy</b>	1250 & 1250	186,6	186,6	186,6
8a	TR1	2500	Dy	750 & 750	600	---	---
	TR2	2500	Dy	750 & 750	600	---	---
8b	TR1	2500	Dy	750 & 750	600	---	---
	TR2	2500	<b>Yy</b>	750 & 750	600	---	---
9a	TR1	2500	Dy	750 & 750	300	300	---
	TR2	2500	Dy	750 & 750	300	300	---
9b	TR1	2500	Dy	750 & 750	300	300	---
	TR2	2500	<b>Yy</b>	750 & 750	300	300	---
10a	TR1	2500	Dy	750 & 750	360	240	---
	TR2	2500	Dy	750 & 750	360	240	---
10b	TR1	2500	Dy	750 & 750	360	240	---
	TR2	2500	<b>Yy</b>	750 & 750	360	240	---
11a	TR1	2500	Dy	750 & 750	300	240	60
	TR2	2500	Dy	750 & 750	300	240	60
11b	TR1	2500	Dy	750 & 750	300	240	60
	TR2	2500	<b>Yy</b>	750 & 750	300	240	60
12a	TR1	2500	Dy	750 & 750	200	200	200
	TR2	2500	Dy	750 & 750	200	200	200
12b	TR1	2500	Dy	750 & 750	200	200	200
	TR2	2500	<b>Yy</b>	750 & 750	200	200	200

Fonte: Autor.

## 6.2. Cenário 1 – Comentários gerais e validação do modelo – Filtro sintonizado em 5ª ordem – Demanda 100%

Foi simulado o caso desenvolvido como exemplo no item 0, ou seja, o filtro de 560 kVAr, sintonizado na 5ª ordem, carga de 100% da potência do transformador, 50% de carga não linear. Na prática, é muito comum que se faça correção somente de uma única ordem selecionada, geralmente aquela de maior contribuição, e assim se pretende ficar abaixo das recomendações do Std IEEE 519 [36] e normalmente essa medida resolve o problema. A primeira simulação foi com demanda de 100% da potência nominal do transformador.

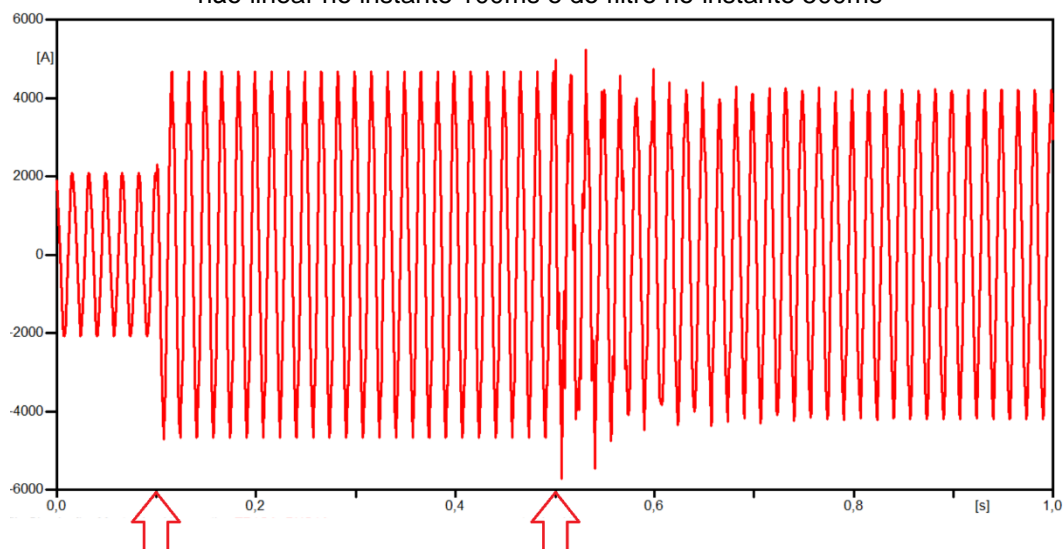
Tabela 6: Composição dos filtros Cenário 1, para modelagem no ATP.

Filtro / h [kVAr]	C [ $\mu$ F]	L [mH]	R [ $\Omega$ ]	Frequência Ressonância [Hz]
560 / 5ª	6447,2489	0,043654	0,0033	500,52 (h:8ª)

Fonte: Autor, seguindo o procedimento de 0

Observe que os bancos de capacitores devem ser dimensionados e especificados em kVAr, mas para modelagem no ATP deve-se utilizar os valores dos componentes, conforme pode ser observado na coluna “parâmetros” Tabela 4. O desenvolvimento natural do procedimento de dimensionamento disponibilizará todos os parâmetros do filtro, então se utiliza os parâmetros requeridos conforme cada software para a simulação.

Figura 17: Aspecto geral das correntes no barramento CCM1 da simulação com a entrada da carga não linear no instante 100ms e do filtro no instante 500ms

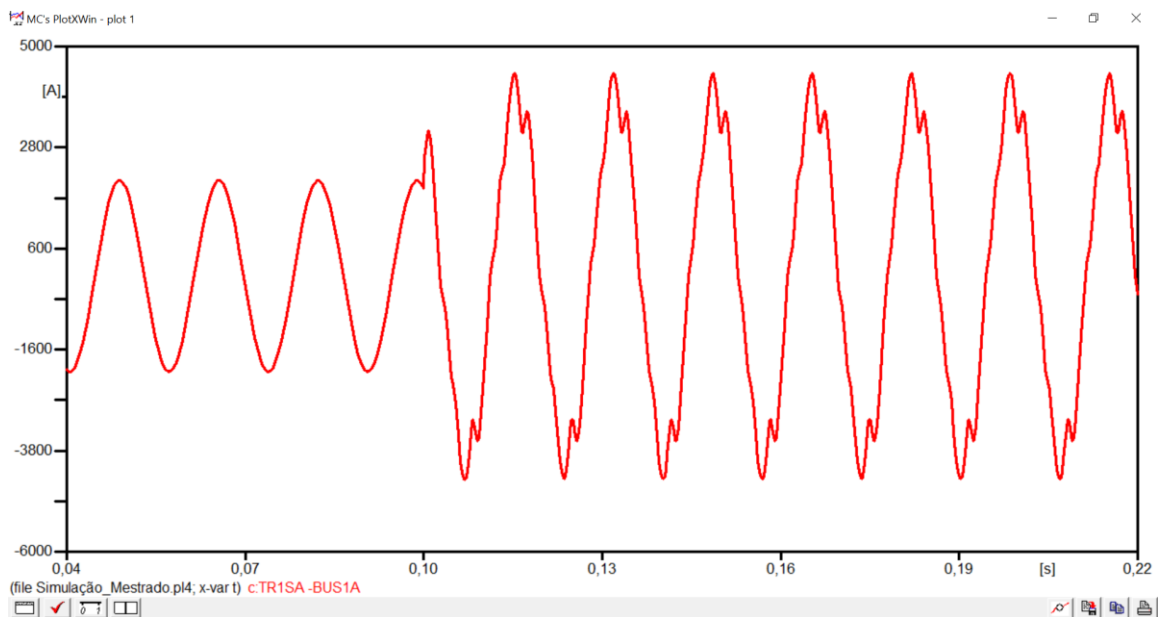


Fonte: Autor

Pode-se observar a corrente da fase A, correspondente à simulação do cenário da Figura 13a, CCM1. Nota-se a corrente sendo elevada com a entrada das cargas não lineares no instante 100ms e um transitório no instante 500ms com a conexão do filtro.

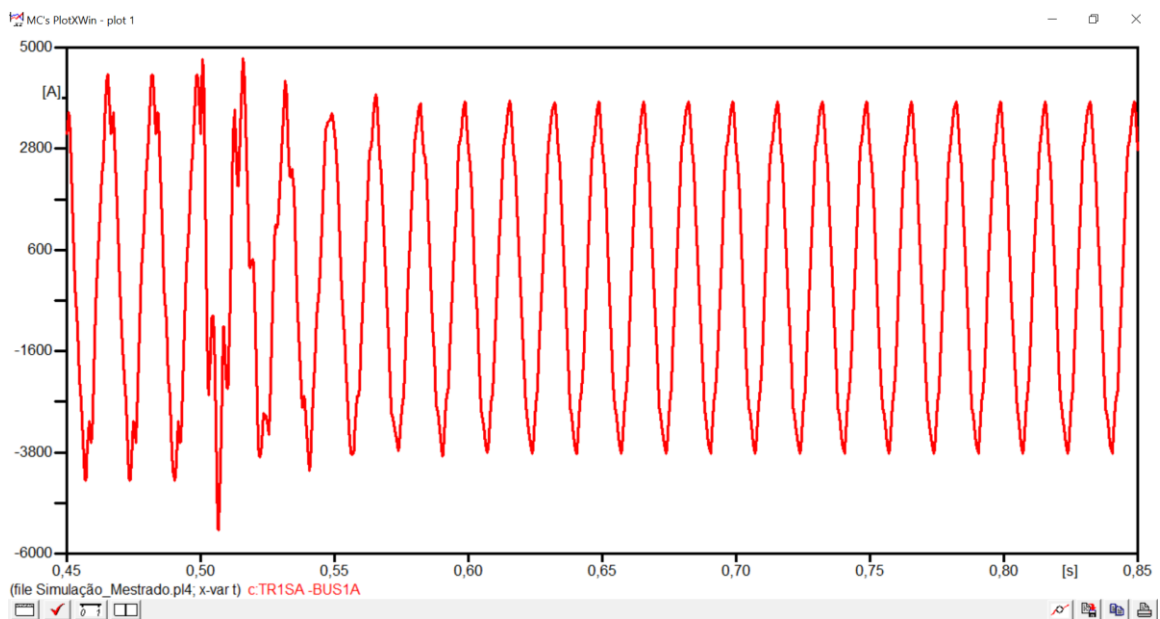
Aumentado a resolução em cada um destes instantes, verifica-se mais claramente o efeito correspondente:

Figura 18: Distorção Harmônica de corrente com a conexão das cargas não lineares em 100ms.



Fonte: Autor

Figura 19: Transitório de conexão do filtro em 500ms e aspecto geral da forma de onda corrigida.

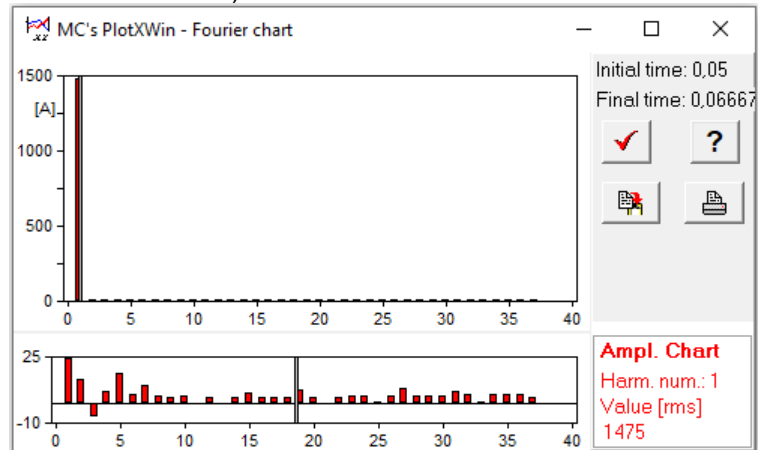


Fonte: Autor

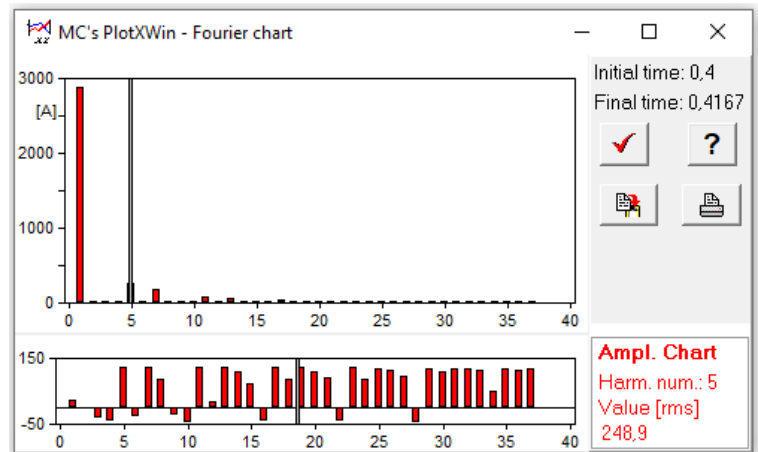
Em seguida pode-se verificar a leitura do espectro harmônico em cada trecho da simulação: antes e após os 100ms e após os 500ms com a entrada do filtro, conforme ilustrado na Figura 20.

Figura 20: Leitura dos três trechos da simulação, entre 0 e 100ms, entre 100 e 500ms e após 500ms.

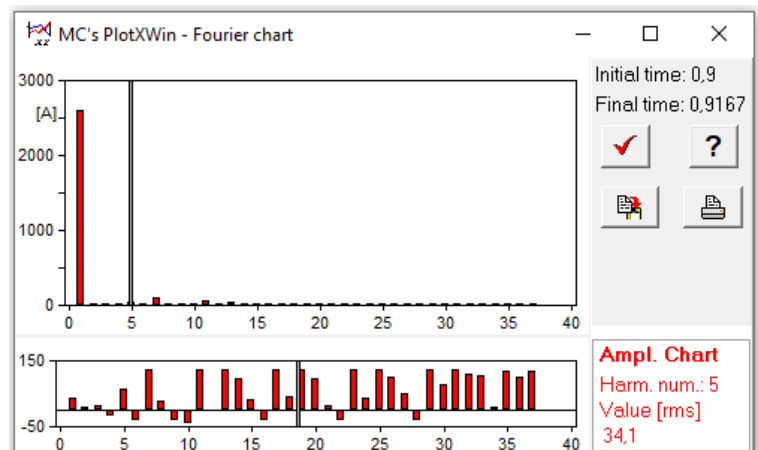
a) Instante inicial até 100ms



b) Instante entre 100 e 500ms



c) Instante após 500ms

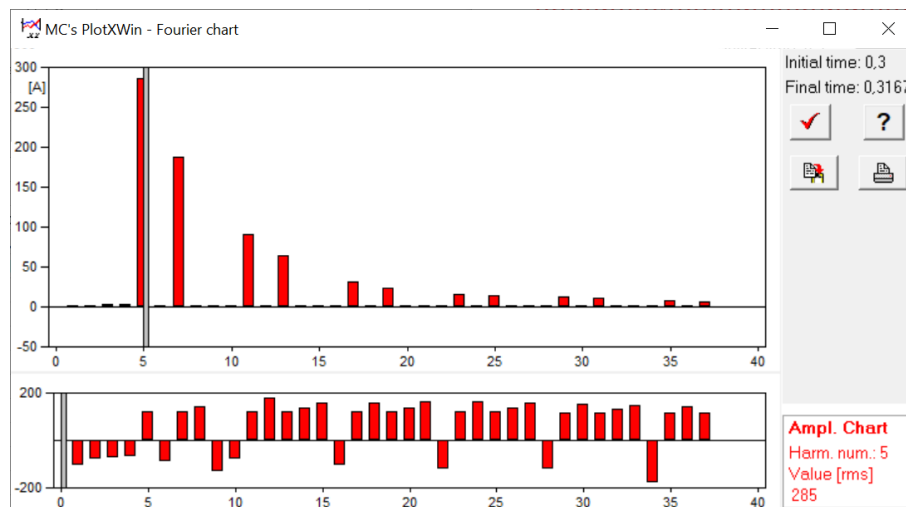


Fonte: Autor

Nas leituras da Figura 20, verifica-se que o modelo está funcionando como esperado. Nota-se que a corrente na fundamental é de 1475 A rms, muito próximo, aos 1503,5 A calculados. Essa pequena diferença se dá por conta da queda de tensão no transformador que resulta da circulação de corrente pelo transformador, uma vez que a carga foi modelada como circuito RLC (impedância fixa), de modo que a corrente fica dependente da variação de tensão. Na Figura 18 vê-se o espectro das correntes não lineares que foram adicionadas e a corrente na fundamental que já se mostra também presente. Em seguida, na Figura 20, é possível verificar os três momentos da simulação, no momento “c” a corrente de 5ª ordem está com valor abaixo daquele ilustrado no momento anterior “b”, em resultado da conexão do filtro.

Importante, também, verificar o espectro das fontes de corrente que foram utilizadas para simular as correntes harmônicas, decorrentes da carga não linear:

Figura 21: Espectro das fontes de correntes, simulando a carga não linear.

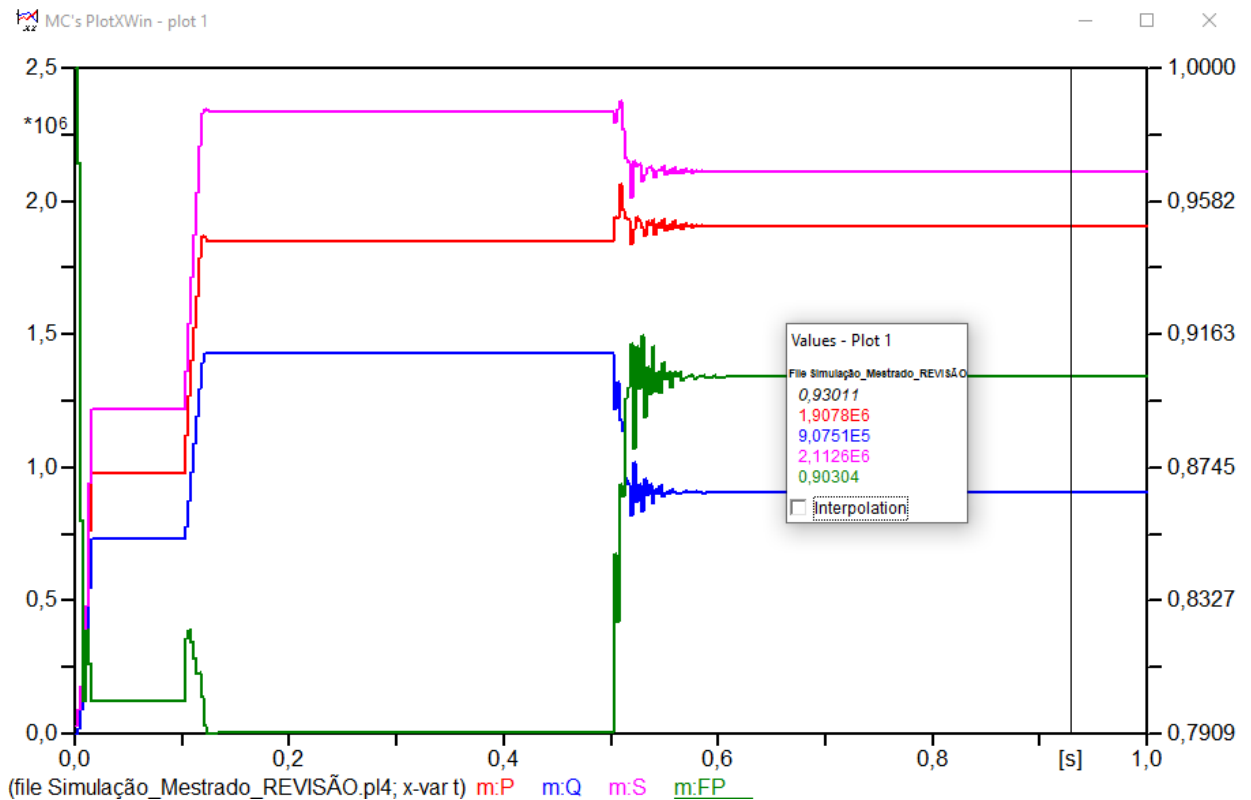


Fonte: Autor

Pode-se também verificar o comportamento do fator de potência nos três trechos da simulação, conforme Figura 22:



Figura 22: Comportamento do fator de potência nos três trechos da simulação.

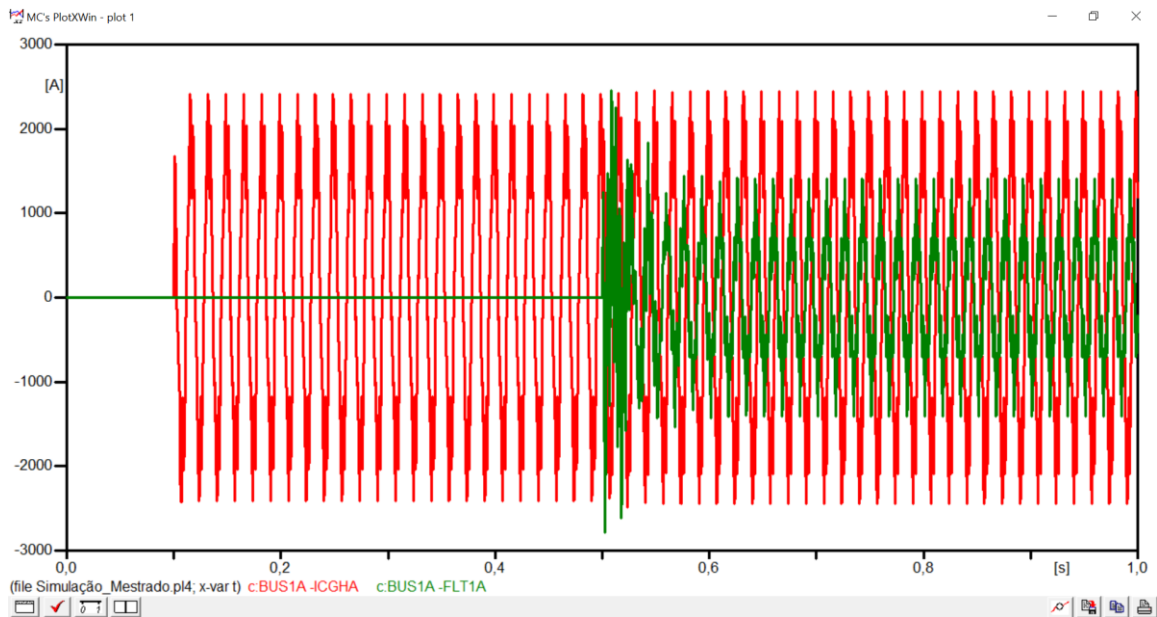


Fonte: Autor

A escala da esquerda se refere as potências P e Q da carga, e a escala da direita ao fator de potência. Observe que a escala do fator de potência inicia em 0,8 indutivo no instante até 100ms, então, pode se verificar que o circuito inicia com fator de potência em 0,82 (escala à direita do gráfico), uma vez que nesse trecho da simulação está presente somente a carga regular de 1250 kVA (2050 kW / 1430,9 kVAr) prevista. No segundo momento da simulação, até 500ms, o fator de potência atinge o valor verificado de 0,79, momento em que já sofre o efeito das distorções, conforme conceito demonstrado no item 5.3.3.2, e finalmente, no terceiro momento, após 500ms, com a conexão do filtro, o fator de potência atinge 0,90, bem próximo aos 0,92 projetados. No entanto, essa condição deve ser melhorada a partir do cenário 8.

O ATP permite ainda verificar a corrente da carga não linear e a corrente do filtro, plotando estas duas correntes no mesmo gráfico é possível observar o momento da conexão de cada um, a carga no instante 100ms e o filtro no instante 500ms:

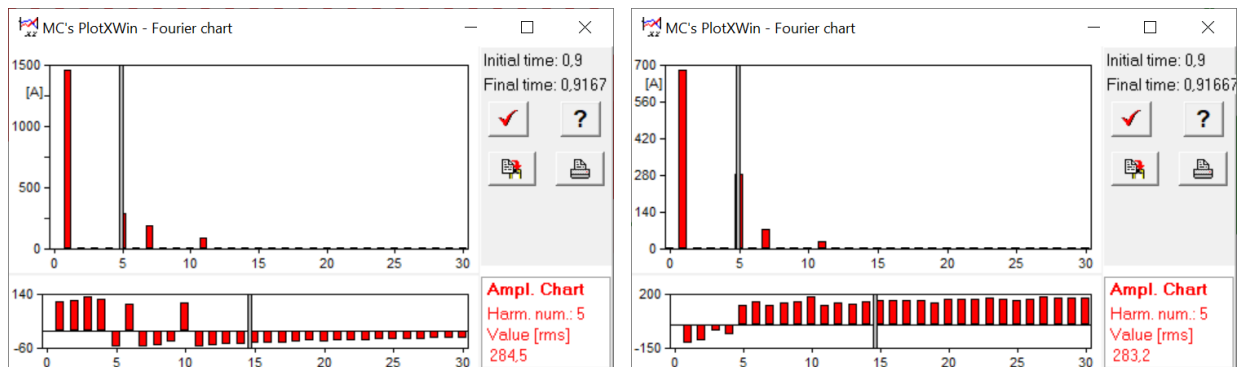
Figura 23: Corrente da fase da carga não linear e do filtro de harmônicas.



Fonte: Autor

Observando o espectro na transformada de Fourier, é possível verificar se corrente não linear está sendo injetada corretamente e se o filtro está absorvendo a mesma corrente, em ordem de grandeza.

Figura 24: Espectro das correntes da carga e do filtro de harmônicas.



Fonte: Autor

A Figura 24 evidencia que as correntes harmônicas foram sendo injetadas como previsto e que o filtro funcionou corretamente, absorvendo a corrente de 5ª ordem e parcelas das correntes de 7ª e 11ª ordem, já que ficaram menores em relação aos valores antes da conexão do filtro. Logo, o modelo operou de maneira adequada.

A eficácia da correção do fator de potência foi equivalente para todos os cenários simulados, pois foi mantida a potência reativa de 560 kVAr. Somente variou-se a

composição dos conjuntos, portanto, não é necessário repetir as comprovações até aqui demonstradas.

Por fim, tendo verificado o modelo, os resultados podem ser checados para o cenário 1, doravante, os passos a seguir foram repetidos para todos os cenários.

Retomando a atenção para o diagrama unifilar, Figura 16, devem ser verificadas as distorções nos barramentos principais no lado secundário dos transformadores, tendo em vista que nesse cenário os transformadores são iguais. basta verificar o secundário de um deles, o lado do primário é comum para ambos, e é este o resultado mais importante, pois representa o ponto de conexão com a rede, onde a qualidade de energia deve ser medida para trâmite com a concessionária local.

Os resultados apresentados na Tabela 7 mostram que a solução proposta nesse cenário atende o objetivo, a Distorção Harmônica de corrente [DHi] e a Distorção Harmônica de tensão [DHv] ficam abaixo dos limites esperados com a instalação do filtro. Na tabela 8 é possível observar que a variação na conexão dos transformadores, tendo um deles em delta no primário o outro em estrela, contribui para redução das distorções, mas somente de maneira sutil, o impacto não é significativo e não é capaz de evitar a instalação dos filtros.

Tabela 7: Resultado da Simulação para o Cenário 1, circuito Figura 13a.

h	CCM1&2				13,8 kV			
	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%
	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro
1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2	0,13%	0,11%	0,08%	0,09%	0,10%	0,08%	0,06%	0,07%
3	0,10%	0,07%	0,04%	0,06%	0,07%	0,04%	0,02%	0,02%
4	0,10%	0,05%	0,01%	0,02%	0,08%	0,03%	0,01%	0,01%
5	8,89%	1,32%	3,31%	0,42%	8,91%	1,24%	0,35%	0,05%
6	0,04%	0,06%	0,01%	0,01%	0,02%	0,04%	0,00%	0,00%
7	5,80%	3,71%	3,01%	1,71%	5,70%	3,62%	0,32%	0,18%
8	0,02%	0,02%	0,03%	0,02%	0,03%	0,01%	0,00%	0,00%
9	0,02%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
10	0,04%	0,04%	0,02%	0,01%	0,03%	0,03%	0,00%	0,00%
11	2,77%	2,10%	2,26%	1,53%	2,74%	2,07%	0,24%	0,16%
12	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
13	1,96%	1,52%	1,90%	1,31%	1,95%	1,51%	0,20%	0,14%
14	0,02%	0,02%	0,03%	0,02%	0,03%	0,02%	0,00%	0,00%
15	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
16	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
17	0,94%	0,74%	1,19%	0,84%	0,93%	0,74%	0,12%	0,09%
18	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
19	0,69%	0,55%	0,97%	0,68%	0,68%	0,54%	0,10%	0,07%
20	0,01%	0,01%	0,03%	0,02%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
21	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
22	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
23	0,46%	0,37%	0,79%	0,56%	0,46%	0,37%	0,08%	0,06%
24	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
25	0,42%	0,34%	0,79%	0,56%	0,42%	0,34%	0,08%	0,06%
26	0,01%	0,01%	0,03%	0,02%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
27	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
28	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
29	0,35%	0,28%	0,76%	0,54%	0,35%	0,28%	0,08%	0,06%
30	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
31	0,31%	0,25%	0,73%	0,52%	0,31%	0,25%	0,08%	0,05%
32	0,01%	0,01%	0,04%	0,03%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
33	0,01%	0,00%	0,02%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
34	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
35	0,20%	0,16%	0,53%	0,38%	0,20%	0,16%	0,05%	0,04%
36	0,01%	0,01%	0,02%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
37	0,18%	0,15%	0,51%	0,36%	0,19%	0,15%	0,05%	0,04%
THD	11,20%	4,80%	5,82%	3,10%	11,10%	4,70%	0,62%	0,34%

Fonte: Autor

Tabela 8: Resultado da Simulação para o Cenário 1, circuito Figura 13b.

h	CCM2				13,8kV			
	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%
	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro
1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2	0,13%	0,11%	0,08%	0,09%	0,10%	0,08%	0,06%	0,07%
3	0,10%	0,07%	0,04%	0,06%	0,06%	0,04%	0,02%	0,02%
4	0,10%	0,05%	0,01%	0,02%	0,08%	0,03%	0,01%	0,01%
5	8,89%	1,37%	3,29%	0,44%	8,49%	1,23%	0,34%	0,04%
6	0,04%	0,06%	0,01%	0,01%	0,02%	0,04%	0,00%	0,00%
7	5,80%	3,72%	2,99%	1,70%	5,53%	3,53%	0,31%	0,18%
8	0,02%	0,02%	0,03%	0,02%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
9	0,02%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
10	0,04%	0,04%	0,02%	0,01%	0,03%	0,03%	0,00%	0,00%
11	2,78%	2,11%	2,25%	1,52%	2,64%	2,00%	0,23%	0,16%
12	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
13	1,96%	1,52%	1,88%	1,30%	1,88%	1,46%	0,19%	0,13%
14	0,02%	0,02%	0,03%	0,02%	0,03%	0,02%	0,00%	0,00%
15	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
16	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
17	0,94%	0,75%	1,18%	0,83%	0,90%	0,71%	0,12%	0,09%
18	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
19	0,69%	0,55%	0,96%	0,68%	0,66%	0,52%	0,10%	0,07%
20	0,01%	0,01%	0,03%	0,02%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
21	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
22	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
23	0,46%	0,37%	0,78%	0,56%	0,44%	0,35%	0,08%	0,06%
24	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
25	0,42%	0,34%	0,78%	0,56%	0,41%	0,33%	0,08%	0,06%
26	0,01%	0,01%	0,03%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
27	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
28	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
29	0,35%	0,28%	0,75%	0,54%	0,34%	0,27%	0,08%	0,06%
30	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
31	0,32%	0,25%	0,72%	0,52%	0,30%	0,24%	0,07%	0,05%
32	0,01%	0,01%	0,04%	0,03%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
33	0,01%	0,00%	0,02%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
34	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
35	0,20%	0,16%	0,52%	0,38%	0,20%	0,16%	0,05%	0,04%
36	0,01%	0,01%	0,02%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
37	0,18%	0,15%	0,50%	0,36%	0,18%	0,14%	0,05%	0,04%
THD	11,20%	4,90%	5,80%	3,10%	10,70%	4,60%	0,60%	0,30%

Fonte: Autor

### 6.3. Cenário 2 – Filtro sintonizado em 7ª ordem – Demanda 100%

Foram repetidas as simulações do cenário 1, porém com o filtro sintonizado em 7ª ordem.

Como já dito, foi mantido o banco de capacitores, 560 kVAr, portanto somente o reator é que será redimensionado, de tal forma que o banco seja sintonizado em 7ª ordem, e consequentemente o valor de  $R$  ajustado para manter o fator de qualidade  $Q$ , igual a 25. Os seguintes componentes foram modelados no ATP:

Tabela 9: Cenário 2 - Composição dos componentes para o filtro Sintonizado em 7ª ordem.

Filtro / h [kVAr]	C [ $\mu$ F]	L [mH]	R [ $\Omega$ ]
560 / 7ª	6447,2489	0,022272	0,0024

Fonte: Autor, seguindo o procedimento de 0

As Tabela 10 e Tabela 11 apresentam os resultados do cenário 2. Esse cenário tem uma característica inusitada, a contribuição de 5ª ordem é amplificada com a instalação do filtro, tanto para distorção de corrente como para de tensão. Embora o resultado no ponto de conexão seja bom, este cenário não é recomendado como solução e será descartado.

Esse cenário evidencia o quão importante é fazer um estudo para definição do filtro, pois o resultado é contraintuitivo. Mostra que instalar um filtro sem fazer as devidas avaliações pode ser pior do que não instalar filtro.

A Figura 25 mostra que o resultado no nível de 13,8 kV é efetivamente bom, no entanto, no lado de baixa tensão, a reação do filtro no aumento da corrente de 5ª ordem torna a solução insatisfatória, causando mais malefícios do que benefícios.

Tabela 10: Resultado da Simulação para o Cenário 2, circuito Figura 13a.

h	CCM2				13,8kV			
	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%
	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro
1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2	0,13%	0,13%	0,08%	0,08%	0,10%	0,09%	0,06%	0,06%
3	0,10%	0,13%	0,04%	0,04%	0,07%	0,10%	0,02%	0,02%
4	0,10%	0,23%	0,01%	0,04%	0,08%	0,22%	0,01%	0,01%
5	8,89%	40,91%	3,31%	13,43%	8,91%	40,62%	0,36%	1,44%
6	0,04%	0,18%	0,01%	0,09%	0,02%	0,18%	0,00%	0,01%
7	5,80%	0,61%	3,01%	0,29%	5,70%	0,59%	0,32%	0,03%
8	0,02%	0,05%	0,03%	0,04%	0,03%	0,05%	0,00%	0,00%
9	0,02%	0,03%	0,01%	0,03%	0,00%	0,04%	0,00%	0,00%
10	0,04%	0,03%	0,02%	0,02%	0,03%	0,01%	0,00%	0,00%
11	2,77%	1,44%	2,26%	1,05%	2,74%	1,42%	0,24%	0,11%
12	0,01%	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,02%	0,00%	0,00%
13	1,96%	1,10%	1,90%	0,96%	1,95%	1,11%	0,20%	0,10%
14	0,02%	0,02%	0,03%	0,03%	0,03%	0,03%	0,00%	0,00%
15	0,01%	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
16	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
17	0,94%	0,57%	1,19%	0,64%	0,93%	0,57%	0,12%	0,07%
18	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
19	0,69%	0,42%	0,97%	0,53%	0,68%	0,42%	0,10%	0,06%
20	0,01%	0,01%	0,03%	0,02%	0,02%	0,02%	0,00%	0,00%
21	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
22	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
23	0,46%	0,29%	0,79%	0,44%	0,46%	0,29%	0,08%	0,05%
24	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
25	0,42%	0,27%	0,79%	0,44%	0,42%	0,27%	0,08%	0,05%
26	0,01%	0,01%	0,03%	0,02%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
27	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
28	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
29	0,35%	0,22%	0,76%	0,43%	0,35%	0,23%	0,08%	0,05%
30	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
31	0,31%	0,20%	0,73%	0,41%	0,31%	0,20%	0,08%	0,04%
32	0,01%	0,01%	0,04%	0,02%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
33	0,01%	0,01%	0,02%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
34	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
35	0,20%	0,13%	0,53%	0,30%	0,20%	0,13%	0,05%	0,03%
36	0,01%	0,01%	0,02%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
37	0,18%	0,12%	0,51%	0,29%	0,19%	0,12%	0,05%	0,03%
<b>THD</b>	<b>11,2%</b>	<b>40,9%</b>	<b>5,8%</b>	<b>13,6%</b>	<b>11,1%</b>	<b>40,6%</b>	<b>0,6%</b>	<b>1,5%</b>

Fonte: Autor

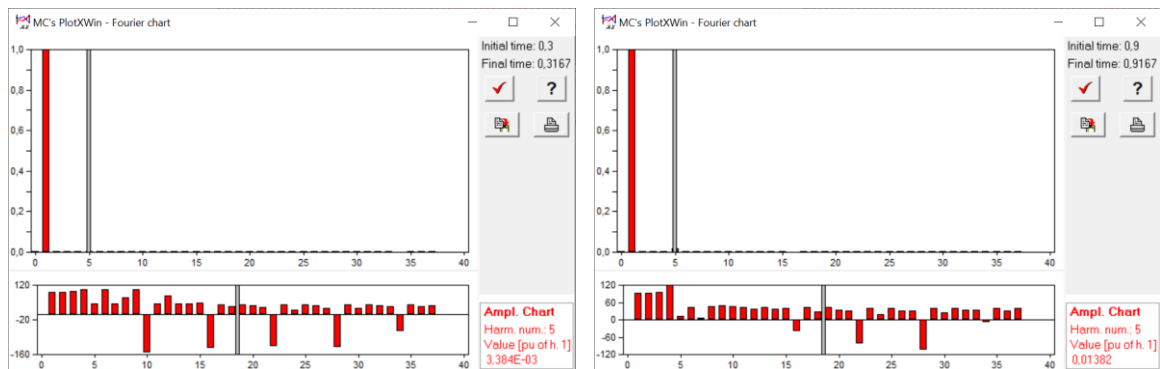
Tabela 11: Resultado da Simulação para o Cenário 2, circuito Figura 13b.

h	CCM2				13,8kV			
	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%
	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro
1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2	0,09%	0,08%	0,06%	0,07%	0,10%	0,08%	0,06%	0,07%
3	0,23%	0,28%	0,32%	0,39%	0,06%	0,10%	0,02%	0,02%
4	0,09%	0,23%	0,02%	0,06%	0,08%	0,22%	0,01%	0,01%
5	8,92%	41,62%	3,26%	13,54%	8,49%	38,96%	0,34%	1,38%
6	0,03%	0,18%	0,01%	0,07%	0,02%	0,17%	0,00%	0,01%
7	5,81%	0,59%	3,00%	0,28%	5,53%	0,57%	0,31%	0,03%
8	0,02%	0,05%	0,01%	0,02%	0,02%	0,04%	0,00%	0,00%
9	0,00%	0,03%	0,04%	0,01%	0,00%	0,02%	0,00%	0,00%
10	0,04%	0,02%	0,02%	0,01%	0,03%	0,01%	0,00%	0,00%
11	2,78%	1,45%	2,24%	1,04%	2,64%	1,37%	0,23%	0,11%
12	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
13	1,96%	1,11%	1,89%	0,95%	1,88%	1,07%	0,19%	0,10%
14	0,03%	0,02%	0,03%	0,02%	0,03%	0,02%	0,00%	0,00%
15	0,01%	0,01%	0,05%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
16	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
17	0,94%	0,57%	1,18%	0,64%	0,90%	0,55%	0,12%	0,07%
18	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
19	0,69%	0,42%	0,97%	0,53%	0,66%	0,41%	0,10%	0,05%
20	0,02%	0,01%	0,02%	0,02%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
21	0,01%	0,01%	0,06%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
22	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
23	0,46%	0,29%	0,78%	0,44%	0,44%	0,28%	0,08%	0,05%
24	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
25	0,42%	0,27%	0,78%	0,44%	0,41%	0,26%	0,08%	0,05%
26	0,01%	0,01%	0,02%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
27	0,01%	0,01%	0,07%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
28	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
29	0,35%	0,23%	0,75%	0,43%	0,34%	0,22%	0,08%	0,04%
30	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
31	0,32%	0,20%	0,72%	0,41%	0,30%	0,19%	0,07%	0,04%
32	0,02%	0,01%	0,03%	0,02%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
33	0,01%	0,01%	0,03%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
34	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
35	0,20%	0,13%	0,52%	0,30%	0,20%	0,13%	0,05%	0,03%
36	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
37	0,19%	0,12%	0,50%	0,29%	0,18%	0,12%	0,05%	0,03%
<b>THD</b>	<b>11,2%</b>	<b>41,7%</b>	<b>5,8%</b>	<b>13,7%</b>	<b>10,7%</b>	<b>39,0%</b>	<b>0,6%</b>	<b>1,4%</b>

Fonte: Autor



Figura 25: Cenário 2 – Espectro de tensão, 13,8kV, antes e depois da conexão do filtro.



Fonte: Autor

#### 6.4. Cenário 3 – Filtro sintonizado em 11ª ordem – Demanda 100%

Foram repetidas as simulações do cenário 1, porém com o filtro sintonizado em 11ª ordem.

Tabela 12: Cenário 3 - Composição dos componentes para o filtro Sintonizado em 11ª ordem.

Filtro / h [kVAr]	C [ $\mu$ F]	L [mH]	R [ $\Omega$ ]
560 / 11 <sup>a</sup>	6447,2489	0,009019	0,0015

Fonte: Autor, seguindo o procedimento de 0

As Tabela 13 e Tabela 14 apresentam os resultados do cenário 3. Esse cenário tem uma característica análoga ao cenário 2, a contribuição de 5ª e 7ª ordens foram amplificadas com a instalação do filtro, tanto para distorção de corrente como para de tensão. Embora o resultado no ponto de conexão seja bom, esse cenário não é recomendado como solução e foi descartado, da mesma forma como no cenário anterior.

Tabela 13: Resultado da Simulação para o Cenário 3, circuito Figura 13a.

h	CCM1&2				13,8kV			
	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%
	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro
1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2	0,13%	0,11%	0,08%	0,10%	0,10%	0,07%	0,06%	0,07%
3	0,10%	0,07%	0,04%	0,06%	0,06%	0,03%	0,02%	0,03%
4	0,10%	0,08%	0,01%	0,02%	0,08%	0,07%	0,01%	0,01%
5	8,89%	18,93%	3,29%	6,21%	8,59%	18,36%	0,34%	0,66%
6	0,04%	0,18%	0,01%	0,10%	0,02%	0,19%	0,00%	0,01%
7	5,80%	18,09%	2,99%	8,23%	5,51%	17,78%	0,30%	0,88%
8	0,02%	0,13%	0,03%	0,04%	0,02%	0,12%	0,00%	0,00%
9	0,02%	0,08%	0,01%	0,02%	0,00%	0,06%	0,00%	0,00%
10	0,04%	0,05%	0,02%	0,01%	0,03%	0,04%	0,00%	0,00%
11	2,78%	0,17%	2,25%	0,13%	2,64%	0,16%	0,23%	0,01%
12	0,01%	0,04%	0,01%	0,01%	0,00%	0,03%	0,00%	0,00%
13	1,96%	0,36%	1,88%	0,33%	1,88%	0,35%	0,19%	0,03%
14	0,02%	0,03%	0,03%	0,01%	0,03%	0,02%	0,00%	0,00%
15	0,01%	0,03%	0,01%	0,01%	0,01%	0,02%	0,00%	0,00%
16	0,01%	0,03%	0,01%	0,01%	0,01%	0,02%	0,00%	0,00%
17	0,94%	0,28%	1,18%	0,32%	0,90%	0,26%	0,12%	0,03%
18	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
19	0,69%	0,22%	0,96%	0,28%	0,65%	0,20%	0,10%	0,03%
20	0,01%	0,02%	0,03%	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
21	0,00%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
22	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
23	0,46%	0,16%	0,78%	0,25%	0,44%	0,15%	0,08%	0,03%
24	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
25	0,42%	0,15%	0,78%	0,26%	0,41%	0,15%	0,08%	0,03%
26	0,01%	0,01%	0,03%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
27	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
28	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
29	0,35%	0,13%	0,75%	0,26%	0,34%	0,12%	0,08%	0,03%
30	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
31	0,32%	0,12%	0,72%	0,25%	0,30%	0,11%	0,07%	0,03%
32	0,01%	0,01%	0,04%	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
33	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
34	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
35	0,20%	0,08%	0,52%	0,18%	0,20%	0,07%	0,05%	0,02%
36	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
37	0,18%	0,07%	0,50%	0,18%	0,18%	0,07%	0,05%	0,02%
<b>THD</b>	<b>11,2%</b>	<b>26,2%</b>	<b>5,8%</b>	<b>10,3%</b>	<b>10,8%</b>	<b>25,6%</b>	<b>0,6%</b>	<b>1,1%</b>

Fonte: Autor

Tabela 14: Resultado da Simulação para o Cenário 3, circuito Figura 13b.

h	CCM1&2				13,8kV			
	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%
	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro
1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2	0,04%	0,04%	0,03%	0,04%	0,04%	0,03%	0,03%	0,03%
3	0,19%	0,22%	0,33%	0,51%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%
4	0,03%	0,01%	0,01%	0,01%	0,03%	0,02%	0,00%	0,01%
5	8,97%	18,90%	3,22%	6,05%	7,63%	16,28%	0,30%	0,58%
6	0,01%	0,10%	0,00%	0,04%	0,01%	0,07%	0,00%	0,01%
7	5,83%	23,79%	2,95%	10,38%	4,96%	15,96%	0,27%	0,79%
8	0,01%	0,06%	0,01%	0,03%	0,01%	0,04%	0,00%	0,00%
9	0,00%	0,01%	0,04%	0,01%	0,00%	0,02%	0,00%	0,00%
10	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,02%	0,00%	0,00%
11	2,80%	0,18%	2,20%	0,12%	2,37%	0,15%	0,21%	0,01%
12	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
13	1,96%	0,38%	1,85%	0,32%	1,68%	0,33%	0,17%	0,03%
14	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
15	0,00%	0,00%	0,05%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
16	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
17	0,95%	0,29%	1,16%	0,31%	0,81%	0,24%	0,11%	0,03%
18	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
19	0,69%	0,23%	0,94%	0,28%	0,58%	0,19%	0,09%	0,03%
20	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
21	0,00%	0,00%	0,06%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
22	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
23	0,46%	0,17%	0,77%	0,25%	0,40%	0,14%	0,07%	0,02%
24	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
25	0,42%	0,16%	0,76%	0,25%	0,36%	0,13%	0,07%	0,02%
26	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
27	0,01%	0,00%	0,07%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
28	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
29	0,35%	0,14%	0,74%	0,25%	0,30%	0,11%	0,07%	0,02%
30	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
31	0,31%	0,12%	0,69%	0,24%	0,27%	0,10%	0,06%	0,02%
32	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
33	0,01%	0,00%	0,04%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
34	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
35	0,20%	0,08%	0,51%	0,18%	0,17%	0,07%	0,05%	0,02%
36	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
37	0,18%	0,07%	0,48%	0,17%	0,15%	0,06%	0,04%	0,02%
<b>THD</b>	<b>11,3%</b>	<b>30,3%</b>	<b>5,7%</b>	<b>12,0%</b>	<b>9,3%</b>	<b>22,8%</b>	<b>0,5%</b>	<b>1,0%</b>

Fonte: Autor

### 6.5. Cenário 4 – Filtro sintonizado em 5ª e 7ª ordens – 2 x 280 kVAr – Demanda 100%

Foram repetidas as simulações do cenário 1, porém com dois filtros de potências iguais, sintonizados em 5ª e 7ª ordens.

Tabela 15: Cenário 4 - Composição dos componentes para o filtro Sintonizado em 5ª e 7 ordens.

Filtro / h [kVAr]	C [ $\mu$ F]	L [mH]	R [ $\Omega$ ]
280 / 5ª	3223,6244	0,087308	0,0066
280 / 7ª	3223,6244	0,044545	0,0047

Fonte: Autor, seguindo o procedimento de 0

As Tabela 16 e Tabela 17 apresentam os resultados do cenário 5. Esse cenário tem resultados muito bons, representando um avanço em relação ao cenário 1, que já havia chegado num resultado suficientemente bom. Nesse cenário, entretanto, o resultado foi ainda melhor. Esse resultado sugere que dividir o banco em duas partes iguais, com sintonias diferentes nas ordens de maior contribuição foi mais eficiente do que mitigar somente a ordem de maior contribuição. Este cenário é recomendável como solução a ser aplicada.

Além da vantagem em relação ao resultado, também se possibilita a automatização do filtro para que cada parte seja acionada em momentos diferentes, através de um controlador de demanda. À medida que as cargas forem sendo acionadas, o primeiro estágio entra em determinado nível de demanda e o segundo entra quando a demanda atingir o nível estipulado. Essa medida permite um controle maior do fator de potência e evita que o sistema fique capacitivo em níveis baixos de demanda. Nesta configuração se teria vários filtros de potências menores sendo acionados escalonadamente, esta possibilidade deve ser avaliada no caso pretendido, aqui estamos somente fazendo alusão a esta possibilidade.

Tabela 16: Resultado da Simulação para o Cenário 4, circuito Figura 13a.

h	CCM1&2				13,8kV			
	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%
	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro
1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2	0,05%	0,04%	0,03%	0,04%	0,04%	0,03%	0,03%	0,03%
3	0,04%	0,03%	0,03%	0,03%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%
4	0,04%	0,02%	0,00%	0,01%	0,03%	0,01%	0,00%	0,01%
5	8,93%	2,21%	3,29%	0,70%	8,62%	2,02%	0,34%	0,07%
6	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
7	5,81%	0,81%	2,98%	0,37%	5,51%	0,77%	0,30%	0,04%
8	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
9	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
10	0,02%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
11	2,79%	1,71%	2,25%	1,22%	2,65%	1,61%	0,23%	0,13%
12	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
13	1,96%	1,27%	1,87%	1,08%	1,88%	1,22%	0,19%	0,11%
14	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
15	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
16	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
17	0,94%	0,64%	1,18%	0,72%	0,90%	0,61%	0,12%	0,07%
18	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
19	0,68%	0,47%	0,95%	0,58%	0,65%	0,44%	0,10%	0,06%
20	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
21	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
22	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
23	0,46%	0,32%	0,78%	0,49%	0,44%	0,31%	0,08%	0,05%
24	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
25	0,42%	0,29%	0,77%	0,48%	0,40%	0,28%	0,08%	0,05%
26	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
27	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
28	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
29	0,35%	0,25%	0,75%	0,47%	0,33%	0,24%	0,08%	0,05%
30	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
31	0,31%	0,22%	0,71%	0,45%	0,30%	0,21%	0,07%	0,05%
32	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
33	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
34	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
35	0,20%	0,14%	0,51%	0,33%	0,19%	0,14%	0,05%	0,03%
36	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
37	0,18%	0,13%	0,49%	0,31%	0,17%	0,12%	0,05%	0,03%
<b>THD</b>	<b>11,3%</b>	<b>3,3%</b>	<b>5,7%</b>	<b>2,3%</b>	<b>10,8%</b>	<b>3,1%</b>	<b>0,5%</b>	<b>0,2%</b>

Fonte: Autor

Tabela 17: Resultado da Simulação para o Cenário 4, circuito Figura 13b.

h	CCM1&2				13,8kV			
	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%
	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro
1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2	0,04%	0,03%	0,03%	0,03%	0,04%	0,03%	0,03%	0,03%
3	0,19%	0,22%	0,33%	0,33%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%
4	0,03%	0,01%	0,01%	0,00%	0,03%	0,01%	0,00%	0,01%
5	8,97%	2,14%	3,22%	0,70%	7,63%	1,81%	0,30%	0,06%
6	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
7	5,83%	0,85%	2,95%	0,37%	4,96%	0,69%	0,27%	0,03%
8	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
9	0,00%	0,01%	0,04%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
10	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
11	2,80%	1,73%	2,20%	1,21%	2,37%	1,44%	0,21%	0,11%
12	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
13	1,96%	1,29%	1,85%	1,07%	1,68%	1,09%	0,17%	0,10%
14	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
15	0,00%	0,00%	0,05%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
16	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
17	0,95%	0,65%	1,16%	0,71%	0,81%	0,55%	0,11%	0,07%
18	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
19	0,69%	0,48%	0,94%	0,58%	0,58%	0,40%	0,09%	0,05%
20	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
21	0,00%	0,00%	0,06%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
22	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
23	0,46%	0,33%	0,77%	0,48%	0,40%	0,28%	0,07%	0,05%
24	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
25	0,42%	0,30%	0,76%	0,48%	0,36%	0,25%	0,07%	0,05%
26	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
27	0,01%	0,00%	0,07%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
28	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
29	0,35%	0,25%	0,74%	0,47%	0,30%	0,21%	0,07%	0,04%
30	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
31	0,31%	0,22%	0,69%	0,44%	0,27%	0,19%	0,06%	0,04%
32	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
33	0,01%	0,00%	0,04%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
34	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
35	0,20%	0,14%	0,51%	0,32%	0,17%	0,12%	0,05%	0,03%
36	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
37	0,18%	0,13%	0,48%	0,31%	0,15%	0,11%	0,04%	0,03%
<b>THD</b>	<b>11,3%</b>	<b>3,3%</b>	<b>5,7%</b>	<b>2,3%</b>	<b>9,6%</b>	<b>2,8%</b>	<b>0,5%</b>	<b>0,2%</b>

Fonte: Autor

### 6.6. Cenário 5 – Filtro sintonizado em 5ª e 7ª ordens – 350 kVAr e 210 kVAr – Demanda 100%

Foram repetidas as simulações do cenário 1, porém com dois filtros com potências proporcionais em relação as contribuições, sintonizados em 5ª e 7ª ordens.

Tabela 18: Cenário 5 - Composição dos componentes para o filtro Sintonizado em 5ª e 7 ordens.

Filtro / h [kVAr]	C [ $\mu$ F]	L [mH]	R [ $\Omega$ ]
350 / 5ª	4029.5305	0.069846	0.0053
210 / 7ª	2417.7183	0.059393	0.0063

Fonte: Autor, seguindo o procedimento de 0

As Tabela 19 e 20 apresentam os resultados do cenário 5. Esse cenário tem resultados muito bons, representa um avanço em relação ao cenário 1, assim como o cenário 4. Esse resultado sugere que dividir o banco em duas partes iguais é melhor do que dividir tentando parametrizar a proporção de contribuição das duas ordens maiores.

Entre o cenário 4 e 5, o cenário 4 se apresenta como solução ligeiramente melhor, porém praticamente equivalente, pois a diferença é muito pequena, como pode ser verificado comparando as respectivas tabelas de resultados.

Tabela 19: Resultado da Simulação para o Cenário 5, circuito Figura 13a.

h	CCM1&2				13,8kV			
	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%
	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro
1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2	0,60%	0,51%	0,37%	0,41%	0,43%	0,34%	0,30%	0,30%
3	0,43%	0,28%	0,15%	0,21%	0,31%	0,16%	0,11%	0,11%
4	0,48%	0,19%	0,03%	0,12%	0,40%	0,11%	0,05%	0,06%
5	8,68%	1,91%	3,33%	0,63%	8,43%	1,69%	0,36%	0,06%
6	0,17%	0,16%	0,04%	0,06%	0,12%	0,09%	0,02%	0,02%
7	5,74%	1,05%	3,04%	0,50%	5,48%	0,96%	0,31%	0,04%
8	0,09%	0,14%	0,12%	0,04%	0,09%	0,09%	0,02%	0,01%
9	0,07%	0,15%	0,03%	0,02%	0,03%	0,11%	0,01%	0,01%
10	0,18%	0,19%	0,07%	0,05%	0,15%	0,16%	0,01%	0,01%
11	2,71%	1,70%	2,25%	1,28%	2,59%	1,61%	0,23%	0,13%
12	0,03%	0,08%	0,04%	0,02%	0,01%	0,05%	0,00%	0,00%
13	1,97%	1,31%	1,94%	1,17%	1,90%	1,26%	0,20%	0,12%
14	0,10%	0,06%	0,15%	0,09%	0,11%	0,05%	0,01%	0,01%
15	0,03%	0,05%	0,06%	0,03%	0,03%	0,02%	0,00%	0,00%
16	0,06%	0,08%	0,03%	0,02%	0,05%	0,06%	0,01%	0,00%
17	0,93%	0,64%	1,20%	0,75%	0,89%	0,61%	0,12%	0,08%
18	0,02%	0,04%	0,05%	0,03%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
19	0,70%	0,49%	1,02%	0,64%	0,68%	0,46%	0,10%	0,06%
20	0,06%	0,05%	0,12%	0,08%	0,07%	0,03%	0,01%	0,01%
21	0,02%	0,03%	0,05%	0,03%	0,03%	0,01%	0,00%	0,00%
22	0,04%	0,04%	0,03%	0,02%	0,03%	0,03%	0,01%	0,00%
23	0,45%	0,32%	0,79%	0,51%	0,44%	0,31%	0,08%	0,05%
24	0,01%	0,03%	0,03%	0,02%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
25	0,44%	0,31%	0,83%	0,53%	0,42%	0,30%	0,08%	0,05%
26	0,05%	0,04%	0,12%	0,08%	0,06%	0,03%	0,01%	0,01%
27	0,02%	0,02%	0,05%	0,03%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
28	0,03%	0,03%	0,05%	0,03%	0,03%	0,03%	0,01%	0,00%
29	0,35%	0,25%	0,76%	0,49%	0,33%	0,24%	0,08%	0,05%
30	0,01%	0,02%	0,05%	0,03%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
31	0,33%	0,24%	0,78%	0,51%	0,32%	0,23%	0,08%	0,05%
32	0,06%	0,05%	0,16%	0,10%	0,06%	0,04%	0,01%	0,01%
33	0,03%	0,03%	0,09%	0,06%	0,03%	0,02%	0,01%	0,00%
34	0,00%	0,02%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
35	0,21%	0,15%	0,56%	0,36%	0,20%	0,14%	0,06%	0,04%
36	0,02%	0,02%	0,08%	0,05%	0,03%	0,01%	0,01%	0,00%
37	0,21%	0,15%	0,59%	0,38%	0,20%	0,14%	0,06%	0,04%
<b>THD</b>	<b>11,1%</b>	<b>3,3%</b>	<b>5,9%</b>	<b>2,5%</b>	<b>10,6%</b>	<b>3,0%</b>	<b>0,7%</b>	<b>0,4%</b>

Fonte: Autor



Tabela 20: Resultado da Simulação para o Cenário 5, circuito Figura 13b.

h	CCM2				13,8kV			
	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%
	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro
1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2	0,09%	0,08%	0,07%	0,08%	0,09%	0,08%	0,07%	0,07%
3	0,22%	0,24%	0,34%	0,30%	0,06%	0,03%	0,02%	0,02%
4	0,08%	0,02%	0,03%	0,02%	0,08%	0,02%	0,01%	0,01%
5	8,95%	1,79%	3,21%	0,57%	7,61%	1,52%	0,30%	0,05%
6	0,03%	0,02%	0,01%	0,01%	0,02%	0,02%	0,00%	0,01%
7	5,83%	1,07%	2,95%	0,46%	4,96%	0,86%	0,27%	0,04%
8	0,03%	0,02%	0,02%	0,01%	0,02%	0,02%	0,00%	0,00%
9	0,01%	0,02%	0,04%	0,01%	0,01%	0,02%	0,00%	0,00%
10	0,04%	0,03%	0,02%	0,02%	0,03%	0,03%	0,00%	0,00%
11	2,79%	1,81%	2,20%	1,26%	2,37%	1,51%	0,21%	0,12%
12	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
13	1,97%	1,34%	1,85%	1,11%	1,68%	1,14%	0,17%	0,11%
14	0,03%	0,02%	0,03%	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
15	0,01%	0,00%	0,05%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
16	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
17	0,95%	0,67%	1,16%	0,73%	0,81%	0,57%	0,11%	0,07%
18	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
19	0,69%	0,50%	0,95%	0,60%	0,59%	0,42%	0,09%	0,06%
20	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
21	0,01%	0,00%	0,06%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
22	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
23	0,46%	0,34%	0,77%	0,49%	0,40%	0,28%	0,07%	0,05%
24	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
25	0,43%	0,31%	0,77%	0,50%	0,36%	0,26%	0,07%	0,05%
26	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
27	0,01%	0,01%	0,06%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
28	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
29	0,35%	0,26%	0,74%	0,48%	0,30%	0,22%	0,07%	0,05%
30	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
31	0,32%	0,23%	0,70%	0,46%	0,27%	0,20%	0,07%	0,04%
32	0,02%	0,01%	0,03%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
33	0,01%	0,01%	0,03%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
34	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
35	0,20%	0,15%	0,51%	0,33%	0,17%	0,13%	0,05%	0,03%
36	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
37	0,19%	0,14%	0,49%	0,32%	0,16%	0,12%	0,05%	0,03%
<b>THD</b>	<b>11,3%</b>	<b>3,2%</b>	<b>5,7%</b>	<b>2,3%</b>	<b>9,6%</b>	<b>2,7%</b>	<b>0,5%</b>	<b>0,2%</b>

Fonte: Autor

### 6.7. Cenário 6 – Filtro sintonizado em 5ª, 7ª e 11ª ordens – 285 kVAr, 185 kVAr e 90 kVAr – Demanda 100%

Foram repetidas as simulações do cenário 1, porém com três filtros com potências proporcionais em relação as contribuições, sintonizados em 5ª, 7ª e 11ª ordens.

Tabela 21: Cenário 6 - Composição dos componentes para o filtro Sintonizado em 5ª, 7ª e 11ª ordens.

Filtro / h [kVAr]	C [ $\mu$ F]	L [mH]	R [ $\Omega$ ]
285 / 5ª	3281,1891	0,085776	0,0065
185 / 7ª	2129,8947	0,067419	0,0071
90 / 11ª	1036,1650	0,056121	0,0093

Fonte: Autor, seguindo o procedimento de 0

As Tabela 22 e Tabela 23 apresentam os resultados do cenário 6. Esse cenário tem resultados muito bons, representa um avanço em relação ao cenário 1 e 4, que já haviam chegado em resultados muito bons. Nesse cenário, entretanto, o resultado é ainda melhor. Esse resultado sugere que dividir o banco em três partes com sintonias diferentes nas ordens de maior contribuição, e atribuindo potências seguindo a proporção de contribuição do espectro, é mais eficiente.

Esse cenário é recomendável como solução a ser aplicada.

Esse cenário mantém a possibilidade de automatização do filtro para que entre em estágios escalonados, através de um controlador de demanda. Essa medida permite um controle maior do fator de potência e evita que o sistema fique capacitivo em níveis baixos de demanda.

Tabela 22: Resultado da Simulação para o Cenário 6, circuito Figura 13a.

h	CCM1&2				13,8kV			
	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%
	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro
1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2	0,13%	0,11%	0,08%	0,09%	0,04%	0,03%	0,03%	0,03%
3	0,10%	0,07%	0,04%	0,06%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%
4	0,10%	0,04%	0,01%	0,03%	0,03%	0,01%	0,00%	0,01%
5	8,89%	2,19%	3,29%	0,70%	8,62%	2,00%	0,34%	0,07%
6	0,04%	0,03%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
7	5,80%	1,11%	2,99%	0,51%	5,51%	1,04%	0,30%	0,05%
8	0,02%	0,03%	0,03%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
9	0,02%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
10	0,04%	0,02%	0,02%	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
11	2,78%	0,48%	2,25%	0,35%	2,65%	0,45%	0,23%	0,04%
12	0,01%	0,03%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
13	1,96%	0,88%	1,88%	0,76%	1,88%	0,85%	0,19%	0,08%
14	0,02%	0,01%	0,03%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
15	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
16	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
17	0,94%	0,53%	1,18%	0,60%	0,90%	0,51%	0,12%	0,06%
18	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
19	0,69%	0,40%	0,96%	0,50%	0,65%	0,38%	0,10%	0,05%
20	0,01%	0,01%	0,03%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
21	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
22	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
23	0,46%	0,28%	0,78%	0,43%	0,44%	0,27%	0,08%	0,04%
24	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
25	0,42%	0,26%	0,78%	0,43%	0,40%	0,25%	0,08%	0,04%
26	0,01%	0,01%	0,03%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
27	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
28	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
29	0,35%	0,22%	0,75%	0,42%	0,33%	0,21%	0,08%	0,04%
30	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
31	0,32%	0,20%	0,72%	0,40%	0,30%	0,19%	0,07%	0,04%
32	0,01%	0,01%	0,04%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
33	0,01%	0,00%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
34	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
35	0,20%	0,13%	0,52%	0,30%	0,19%	0,12%	0,05%	0,03%
36	0,01%	0,00%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
37	0,18%	0,12%	0,50%	0,29%	0,17%	0,11%	0,05%	0,03%
<b>THD</b>	<b>11,2%</b>	<b>2,8%</b>	<b>5,8%</b>	<b>1,7%</b>	<b>10,8%</b>	<b>2,6%</b>	<b>0,6%</b>	<b>0,2%</b>

Fonte: Autor

Tabela 23: Resultado da Simulação para o Cenário 6, circuito Figura 13b.

h	CCM2				13,8kV			
	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%
	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro
1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2	0,09%	0,08%	0,07%	0,08%	0,09%	0,08%	0,07%	0,07%
3	0,22%	0,24%	0,34%	0,32%	0,06%	0,03%	0,02%	0,02%
4	0,08%	0,02%	0,03%	0,02%	0,08%	0,02%	0,01%	0,01%
5	8,95%	2,13%	3,21%	0,68%	7,61%	1,80%	0,30%	0,06%
6	0,03%	0,02%	0,01%	0,01%	0,02%	0,02%	0,00%	0,01%
7	5,83%	1,16%	2,95%	0,50%	4,96%	0,94%	0,27%	0,04%
8	0,03%	0,02%	0,02%	0,00%	0,02%	0,02%	0,00%	0,00%
9	0,01%	0,01%	0,04%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
10	0,04%	0,01%	0,02%	0,01%	0,03%	0,01%	0,00%	0,00%
11	2,79%	0,50%	2,20%	0,34%	2,37%	0,41%	0,21%	0,03%
12	0,01%	0,02%	0,00%	0,01%	0,00%	0,02%	0,00%	0,00%
13	1,97%	0,90%	1,85%	0,74%	1,68%	0,76%	0,17%	0,07%
14	0,03%	0,01%	0,03%	0,00%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
15	0,01%	0,00%	0,05%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
16	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
17	0,95%	0,54%	1,16%	0,59%	0,81%	0,45%	0,11%	0,06%
18	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
19	0,69%	0,41%	0,95%	0,50%	0,59%	0,34%	0,09%	0,05%
20	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
21	0,01%	0,00%	0,06%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
22	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
23	0,46%	0,29%	0,77%	0,42%	0,40%	0,24%	0,07%	0,04%
24	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
25	0,43%	0,27%	0,77%	0,42%	0,36%	0,22%	0,07%	0,04%
26	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
27	0,01%	0,00%	0,06%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
28	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
29	0,35%	0,22%	0,74%	0,41%	0,30%	0,19%	0,07%	0,04%
30	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
31	0,32%	0,20%	0,70%	0,40%	0,27%	0,17%	0,07%	0,04%
32	0,02%	0,01%	0,03%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
33	0,01%	0,01%	0,03%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
34	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
35	0,20%	0,13%	0,51%	0,29%	0,17%	0,11%	0,05%	0,03%
36	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
37	0,19%	0,12%	0,49%	0,28%	0,16%	0,10%	0,05%	0,03%
<b>THD</b>	<b>11,3%</b>	<b>2,8%</b>	<b>5,7%</b>	<b>1,7%</b>	<b>9,6%</b>	<b>2,3%</b>	<b>0,5%</b>	<b>0,2%</b>

Fonte: Autor

### 6.8. Cenário 7 – Filtro sintonizado em 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup> e 11<sup>a</sup> ordens – 3 x 186,6 kVAr – Demanda 100%

Foram repetidas as simulações do cenário 1, porém com três filtros com potências iguais, sintonizados em 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup> e 11<sup>a</sup> ordens. Esse caso é somente comparativo, pois essa potência não é comercial.

Tabela 24: Cenário 7 - Composição dos componentes para o filtro Sintonizado em 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup> e 11<sup>a</sup> ordens.

Filtro / h [kVAr]	C [ $\mu$ F]	L [mH]	R [ $\Omega$ ]
186,66 / 5 <sup>a</sup>	2149,0062	0,130962	0,0100
186,66 / 7 <sup>a</sup>	2149,0062	0,066817	0,0071
186,66 / 11 <sup>a</sup>	2149,0062	0,027058	0,0045

Fonte: Autor, seguindo o procedimento de 0

As Tabela 24 e Tabela 25 apresentam os resultados do cenário 7. Esse cenário tem resultados muito bons, representa um avanço em relação ao cenário 1 e 4, que já haviam chegado num resultado muito bons, tal como no cenário 6. Esse resultado também sugere que dividir o banco em três partes com sintonias diferentes nas ordens de maior contribuição, porém atribuindo potências iguais é bastante eficiente.

Esse cenário é recomendável como solução a ser aplicada.

Esse cenário mantém a possibilidade de automatização do filtro para que funcione em estágios escalonados, através de um controlador de demanda. Essa medida permite um controle maior do fator de potência e evita que o sistema fique capacitivo em níveis baixos de demanda. Potências iguais nos três estágios proporcionam algumas facilidades em relação ao acionamento dos estágios, pois, permitem o acionamento do primeiro estágio num patamar mais baixo de demanda em relação ao anterior, além de proporcionar uma divisão mais intuitiva. Essa pode ser uma alternativa preferencial em muitos casos práticos.

Tabela 25: Resultado da Simulação para o Cenário 7, circuito Figura 13a.

h	CCM1&2				13,8kV			
	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%
	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro
1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2	0,13%	0,11%	0,08%	0,09%	0,10%	0,07%	0,06%	0,07%
3	0,10%	0,07%	0,04%	0,06%	0,06%	0,03%	0,02%	0,02%
4	0,10%	0,04%	0,01%	0,03%	0,08%	0,02%	0,01%	0,01%
5	8,89%	3,19%	3,29%	1,03%	8,59%	3,00%	0,34%	0,11%
6	0,04%	0,03%	0,01%	0,02%	0,02%	0,02%	0,00%	0,01%
7	5,80%	1,17%	2,99%	0,54%	5,51%	1,09%	0,30%	0,05%
8	0,02%	0,03%	0,03%	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
9	0,02%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
10	0,04%	0,03%	0,02%	0,00%	0,03%	0,02%	0,00%	0,00%
11	2,78%	1,40%	2,25%	1,01%	2,64%	1,33%	0,23%	0,10%
12	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
13	1,96%	0,87%	1,88%	0,75%	1,88%	0,84%	0,19%	0,08%
14	0,02%	0,02%	0,03%	0,02%	0,03%	0,01%	0,00%	0,00%
15	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
16	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
17	0,94%	0,46%	1,18%	0,52%	0,90%	0,44%	0,12%	0,05%
18	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
19	0,69%	0,35%	0,96%	0,44%	0,65%	0,33%	0,10%	0,04%
20	0,01%	0,01%	0,03%	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
21	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
22	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
23	0,46%	0,24%	0,78%	0,37%	0,44%	0,23%	0,08%	0,04%
24	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
25	0,42%	0,23%	0,78%	0,38%	0,41%	0,22%	0,08%	0,04%
26	0,01%	0,01%	0,03%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
27	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
28	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
29	0,35%	0,19%	0,75%	0,37%	0,34%	0,18%	0,08%	0,04%
30	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
31	0,32%	0,17%	0,72%	0,36%	0,30%	0,16%	0,07%	0,04%
32	0,01%	0,01%	0,04%	0,02%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
33	0,01%	0,00%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
34	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
35	0,20%	0,11%	0,52%	0,26%	0,20%	0,11%	0,05%	0,03%
36	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
37	0,18%	0,10%	0,50%	0,25%	0,18%	0,10%	0,05%	0,03%
<b>THD</b>	<b>11,2%</b>	<b>3,8%</b>	<b>5,8%</b>	<b>2,0%</b>	<b>10,8%</b>	<b>3,6%</b>	<b>0,6%</b>	<b>0,2%</b>

Fonte: Autor

Tabela 26: Resultado da Simulação para o Cenário 7, circuito Figura 13b.

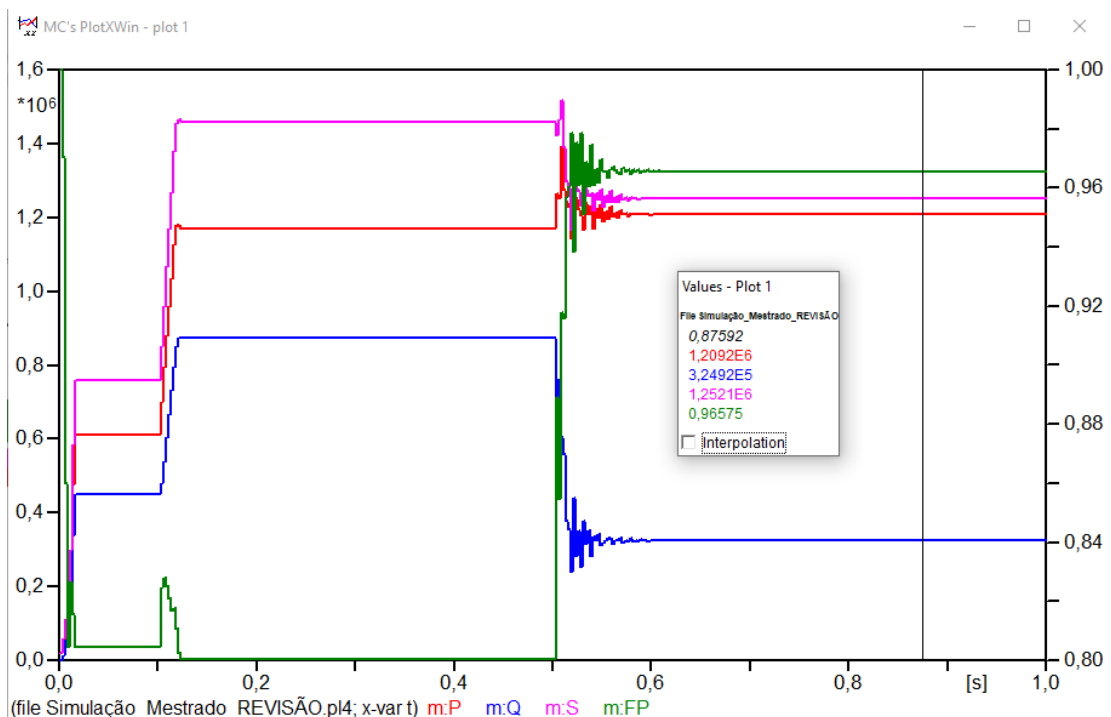
h	CCM2				13,8kV			
	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%
	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro
1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2	0,04%	0,03%	0,03%	0,04%	0,04%	0,03%	0,03%	0,03%
3	0,19%	0,22%	0,33%	0,36%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%
4	0,03%	0,01%	0,01%	0,01%	0,03%	0,01%	0,00%	0,01%
5	8,97%	3,19%	3,22%	1,03%	7,63%	2,67%	0,30%	0,09%
6	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
7	5,83%	1,21%	2,95%	0,53%	4,96%	0,98%	0,27%	0,05%
8	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
9	0,00%	0,00%	0,04%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
10	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
11	2,80%	1,45%	2,20%	1,02%	2,37%	1,20%	0,21%	0,09%
12	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
13	1,96%	0,90%	1,85%	0,74%	1,68%	0,75%	0,17%	0,07%
14	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
15	0,00%	0,00%	0,05%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
16	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
17	0,95%	0,48%	1,16%	0,51%	0,81%	0,40%	0,11%	0,05%
18	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
19	0,69%	0,36%	0,94%	0,43%	0,58%	0,30%	0,09%	0,04%
20	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
21	0,00%	0,00%	0,06%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
22	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
23	0,46%	0,25%	0,77%	0,37%	0,40%	0,21%	0,07%	0,03%
24	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
25	0,42%	0,23%	0,76%	0,37%	0,36%	0,19%	0,07%	0,03%
26	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
27	0,01%	0,00%	0,07%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
28	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
29	0,35%	0,20%	0,74%	0,36%	0,30%	0,16%	0,07%	0,03%
30	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
31	0,31%	0,17%	0,69%	0,35%	0,27%	0,15%	0,06%	0,03%
32	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
33	0,01%	0,00%	0,04%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
34	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
35	0,20%	0,11%	0,51%	0,25%	0,17%	0,10%	0,05%	0,02%
36	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
37	0,18%	0,10%	0,48%	0,24%	0,15%	0,09%	0,04%	0,02%
<b>THD</b>	<b>11,3%</b>	<b>3,9%</b>	<b>5,7%</b>	<b>2,0%</b>	<b>9,6%</b>	<b>3,2%</b>	<b>0,5%</b>	<b>0,2%</b>

Fonte: Autor

### 6.9. Cenário 8 – Filtro sintonizado em 5ª ordem – Demanda 60%

Foram repetidas as simulações do cenário 1, porém com demanda de 60% da potência nominal do transformador. Antes, porém, de partir para os resultados foi apresentado, na Figura 26: a condição da correção do fator de potência para esse nível de demanda. Uma das preocupações recaía em evitar ao máximo que o sistema ficasse capacitivo, já se constata que esse não é o caso. Nos cenários com demanda de 100%, devido à queda de tensão no transformador, magnetização etc., o fator de potência ficou abaixo dos 0,92 projetados, condição não desejável. O ideal seria ficar até ligeiramente acima, portanto, optou-se por elevar a potência do filtro para 600 kVAr e melhorar a condição nos cenários com demanda de 100%, a Figura 27 ilustra essa condição. O fator de potência já tinha sinalizado nos cenários anteriores que estava precisando de algum ajuste, optou-se por aguardar o resultado no cenário de 60% de demanda devido a preocupação de que o ajuste para o cenário de 100% implicasse em deixar o sistema capacitivo quando a demanda estivesse em 60% a partir deste ponto, com o resultado da simulação de 60% de demanda tem-se as informações necessárias para tomada de decisão e ajustar o Banco de capacitores.

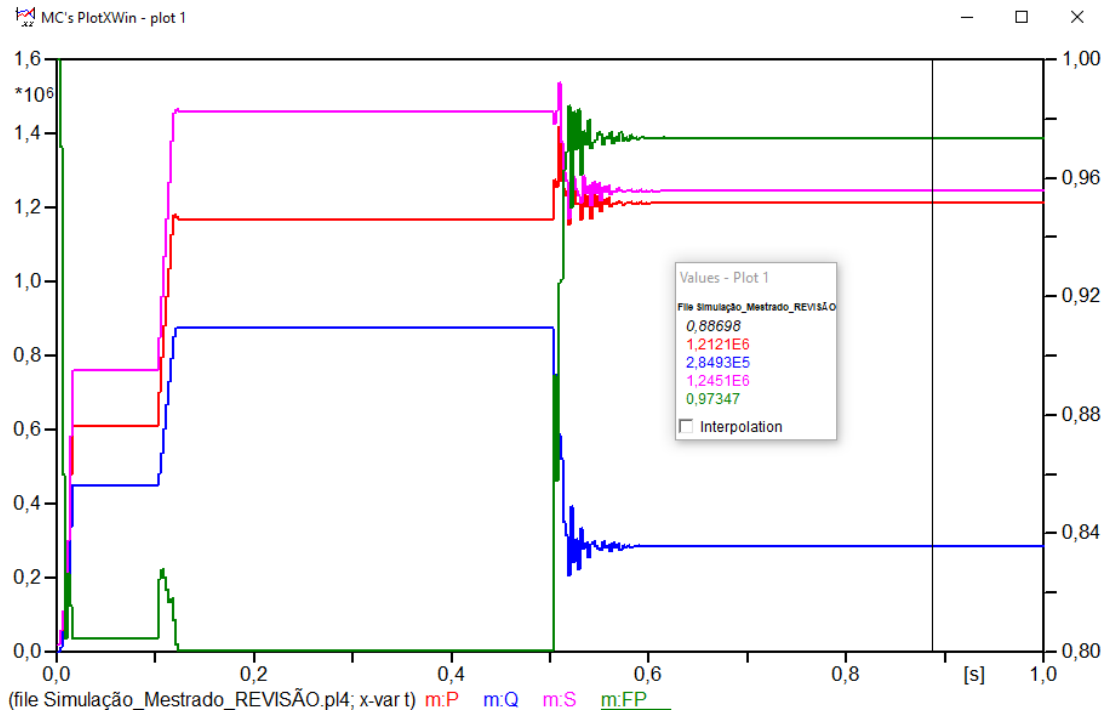
Figura 26: Potência demandada de 60% e fator de potência, válido para cenários de 1 a 7.



Fonte: Autor



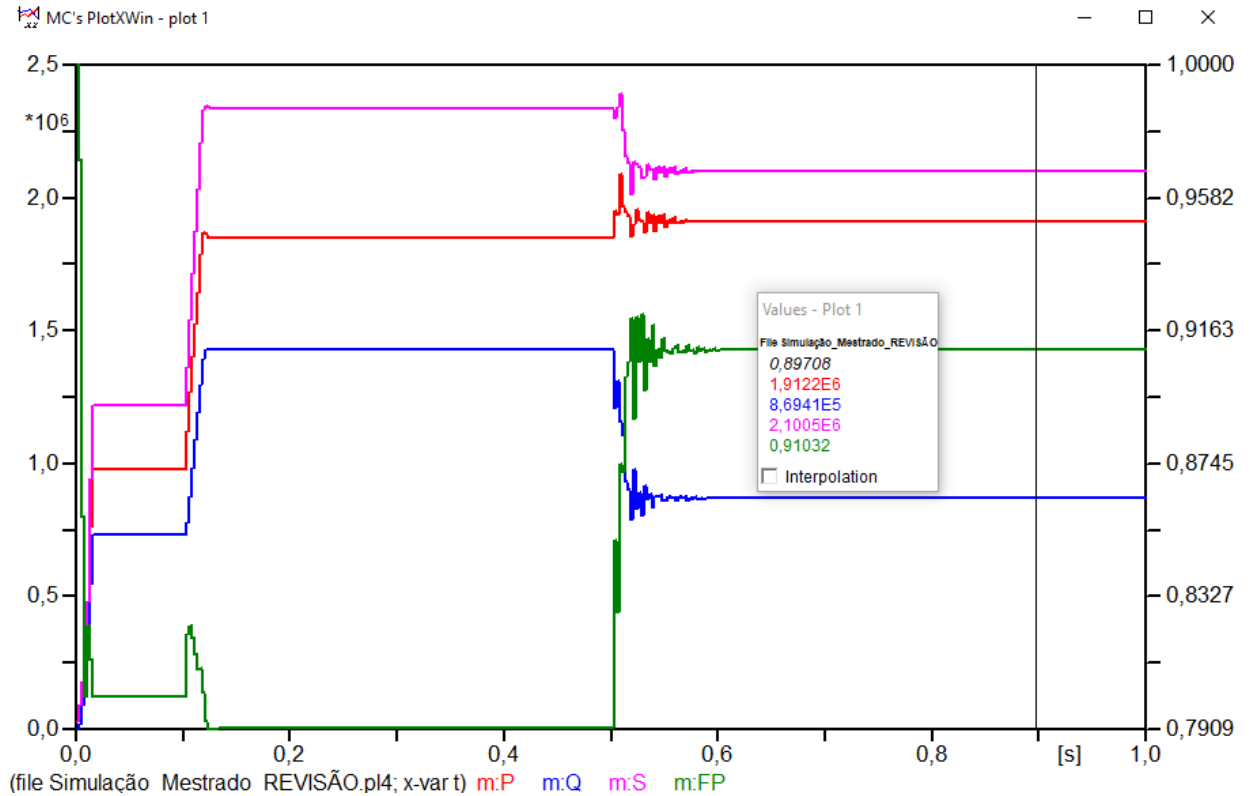
Figura 27: Potência demandada e fator de potência, Filtro de 600kVAr – demanda 60%.



Fonte: Autor

É importante observar que o cenário de 100% de demanda é uma condição de projeto. Na indústria o transformador não pode operar muito próximo da sua potência nominal, pois um evento de *trip* ou perda do transformador ocasiona um prejuízo muito maior, devido à perda de produção. Com o aumento da potência do filtro para 600 kVAr o fator de potência no cenário de demanda 100% não fica acima de 0,92. Porém, a condição é melhor do que nos cenários de 1 a 7, ficando em 0,91, que é um resultado aceitável, levando em consideração que, na prática, o transformador sempre deve operar com uma folga técnica, abaixo da nominal, com 5 a 10% de folga, no máximo.

Figura 28: Potência demandada e fator de potência, Filtro de 600kVAr – demanda 100% - comparar com Figura 22.



Fonte: Autor

Tendo um novo cenário de cargas, uma nova tabela de contribuição harmônica, seguindo as características da carga, 750 kVAr, e o espectro típico, Tabela 1, deve ser calculada seguindo o procedimento do item 5.3.3. O resultado está na Tabela 27.

Esse novo perfil de correntes harmônicas deve ser modelado no ATP, em substituição ao anterior, para então iniciar as simulações dos próximos cenários.

Tabela 27: Valores de Corrente e Tensão Harmônicos para os cenários de demanda 60%.

<b>h</b>	<b>I [A]</b>	<b>V [V]</b>
5	242,8	11,5838
7	158,4	18,7316
11	76,3	9,2120
13	53,4	3,4093
17	26,0	0,8181
19	18,5	0,4452
23	12,5	0,1801
25	11,4	0,1250
29	9,5	0,0507
31	8,3	0,0252
35	5,9	0,0057
37	5,1	0,0141

Fonte: Autor

Tabela 28: Cenário 8 - Composição dos componentes para o filtro Sintonizado em 5ª ordem.

<b>Filtro / h [kVAr]</b>	<b>C [<math>\mu</math>F]</b>	<b>L [mH]</b>	<b>R [<math>\Omega</math>]</b>
600 / 5ª	6907,7666	0,040744	0,0031

Fonte: Autor, seguindo o procedimento de 0

Análogo ao cenário 1, os resultados apresentados nas: Tabela 29 e Tabela 30 mostram que a solução proposta neste cenário atende o objetivo, a Distorção Harmônica de corrente [DHi] e a Distorção Harmônica de tensão [DHv] ficam abaixo dos limites esperados com a instalação do filtro.

Embora o resultado seja bom, este cenário não é recomendável como solução, pois há cenários com resultados pronunciadamente melhores, tendo em vista que a potência do filtro nos diversos cenários é sempre a mesma.

Tabela 29: Resultado da Simulação para o Cenário 8, circuito Figura 13a.

h	CCM1&2				13,8kV			
	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%
	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro
1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2	0,13%	0,10%	0,08%	0,09%	0,09%	0,06%	0,07%	0,07%
3	0,10%	0,07%	0,05%	0,06%	0,06%	0,02%	0,02%	0,02%
4	0,10%	0,04%	0,01%	0,03%	0,08%	0,02%	0,01%	0,01%
5	9,11%	1,37%	2,04%	0,24%	8,79%	1,17%	0,22%	0,02%
6	0,04%	0,05%	0,01%	0,01%	0,02%	0,04%	0,00%	0,00%
7	5,95%	3,85%	1,85%	1,01%	5,59%	3,59%	0,19%	0,11%
8	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
9	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
10	0,04%	0,04%	0,01%	0,01%	0,03%	0,03%	0,00%	0,00%
11	2,84%	2,20%	1,39%	0,91%	2,67%	2,06%	0,14%	0,09%
12	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
13	2,00%	1,58%	1,16%	0,78%	1,91%	1,51%	0,12%	0,08%
14	0,02%	0,02%	0,02%	0,02%	0,03%	0,02%	0,00%	0,00%
15	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
16	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
17	0,97%	0,79%	0,74%	0,50%	0,92%	0,75%	0,08%	0,05%
18	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
19	0,70%	0,57%	0,59%	0,40%	0,66%	0,53%	0,06%	0,04%
20	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
21	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
22	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
23	0,47%	0,38%	0,48%	0,33%	0,45%	0,36%	0,05%	0,03%
24	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
25	0,44%	0,36%	0,49%	0,34%	0,42%	0,35%	0,05%	0,04%
26	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
27	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
28	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
29	0,36%	0,29%	0,46%	0,32%	0,34%	0,28%	0,05%	0,03%
30	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
31	0,31%	0,26%	0,42%	0,29%	0,29%	0,24%	0,04%	0,03%
32	0,01%	0,01%	0,02%	0,02%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
33	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
34	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
35	0,23%	0,19%	0,36%	0,25%	0,22%	0,18%	0,04%	0,03%
36	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
37	0,20%	0,16%	0,33%	0,23%	0,19%	0,16%	0,03%	0,02%
<b>THD</b>	11,5%	5,0%	3,6%	1,9%	11,0%	4,7%	0,4%	0,2%

Fonte: Autor

Tabela 30: Resultado da Simulação para o Cenário 8, circuito Figura 13b.

h	CCM2				13,8kV			
	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%	DHi%	DHi%	DHv%	DHv%
	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro
1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2	0,08%	0,05%	0,07%	0,07%	0,09%	0,06%	0,07%	0,07%
3	0,35%	0,42%	0,60%	0,21%	0,06%	0,02%	0,02%	0,02%
4	0,08%	0,02%	0,02%	0,01%	0,08%	0,02%	0,01%	0,01%
5	9,15%	1,17%	1,98%	0,22%	7,72%	1,05%	0,19%	0,02%
6	0,03%	0,04%	0,01%	0,01%	0,02%	0,03%	0,00%	0,01%
7	5,97%	3,90%	1,83%	0,99%	5,04%	3,25%	0,17%	0,10%
8	0,03%	0,01%	0,01%	0,00%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
9	0,01%	0,02%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
10	0,04%	0,03%	0,01%	0,01%	0,03%	0,03%	0,00%	0,00%
11	2,85%	2,23%	1,36%	0,89%	2,39%	1,85%	0,13%	0,09%
12	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
13	2,00%	1,60%	1,14%	0,76%	1,70%	1,35%	0,11%	0,07%
14	0,03%	0,02%	0,02%	0,01%	0,02%	0,02%	0,00%	0,00%
15	0,01%	0,00%	0,06%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
16	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
17	0,98%	0,80%	0,72%	0,49%	0,83%	0,67%	0,07%	0,05%
18	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
19	0,70%	0,58%	0,59%	0,40%	0,60%	0,49%	0,06%	0,04%
20	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
21	0,01%	0,01%	0,09%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
22	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
23	0,47%	0,39%	0,47%	0,32%	0,40%	0,33%	0,04%	0,03%
24	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
25	0,44%	0,36%	0,48%	0,33%	0,38%	0,31%	0,05%	0,03%
26	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
27	0,01%	0,01%	0,11%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
28	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
29	0,36%	0,30%	0,45%	0,31%	0,30%	0,25%	0,04%	0,03%
30	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
31	0,31%	0,26%	0,42%	0,29%	0,26%	0,22%	0,04%	0,03%
32	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
33	0,01%	0,01%	0,08%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
34	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
35	0,23%	0,19%	0,35%	0,24%	0,20%	0,16%	0,03%	0,02%
36	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
37	0,20%	0,17%	0,32%	0,22%	0,17%	0,14%	0,03%	0,02%
<b>THD</b>	11,5%	5,0%	3,6%	1,8%	9,8%	4,2%	0,3%	0,2%

Fonte: Autor

### 6.10. Cenário 9 – Filtro sintonizado em 5ª e 7ª ordens – 2 x 300 kVAr - Demanda 60%

Foram repetidas as simulações do cenário 1, porém com demanda de 60% da potência nominal do transformador e filtros dimensionados em 5ª e 7ª ordens, dois conjuntos iguais de 300 kVAr cada.

Tabela 31: Cenário 9 - Composição dos componentes para o filtro sintonizado em 5ª e 7 ordens.

Filtro / h [kVAr]	C [ $\mu$ F]	L [mH]	R [ $\Omega$ ]
300 / 5ª	3453,8833	0,081487	0,0061
300 / 7ª	3453,8833	0,041575	0,0044

Fonte: Autor, seguindo o procedimento de 0

As Tabela 32 e Tabela 33 apresentam os resultados do cenário 9. Esse cenário tem resultados muito bons, é análogo ao cenário 4, onde é sugerido dividir o banco em duas partes iguais, com sintonias diferentes nas ordens de maior contribuição, mostrando que é mais eficiente do que atacar somente a ordem de maior contribuição, como pode ser verificado comparando com o cenário 8, anterior.

Esse cenário é recomendável como solução a ser aplicada.

Além da vantagem em relação ao resultado, também possibilita a automatização do filtro para que entre em estágios escalonados, através de um controlador de demanda, à medida que as cargas forem sendo acionadas, o primeiro estágio entra em determinado nível de demanda e o segundo entra quando a demanda atingir o nível estipulado. Essa medida permite um controle maior do fator de potência e evita que o sistema fique capacitivo em níveis baixos de demanda.

Tabela 32: Resultado da Simulação para o Cenário 9, circuito Figura 13a.

h	CCM1&2				13,8kV			
	DHi% S/ Filtro	DHi% C/ Filtro	DHv% S/ Filtro	DHv% C/ Filtro	DHi% S/ Filtro	DHi% C/ Filtro	DHv% S/ Filtro	DHv% C/ Filtro
1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2	0,13%	0,10%	0,08%	0,09%	0,09%	0,06%	0,07%	0,07%
3	0,10%	0,07%	0,05%	0,06%	0,06%	0,02%	0,02%	0,02%
4	0,10%	0,03%	0,01%	0,03%	0,08%	0,01%	0,01%	0,01%
5	9,11%	2,23%	2,04%	0,40%	8,79%	1,94%	0,22%	0,04%
6	0,04%	0,03%	0,01%	0,02%	0,02%	0,01%	0,00%	0,01%
7	5,95%	0,81%	1,85%	0,22%	5,59%	0,76%	0,19%	0,02%
8	0,02%	0,03%	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
9	0,01%	0,03%	0,01%	0,01%	0,00%	0,02%	0,00%	0,00%
10	0,04%	0,04%	0,01%	0,01%	0,03%	0,03%	0,00%	0,00%
11	2,84%	1,74%	1,39%	0,72%	2,67%	1,63%	0,14%	0,08%
12	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
13	2,00%	1,30%	1,16%	0,64%	1,91%	1,25%	0,12%	0,07%
14	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,03%	0,01%	0,00%	0,00%
15	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
16	0,01%	0,02%	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
17	0,97%	0,67%	0,74%	0,43%	0,92%	0,64%	0,08%	0,05%
18	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
19	0,70%	0,49%	0,59%	0,35%	0,66%	0,45%	0,06%	0,04%
20	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
21	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
22	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
23	0,47%	0,33%	0,48%	0,29%	0,45%	0,31%	0,05%	0,03%
24	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
25	0,44%	0,31%	0,49%	0,30%	0,42%	0,30%	0,05%	0,03%
26	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
27	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
28	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
29	0,36%	0,26%	0,46%	0,28%	0,34%	0,25%	0,05%	0,03%
30	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
31	0,31%	0,22%	0,42%	0,26%	0,29%	0,21%	0,04%	0,03%
32	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
33	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
34	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
35	0,23%	0,17%	0,36%	0,22%	0,22%	0,16%	0,04%	0,02%
36	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
37	0,20%	0,14%	0,33%	0,20%	0,19%	0,14%	0,03%	0,02%
<b>THD</b>	<b>11,5%</b>	<b>3,4%</b>	<b>3,6%</b>	<b>1,4%</b>	<b>11,0%</b>	<b>3,1%</b>	<b>0,4%</b>	<b>0,2%</b>

Fonte: Autor.

Tabela 33: Resultado da Simulação para o Cenário 9, circuito Figura 13b.

h	CCM2				13,8kV			
	DHi% S/ Filtro	DHi% C/ Filtro	DHv% S/ Filtro	DHv% C/ Filtro	DHi% S/ Filtro	DHi% C/ Filtro	DHv% S/ Filtro	DHv% C/ Filtro
1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2	0,04%	0,03%	0,03%	0,03%	0,04%	0,03%	0,03%	0,03%
3	0,32%	0,41%	0,59%	0,26%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%
4	0,04%	0,01%	0,01%	0,01%	0,03%	0,00%	0,00%	0,01%
5	9,17%	2,03%	1,98%	0,39%	7,75%	1,76%	0,19%	0,03%
6	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
7	5,97%	0,85%	1,83%	0,21%	5,05%	0,68%	0,17%	0,02%
8	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
9	0,00%	0,01%	0,03%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
10	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
11	2,86%	1,78%	1,36%	0,71%	2,40%	1,47%	0,13%	0,07%
12	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
13	2,00%	1,32%	1,14%	0,63%	1,70%	1,12%	0,11%	0,06%
14	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
15	0,01%	0,00%	0,06%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
16	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
17	0,98%	0,68%	0,72%	0,42%	0,83%	0,57%	0,07%	0,04%
18	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
19	0,70%	0,49%	0,59%	0,34%	0,59%	0,41%	0,05%	0,03%
20	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
21	0,01%	0,01%	0,09%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
22	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
23	0,47%	0,34%	0,47%	0,28%	0,40%	0,28%	0,04%	0,03%
24	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
25	0,44%	0,31%	0,48%	0,29%	0,37%	0,27%	0,05%	0,03%
26	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
27	0,01%	0,01%	0,11%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
28	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
29	0,36%	0,26%	0,45%	0,27%	0,30%	0,22%	0,04%	0,03%
30	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
31	0,30%	0,22%	0,41%	0,25%	0,26%	0,19%	0,04%	0,02%
32	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
33	0,01%	0,01%	0,08%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
34	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
35	0,23%	0,17%	0,35%	0,21%	0,19%	0,14%	0,03%	0,02%
36	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
37	0,19%	0,14%	0,31%	0,19%	0,16%	0,12%	0,03%	0,02%
<b>THD</b>	<b>11,6%</b>	<b>3,3%</b>	<b>3,6%</b>	<b>1,4%</b>	<b>9,8%</b>	<b>2,8%</b>	<b>0,3%</b>	<b>0,1%</b>

Fonte: Autor.



### 6.11. Cenário 10 – Filtro sintonizado em 5ª e 7ª ordens – 360 kVAr e 240 kVAr - Demanda 60%

Foram repetidas as simulações do cenário 1, porém com demanda de 60% da potência nominal do transformador e filtros dimensionados em 5ª e 7ª ordens, dois conjuntos com potência de 360kVAr e 240kVAr, respectivamente.

Tabela 34: Cenário 10 - Composição dos componentes para o filtro Sintonizado em 5ª e 7 ordens.

Filtro / h [kVAr]	C [ $\mu$ F]	L [mH]	R [ $\Omega$ ]
360 / 5ª	4144,6600	0,067906	0,0051
240 / 7ª	2763,1067	0,051969	0,0055

Fonte: Autor, seguindo o procedimento de 0

As Tabela 35 e Tabela 36 apresentam os resultados do cenário 10. Esse cenário tem resultados muito bons, assim como o cenário 9, anterior. Esse resultado sugere que dividir o banco em duas partes iguais dá resultado equivalente a dividir tentando parametrizar a proporção de contribuição das duas ordens maiores.

Comparando os cenários 9 / 10 e 4 / 5, observa-se resultados muito bons e equivalentes.

A configuração com partes iguais é mais interessante por permitir uma divisão melhor dos estágios de demanda para acionamento dos filtros. Assim, ela é recomendada como solução a ser implementada.

Tabela 35: Resultado da Simulação para o Cenário 10, circuito Figura 13a.

h	CCM1&2				13,8kV			
	DHi% S/ Filtro	DHi% C/ Filtro	DHv% S/ Filtro	DHv% C/ Filtro	DHi% S/ Filtro	DHi% C/ Filtro	DHv% S/ Filtro	DHv% C/ Filtro
1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2	0,13%	0,10%	0,08%	0,09%	0,09%	0,06%	0,07%	0,07%
3	0,10%	0,07%	0,05%	0,06%	0,06%	0,02%	0,02%	0,02%
4	0,10%	0,03%	0,01%	0,03%	0,08%	0,01%	0,01%	0,01%
5	9,11%	1,94%	2,04%	0,35%	8,79%	1,68%	0,22%	0,03%
6	0,04%	0,03%	0,01%	0,02%	0,02%	0,01%	0,00%	0,01%
7	5,95%	0,95%	1,85%	0,26%	5,59%	0,89%	0,19%	0,03%
8	0,02%	0,03%	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
9	0,01%	0,03%	0,01%	0,01%	0,00%	0,02%	0,00%	0,00%
10	0,04%	0,04%	0,01%	0,01%	0,03%	0,03%	0,00%	0,00%
11	2,84%	1,82%	1,39%	0,75%	2,67%	1,70%	0,14%	0,08%
12	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
13	2,00%	1,35%	1,16%	0,66%	1,91%	1,29%	0,12%	0,07%
14	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,03%	0,01%	0,00%	0,00%
15	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
16	0,01%	0,02%	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
17	0,97%	0,69%	0,74%	0,44%	0,92%	0,66%	0,08%	0,05%
18	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
19	0,70%	0,51%	0,59%	0,36%	0,66%	0,47%	0,06%	0,04%
20	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
21	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
22	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
23	0,47%	0,34%	0,48%	0,30%	0,45%	0,32%	0,05%	0,03%
24	0,00%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
25	0,44%	0,32%	0,49%	0,30%	0,42%	0,31%	0,05%	0,03%
26	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
27	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
28	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
29	0,36%	0,26%	0,46%	0,29%	0,34%	0,25%	0,05%	0,03%
30	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
31	0,31%	0,23%	0,42%	0,26%	0,29%	0,21%	0,04%	0,03%
32	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
33	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
34	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
35	0,23%	0,17%	0,36%	0,22%	0,22%	0,16%	0,04%	0,02%
36	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
37	0,20%	0,15%	0,33%	0,21%	0,19%	0,14%	0,03%	0,02%
<b>THD</b>	<b>11,5%</b>	<b>3,3%</b>	<b>3,6%</b>	<b>1,4%</b>	<b>11,0%</b>	<b>3,0%</b>	<b>0,4%</b>	<b>0,2%</b>

Fonte: Autor.

Tabela 36: Resultado da Simulação para o Cenário 10, circuito Figura 13b.

h	CCM2				13,8kV			
	DHi% S/ Filtro	DHi% C/ Filtro	DHv% S/ Filtro	DHv% C/ Filtro	DHi% S/ Filtro	DHi% C/ Filtro	DHv% S/ Filtro	DHv% C/ Filtro
1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2	0,08%	0,06%	0,07%	0,07%	0,09%	0,06%	0,07%	0,07%
3	0,35%	0,42%	0,60%	0,23%	0,06%	0,02%	0,02%	0,02%
4	0,08%	0,01%	0,02%	0,01%	0,08%	0,01%	0,01%	0,01%
5	9,15%	1,74%	1,98%	0,33%	7,72%	1,52%	0,19%	0,03%
6	0,03%	0,01%	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,01%
7	5,97%	1,01%	1,83%	0,24%	5,04%	0,80%	0,17%	0,02%
8	0,03%	0,02%	0,01%	0,00%	0,02%	0,02%	0,00%	0,00%
9	0,01%	0,02%	0,02%	0,01%	0,01%	0,02%	0,00%	0,00%
10	0,04%	0,03%	0,01%	0,01%	0,03%	0,03%	0,00%	0,00%
11	2,85%	1,84%	1,36%	0,73%	2,39%	1,52%	0,13%	0,07%
12	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
13	2,00%	1,37%	1,14%	0,65%	1,70%	1,16%	0,11%	0,06%
14	0,03%	0,02%	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
15	0,01%	0,00%	0,06%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
16	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
17	0,98%	0,70%	0,72%	0,43%	0,83%	0,59%	0,07%	0,04%
18	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
19	0,70%	0,51%	0,59%	0,35%	0,60%	0,43%	0,06%	0,03%
20	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
21	0,01%	0,01%	0,09%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
22	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
23	0,47%	0,35%	0,47%	0,29%	0,40%	0,29%	0,04%	0,03%
24	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
25	0,44%	0,32%	0,48%	0,30%	0,38%	0,28%	0,05%	0,03%
26	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
27	0,01%	0,01%	0,11%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
28	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
29	0,36%	0,27%	0,45%	0,28%	0,30%	0,22%	0,04%	0,03%
30	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
31	0,31%	0,23%	0,42%	0,26%	0,26%	0,19%	0,04%	0,02%
32	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
33	0,01%	0,01%	0,08%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
34	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
35	0,23%	0,17%	0,35%	0,22%	0,20%	0,14%	0,03%	0,02%
36	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
37	0,20%	0,15%	0,32%	0,20%	0,17%	0,13%	0,03%	0,02%
<b>THD</b>	<b>11,5%</b>	<b>3,3%</b>	<b>3,6%</b>	<b>1,4%</b>	<b>9,8%</b>	<b>3,0%</b>	<b>0,3%</b>	<b>0,1%</b>

Fonte: Autor.

### 6.12. Cenário 11 – Filtro sintonizado em 5ª, 7ª e 11 ordens – 300 kVAr, 200 kVAr e 100 kVAr - Demanda 60%

Foram repetidas as simulações do cenário 1, porém com demanda de 60% da potência nominal do transformador e filtros dimensionados em 5ª, 7ª e 11ª ordens, três conjuntos com potências de 300, 200 e 100 kVAr, respectivamente.

Tabela 37: Cenário 11 - Composição dos componentes para o filtro Sintonizado em 5ª, 7 e 11ª ordens.

Filtro / h [kVAr]	C [ $\mu$ F]	L [mH]	R [ $\Omega$ ]
300 / 5ª	3453,8833	0,081487	0,0061
200 / 7ª	2302,5889	0,062363	0,0066
100 / 11ª	1151,2944	0,050509	0,0084

Fonte: Autor, seguindo o procedimento de 0

As Tabela 38 e Tabela 39 apresentam os resultados do cenário 11. Esse cenário tem resultados excelentes.

Esse resultado sugere que dividir o banco em três partes com sintonias diferentes nas ordens de maior contribuição e atribuindo potências, seguindo a proporção de contribuição do espectro, estratégia que se mostrou ser a mais eficiente.

Esse cenário é recomendável como solução a ser aplicada.

Esse cenário mantém a possibilidade de automatização do filtro para que entre em estágios escalonados, através de um controlador de demanda. Essa medida permite um controle maior do fator de potência e evita que o sistema fique capacitivo em níveis baixos de demanda, assim como nos cenários 4, 5, 6, 7, 9 e 10.

Tabela 38: Resultado da Simulação para o Cenário 11, circuito Figura 13a.

h	CCM2				13,8kV			
	DHi% S/ Filtro	DHi% C/ Filtro	DHv% S/ Filtro	DHv% C/ Filtro	DHi% S/ Filtro	DHi% C/ Filtro	DHv% S/ Filtro	DHv% C/ Filtro
1	100%	100%	100,00%	100%	100%	100%	100%	100%
2	0,13%	0,10%	0,08%	0,09%	0,10%	0,07%	0,06%	0,07%
3	0,10%	0,07%	0,05%	0,06%	0,07%	0,02%	0,02%	0,02%
4	0,10%	0,03%	0,01%	0,03%	0,08%	0,01%	0,01%	0,01%
5	9,11%	2,26%	2,04%	0,40%	8,85%	2,03%	0,22%	0,04%
6	0,04%	0,03%	0,01%	0,02%	0,02%	0,01%	0,00%	0,01%
7	5,96%	0,96%	1,85%	0,26%	5,58%	0,87%	0,19%	0,03%
8	0,02%	0,02%	0,02%	0,01%	0,03%	0,01%	0,00%	0,00%
9	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
10	0,04%	0,02%	0,01%	0,01%	0,03%	0,01%	0,00%	0,00%
11	2,84%	0,65%	1,39%	0,27%	2,67%	0,60%	0,14%	0,03%
12	0,01%	0,03%	0,01%	0,01%	0,01%	0,02%	0,00%	0,00%
13	2,00%	1,00%	1,16%	0,50%	1,91%	0,97%	0,12%	0,05%
14	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,03%	0,01%	0,00%	0,00%
15	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
16	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
17	0,97%	0,59%	0,74%	0,38%	0,93%	0,56%	0,08%	0,04%
18	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
19	0,70%	0,44%	0,59%	0,31%	0,66%	0,40%	0,06%	0,03%
20	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
21	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
22	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
23	0,47%	0,30%	0,48%	0,26%	0,45%	0,29%	0,05%	0,03%
24	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
25	0,44%	0,28%	0,49%	0,27%	0,43%	0,28%	0,05%	0,03%
26	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
27	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
28	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
29	0,36%	0,24%	0,46%	0,26%	0,34%	0,23%	0,05%	0,03%
30	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
31	0,31%	0,21%	0,43%	0,24%	0,29%	0,19%	0,04%	0,02%
32	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
33	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
34	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
35	0,23%	0,15%	0,36%	0,20%	0,22%	0,14%	0,04%	0,02%
36	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
37	0,20%	0,13%	0,33%	0,19%	0,19%	0,13%	0,03%	0,02%
<b>THD</b>	<b>11,50%</b>	<b>2,88%</b>	<b>3,59%</b>	<b>1,06%</b>	<b>11,06%</b>	<b>2,63%</b>	<b>0,38%</b>	<b>0,13%</b>

Fonte: Autor.

Tabela 39: Resultado da Simulação para o Cenário 11, circuito Figura 13b.

h	CCM2				13,8kV			
	DHi% S/ Filtro	DHi% C/ Filtro	DHv% S/ Filtro	DHv% C/ Filtro	DHi% S/ Filtro	DHi% C/ Filtro	DHv% S/ Filtro	DHv% C/ Filtro
1	100%	100%	100,00%	100%	100%	100%	100%	100%
2	0,08%	0,06%	0,07%	0,07%	0,09%	0,06%	0,07%	0,07%
3	0,35%	0,42%	0,60%	0,25%	0,06%	0,02%	0,02%	0,02%
4	0,08%	0,01%	0,02%	0,02%	0,08%	0,01%	0,01%	0,01%
5	9,15%	2,04%	1,98%	0,38%	7,72%	1,76%	0,19%	0,03%
6	0,03%	0,01%	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,01%
7	5,97%	1,01%	1,83%	0,24%	5,04%	0,80%	0,17%	0,02%
8	0,03%	0,02%	0,01%	0,00%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
9	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
10	0,04%	0,01%	0,01%	0,01%	0,03%	0,01%	0,00%	0,00%
11	2,85%	0,66%	1,36%	0,26%	2,39%	0,55%	0,13%	0,02%
12	0,01%	0,02%	0,00%	0,01%	0,00%	0,02%	0,00%	0,00%
13	2,00%	1,02%	1,14%	0,48%	1,70%	0,86%	0,11%	0,05%
14	0,03%	0,01%	0,02%	0,00%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
15	0,01%	0,00%	0,06%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
16	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
17	0,98%	0,60%	0,72%	0,37%	0,83%	0,50%	0,07%	0,04%
18	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
19	0,70%	0,44%	0,59%	0,31%	0,60%	0,37%	0,06%	0,03%
20	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
21	0,01%	0,00%	0,09%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
22	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
23	0,47%	0,31%	0,47%	0,26%	0,40%	0,26%	0,04%	0,02%
24	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
25	0,44%	0,29%	0,48%	0,26%	0,38%	0,25%	0,05%	0,03%
26	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
27	0,01%	0,01%	0,11%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
28	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
29	0,36%	0,24%	0,45%	0,25%	0,30%	0,20%	0,04%	0,02%
30	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
31	0,31%	0,21%	0,42%	0,23%	0,26%	0,17%	0,04%	0,02%
32	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
33	0,01%	0,01%	0,08%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
34	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
35	0,23%	0,16%	0,35%	0,20%	0,20%	0,13%	0,03%	0,02%
36	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
37	0,20%	0,13%	0,32%	0,18%	0,17%	0,11%	0,03%	0,02%
<b>THD</b>	<b>11,56%</b>	<b>2,77%</b>	<b>3,57%</b>	<b>1,06%</b>	<b>9,76%</b>	<b>2,32%</b>	<b>0,34%</b>	<b>0,12%</b>

Fonte: Autor.

### 6.13. Cenário 12 – Filtro sintonizado em 5ª, 7ª e 11 ordens – 3 x 200 kVAr - Demanda 60%

Foram repetidas as simulações do cenário 1, porém com demanda de 60% da potência nominal do transformador e filtros dimensionados em 5ª, 7ª e 11ª ordens, três conjuntos iguais de 200 kVAr.

Tabela 40: Cenário 12 - Composição dos componentes para o filtro Sintonizado em 5ª, 7 e 11ª ordens.

Filtro / h [kVAr]	C [ $\mu$ F]	L [mH]	R [ $\Omega$ ]
200 / 5ª	2302,5889	0,122231	0,0092
200 / 7ª	2302,5889	0,062363	0,0066
200 / 11ª	2302,5889	0,025254	0,0042

Fonte: Autor, seguindo o procedimento de 0

As Tabela 41 e Tabela 42 apresentam os resultados do cenário 12. Esse cenário tem resultados satisfatórios.

Esse resultado sugere que dividir o banco em três partes iguais com sintonias diferentes nas ordens de maior contribuição. Essa estratégia é boa, porém ela apresentou um aumento da distorção de 7ª ordem. Esse fato mostra o quão importante é realizar o estudo, pois este resultado não era esperado.

O cenário 11, indica que retirando 100 kVAr do filtro de 11ª ordem e adicionando no filtro de 5ª ordem o problema é resolvido.

A estratégia nesse cenário seria a estratégia mais conveniente, se não fosse a reação de aumento da distorção de 7ª ordem. Em outros casos, outros unifilares, com outras cargas ou fonte, talvez essa reação não ocorra. É sempre importante não adotar solução sem antes fazer um estudo cuidadoso.

Tabela 41: Resultado da Simulação para o Cenário 12, circuito Figura 13a.

h	CCM1&2				13,8kV			
	DHi% S/ Filtro	DHi% C/ Filtro	DHv% S/ Filtro	DHv% C/ Filtro	DHi% S/ Filtro	DHi% C/ Filtro	DHv% S/ Filtro	DHv% C/ Filtro
1	100%	100%	100,00%	100%	100%	100%	100%	100%
2	0,13%	0,09%	0,08%	0,09%	0,10%	0,06%	0,06%	0,07%
3	0,10%	0,06%	0,05%	0,06%	0,07%	0,02%	0,02%	0,02%
4	0,10%	0,04%	0,01%	0,03%	0,08%	0,03%	0,01%	0,01%
5	9,11%	3,03%	2,04%	0,55%	8,85%	2,75%	0,22%	0,06%
6	0,04%	0,05%	0,01%	0,01%	0,02%	0,03%	0,00%	0,00%
7	5,95%	6,14%	1,85%	1,61%	5,58%	5,66%	0,19%	0,17%
8	0,02%	0,05%	0,02%	0,02%	0,03%	0,04%	0,00%	0,00%
9	0,01%	0,03%	0,01%	0,02%	0,00%	0,02%	0,00%	0,00%
10	0,04%	0,02%	0,01%	0,01%	0,03%	0,01%	0,00%	0,00%
11	2,84%	0,27%	1,39%	0,12%	2,67%	0,25%	0,14%	0,01%
12	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
13	2,00%	0,65%	1,16%	0,33%	1,91%	0,64%	0,12%	0,04%
14	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,03%	0,01%	0,00%	0,00%
15	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
16	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
17	0,97%	0,45%	0,74%	0,29%	0,93%	0,43%	0,08%	0,03%
18	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
19	0,70%	0,35%	0,59%	0,25%	0,66%	0,32%	0,06%	0,03%
20	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
21	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
22	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
23	0,47%	0,24%	0,48%	0,21%	0,45%	0,23%	0,05%	0,02%
24	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
25	0,44%	0,23%	0,49%	0,22%	0,43%	0,23%	0,05%	0,02%
26	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
27	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
28	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
29	0,36%	0,19%	0,46%	0,21%	0,34%	0,19%	0,05%	0,02%
30	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
31	0,31%	0,17%	0,43%	0,20%	0,29%	0,16%	0,04%	0,02%
32	0,01%	0,01%	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
33	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
34	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
35	0,23%	0,13%	0,36%	0,17%	0,22%	0,12%	0,04%	0,02%
36	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
37	0,20%	0,11%	0,33%	0,16%	0,19%	0,11%	0,03%	0,02%
<b>THD</b>	11,50%	6,90%	3,59%	1,84%	11,06%	6,36%	0,38%	0,20%

Fonte: Autor



Tabela 42: Resultado da Simulação para o Cenário 12, circuito Figura 13b.

h	CCM2				13,8kV			
	DHi% S/ Filtro	DHi% C/ Filtro	DHv% S/ Filtro	DHv% C/ Filtro	DHi% S/ Filtro	DHi% C/ Filtro	DHv% S/ Filtro	DHv% C/ Filtro
1	100%	100%	100,00%	100%	100%	100%	100%	100%
2	0,08%	0,06%	0,07%	0,07%	0,09%	0,06%	0,07%	0,07%
3	0,35%	0,41%	0,60%	0,27%	0,06%	0,02%	0,02%	0,03%
4	0,08%	0,01%	0,02%	0,02%	0,08%	0,02%	0,01%	0,01%
5	9,15%	2,84%	1,98%	0,53%	7,72%	2,41%	0,19%	0,05%
6	0,03%	0,03%	0,01%	0,01%	0,02%	0,03%	0,00%	0,01%
7	5,97%	6,28%	1,83%	1,60%	5,04%	5,12%	0,17%	0,15%
8	0,03%	0,05%	0,01%	0,01%	0,02%	0,04%	0,00%	0,00%
9	0,01%	0,03%	0,02%	0,00%	0,01%	0,02%	0,00%	0,00%
10	0,04%	0,02%	0,01%	0,00%	0,03%	0,01%	0,00%	0,00%
11	2,85%	0,28%	1,36%	0,11%	2,39%	0,23%	0,13%	0,01%
12	0,01%	0,02%	0,00%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
13	2,00%	0,68%	1,14%	0,32%	1,70%	0,57%	0,11%	0,03%
14	0,03%	0,01%	0,02%	0,00%	0,02%	0,01%	0,00%	0,00%
15	0,01%	0,01%	0,06%	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%
16	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
17	0,98%	0,46%	0,72%	0,29%	0,83%	0,38%	0,07%	0,03%
18	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
19	0,70%	0,35%	0,59%	0,24%	0,60%	0,29%	0,06%	0,02%
20	0,02%	0,01%	0,02%	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
21	0,01%	0,00%	0,09%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
22	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
23	0,47%	0,25%	0,47%	0,21%	0,40%	0,21%	0,04%	0,02%
24	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
25	0,44%	0,24%	0,48%	0,22%	0,38%	0,20%	0,05%	0,02%
26	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
27	0,01%	0,01%	0,11%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
28	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
29	0,36%	0,20%	0,45%	0,21%	0,30%	0,16%	0,04%	0,02%
30	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
31	0,31%	0,17%	0,42%	0,19%	0,26%	0,14%	0,04%	0,02%
32	0,02%	0,01%	0,02%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%
33	0,01%	0,01%	0,08%	0,00%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
34	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
35	0,23%	0,13%	0,35%	0,16%	0,20%	0,11%	0,03%	0,02%
36	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,00%	0,00%
37	0,20%	0,11%	0,32%	0,15%	0,17%	0,09%	0,03%	0,01%
<b>THD</b>	<b>11,50%</b>	<b>6,98%</b>	<b>3,57%</b>	<b>1,84%</b>	<b>9,76%</b>	<b>5,72%</b>	<b>0,34%</b>	<b>0,18%</b>

Fonte: Autor

## 7. RESULTADOS

A análise dos resultados permite as seguintes observações:

- a) Uma das investigações mais importantes intencionadas era verificar se a alternância de grupos de ligação dos transformadores no lado do primário, delta e estrela, faria com que a somatória das distorções fosse reduzida, de tal forma que pudesse ser dispensado o uso de filtros. Considerando as tabelas de 7 a 42, verifica-se que a utilização de conexões diferentes nos primários dos transformadores, alternando entre delta e estrela faz com que as distorções harmônicas sejam, de fato, mitigadas naturalmente, porém não o bastante para se evitar o uso de filtros, como pode ser observado nos pares de tabelas em cada cenário. As simulações com final “a” representam os resultados com transformadores com o lado do primário conectado em Delta, e as simulações com final “b” representam os resultados com transformadores com conexão alternada entre delta e estrela.
- b) Importante observar os requisitos do IEEE Std 519 [36]. O limite para as distorções de corrente deve ser até 7% e distorção de tensão até 5% para o nível de 480 V; e 3% para o nível de 13,8 kV, conforme Figura 29 e Figura 30.
- c) A Tabela 43 apresenta um resumo dos totais das simulações, cenários de 1 a 12. Os resultados destacados em vermelho estão acima dos limites do IEEE Std 519 e os em verde estão dentro dos limites aceitáveis.

Figura 29: IEEE Std 519: 2014, Tabela 1 – Limite de distorção de tensão

**Table 1—Voltage distortion limits**

Bus voltage $V$ at PCC	Individual harmonic (%)	Total harmonic distortion THD (%)
$V \leq 1.0$ kV	5.0	8.0
$1$ kV $< V \leq 69$ kV	3.0	5.0
$69$ kV $< V \leq 161$ kV	1.5	2.5
$161$ kV $< V$	1.0	1.5 <sup>a</sup>

<sup>a</sup>High-voltage systems can have up to 2.0% THD where the cause is an HVDC terminal whose effects will have attenuated at points in the network where future users may be connected.

Fonte: IEEE Std 519:2014 [36]

Figura 30: IEEE Std 519: 2014, Tabela 1 – Limite de distorção de corrente

**Table 2—Current distortion limits for systems rated 120 V through 69 kV**

Maximum harmonic current distortion in percent of $I_L$						
Individual harmonic order (odd harmonics) <sup>a, b</sup>						
$I_{sc}/I_L$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 20 <sup>c</sup>	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Fonte: IEEE Std 519: 2014 [36]

- d) O recurso de utilizar ligações diferentes nos primários dos transformadores beneficia somente o lado primário, uma vez que não se observa diferenças nos barramentos no lado do secundário, os quais apresentam distorções e fator de potência equivalentes, sem nenhuma alteração por conta do tipo de ligação.
- e) A Figura 22 representa o comportamento do fator de potência equivalente para os dois casos de grupos de ligação de transformadores, constatando que o fator de potência não é beneficiado pelas ligações diferentes dos transformadores, de modo que um banco de capacitores para correção é requerido, tanto em um caso como em outro.
- f) A demonstra que, para plantas com quantidade baixa de transformadores com potência na ordem de grandeza dos apresentados nas simulações não necessita de compensação de distorções no ponto de entrega, pois a distorção de tensão não chega a comprometer os limites estabelecidos para distorção de tensão, que é exigido pelas concessionárias, ver Figura 29 e comparar com as colunas de tensão nas tabelas de resultado dos cenários simulados. Deve-se observar que a não instalação dos filtros implica em que os equipamentos conectados aos secundários dos transformadores, estarão submetidos às distorções de corrente e às suas consequências, estando sujeitos a sobreaquecimento, vibração, deterioração dos cabos, atuação indevida de fusíveis ou relés de proteção. Os transformadores, além de estarem sujeitos às mesmas desvantagens, têm a capacidade limitada, devido à não correção do fator de potência.

- g) Considerando as Tabelas de 7 a 42, observa-se que a aplicação dos filtros constitui uma solução efetiva na mitigação das distorções harmônicas e corrigem o fator de potência.
- h) A Tabela 43 demonstra que ainda que os vários cenários comprovam a efetividade de aplicação de filtros, há composições melhores do que outras. Para a mesma potência reativa aplicada a composição em diferentes ordens ou a seleção da ordem de sintonia tem influência contundente no resultado, observe os cenários 2 e 3, nas tabelas de 9 a 12, a instalação de filtros sintonizados nas 7ª e 11ª ordens pode causar aumento na distorção de 5ª ordem, resultando numa distorção total pior com filtro comparada a distorção sem filtro. Ou seja, instalação de filtro sem um estudo cuidadoso pode ser pior do que não instalar filtros. Os cenários 2 e 3 foram, portanto, descartados como potencial solução.
- i) A utilização de três filtros do tipo *single-tuned* com potências proporcionais as contribuições do espectro harmônico é mais eficiente do que utilizar filtros com potências iguais. Constata-se essa conclusão através da comparação dos cenários 6 / 7 e 11 / 12.
- j) Os cenários 1 e 8, que foca na correção da maior contribuição, 5ª ordem, se mostraram satisfatórios, porém os cenários cujo banco é dividido e sintonizado em mais ordens se mostram mais eficientes. Portanto, conclui-se que vale a pena utilizar o banco de capacitores com seções diferentes para sintonizar em mais de uma ordem harmônica, indo da maior contribuição para a menor, sempre iniciando pela de maior contribuição.
- k) Os filtros não tiveram eficiência prejudicada por serem dimensionados para a potência nominal do transformador e no cenário simulado com 60% de fator de demanda, pois a impedância da fonte permanecendo a mesma não altera a sintonia do filtro. No entanto, o cuidado com o fator de potência deve ser observado.

Tabela 43: Resumo dos resultados totais, no nível de 480V e 13,8kV – Cenários de 1 a 12.

Cenário	CCM1&2				13,8kV			
	TDHi% S/ Filtro	TDHi% C/ Filtro	TDHv% S/ Filtro	TDHv% C/ Filtro	TDHi% S/ Filtro	TDHi% C/ Filtro	TDHv% S/ Filtro	TDHv% C/ Filtro
1a	11,20%	4,80%	5,82%	3,10%	11,10%	4,70%	0,62%	0,34%
1b	11,20%	4,90%	5,80%	3,10%	10,70%	4,60%	0,60%	0,30%
2a	11,20%	40,90%	5,80%	13,60%	11,10%	40,60%	0,60%	1,50%
2b	11,20%	41,70%	5,80%	13,70%	10,70%	39,00%	0,60%	1,40%
3a	11,20%	26,20%	5,80%	10,30%	10,80%	25,60%	0,60%	1,10%
3b	11,30%	30,30%	5,70%	12,00%	9,30%	22,80%	0,50%	1,00%
4a	11,30%	3,30%	5,70%	2,30%	10,80%	3,10%	0,50%	0,20%
4b	11,30%	3,30%	5,70%	2,30%	9,60%	2,80%	0,50%	0,20%
5a	11,10%	3,30%	5,90%	2,50%	10,60%	3,00%	0,70%	0,40%
5b	11,30%	3,20%	5,70%	2,30%	9,60%	2,70%	0,50%	0,20%
6a	11,20%	2,80%	5,80%	1,70%	10,80%	2,60%	0,60%	0,20%
6b	11,30%	2,80%	5,70%	1,70%	9,60%	2,30%	0,50%	0,20%
7a	11,20%	3,80%	5,80%	2,00%	10,80%	3,60%	0,60%	0,20%
7b	11,30%	3,90%	5,70%	2,00%	9,60%	3,20%	0,50%	0,20%
8a	11,50%	5,00%	3,60%	1,90%	11,00%	4,70%	0,40%	0,20%
8b	11,50%	5,00%	3,60%	1,80%	9,80%	4,20%	0,30%	0,20%
9a	11,50%	3,40%	3,60%	1,40%	11,00%	3,10%	0,40%	0,20%
9b	11,60%	3,30%	3,60%	1,40%	9,80%	2,80%	0,30%	0,10%
10a	11,50%	3,30%	3,60%	1,40%	11,00%	3,00%	0,40%	0,20%
10b	11,50%	3,30%	3,60%	1,40%	9,80%	3,00%	0,30%	0,10%
11a	11,50%	2,88%	3,59%	1,06%	11,06%	2,63%	0,38%	0,13%
11b	11,50%	2,77%	3,57%	1,06%	9,76%	2,32%	0,34%	0,12%
12a	11,50%	6,99%	3,59%	1,84%	11,06%	6,36%	0,38%	0,20%
12b	11,50%	6,98%	3,57%	1,84%	9,76%	5,72%	0,34%	0,18%

Fonte: Autor

- I) Os resultados finais se mostraram de uma maneira geral bastante favoráveis, porém deve-se levar em conta que os resultados são conceituais, pois a quantidade de transformadores contribuirá tanto mais quanto mais transformadores estiverem conectados no mesmo barramento, observe a Tabela 44 que mostra os resultados para o mesmo barramento com aumento da quantidade de transformadores para 20, no cenário “DD” com transformadores sempre em “Delta” no lado do primários e no cenário “DY” com grupos de ligação alternados em “Delta” e “ Estrela”. Constata-se, portanto, que a partir de uma certa quantidade de transformadores será necessário também se considerar uma compensação no nível de média tensão, a Tabela 44 mostra que para 20 transformadores conectados no barramento a distorção de tensão já ultrapassa o limite de 5% de distorção tolerados.

Tabela 44: Resultados totais no nível de 13,8kV com 20 transformadores conectados.

Cenário	13,8kV			
	TDHi%	TDHi%	TDHv%	TDHv%
	S/ Filtro	C/ Filtro	S/ Filtro	C/ Filtro
DD	12,76%	1,75%	5,59%	1,06%
DY	11,39%	1,57%	5,00%	0,96%

Fonte: Autor

- m) A queda de tensão no lado secundário dos transformadores e o fator de potência têm níveis mais favoráveis quando se aplicam filtros nessas posições. A vantagem de aplicar filtros no secundário é salvaguardar o equipamento e os demais a ele conectados, evitando todos os inconvenientes das distorções harmônicas e aliviando a corrente fundamental devido a correção do fator de potência. Por outro lado, o custo de aplicar filtros nos secundários dos transformadores em comparação com a instalação no primário é maior, porque quando se dimensiona filtro para média tensão se leva em consideração a demanda do conjunto dos transformadores, e dimensionando para a baixa tensão se leva em consideração a potência nominal do transformador, de modo que a potência instalada de filtros fica muito maior na baixa tensão, além de ser segregada em vários equipamentos distintos, cada um com sua estrutura, painel, componentes de proteção e controle, etc, ao passo que o filtro na média tensão se resume a um único conjunto. Cada projeto deve levar em consideração o aspecto econômico para tomar a melhor decisão.
- n) Os bancos de capacitores foram dimensionados para corrigir o fator de potência de 0,82 para 0,92. Para os cenários com demanda de 100% da potência nominal do transformador o alvo desejado fica ligeiramente abaixo, entre 0,9 e 0,91. Esse resultado pode ser atribuído a magnetização do transformador e as impedâncias dos cabos, de acabam por inserir reatâncias não consideradas inicialmente. Uma alternativa interessante, é utilizar os resultados do fluxo de potência e readequar o dimensionamento dos bancos de capacitores. No estudo em questão optou-se por não redimensionar o banco, pois estava sendo considerado um cenário severo, 100% da potência nominal do transformador. Na indústria esse cenário de operação não é desejável, mas pode ocorrer eventualmente, como exceção.

O mais comum é manter a operação no máximo entre 80% e 90% da capacidade o equipamento. Nesse cenário, o fator de potência fica dentro dos limites esperados e até acima. Com base nos resultados é possível estimar que para demanda de 80% da potência do transformador o Fator de potência já ficará na casa de 0,95, o projetista deve procurar inferir resultados com base nas observações que vai obtendo para procurar novos cenários de simulação para demonstrar e constatar os resultados desejados.

## 8. ANÁLISE ECONOMICA

Foi feita uma consulta ao mercado para verificar o custo dos filtros, os seguintes preços foram obtidos:

Tabela 45: Tomada de preço Filtro de Harmônicas 600kVAr, passivo *single-tuned* e ativo.

<b>Composição</b>	<b>Preço [R\$]</b>
Banco de capacitores sintonizado em 5ª ordem 3 x 200 kVAr – 480 V	R\$ 340.924,52
Filtro ativo 3 x 300 A – 480 V	R\$ 1.721.106,82

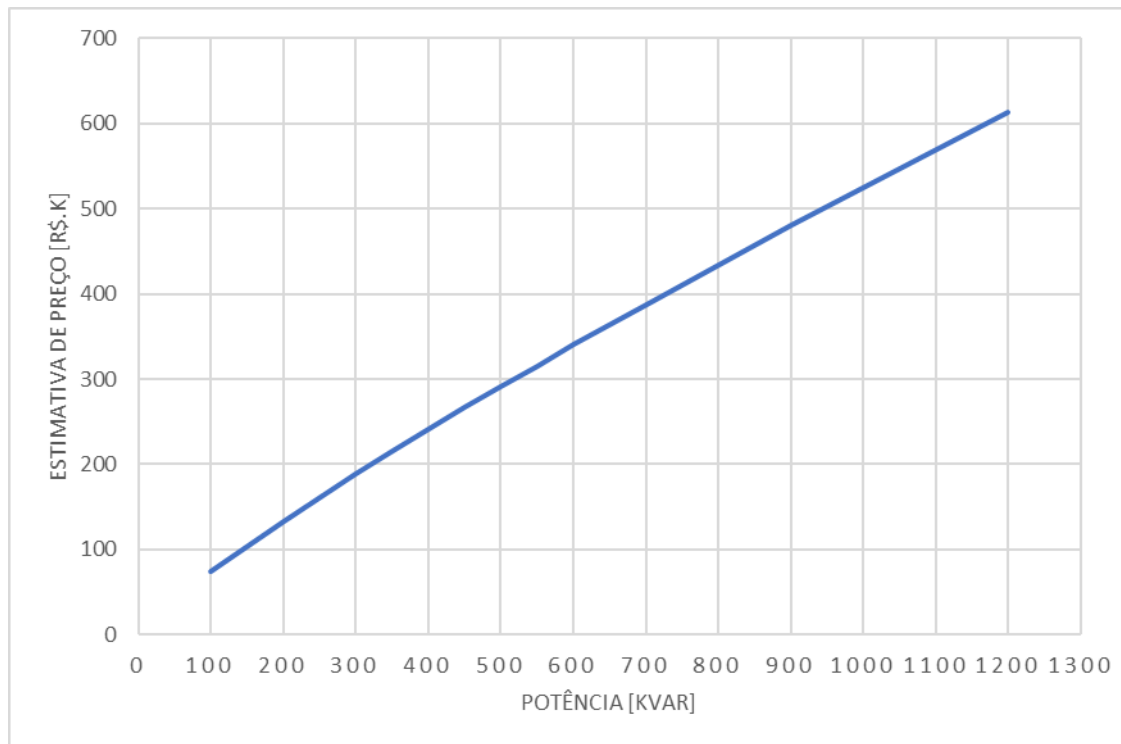
Fonte: Autor. Base de preço agosto/2023.

Foi realizada no mês de agosto de 2023 uma tomada de preço, para orientar o custo da solução através de filtros passivos (banco de capacitores sintonizados). Foi também cotada a solução equivalente para um filtro ativo. Não é o objetivo deste trabalho comparar a eficiência do filtro passivo com o ativo. Já se constatou que a solução com filtro passivo é suficientemente boa. A demonstração do custo do filtro ativo tem objetivo de ilustrar a desproporção de custos. Existem soluções híbridas que combinam os dois tipos, no entanto, presume-se que esse refinamento pode ser necessário somente para casos muito específicos. O objetivo deste trabalho foi abranger casos particulares de plantas industriais de processo contínuo, no entanto, os conceitos e as técnicas apresentadas poderiam ser estudados e utilizadas para qualquer tipo de instalação.

A Figura 31 traz uma curva para se ter um preço de referência para filtros passivos numa faixa de potência que cobre a maior parte das aplicações em baixa tensão. Ela pode ser utilizada como referência para se ter um indicativo de investimento. Importante observar que a variação de preço não é linear, pois há uma série de componentes que compõem o filtro e que faz com que o preço tenha uma parcela importante além dos capacitores e reatores, como o painel (chaparia), dispositivos de proteção, resistência

de aquecimento, tomada de uso geral ou específico, iluminação, ventilação, controlador de demanda, interface de rede, etc.

Figura 31: Estimativa de custo de Filtros Passivos: Potência x Custo [KR\$]



Fonte: Autor. Preço Budget, agosto/2023.

Este demonstrativo de custo tem objetivo de demonstrar que o custo da solução aplicando filtro passivos é significativamente mais econômica do que a solução em filtros passivos para a mesma potência e tensão.

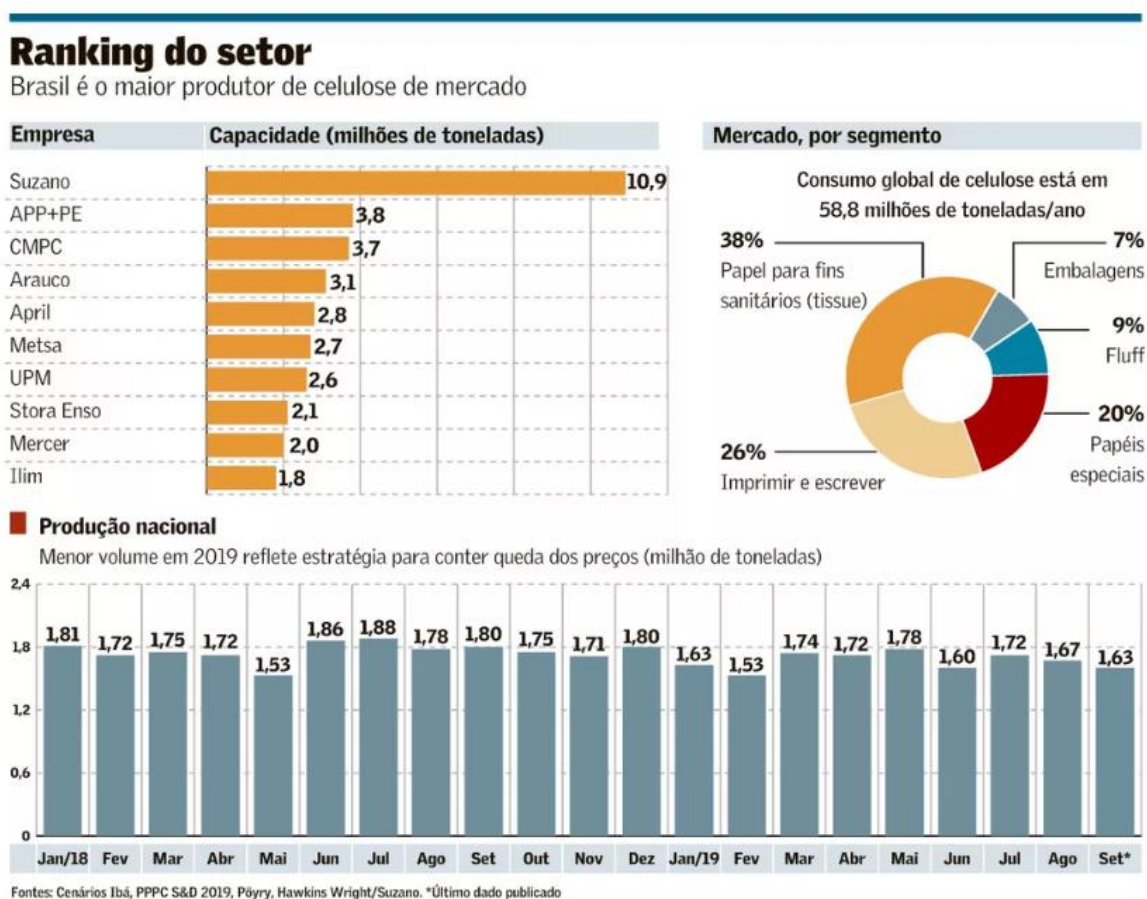
Em [5] Figura 31 pode-se ver um estudo comparativo de preços para mesmas potências, porém em tensões diferentes, neste caso somente para filtros passivos. O resultado do estudo mostra que a medida que o nível de tensão aumenta a tendência é ter filtros mais econômicos no nível de média tensão, muito fatores podem contribuir para este resultado, como: potencia total requiera na baixa tensão pode ser diferente da potencia total requerida no nível de média tensão; filtros em baixa tensão são montados em painéis fechados e testados, filtros em média tensão são, geralmente, montados em racks abertos, cujo custo da estrutura é menor, etc.

Independente da solução que seja adotada, média tensão ou baixa tensão, há ainda um fator importantíssimo que precisa ser levado em consideração: se vale a pena



investir no filtro. Para se verificar este ponto pode se comparar o custo de uma interrupção causada por a uma atuação indevida da proteção ou sobreaquecimento de qualquer equipamento por conta de distorção harmônica, e pegar o custo da “hora parada” pela perda de produção e comparar com custo do filtro.

Figura 32: Estimativa de custo de Filtros Passivos: Potência x Custo [KR\$]



Fonte: Revista valor econômico

A Figura 32 mostra o ranking dos maiores produtores de celulose no Brasil no ano de 2019, a produção das plantas são informações públicas, normalmente informadas nos demonstrativos de resultado das companhias. A linhas de produção mais modernas produzem cerca de 1,5 milhão de toneladas de celulose por ano [t/a], calcula-se a produção anual para 350 dias por ano, considerando 15 dias de parada programada para manutenção, assim a produção diária média tem que ser cerca de 4285 toneladas por dia [t/d].

A cotação da tonelada de celulose, por um de segmento específico do mercado de commodities, deve ser verificado em diferentes fontes, pois o preço varia conforme a

região, como China, Europa, Estados Unidos, etc. Foi consultado o portal “investing.com” e “bloomberg”, ainda há outras fontes mais especializadas e papel e celulose como “Fastmarkets RISI” e a “revistaopapel.org.br”. Consultando uma série histórica se verificou que desde 2010 essa cotação variou, subido e descendo, chegou a custar U\$1200 entre 2014 e 2018, variou para baixo nos últimos anos, chegou a ser cotada em US400/ton em anos mais recentes entre 2020 e 2022 e agora na cotação atual, abril/2024 o custo médio é de U\$800/ton, será adotado este valor para o desenvolvimento a seguir.

Partindo então do dado de produção diária de 4285 ton/dia, obtém-se produção média por hora:

$$\text{➤ } 4282 / 24\text{h} = 178,5 \text{ ton/h}$$

178,5 toneladas por hora a um custo de U\$800/ton, obtém-se o seguinte custo de hora pada por perda de produção:

$$\text{➤ } 178,5 * 800 = 142.800 \text{ US\$/h}$$

Agora no início do ano de 2024 o cambio médio do Dólar está em R\$5,00/US\$, conforme se verifica em qualquer plataforma de cambio, ou seja, o custo médio de hora pada em Reais [R\$], seria cerca de:

$$142.800 * 5 = 714.000 \text{ [R\$/h]}$$

Fabricas de celulose são concebidas para nunca pararem, uma parada, implica em um retorno muito demorado, uma vez que será necessário fazer limpeza em tubulações, equipamentos como refinadores, garantir a limpeza química de algumas partes do processo, abafamento da caldeira de recuperação química, etc, além, é claro, da solução do problema que causou a parada, uma vez eliminados todos os problemas que causaram a parada a retomada da produção envolve uma complexa série de procedimentos para garantir que a retomada seja segura e eficiente, primeiro são realizados testes mecânicos em alguns equipamentos, que são acionados com água antes de rodar com massa de celulose propriamente dita, a caldeira de recuperação e o digestor de celulose precisam ser reauecidos até o ponto de operação, esse procedimento pode levar até 12 horas dependendo do tamanho da caldeira, o equilíbrio

químico do processo também precisa ser controlado, todo o processo de cozimento e separação da lignina da celulose acontece em fase alcalina, a última etapa é ácida, então não pode haver mistura de fluido nas tubulações. Enfim, a retomada de produção de uma planta pode levar de algumas horas, 9 a 15 horas, até dois dias, ou seja, uma parada por atuação indevida de alguma proteção elétrica ou sobreaquecimento de algum transformador ou motor elétrico ou algum painel ou uma tulipa de disjuntor de uma fonte importante pode causar um prejuízo enorme, cerca de R\$700.000 por hora, numa planta com as características apresentadas acima. A Figura 33 ilustra a progressão do custo de perda de produção por hora parada, considerando que cada hora custa R\$714.000,00 pode-se observar que até 48 horas de parada este valor resulta em cerca de R\$ 35.000.000,00. Estes valores tornam inquestionável a importância de se atentar para distorções harmônicas a fim de evitar uma parada por conta deste problema.

Considerando transformadores do tamanho da ordem de grandeza de 2500kVA, transformador utilizado neste trabalho e que representa uma boa média do que é aplicado nas fabricas de celulose, pode-se concluir que uma única parada de uma hora já compensaria o investimento em filtro de harmônicas passivo no nível de baixa tensão.

Figura 33: Custo de perda de produção por hora parada [kR\$]



Fonte: autor

## 9. CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados, pode-se concluir que filtros passivos, compostos por banco de capacitores sintonizados, constituem uma solução eficiente para mitigação de distorções harmônicas.

As simulações indicaram que a variação da demanda no transformador entre 60 e 100% da potência nominal do transformador não causaram dessintonização no filtro. No entanto, é muito importante que em cada projeto esse ponto seja observado, assim como o resultado na correção do fator de potência. No caso de variação maior, o sistema elétrico pode ficar capacitivo, podendo causar sobretensão no barramento. Havendo essa possibilidade, é indicado que o filtro seja acionado em estágios, conforme o nível de demanda.

Os resultados indicaram que o filtro tem maior eficiência quando se divide a potência total em estágios sintonizados para diferentes ordens (5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup> e 11<sup>a</sup> ordens por exemplo; ou somente 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordens), ao invés de manter todo o conjunto sintonizado na ordem de maior contribuição (5<sup>a</sup> ordem, por exemplo). Lembra-se que essas ordens harmônicas se referem ao espectro típico de distorções causadas por conversores de frequência de 6 pulsos. Esse equipamento foi escolhido por ser uma das aplicações mais comuns na indústria.

O trabalho tinha objetivo de verificar se a combinação de transformadores com o primário conectado em delta e estrela poderiam mitigar naturalmente as distorções originadas no secundário. Foi constatado que sim, a mitigação natural existe, no entanto, não é suficiente para se evitar a instalação de filtros, conforme observado nos pares de tabelas de resultados em cada cenário.

Este trabalho constata que não se deve adotar “soluções prontas”, sem antes fazer um estudo avaliando diferentes alternativas técnicas e econômicas para se poder chegar a uma solução adequada para cada situação.

Ao percorrer o procedimento do item 5.3 para dimensionamento de filtros, se constatará que resultará em uma frequência de ressonância paralela diferente para cada potência e para cada ordem de sintonia. É muito importante que esse ponto seja observado no

projeto para que seja verificado os pontos de risco de ressonância e assim possam ser evitados, é possível se optar por um conjunto de filtros com eficiência de mitigação menor do que um outro conjunto em função da frequência de ressonância resultante, que eventualmente ofereça condição de segurança melhor para o projeto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Nassif, Alexandre; Xu, Wilsun; Freitas, Walmir. An investigation on the selection of filter topologies for passive filter applications. *IEEE PES General Meeting, July 2010*, pp.1-1.
- [2] Das, J.C., "Passive Filters-Potentialities and Limitations", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Volume 40, No.1, pp. 232-241, 2004.
- [3] Zubair Ahmed Memon, Mohammad Aslam Uquaili, Mukhtiar Ali Unar "Harmonics Mitigation of Industrial Power System Using Passive Filters" - *Mehran University Research Journal of Engineering & Technology*, Volume 31, No. 2, April, 2012 ;
- [4] S.N. AL. Yousif, M. Z. C. Wanik, A. Mohamed "Implementation of Different Passive Filter Designs for Harmonic Mitigation" - *National Power & Energy Conference (PECon) 2004 Proceedings*, Kuala Lumpur, Malaysia
- [5] Cornelia Kawann, Alexander E. Emanud "PASSIVE SHUNT HARMONIC FILTERS FOR LOW AND MEDIUM VOLTA.GE: A COST COMPARISON STUDY - *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 11, No. 4, November 1996
- [6] A. A. Eajal, M. E. El-Hawary "Optimal Capacitor Placement and Sizing in Distorted Radial Distribution Systems Part I: System Modeling and Harmonic Power Flow Studies
- [7] Izhar, M; Hadzer, C.M ; Syafrudin, M ; Taib, S ; Idris, S. Performance for passive and active power filter in reducing harmonics in the distribution system. *PECon 2004. Proceedings. National Power and Energy Conference, 2004*, 2004, pp.104-108
- [8] G. W. Chang, S. Y. Chu, H. L. Wang "A New Approach for Placement of Single-Tuned Passive Harmonic Filters in a Power System"
- [9] M. Jzhar, C. M. Hadzer, S. Masri and S. Idris "A Study of the Fundamental Principles to Power System Harmonic" - *National Power and Energy Conference (PECon) 2003 Proceedings*, Bangi, Malaysia
- [10] DAMIANA, GONZALEZ. AND JOHNC. MCCALL " Design of Filters to Reduce Harmonic Distortion in Industrial Power Systems" - *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS*, VOL. IA-23. NO. 3. MAY/JUNE 1987
- [11] S. L. CLARK, P. FAMOURI " Elimination of Supply Harmonics " - *IEEE Industry Applications Magazine* B Marth/April 1997

- [12] Thomas H. Ortmeyer, Takashi Hiyama "Distribution System Harmonic Filter Planning"
- [13] Ahmed Faheem Zobaa - The Optimal Passive Filters to Minimize Voltage Harmonic Distortion at a Load Bus - IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 20, NO. 2, APRIL 2005.
- [14] Chih-Ju Chou, Chih-Wen Lio, June-Yawn Lee, and Kune-Da Lee " Optimal Planning of Large Passive-Harmonic-Filters Set at High Voltage Level" - IEBE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. IS. NO. I , FEBRUARY 2000.
- [15] Franklin M. P. Pamplona and Benemar A. Soma "Harmonic Passive Filter Planning In Radial Distribution Systems Using Genetic Algorithms" - 2004 IEEEWPEs Transmission & Distribution Conference & Exposition: Latin America
- [16] XIAODONG LIANG & OBINNA ILOCHONWU " Passive Harmonic Filter Design Scheme" - IEEE INDUSTRY APPLICATIONS MAGAZINE - SEPT/OCT 2011
- [17] Shady Hossam Eldeen Abdel Aleem, Ahmed Faheem Zobaa, Senior and Mohamed Mamdouh Abdel Aziz " Optimal C-Type Passive Filter Based on Minimization of the Voltage Harmonic Distortion for Nonlinear Loads" - IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 59, NO. 1, JANUARY 2012
- [18] O. Fatih Kececioglu, Hakan Acikgoz and Mustafa Sekkeli "Advanced configuration of hybrid passive filter for reactive power and harmonic compensation" - Kececioglu et al. SpringerPlus (2016)
- [19] Edi Sarwono " Investigate quality factor of single tuned passive filter to reduce harmonic of LED lamp " - Journal of physics. Conference series, 2020
- [20] Mansoor Ahmed Soomro, Anwar Ali Sahito, Irfan Ahmed Halepoto and Kamran Kazi " Single Tuned Harmonic Shunt Passive Filter Design for Suppressing Dominant Odd Order Harmonics in order to Improve Energy Efficiency" - Indian Journal of Science and Technology, Vol 9(47), December 2016
- [21] Wei-Hsiang Ko, Martti Tuomainen " Design and application of a single - tuned passive harmonic filter to suppress harmonic distortion and resonance for railway traction power systems—A case study " - IET Electrical Systems in Transportation, December 2021
- [22] Gary W. Chang, Hung-Lu Wang, and Shou-Yung Chu " Strategic Placement and Sizing of Passive Filters in a Power System for Controlling Voltage Distortion" - IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 19, NO. 3, JULY 2004

- [23] Jakkapong Tupsa-ard, Chaiya Chamchoy and Thavatchai Tayjasanant " High-Voltage Passive Harmonic Filter Design" - The 8th Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand - Conference 2011
- [24] Buddhadeva Sahoo, Mohammed M. Alhaider and Pravat Kumar Rout " Effective Harmonic Cancellation Technique for a Three-Phase Four-Wire System" - *Energies* 2022, 15, 7526. <https://doi.org/10.3390/en15207526>
- [25] Ahmed S. Abbas, Ragab A. El-Sehiemy, Adel Abou El-Ela, Eman Salah Ali, Karar Mahmoud, Matti Lehtonen and Mohamed M. F. Darwish " Optimal Harmonic Mitigation in Distribution Systems with Inverter Based Distributed Generation" - *Generation. Appl. Sci.* 2021, 11, 774. <https://doi.org/10.3390/app11020774>
- [26] Ramy Ali and Terence O'Donnell "Analysis and Mitigation of Harmonic Resonances in Multi-Parallel Grid-Connected Inverters: A Review" - *Energies* 2022, 15, 5438. <https://doi.org/10.3390/en15155438>
- [27] IEC Standard 60871 - 1: Shunt capacitors for a.c. power system having a rated voltage above 1000 V (2014)
- [28] Power capacitors – Low-voltage power factor correction banks (2017)
- [29] IEEE Std 3002.8 - Recommended Practice for Conducting Harmonic Studies and Analysis of Industrial and Commercial Power Systems (2018)
- [30] G. K. Singh "Power system harmonics research: a survey" – EUROPEAN TRANSACTIONS ON ELECTRICAL POWER, *Euro. Trans. Electr. Power* 2009; 19:151–172
- [31] Johnson, James R. (2002). Proper Use of Active Harmonic Filters to Benefit Pulp and Paper Mills. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 38, n° 3. May/jun 2002.
- [32] Kececioglu, O.; Acikgoz, Hakan; Sekkeli, Mustafa. Advanced configuration of hybrid passive filter for reactive power and harmonic compensation. *National Power and Energy Conference (PeCon) 2003 Proceedings*, Bangi, Malaysia.
- [33] X. Yao, "The method for designing the third order filter," in *Proc. 8th IEEE ICHQP*, Oct. 1998, pp. 139–142.]
- [34] PRODIST – Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica – ANEEL.
- [35] ABNT NBR IEC 60831-1 - Capacitores de potência auto-regenerativos para sistemas CA, com tensão máxima de 1 000 V - Parte 1: Generalidades -



Desempenho, ensaios e classificação - Requisitos de segurança - Guia para instalação e operação

- [36] IEEE Std 519 - 2014. Recommended Practice and. Requirements for Harmonic Control in. Electric Power Systems.
- [37] IEEE Std 3002.8-2018 - IEEE Recommended Practice for Conducting Harmonic Studies and Analysis of Industrial and Commercial Power Systems.
- [38] Procedimentos de Rede ONS – Submódulo 2.9 - Requisitos mínimos de qualidade de energia elétrica para acesso ou integração à Rede Básic
- [39] SKM Power Tools, version 9,0,0,4, SKM Systems Analysis, Inc..
- [40] ATPDraw Windows version 7.3, graphical version of ATP of the Electromagnetic Transient Program (EMTP).