

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**RAMON RAVANI DEL PIERO**

**ESTUDO DA CONEXÃO DE UM FILTRO HÍBRIDO SÉRIE  
EM UMA MICRORREDE CA COM O FILTRO ATIVO EM  
SÉRIE COM A REDE ELÉTRICA**

VITÓRIA  
2021

RAMON RAVANI DEL PIERO

**ESTUDO DA CONEXÃO DE UM FILTRO HÍBRIDO SÉRIE  
EM UMA MICRORREDE CA COM O FILTRO ATIVO EM  
SÉRIE COM A REDE ELÉTRICA**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Ramon Ravani Del Piero**, apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Hélio Marcos André Antunes

VITÓRIA  
2021

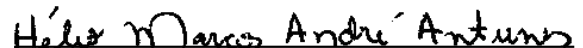
RAMON RAVANI DEL PIERO


**ESTUDO DA CONEXÃO DE UM FILTRO HÍBRIDO SÉRIE  
EM UMA MICRORREDE CA COM O FILTRO ATIVO EM  
SÉRIE COM A REDE ELÉTRICA**


Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Ramon Ravani Del Piero**, apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Aprovada em 14 de maio de 2021.

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

  
**Prof. Dr. Hélio Marcos André Antunes**  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador

  
**Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos**  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Examinador

  
**Prof. Dr. Vinícius Secchin de Melo**  
Instituto Federal do Espírito Santo  
Examinador

Aos meus pais Marcia e Robson e à minha namorada Fádua.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Marcia e Robson, por todo o suporte prestado durante toda minha vida e especialmente durante este curso de engenharia elétrica na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Agradeço também a minha namorada Fádua, que sempre me apoiou durante as minhas jornadas, fornecendo apoio e me trazendo conforto nos momentos necessários.

Agradeço aos meus colegas de curso que me acompanharam por todo o trajeto. E agradeço especialmente ao meu orientador o Professor Dr. Hélio Marcos André Antunes, pela sua orientação e apoio nesse período tão difícil.

## RESUMO

Nos últimos anos, o setor de energia elétrica tem passado por uma grande transformação com a expansão da geração distribuída e, dentro desse contexto, as microrredes (MRs) vêm ganhando destaque. Uma MR pode ser definida como um conjunto de cargas elétricas, microfuentes de geração de energia elétrica e elementos armazenadores de energia, podendo operar no modo ilhado ou conectado à rede de distribuição de energia elétrica. Porém, como uma MR baseia-se em conversores eletrônicos, a mesma possui baixa potência de curto-circuito, o que pode torná-la suscetível a problemas de qualidade da energia elétrica (QEE). Com presença de geradores distribuídos e cargas não lineares, as taxas de distorção harmônica de tensão e corrente são substancialmente incrementadas na MR, e é necessário o uso de filtros harmônicos dos tipos passivo, ativo ou híbrido. Neste trabalho foi realizado o estudo da aplicação de um filtro híbrido série em uma MR de corrente alternada (CA) trifásica com controle centralizado, onde o filtro ativo estará conectado em série com a rede e o filtro passivo em paralelo à carga. Para se alcançar o resultado foi necessário desenvolver e modelar o filtro híbrido série e implementá-lo em uma MR CA escolhida. Por fim, por meio de simulações no *software* Simulink foi avaliado o desempenho do filtro híbrido série quanto a compensação harmônica e melhoria na QEE da MR. Os resultados obtidos comprovam que o filtro proposto é eficaz para a melhora da qualidade da energia elétrica utilizando um filtro ativo com potência nominal de aproximadamente 7% da potência consumida pela carga.

Palavras-chave: Microrrede. Filtros passivos. Filtro híbrido série. Qualidade da energia elétrica. Compensação harmônica.

## **ABSTRACT**

In the last few years, the electric power sector has undergone a major transformation with the expansion of distributed generation and, within this context, the microgrids are gaining prominence. A microgrid can be defined as a set of electrical loads, distributed generators and energy storage elements, which can operate in island mode or connected to the main grid. However, as a microgrid is based on electronic converters, it has low short-circuit power capabilities, which can make it susceptible to problems of Power Quality Problems. With the presence of distributed generators and non-linear loads, such as voltage and current harmonic distortion rates are increased in the MG, and it is necessary to use passive, active or hybrid harmonic filters to compensate it. In this work it will be proposed the study of the application of a series hybrid filter in a three-phase AC microgrid with centralized control, where the active filter will be connected in series with the main grid and the passive filter in parallel to the load. To achieve the result it was necessary to develop and model the series hybrid filter and implement it in a microgrid AC. Finally, through simulations in the Simulink software, the performance of the series hybrid filter was evaluated in terms of harmonic compensation and improvement in the power quality of microgrid. At the end of the study, the results obtained prove that the proposed filter is effective for improving the power quality using an active filter with nominal power of only 7% of the power consumed by the load.

**Keywords:** Microgrid. Passive filters. Series Hybrid Filter. Electric Power Quality. Harmonic compensation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Configuração típica de uma microrrede .....	21
Figura 2 – Configuração do conversor formador de rede .....	23
Figura 3 – Configuração do conversor supridor de rede .....	24
Figura 4 – Configuração do conversor supridor de rede .....	25
Figura 5 – Microrrede com barramento CC .....	26
Figura 6 – Microrrede com barramento CA .....	27
Figura 7 – Efeito da distorção de tensão em sistema de potência .....	29
Figura 8 – Estrutura para correção de distorção harmônica .....	32
Figura 9 – Alguns tipos de filtros passivos. (a) Filtro sintonizado simples, (b) filtro sintonizado duplo e (c) filtro passa altas .....	33
Figura 10 – Filtros ativos. (a) Filtro série paralelo e (b) filtro série ativo .....	35
Figura 11 – Filtro híbrido paralelo .....	36
Figura 12 – Filtro híbrido série .....	38
Figura 13 – Controle de tensão no capacitor .....	39
Figura 14 – Diagrama de blocos do DSOGI-PLL .....	40
Figura 15 – Diagrama de blocos para detecção harmônica .....	41
Figura 16 – Configuração da microrrede em estudo .....	43
Figura 17 – Modelo do circuito da MR .....	47
Figura 18 – Modelo do circuito da MR em modo conectado à rede com a carga como fonte poluidora .....	47
Figura 19 – Modelo do circuito da MR em modo conectado à rede com o SFCR como fonte poluidora .....	47
Figura 20 – Característica de filtragem modo conectado a rede – Relação entre $ISh$ e $ILh$ ....	49
Figura 21 – Característica de filtragem modo conectado a rede – Relação entre $IFh$ e $ILh$ ....	49
Figura 22 – Característica de filtragem modo conectado a rede – Relação entre $IInvh$ e $ILh$ .....	50
Figura 23 – Característica de filtragem modo conectado a rede – Relação entre $ISh$ e $IInvh$ .....	50
Figura 24 – Característica de filtragem modo conectado a rede – Relação entre $IFh$ e $IInvh$ .....	51
Figura 25 – Modelo do circuito da MR em modo ilhado com a carga como fonte poluidora .....	52



Figura 26 – Modelo do circuito da MR em modo conectado à rede com o SFCR como fonte poluidora .....	52
Figura 27 – Característica de filtragem modo ilhado – Relação entre $ISh$ e $ILh$ .....	53
Figura 28 – Característica de filtragem modo ilhado – Relação entre $IFh$ e $ILh$ .....	54
Figura 29 – Característica de filtragem modo ilhado – Relação entre $IInvh$ e $ILh$ .....	54
Figura 30 – Característica de filtragem modo ilhado – Relação entre $ISh$ e $IInvh$ .....	55
Figura 31 – Característica de filtragem modo ilhado – Relação entre $IFh$ e $IInvh$ .....	55
Figura 32 – Modelo da MR completo .....	56
Figura 33 – Subsistema: conversor formador de rede .....	57
Figura 34 – Subsistema: filtro ativo ideal e seu sistema de controle.....	57
Figura 35 – Subsistema: filtro passivo com três estágios.....	58
Figura 36 – Subsistema: carga não linear .....	59
Figura 37 – Subsistema: carga linear.....	59
Figura 38 – Subsistema: sistema fotovoltaico conectado à rede .....	59
Figura 39 – Modelo da MR no modo conectado à rede .....	60
Figura 40 – Distorção harmônica de tensão e corrente no PAC.....	61
Figura 41 – Distorção harmônica de tensão e corrente na rede elétrica .....	62
Figura 42 – Espectro da tensão. (a) Sem filtro e (b) com filtro híbrido série.....	63
Figura 43 – Espectro da corrente. (a) Sem filtro e (b) com filtro híbrido série.....	63
Figura 44 – Modelo da MR em modo ilhado .....	64
Figura 45 – Distorção harmônica de tensão e corrente no PAC.....	65
Figura 46 – Distorção harmônica de tensão e corrente no CFR.....	65
Figura 47 – Espectro da tensão. (a) Sem filtro e (b) com filtro híbrido série.....	66
Figura 48 – Espectro da tensão. (a) Sem filtro e (b) com filtro híbrido série.....	66
Figura 49 – Tensão de fase no PAC - $V_{an}$ no domínio do tempo. (a) Sem filtro, (b) filtro passivo e (c) filtro híbrido .....	67
Figura 50 – Corrente de fase no PAC - $I_{an}$ no domínio do tempo. (a) Sem filtro, (b) filtro passivo e (c) filtro híbrido .....	68
Figura 51 – Tensão de fase na rede - $V_{an}$ no domínio do tempo. (a) Sem filtro, (b) filtro passivo e (c) filtro híbrido .....	68
Figura 52 – Tensão no filtro ativo .....	69
Figura 53 – Corrente no filtro passivo.....	69
Figura 54 – Fluxo de potência ativa .....	70
Figura 55 – Fluxo de potência reativa .....	70

Figura 56 – Fator de potência no PAC da MR .....	71
Figura 57 – Tensão de fase no PAC - $V_{an}$ no domínio do tempo. (a) Sem filtro, (b) Filtro passivo e (c) Filtro híbrido .....	72
Figura 58 – Corrente de fase no PAC - $I_{an}$ no domínio do tempo. (a) Sem filtro, (b) Filtro passivo e (c) Filtro híbrido .....	72
Figura 59 – Tensão de fase na rede - $V_{an}$ no domínio do tempo. (a) Sem filtro, (b) Filtro passivo e (c) Filtro híbrido .....	73
Figura 60 – Tensão no filtro ativo .....	73
Figura 61 – Corrente no filtro passivo.....	74
Figura 62 – Fluxo de potência ativa .....	74
Figura 63 – Fluxo de potência reativa .....	75
Figura 64 – Fator de potência no PAC da MR .....	75

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Limites de distorção harmônica.....	30
Quadro 2 – Limites de distorção harmônica total da tensão.....	31
Quadro 3 – Limites de distorção harmônica total da corrente.....	31
Quadro 4 – Parâmetros da microrrede em estudo.....	44
Quadro 5 – Parâmetros do filtro passivo composto.....	46
Quadro 6 – Valores de DHT para cada estágio da simulação no modo conectado.....	61
Quadro 7 – Valores de DHT para cada estágio da simulação no modo ilhado.....	64
Quadro 8 – Tensão e corrente no filtro ativo no modo conectado a rede.....	76
Quadro 9 – Tensão e corrente no filtro ativo no modo ilhado.....	77

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BT	Baixa Tensão
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CCMR	Centro de Controle da Microrrede
CFR	Conversor Formador de Rede
CL	Controlador Local
DHT	Distorção Harmônica Total
DSOGI-PLL	<i>Dual Second Order Generalized Integrator PLL</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
MR	Microrrede
MT	Média Tensão
OM	Operador de Mercado
ORD	Operador da Rede de Distribuição
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PLL	<i>Phase Locked Loop</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
SRF	<i>Synchronous Reference Frame</i>
VSI	<i>Voltage source inverter</i>
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo

## LISTA DE SÍMBOLOS

$h$	Ordem harmônica (número inteiro);
$V_h$	Valor RMS da componente de tensão harmônica $h$ (V)
$V_1$	Valor RMS da tensão fundamental (V)
$I_h$	Valor RMS da componente de corrente harmônica $h$ (A)
$I_1$	Valor RMS da corrente fundamental (A)
$I_{FA}$	Corrente de compensação do filtro ativo (A)
$K_{ap}$	Ganho do filtro híbrido paralelo
$I_{Sh}$	Componente harmônica de corrente da fonte (A)
$V_c$	Tensão de compensação do filtro ativo (V)
$K_v$	Ganho do filtro híbrido série
$V_t$	Componente harmônica de tensão da carga (V)
$I$	Vetor corrente de entrada: [ $I_a, I_b, I_c$ ]
$V_b^*$	Vetor tensão para controle no capacitor: [ $V_{ba}^*, V_{bb}^*, V_{bc}^*$ ]
$V_h^*$	Vetor tensão para compensação harmônica: [ $V_{ha}^*, V_{hb}^*, V_{hc}^*$ ]
$V_c^*$	Vetor tensão de referência para o filtro ativo: [ $V_{ca}^*, V_{cb}^*, V_{cc}^*$ ]
$i_d$	Corrente de eixo direto (A)
$i_q$	Corrente em quadratura (A)
$i_0$	Sequência zero no referencial síncrono
$i$	Corrente nas fases $i_a, i_b, i_c$ no domínio do tempo (A)
$\theta_1$	Ângulo da transformação no referencial síncrono do PLL (°)
$X_L$	Valor da reatância indutiva ( $\Omega$ )
$X_C$	Valor da reatância capacitiva ( $\Omega$ )
$Q_{Comp}$	Valor da compensação de reativos fundamental (VAr)
$V_{ef}$	Valor da tensão eficaz (V)
$Q_{pf}$	Fator de qualidade do filtro passa-faixa
$Q_{pa}$	Fator de qualidade do filtro passa alta
$R_h$	Resistência do filtro passivo ( $\Omega$ )
$L_h$	Indutância do filtro sintonizado no harmônico de ordem $h$ ( $\Omega$ )
$C_h$	Capacitância do filtro sintonizado no harmônico de ordem $h$ ( $\Omega$ )
$I_{Lh}$	Componente harmônica de corrente da carga (A)
$I_{Fh}$	Componente harmônica de corrente da carga (A)

$Z_{fp}$	Valor da impedância do filtro passivo ( $\Omega$ )
$Z_S$	Valor da impedância da rede ( $\Omega$ )
$Z_f$	Valor da impedância do ramo de filtragem do inversor do SFCR ( $\Omega$ )
$Z_2$	Valor da impedância do ramo 2 do filtro do inversor do SFCR ( $\Omega$ )
$Z_{inv}$	Valor da impedância do inversor para a condição em que a carga é poluidora ( $\Omega$ )
$Z_t$	Valor da impedância do secundário do transformado do CFR ( $\Omega$ )

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa .....</b>	<b>17</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>18</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>18</b>
<b>1.4</b>	<b>Metodologia .....</b>	<b>18</b>
<b>1.5</b>	<b>Organização do Trabalho .....</b>	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>MICRORREDES.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1</b>	<b>As Microrredes de Energia Elétrica .....</b>	<b>20</b>
2.1.1	Componentes das microrredes .....	22
2.1.1.1	Microfontes.....	22
2.1.1.2	Controladores.....	22
2.1.1.3	Conversores eletrônicos.....	23
2.1.1.4	Estruturas de armazenamento de energia .....	25
2.1.2	Topologias das microrredes .....	25
<b>2.2</b>	<b>Comentários Sobre Microrredes .....</b>	<b>27</b>
<b>3</b>	<b>DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM MICRORREDES.....</b>	<b>28</b>
<b>3.1</b>	<b>Distorções Harmônicas.....</b>	<b>28</b>
<b>3.2</b>	<b>Filtros .....</b>	<b>31</b>
<b>3.3</b>	<b>Filtros Passivos.....</b>	<b>32</b>
<b>3.4</b>	<b>Filtros Ativos .....</b>	<b>34</b>
<b>3.5</b>	<b>Filtros Híbridos.....</b>	<b>35</b>
3.5.1	Filtro híbrido paralelo .....	35
3.5.2	Filtro híbrido série .....	36
<b>3.6</b>	<b>Controle do Filtro Híbrido Série.....</b>	<b>38</b>
3.6.1	Método de sincronização PLL .....	39
3.6.2	Método de detecção harmônica .....	40
<b>3.7</b>	<b>Comentário Sobre Harmônicos .....</b>	<b>42</b>
<b>4</b>	<b>ESTUDO DA APLICAÇÃO DO FILTRO HÍBRIDO SÉRIE EM UMA MICRORREDE .....</b>	<b>43</b>
<b>4.1</b>	<b>A Microrrede em Estudo .....</b>	<b>43</b>

<b>4.2</b>	<b>Escolha do Filtro Passivo .....</b>	<b>44</b>
<b>4.3</b>	<b>Escolha do Ganho do Filtro Ativo (<math>Kv</math>).....</b>	<b>46</b>
<b>4.4</b>	<b>Simulação do Filtro Híbrido na MR.....</b>	<b>56</b>
<b>4.5</b>	<b>Resultados de Simulação.....</b>	<b>60</b>
4.5.1	Análise no modo conectado.....	60
4.5.2	Análise no modo ilhado.....	64
<b>4.6</b>	<b>Grandezas Elétricas.....</b>	<b>67</b>
4.6.1	Análise no modo conectado.....	67
4.6.2	Análise no modo ilhado.....	71
<b>4.7</b>	<b>Projeto do Filtro Ativo .....</b>	<b>76</b>
4.7.1	Modo conectado à rede.....	76
4.7.2	Modo ilhado.....	76
4.7.3	Escolha do filtro.....	77
<b>4.8</b>	<b>Comentários Sobre os Resultados da Simulação .....</b>	<b>77</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>79</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>81</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A demanda energética mundial, em conjunto com as preocupações ambientais, vem aumentando com o passar dos anos. Tendo em vista que a matriz elétrica mundial é baseada em combustíveis fósseis, que são limitados e poluem o meio ambiente, o sistema elétrico tem se direcionado à geração distribuída. Isso também se deve ao alto custo e a baixa eficiência das grandes plantas centralizadas de geração. Sendo que apenas 35%, em média, da energia primária utilizada nas centrais geradoras chega aos consumidores na forma de energia elétrica e a extensa estrutura radial de transmissão torna as áreas consumidoras vulneráveis (TAHIM, 2015).

Com o crescimento da geração distribuída no sistema de baixa tensão (BT), o conceito de microrrede tem ganhado força, sendo uma abordagem que permite controle local de uma geração distribuída, eliminando a necessidade de uma central de distribuição. Durante a ocorrência de distúrbios, a geração e cargas locais podem se separar do sistema de distribuição, ilhando a MR sem prejudicar a integridade da rede de distribuição, tornando possível alimentar a rede elétrica com geradores internos (LASSETER, 2002).

Com o avanço da eletrônica de potência foi possível desenvolver mais interfaces entre fontes renováveis de geração distribuída e as MRs. Entretanto uma MR é um sistema elétrico pouco robusto, com baixa potência de curto-circuito, uma vez que se baseia em geradores constituídos por conversores eletrônicos programáveis, o que a torna muito suscetível a problemas com a qualidade de energia elétrica, dentre os quais pode-se citar desequilíbrios de tensão, desvios de frequência e distorções harmônicas. E, com a expansão das cargas não lineares, as taxas de distorção harmônica de tensão e corrente no ponto de acoplamento comum (PAC) vêm aumentando consideravelmente (ANTUNES et al., 2018).

As correntes harmônicas podem ser eliminadas por meio de filtros harmônicos visando uma melhoria na QEE, sendo também utilizados para regular o fator de potência da instalação. Existem três tipos de filtros que podem reduzir a distorção harmônica, os passivos, ativos e híbridos. Os passivos são compostos de elementos como resistores, indutores e capacitores. Já os ativos são compostos por componentes ativos, como os IGBTs, permitindo assim que o filtro elimine diferentes frequências harmônicas (ALEMAM et al., 2018). E, por último, os

híbridos, que são formados pela associação entre um filtro ativo e um passivo (ANTUNES, 2018).

Neste trabalho foi feita a análise de uma MR CA com controle centralizado formada por um sistema de filtragem híbrida série, buscando reduzir os efeitos das correntes harmônicas provenientes das cargas não lineares e do gerador distribuído no sistema da rede de distribuição, de modo a obter uma melhoria no funcionamento das MRs e, conseqüentemente, uma melhor QEE. Foram realizadas simulações computacionais no *software Matlab/Simulink* por meio da modelagem desenvolvida para o sistema em estudo.

### **1.1 Justificativa**

Tendo em vista a necessidade de novas fontes de energias para suprir a demanda mundial, o crescimento da geração distribuída é evidente. Simultaneamente, as MRs vêm ganhando notoriedade por serem uma resposta barata e eficiente, incorporando fontes renováveis e com menores perdas de transmissão. Com isso surge a necessidade de se realizarem estudos e melhorias nesses tipos de sistemas.

Devido ao aumento da utilização de cargas não lineares, presença de geradores distribuídos e utilização conversores, as taxas de distorção harmônicas aumentaram consideravelmente, afetando o desempenho da rede e das cargas conectadas a ela. Essas distorções causam alterações na forma de onda da corrente elétrica e da tensão, gerando assim desequilíbrio entre fases, presença de reativos e distúrbios na tensão, podendo ser afundamentos, elevações e a flutuação de tensão, piorando, assim, a QEE do sistema. Buscando solucionar estes problemas o estudo da aplicação de filtros híbridos vem ganhando notoriedade. Esses podem reduzir as taxas harmônicas indesejadas da rede, possibilitando, desta forma, uma melhoria na QEE.

O filtro híbrido série tem como vantagem a diminuição do custo do filtro ativo, visto que a configuração do sistema proporciona uma menor potência no filtro ativo, além de eliminar o problema de ressonância dos filtros passivos sendo mais fácil sintonizá-los na frequência desejada. Sendo assim bem visado na solução do problema em questão (ANTUNES, 2009).

## 1.2 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo analisar, a partir de modelagem e simulação computacional, a implementação de um filtro híbrido série conectado a uma MR CA trifásica, com o intuito de melhorar a QEE.

## 1.3 Objetivos Específicos

A seguir são apresentados os principais objetivos específicos do trabalho:

- Compreender o funcionamento do filtro híbrido série na MR;
- Otimizar a escolha do filtro para obter os melhores resultados;
- Avaliar o efeito do ganho nas distorções de tensão e corrente;
- Avaliar o desempenho do filtro utilizado na MR em questão.

## 1.4 Metodologia

Neste trabalho serão realizados estudos direcionados à implementação de um filtro híbrido série em uma MR CA trifásica, com o filtro ativo em série com rede. Portanto, quanto à sua natureza, trata-se de uma pesquisa aplicada. Desse modo, serão feitas pesquisas sobre os temas abordados levando em consideração os trabalhos já desenvolvidos nesta área, visando identificar qual será o desempenho do filtro na MR e comparando com outros já utilizados. Sob o ponto de vista de objetivos, é classificado como uma pesquisa explicativa, pois visa encontrar os parâmetros do filtro e analisar o seu desempenho. Já do ponto de vista dos procedimentos técnicos, é uma pesquisa experimental, pois submeterá o filtro a influências de variáveis visando obter os resultados desejados. E do ponto de vista da abordagem do problema, a pesquisa é considerada como quantitativa, já que traduz o desempenho do filtro em números, sendo possível ser analisado em gráficos e em valores.

## 1.5 Organização do Trabalho

Este trabalho foi dividido em seis seções, sendo a primeira uma seção introdutória, consistindo em uma breve abordagem do tema e uma explicação de como foi desenvolvido o texto, assinalando objetivos, métodos e a importância do estudo.

Na seção 2 será apresentado o referencial teórico referente às MRs onde serão abordados conceitos, funcionamentos, componentes e topologias. Entre os componentes serão abordados as microfontes, os controladores, os conversores e as estruturas de armazenamento de energia.

Na seção 3 será exposta a problemática das distorções harmônicas e serão introduzidos os filtros como uma possível solução. Nesta seção será dada ênfase a estes filtros, onde serão abordados os tipos de topologia e as suas características. Por fim, será apresentado o método de controle utilizado para o filtro híbrido escolhido nesse trabalho.

Na seção 4 será apresentado o estudo da aplicação do filtro híbrido série na MR em questão. Nela serão apresentadas as características da MR, informando seus parâmetros e sua configuração. Também será demonstrado como foi feita a escolha do filtro passivo e do ganho do filtro ativo. E, por fim, a modelagem do sistema no *software* Simulink exibindo o sistema e seus subsistemas.

Já na seção 5 foi evidenciados os resultados obtidos na simulação apresentada na seção anterior, contemplando tanto a MR em seu modo conectado à rede quanto no modo ilhado, evidenciando o comportamento das grandezas do sistema e quantificando a melhoria após o uso do filtro. Também foi realizado o cálculo da potência do filtro ativo para assim ser possível escolha do filtro adequado.

Por fim, a seção 6 engloba as conclusões finais relativas ao projeto elaborado e uma possível abordagem a ser considerada em trabalhos posteriores.

## 2 MICRORREDES

Nesta seção serão apresentados os conceitos básicos de uma MR, o sistema no qual será avaliada a operação do filtro híbrido série. Serão apresentadas informações básicas sobre o seu funcionamento, detalhando os seus principais componentes e as topologias utilizadas.

### 2.1 As Microrredes de Energia Elétrica

Uma MR pode ser definida como uma rede elétrica formada por unidades de geração distribuída, dispositivos de armazenamento e cargas elétricas capazes de suprir uma área local, do tipo residencial, industrial ou comercial, com energia elétrica e calor (LASSETER, 2004). Uma MR é constituída por conversores eletrônicos que possuem resposta rápida e são vistas pelo sistema como uma única entidade. Pode operar conectada à rede de alimentação principal ou no modo ilhado, sustentando-se com seu próprio sistema de energia (MAHMOUD et al., 2014). A operação no modo ilhado é garantida por um sistema de armazenamento, que pode ser formado por bancos de baterias, compressores de ar ou *flywheel* (PARHIZI et al., 2015).

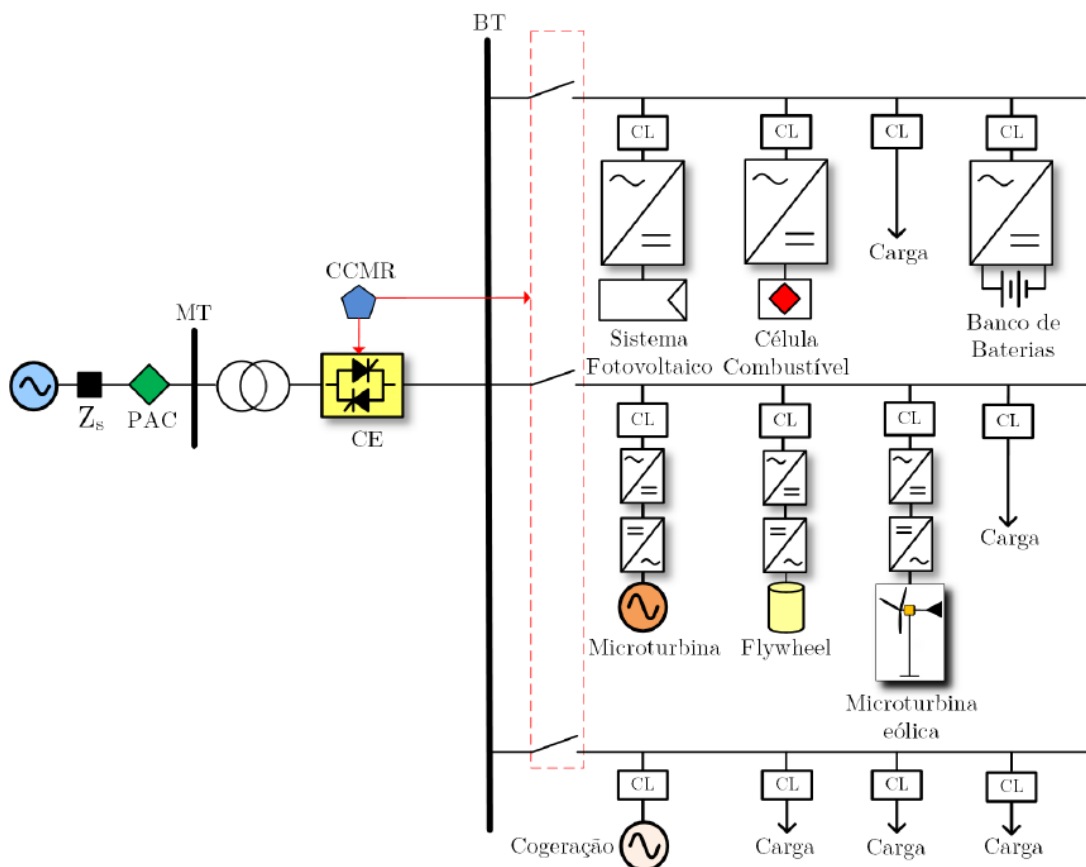
A geração local é dada por um conjunto de microfones interligadas a um barramento de BT ou Média Tensão (MT) (BEVRANI; WATANABE; MITANI, 2014). Outro componente importante é o Centro de Controle da Microrrede (CCMR), responsável por controlar adequadamente as cargas, administrando o balanço energético do sistema. Esse controle é feito por meio das microfones de geração, do armazenamento de energia e das cargas elétricas do sistema (KAUR; KAUSHAL; BASAK, 2016a). O CCMR também tem a função de definir as potências ativa e reativa que devem ser fornecidas pelas microfones, além de controlar a tensão e a frequência no ponto de conexão com a rede elétrica principal (EID et al., 2014).

Cada uma das microfones e cargas elétricas possuem um Controlador Local (CL), responsável pelo ajuste do fluxo de potência, o qual é definido pelo CCMR instalado na subestação. O CCMR também atua na produção e armazenamento de energia e pode definir a potência ativa e reativa que deve ser despachada pelas microfones (LOPES et al., 2006). O controle e flexibilidade da MR são garantidos por meio de interfaces baseadas em eletrônica de potência. Deste modo, o controle dos conversores de uma MR é de extrema importância (TABATABAEE et al., 2011).

Uma MR, além de operar no modo conectado à rede ou ilhado, deve suportar transições entre esses dois modos de operação (OLIVARES et al., 2014). Um componente essencial para a interligação da rede elétrica com a MR é a Chave Estática (CE), possibilitando que a MR opere em seus dois modos de operação, sendo seu controle realizado pelo CCMR. (PAQUETTE; DIVAN, 2014). A MR, contudo, é um sistema fraco e com baixa potência, o que a torna suscetível a problemas na QEE, sendo os mais comuns conteúdos harmônicos, baixo fator de potência e desvios na frequência (NATESAN, 2014).

A Figura 1 representa o esquemático de uma MR CA, sendo possível observar diversos tipos de microfones, o barramento em BT, o CCMR, os CLs e os conversores com o sistema de armazenamento de energia.

Figura 1 – Configuração típica de uma microrrede



Fonte: Eid e outros (2014).  
Nota: Adaptado pelo autor

### 2.1.1 Componentes das microrredes

Os principais componentes das MR são as microfontes, os controladores, os conversores e as estruturas de armazenamento de energia.

#### 2.1.1.1 Microfontes

As microfontes são fontes utilizadas para produção de energia elétrica com faixa de potência entre 1 kW e 10 MW (BHENDE; KALAM, 2013). Essas fontes podem ser alimentadas por combustíveis fósseis ou por fontes renováveis. Como exemplo das fontes renováveis pode-se citar a solar, eólica e hidráulica. Minigeradores hidráulicos, turbinas eólicas e painéis fotovoltaicos são exemplos de microfontes utilizadas em MRs para converter fontes renováveis em eletricidade, tendo como principal desvantagem a intermitência da sua natureza (MAHMOUD, 2017). Essa desvantagem leva a uma importante divisão, sendo as fontes do tipo despachável e não despachável. Uma fonte despachável pode ser regulada pelo CCMR, pois sua fonte de energia primária é controlável e a fonte não-despachável não.

#### 2.1.1.2 Controladores

O controle de uma MR deve garantir que todas suas funções sejam atendidas. Sendo o CL e o CCMR responsáveis pelo controle primário e secundário (internos à MR), já o Operador de Rede de Distribuição (ORD) ou o Operador de Mercado (OM) são responsáveis pelo controle terciário (ANTUNES et al., 2018).

O nível primário, representado pelo CL, tem como principal função em uma MR regular as variáveis locais como tensão, frequência e potência, e também pode controlar as cargas elétricas retirando e assumindo carga quando necessário e as microfontes (ALLAF, 2010; EID et al., 2014). Já o nível secundário, representado pelo CCMR, tem como função administrar a tensão e a frequência da MR, além de enviar um *setpoint* de potência ativa e reativa para as microfontes despacháveis em um cenário de controle centralizado. O CCMR pode se comunicar com o ORD, permitindo assim melhor o gerenciamento e operação da microrrede (WANG et al., 2012; KAUR; KAUSHAL; BASAK, 2016b).

Já o nível mais alto, o terciário, sendo representado pelo ORD e OM, tem como função o gerenciamento da rede de distribuição de MT, sendo utilizado quando possui mais de uma MR presente na rede elétrica (EID et al., 2014).

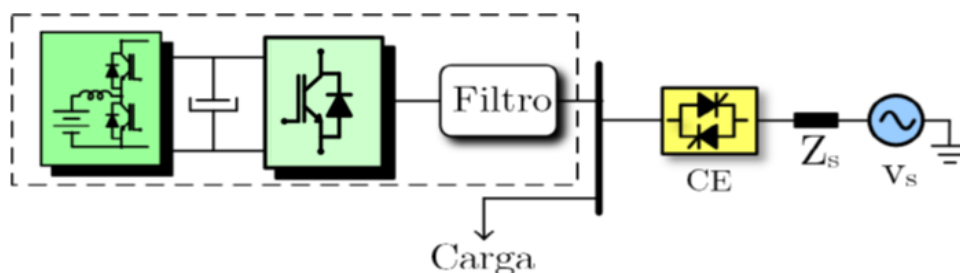
### 2.1.1.3 Conversores eletrônicos

Os conversores eletrônicos nas MRs podem assumir funções distintas, sendo então classificados em três tipos: supridor de rede, formador de rede e suporte à rede (ROCABERT et al., 2018; MAJUMDER; BAG, 2014).

O conversor supridor de rede tem o papel de operar como fonte de corrente injetando potência ativa, atendendo a demanda da carga ou, até mesmo, exportando energia para a rede elétrica principal. O formador de rede tem a função de produzir tensão e frequência, operando no modo V-f, garantindo a qualidade e continuidade de serviço, além de manter a estabilidade do sistema elétrico como um todo quando a MR está operando no modo ilhado. Já o conversor de suporte tem como atribuição o fornecimento de serviços ancilares na MR, como regulação de tensão e frequência, compensação de afundamento de tensão e filtragem harmônica (ANTUNES, 2018).

Neste trabalho são utilizados dois tipos de conversores, o formador de rede e o supridor de rede. O primeiro atua sempre que a rede elétrica principal se encontra em falha ou quando a MR opera no modo ilhado. Neste caso, o sistema encontra-se sem referência, passando a ser controlado por uma fonte de tensão, que atua em malha fechada impondo tensão e frequência para o sistema. A composição do Conversor Formador de Rede (CFR) é ilustrada na Figura 2.

Figura 2 – Configuração do conversor formador de rede



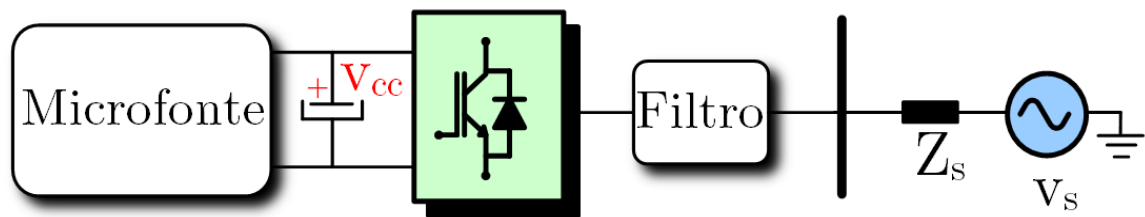
Fonte: Antunes (2018).



O formador de rede representado na Figura 2 é formado por um inversor do tipo fonte de tensão (VSI), um filtro passivo do tipo LC que garante uma tensão senoidal em sua saída (Matos, Ribeiro, Silva, 2014). Para aplicações dos sistemas de armazenamento de energia em BT é usado um estágio intermediário composto por um conversor corrente contínua (CC)-CC do tipo *buck-boost*, o que garante a bidirecionalidade de potência do formador de rede (ANTUNES, 2018).

Já o supridor de rede tem como função converter a energia produzida por uma microfonte e entrega-la à rede, possuindo um importante papel para o estudo, visto que será utilizado um sistema fotovoltaico. O conversor atua sincronizado à rede, permitindo que haja injeção de potência ativa e reativa na rede. Desse modo, o sistema enxerga esse conversor como uma fonte de corrente, de alta impedância de entrada. A Figura 3 apresenta a composição do conversor supridor de rede conectado à rede elétrica (PARHIZI et al., 2015).

Figura 3 – Configuração do conversor supridor de rede

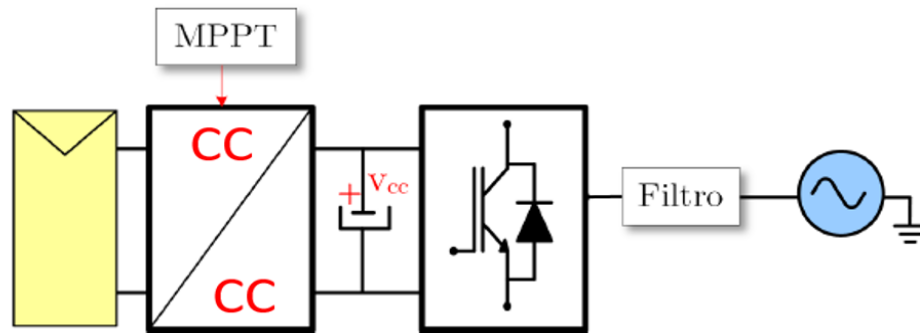


Fonte: Antunes (2018).

Analisando a Figura 3 pode-se notar que o supridor de rede é conectado à rede elétrica por meio de um filtro passivo, que pode ser do tipo L, LC ou LCL, o que propicia a redução do *ripple* de chaveamento do inversor. Usualmente o conversor é representado por inversor VSI, podendo ser monofásico ou trifásico. Caso o inversor possua um seguidor de ponto de máxima potência (MPPT, do inglês *Maximum Power Point Tracker*) com microfonte do tipo solar ou eólica a operação independe do CCMR, ou seja, o inversor pode operar sem um canal de comunicação (ANTUNES, 2018).

Quando utilizado painéis solares, é utilizado um conversor CC-CC responsável por rastrear o ponto de máxima potência do sistema. Como o sistema fotovoltaico tem característica de fonte de corrente, o VSI é responsável por manter a tensão constante em seu barramento CC, injetando energia na rede. Esta topologia pode ser vista na Figura 4 (ANTUNES, 2018).

Figura 4 – Configuração do conversor supridor de rede



Fonte: Antunes (2018).

#### 2.1.1.4 Estruturas de armazenamento de energia

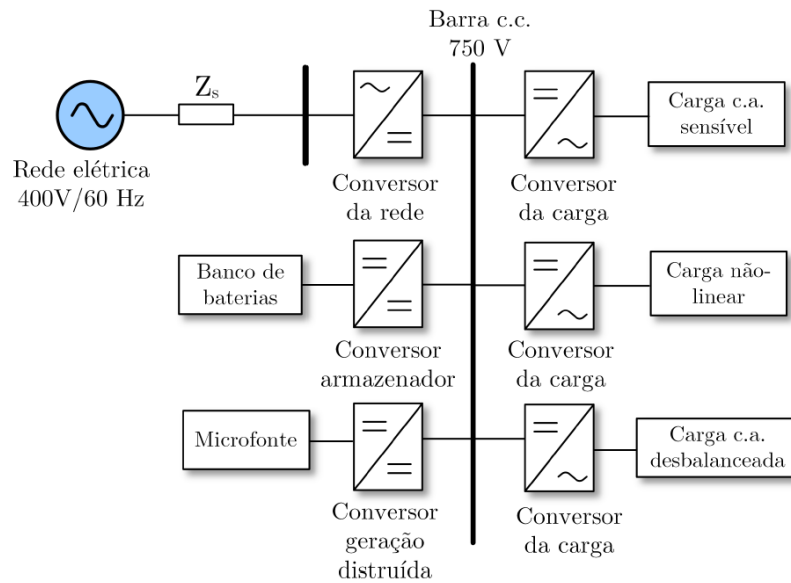
Devido à presença de microfuentes intermitentes, como fotovoltaica e eólica, a estrutura de armazenamento de energia se torna um elemento fundamental em uma MR, já que, para garantir o equilíbrio entre oferta e demanda elétrica e a QEE, são necessários elementos de armazenamento que atuam nos momentos de falta (LUO et al., 2015; SEPÚLVEDA et al., 2016).

#### 2.1.2 Topologias das microrredes

Com relação a topologia as MRs podem ser classificadas em CC, CA e híbridas. A topologia da MR influencia na necessidade do uso de conversores para interligar seus elementos. Comumente são utilizados conversores CC-CC e CC-CA

A MR CC apresenta como sua principal desvantagem a utilização de diversas interfaces. Entretanto, possuem vantagens, como menores perdas, devido ao fato de não ser necessária a utilização de um conversor CC-CA entre carga e rede, dispensar controle de frequência e não existir fluxo de potência reativa na MR (ANAND; FERNADES, 2010). A Figura 5 ilustra uma configuração com o barramento CC em uma MR.

Figura 5 – Microrrede com barramento CC



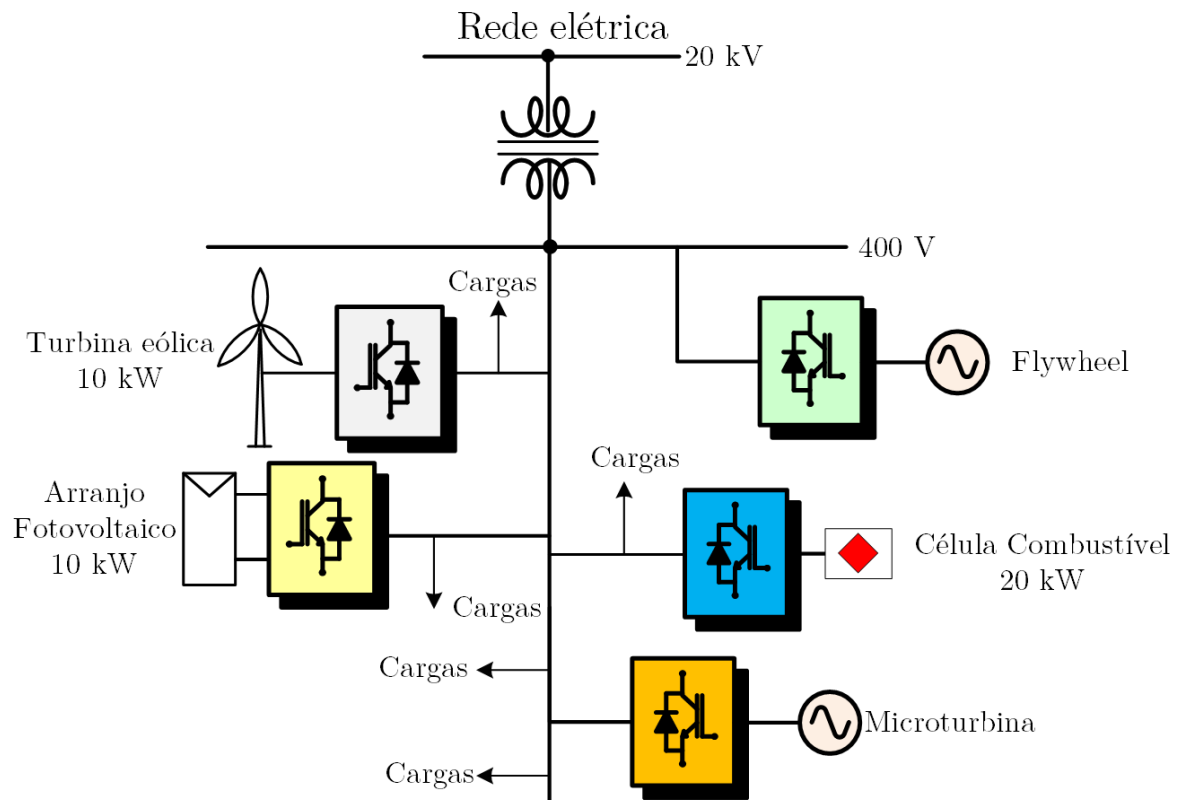
Fonte: Noroozian e Gharehpet (2012).

A MR CA é o tipo mais utilizado e pesquisado (WANG et al., 2012). Nessa topologia, os elementos CCs da MR são interfaceados ao barramento da MR por conversores CC-CA, enquanto as microfones CA podem ser conectadas diretamente ao barramento. Apresentam como principal desvantagem o desbalanço de tensão devido à presença de cargas e fontes de geração monofásicas e o surgimento de harmônicos, também proporcionando afundamento, elevação e flutuação de tensão (BOUZID et al., 2011). Entretanto, possui como principal vantagem a compatibilidade com o sistema elétrico nacional. Esta topologia será utilizada para o estudo neste trabalho e é ilustrada na Figura 6.

Considerando o seu controle a MR pode operar em modo Mestre-Escravo, com o controle de todo o sistema centralizado. Quando opera em modo ilhado o CFR é o mestre com controle no modo V-f e os demais inversores atuam como escravos com controle PQ. Já para a condição em que a rede elétrica está presente, o mestre opera como fonte de corrente, aguardando o momento para entrar em operação (WANG et al., 2012).

A MR híbrida CC/CA possui um conversor de interface entre o barramento CC e CA o que permite eliminar o estágio CC-CA de um sistema que necessite manter o estágio CC-CC, como, por exemplo, o sistema fotovoltaico (WANG et al., 2012; UNAMUNO; BARRENA, 2015).

Figura 6 – Microrrede com barramento CA



Fonte: Wang e Cheng (2013).

## 2.2 Comentários Sobre Microrredes

Nesta seção, foi apresentado o conceito de MR e seus principais componentes, sendo eles o CCMR, o CL, a CE, as microfones, os conversores e as estruturas de armazenamento de energia. Dentre eles foram expostos os tipos de conversores, sendo eles o conversor formador de rede, o supridor de rede e o de suporte a rede. O formador de rede será utilizado como fonte de tensão e frequência quando a rede opera em modo ilhado, o supridor de rede é utilizado em conjunto com o sistema fotovoltaico permitindo que este injete potência na rede e o filtro ativo pode ser comparado ao suporte a rede. Por fim, foram explicitadas as possíveis topologias de uma MR, comentando sobre o controle mestre-escravo utilizado.

### 3 DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM MICRORREDES

A utilização de cargas elétricas não lineares acarreta em uma degradação na QEE, e esse fato se deve a essas cargas serem grandes geradoras de correntes harmônicas, que podem fluir para o sistema elétrico caso não sejam devidamente compensadas. Nesta seção serão abordadas distorções harmônicas, explicando o que são e quais seus efeitos, tendo enfoque para o método de compensação harmônica com a utilização de filtros. Serão comentadas as principais topologias dos filtros harmônicos e o controle para os filtros ativos.

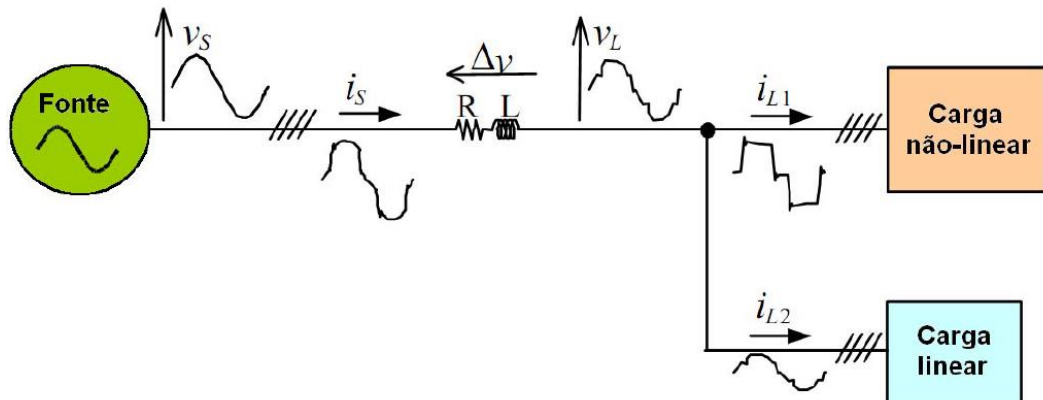
#### 3.1 Distorções Harmônicas

Uma onda não senoidal periódica é composta de uma série de ondas senoidais ou cossenoidais. As distorções harmônicas são fenômenos associados às deformações na forma de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2017). Uma componente com ordem maior que um na série de Fourier de uma onda periódica pode ser chamada de harmônica (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2014).

As distorções harmônicas produzem deformações que apresentam forma similar a cada ciclo de frequência fundamental. Desta forma, o espectro contém apenas frequências múltiplas inteiras da fundamental. Esse tipo de deformação geralmente é imposto por dispositivos que apresentam relação não linear entre tensão e corrente como, por exemplo, transformadores e motores, cujos núcleos ferromagnéticos são sujeitos à saturação e conversores, devido aos componentes não lineares e devido a sua comutação quando entra em atuação (DECKMANN, 2018; GARCIA, 2002).

A Figura 7 retrata como a distorção harmônica é vista em um sistema de potência. O sistema possui uma fonte de tensão senoidal ( $v_s$ ) operando em conjunto com uma carga linear e outra não linear. A carga não linear consome uma corrente não senoidal ( $i_{L1}$ ) que é composta pela componente fundamental mais harmônicas. A circulação de harmônicas na corrente de linha ( $i_s$ ) produz uma queda de tensão não linear ( $\Delta_v$ ) sobre a impedância de linha (R e L) distorcendo a tensão de carga ( $V_L$ ). Como consequência a carga linear também é afetada consumindo corrente distorcida ( $i_{L2}$ ).

Figura 7 – Efeito da distorção de tensão em sistema de potência



Fonte: Antunes (2009).

Quando os circuitos operam de forma não linear, com a presença de corrente e tensões harmônicas, causam diversos efeitos ao sistema. Entre esses efeitos podem ser citados:

- Aumento das perdas (Efeito Joule), saturação, ressonâncias, vibração nos enrolamentos e redução da vida útil dos transformadores;
- Disparo indevido de semicondutores de potência em retificadores controlados e reguladores de tensão;
- Problema na operação de reles de proteção, disjuntores e fusíveis;
- Redução da QEE;
- Erros em medidores digitais de energia elétrica e instrumentos de medição;

O indicador mais utilizado para quantificar a distorção harmônica é a Distorção Harmônica Total (DHT). É importante ressaltar que a DHT pode ser calculada tanto para corrente quanto para tensão. A DHT de tensão ( $DHT_v$ ) e a DHT de corrente ( $DHT_i$ ) são dadas pelas equações (1) e (2).

$$DHT_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h \max} V_h^2}}{V_1} \quad (1)$$

$$DHT_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h \max} I_h^2}}{I_1} \quad (2)$$

Onde:

$h$  – Ordem harmônica (número inteiro);

$V_h$  – Valor RMS da componente de tensão harmônica  $h$ ;

$V_1$  – Valor RMS da tensão fundamental;

$I_h$  – Valor RMS da componente de corrente harmônica  $h$ ;

$I_1$  – Valor RMS da corrente fundamental;

Por definição a distorção harmônica de tensão e corrente no PAC deve ser limitada, considerando o usuário final como responsável por assegurar o limite de harmônicas de corrente e as concessionárias de energia como responsáveis pela limitação da distorção da tensão distribuída. Os limites de harmônicos são projetados para toda a instalação visto que o PAC é utilizado como ponto de conexão do fornecedor de energia com o comprador (IEEE, 2014).

Para análise das distorções harmônicas, foram utilizadas as recomendações IEEE 519 e na resolução normativa da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), presentes no Módulo 8 do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2014; AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2021). Onde para a análise das distorções de tensão, o PRODIST determina os valores máximos de distorção harmônica totais, conforme o Quadro 1, mas não comenta a respeito da distorção de corrente. Por isso, foi necessário recorrer à recomendação internacional IEEE 519, que estabelece os limites de distorção harmônica de corrente, conforme o Quadro 2. Considerando a tensão utilizada menor que 1 kV e a relação entre a corrente de curto circuito trifásica e a corrente da carga menor que 20, pois a corrente de curto circuito é 3409A e a corrente de carga é 252A, sendo obtidas através da simulação do sistema, encontra-se os valores mostrados no Quadro 1.

Quadro 1 – Limites de distorção harmônica

Grandeza	Valor (%)
Valor máximo de $DHT_V$	10
Valor máximo de $DHT_I$	5

Fonte: Produção do próprio autor.

Quadro 2 – Limites de distorção harmônica total da tensão

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
$DHT_V$	10,0%	8,0%	5,0%

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (2021).

Nota: Adaptado pelo autor.

Quadro 3 – Limites de distorção harmônica total da corrente

Máxima $DHT_I$	
$I_{SC}/I_L$	$DHT_I$
< 20	5,0%
20<50	8,0%
50<100	12,0 %

Fonte: Institute of Electrical and Electronic Engineers (2014).

Nota: Adaptado pelo autor.

### 3.2 Filtros

De acordo com Garcia (2002), as distorções harmônicas são deformações nas formas de onda das tensões e correntes, e quando presentes no sistema elétrico, podem provocar diversos fenômenos como aumento da queda de tensão e redução do fator de potência, comprometendo a QEE.

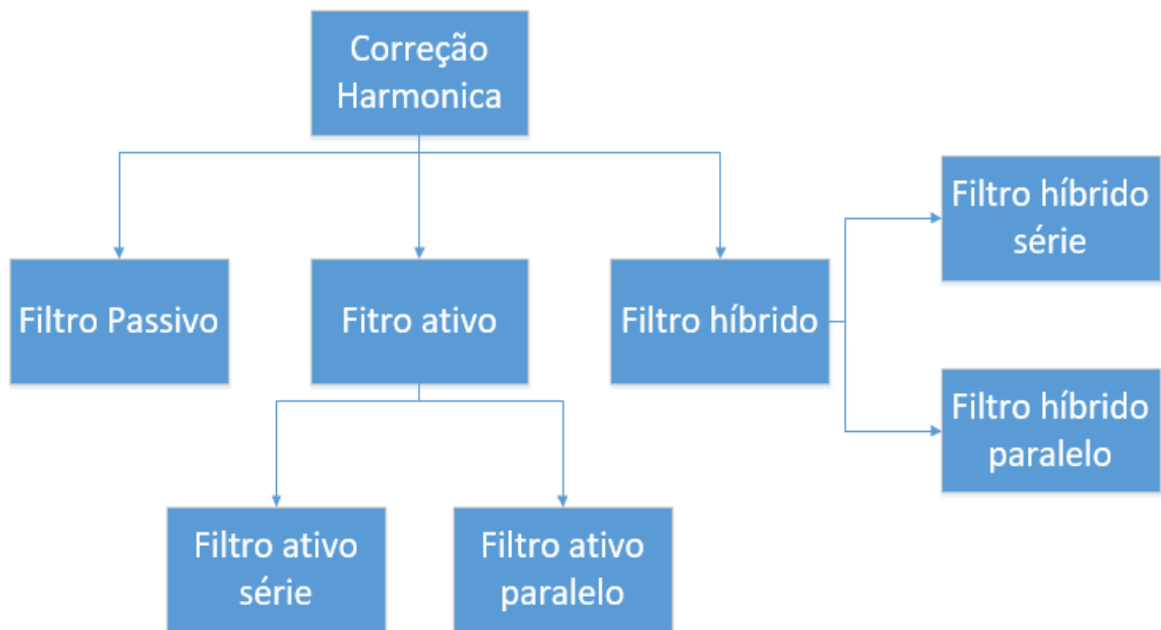
Existem equipamentos que, para manter a qualidade de suas funções, necessitam de uma tensão puramente senoidal já que são sensíveis às componentes harmônicas de tensão (SANTOS, 2007). Nesses casos, faz-se necessário a correção do efeito dos harmônicos. A Figura 8 mostra um diagrama de blocos com as principais técnicas para correção harmônica, que serão detalhadas cada uma destas técnicas nas próximas seções.



### 3.3 Filtros Passivos

Os filtros passivos são uma solução clássica para a redução do efeito das distorções harmônicas em sistemas elétricos, pois dependem somente de componentes passivos como indutores (L), capacitores (C) e resistores (R), podendo ser classificados em filtros passa-faixa e passa-alta e são conectados em paralelo com as cargas não lineares. (AKAGI, 2005).

Figura 8 – Estrutura para correção de distorção harmônica



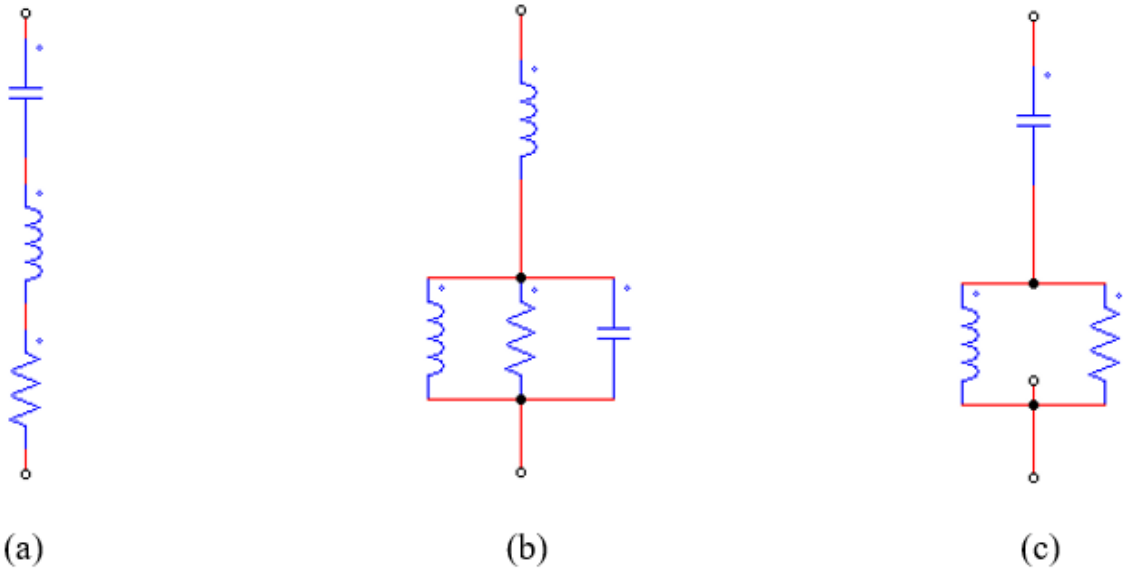
Fonte: Produção do próprio autor.

Três possíveis configurações de filtros passivos podem ser visualizadas na Figura 9, onde as células LC série são sintonizadas nas frequências que se deseja eliminar, sendo utilizado para menores frequências, neste trabalho serão sintonizadas no quinto e no sétimo harmônico, e a célula com capacitor é responsável por filtrar as mais elevadas, neste caso o décimo primeiro harmônico. Os filtros apresentam uma reatância capacitiva, de modo que contribuem para a correção do fator de potência (na frequência fundamental), supondo que a carga alimentada seja de característica indutiva (POMILIO; DECKMANN, 2009).

De acordo com Pires (2010), há duas configurações possíveis de filtros passivos: série e paralelo (*shunt*). Enquanto o filtro série cria um caminho de alta impedância entre a fonte geradora e a carga, para uma determinada corrente harmônica, o filtro paralelo cria um

caminho de baixa impedância em derivação, desviando a corrente harmônica para o qual foi sintonizado. O valor desse caminho muda para cada filtro sendo afetado pelo seu fator de qualidade, o qual determina nitidez da afinação, assumindo normalmente valores entre 20 e 100.

Figura 9 – Alguns tipos de filtros passivos. (a) Filtro sintonizado simples, (b) filtro sintonizado duplo e (c) filtro passa altas



Fonte: Produção do próprio autor.

Os filtros passivos possuem uma grande aplicação na correção de harmônicos, devido ao seu baixo custo inicial e elevada eficiência (AKAGI, 1991). Porém, também possuem algumas desvantagens como (ANTUNES, 2009):

- Alta sensibilidade à variação da frequência da rede;
- Sua frequência de sintonia é fixa e difícil de ser ajustada;
- A impedância da rede afeta sua filtragem;
- Pode atrair harmônicas de corrente provenientes de outras partes do sistema elétrico;
- Podem ocorrer ressonância paralela e série entre a rede elétrica e o filtro passivo.

Por meio do Teorema da Superposição é possível analisar a ressonância paralela e série do sistema. A ressonância paralela ocorre por meio da interação entre as impedâncias equivalentes da rede elétrica e do sistema de filtragem passiva com a carga não linear. Caso ocorra de a componente harmônica de corrente coincidir com o pico de impedância, o produto da corrente com a alta impedância gera uma distorção harmônica tanto na rede quando no

filtro. Assim, é gerada uma distorção de tensão na carga que pode causar um desarmamento por sobrecorrente nos filtros, podendo até mesmo causar danos materiais (ANTUNES, 2009).

A ressonância série ocorre quando a tensão da rede elétrica possui a mesma frequência do ponto de mínima impedância do filtro passivo, acarretando assim um curto-circuito que pode amplificar a corrente da rede elétrica e no filtro passivo (ANTUNES, 2009).

### **3.4 Filtros Ativos**

Os filtros ativos, em teoria, podem ser implementados por geradores ideais de tensão e de corrente (GYUGYI; STRYCUDA, 1976). O filtro ativo utiliza a capacidade de um conversor CC-CA para produzir uma tensão ou corrente alternada com qualquer forma de onda, injetando correntes harmônicas em fase oposta à da carga não linear, cancelando-a e, assim, limitando a distorção de corrente. Estes filtros possuem desempenho superior na compensação harmônica com tamanho e peso reduzidos, além de serem mais flexíveis comparados a um passivo (AKAGI, 2005; ORTMAN, 2008).

Segundo Dugan e outros (2004), filtros ativos são dispositivos usados para eliminar harmônicos. Eles são baseados numa sofisticada Eletrônica de Potência e são muito mais caros do que os passivos. No entanto, eles têm a vantagem de não ocorrer ressonância harmônica com a rede elétrica principal.

Os filtros ativos podem ser separados em duas categorias, diferenciadas pela forma da conexão destes com a rede elétrica. Sob este ponto de vista, eles podem ser do tipo série ou paralelo (comumente referenciado na literatura como filtros *shunt*). Estas topologias podem ser visualizadas na Figura 10 (GYUGYI; STRYCUDA, 1976).

Figura 10 – Filtros ativos. (a) Filtro série paralelo e (b) filtro série ativo



Fonte: Ortman (2008).

### 3.5 Filtros Híbridos

Os filtros híbridos são compostos pela associação de um filtro ativo e passivo. Esta conexão tem como objetivo unir as características vantajosas de cada configuração, além de eliminar as desvantagens da operação isolada.

Existem dois tipos de filtros híbridos: o série e o paralelo. Na primeira configuração o filtro ativo opera conectado em série ao passivo. Já na segunda ambos estão conectados em paralelo com a rede elétrica.

Por ter um bom custo-benefício, a escolha de um filtro híbrido para fornecer uma melhoria na QEE tem-se mostrado ser uma opção mais atrativa, quando comparada à solução de filtragem ativa ou passiva puras. Um filtro híbrido é apontado como uma solução ideal para a compensação harmônica de cargas não lineares (SINGH et al., 2005).

#### 3.5.1 Filtro híbrido paralelo

Nesse tipo de configuração, tanto o ativo quanto o passivo estão conectados em paralelo com a carga não linear e a rede elétrica, como pode ser observado na Figura 11. O filtro passivo provê um caminho de baixa impedância para a corrente harmônica da carga e também compensa os reativos na frequência fundamental. Já o ativo opera injetando correntes iguais e em fases opostas às das correntes harmônicas da carga não linear, cancelando as harmônicas de forma parcial ou total (ANTUNES, 2009). Neste tipo de implementação, o filtro ativo é

utilizado como uma fonte de corrente controlada pelas parcelas harmônicas de corrente da carga, como definido na equação (3).

$$I_{FA} = K_{ap} * I_{Sh} \quad (3)$$

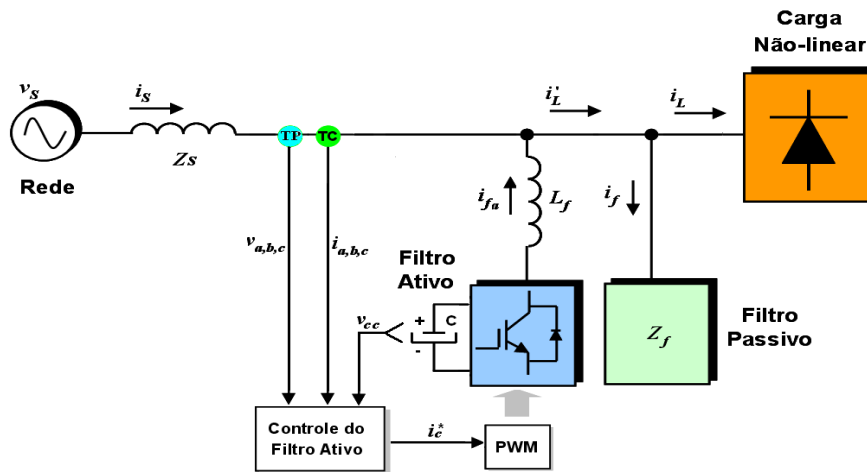
Onde:

$I_{Sh}$  – Componente harmônica de corrente da fonte;

$K_{ap}$  – Ganho do filtro híbrido paralelo;

$I_{FA}$  – Corrente de compensação do filtro ativo;

Figura 11 – Filtro híbrido paralelo



Fonte: Antunes (2009).

### 3.5.2 Filtro híbrido série

O filtro híbrido série é formado pela associação série de um passivo e um ativo, podendo ser encontrado em duas configurações. Na primeira configuração, o filtro ativo é conectado em série com o passivo, formando um filtro híbrido série que é conectado em paralelo com a rede elétrica e a carga. Já na segunda configuração, o filtro ativo é ligado em série com a rede, e o passivo em paralelo com a rede e carga. Neste trabalho será avaliada o funcionamento da segunda configuração.

Com a conexão do filtro ativo em série com a rede elétrica, é possível melhorar a compensação harmônica do passivo. Nesta configuração, o passivo absorve as componentes da frequência das cargas não lineares, enquanto o ativo age como um isolador harmônico entre a rede e o

filtro passivo, amenizando a ressonância harmônica presente no sistema elétrico (AKAGI; FUJITA, 1991). Quando o filtro ativo está conectado em série com o passivo a maior parte da tensão está aplicada sobre o passivo, dessa forma o filtro ativo se comporta como um curto-circuito para a componente fundamental conseguindo reduzir assim sua potência nominal de forma significativa quando comparado ao ativo puro, tornando assim essa topologia mais atrativa (ANTUNES, 2009).

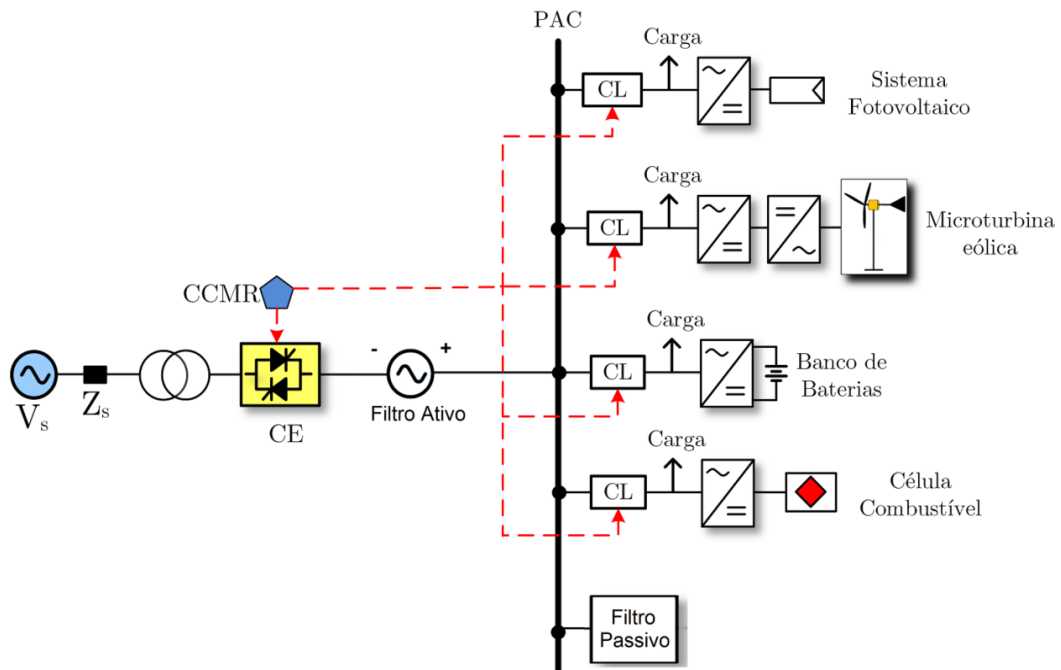
Quando conectado em série com a rede o filtro ativo funciona como um isolador harmônico fazendo com que a corrente harmônica da carga flua pelo filtro passivo, eliminando os problemas gerados quando este é utilizado sozinho (ANTUNES, 2009). Pode-se destacar as principais funções de um filtro híbrido série como:

- Isolação harmônica;
- Compensação harmônica;
- Regulação de tensão;
- Compensador de desequilíbrios;
- Controle de potência reativa fundamental;

O filtro ativo série tem como desvantagem o alto custo inicial em comparação com o passivo e por serem enormemente influenciados pelo algoritmo de filtragem implementado para a extração da corrente harmônica da fonte e pelo método de controle utilizado. (ANTUNES, 2009).

A Figura 12 ilustra uma MR com um filtro híbrido série. Na imagem pode-se observar que o filtro ativo atua como uma fonte de tensão controlada em série com a MR, enquanto o passivo opera conectado em paralelo com a rede elétrica, formando desse modo um filtro híbrido série.

Figura 12 – Filtro híbrido série



Fonte: Patrao e outros (2015).

Na configuração de filtragem híbrida série da Figura 12, a tensão de saída do filtro ativo é dada pela equação (4) (AKAGI, 2004):

$$V_c = -K_v * I_{Sh} \quad (4)$$

Onde:

$I_{Sh}$  – Componente harmônica de corrente da fonte;

$K_v$  – Ganho do filtro híbrido série;

$V_c$  – Tensão de compensação do filtro ativo;

### 3.6 Controle do Filtro Híbrido Série

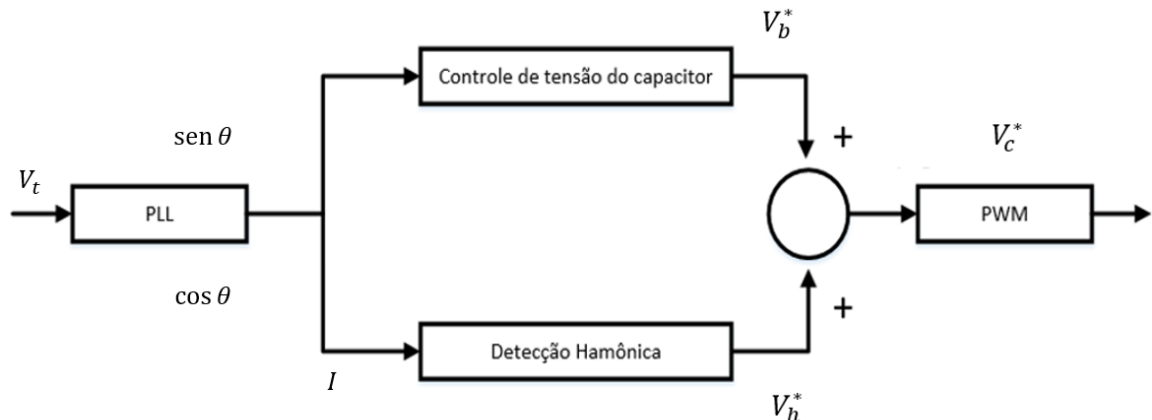
Para funcionamento adequado do filtro híbrido série é necessário um controle do filtro ativo.

Seu controle é composto por três módulos:

- Método de detecção harmônica;
- Regulador de tensão no elo CC do inversor;
- Modulação PWM

O controle do filtro ativo pode ser representado conforme a Figura 13.

Figura 13 – Controle de tensão no capacitor



Fonte: Produção do próprio autor.

Onde:

$V_t$  – Componente harmônica de tensão da carga;

$V_{cc}$  – Ganho do filtro híbrido série;

$I$  – Vetor corrente de entrada:  $[I_a, I_b, I_c]$ ;

$V_b^*$  – Vetor tensão para controle no capacitor:  $[V_{ba}^*, V_{bb}^*, V_{bc}^*]$ ;

$V_h^*$  – Vetor tensão para compensação harmônica:  $[V_{ha}^*, V_{hb}^*, V_{hc}^*]$ ;

$V_c^*$  – Vetor tensão de referência para o filtro ativo:  $[V_{ca}^*, V_{cb}^*, V_{cc}^*]$ ;

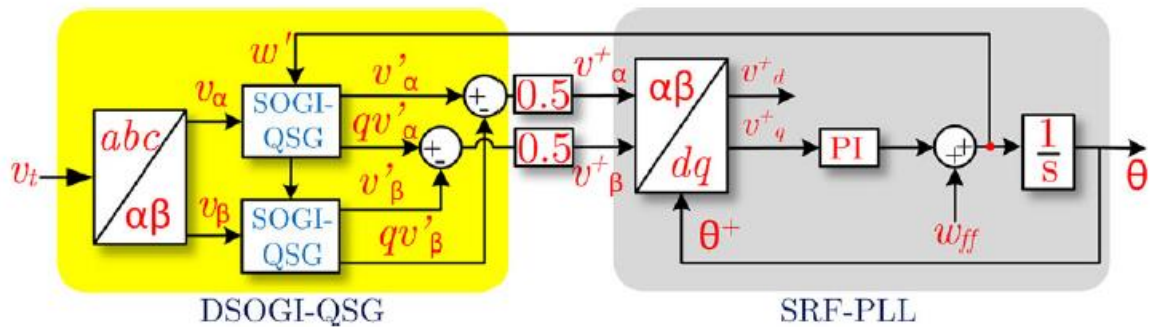
### 3.6.1 Método de sincronização PLL

O *Phase Locked Loop* (PLL) é um sistema de sincronização de conversores trifásicos com a rede. Um PLL ideal é capaz de fornecer de maneira rápida e precisa informações sobre a sincronização com um alto grau de imunidade e insensibilidade a perturbações, harmônicas, desequilíbrios, afundamentos de tensão e outros tipos de distorções dos sinais de entrada (GUO et al., 2011)

O método utilizado neste trabalho será o *Dual Second Order Generalized Integrator PLL* (DSOGI-PLL). Na Figura 14 é possível observar o diagrama em blocos que representa o DSOGI-PLL.



Figura 14 – Diagrama de blocos do DSOGI-PLL



Fonte: Rodriguez (2006).

O DSOGI-PLL realiza a extração da sequência positiva das tensões, minimiza a influência das distorções harmônicas sobre os sinais de sincronismo e leva em consideração possíveis variações na frequência fundamental da rede elétrica.

### 3.6.2 Método de detecção harmônica

O método de detecção harmônica é um dos principais requisitos da eficiência na operação de um filtro híbrido série, sendo responsável por determinar características específicas das componentes harmônicas, como a frequência, amplitude, fase e tempo de duração de um dado sinal de entrada (tensão ou corrente) (ASIMINOAEL; BLAABJERG; HANSEN, 2007).

Para se obter a corrente de referência no controle do filtro ativo pode-se utilizar o domínio do tempo ou da frequência. No domínio da frequência a corrente é identificada por meio do uso da Transformada de Fourier reagrupada para prover um resultado mais rápido, reduzindo o número de cálculos e permitindo sua implementação em tempo real em microcontroladores (LIMONGI, 2006).

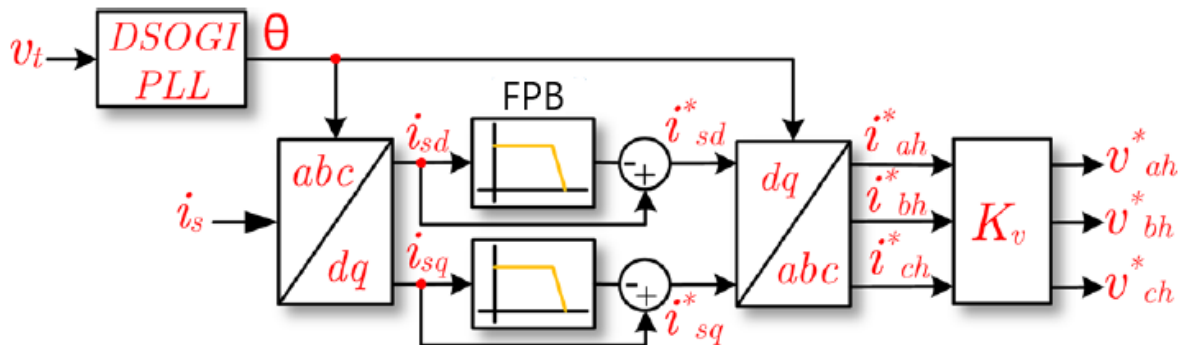
Quando utilizado o domínio do tempo tem-se uma estrutura mais simples, mais rápida e com resultados tão eficazes quanto aos dos métodos no domínio da frequência. Dentre esses métodos pode-se destacar o método do eixo de referência síncrono, comumente chamado de *Synchronous Reference Frame* (SFR), pois possui a vantagem de ser imune a distorções de tensão na rede permitindo assim gerar correntes de referência com maior fidelidade ao conteúdo que se deseja compensar (ASIMINOAEL; BLAABJERG; HANSEN, 2007).

Nesse método a corrente que é obtida do sistema elétrico nas coordenadas abc são transformadas para as coordenadas dq0 no referencial síncrono, por meio da Transformada de Park. Um PLL trifásico é necessário para se obter o ângulo de referência da frequência fundamental para assim efetuar o cálculo da transformação dq0 no referencial síncrono, sendo está a principal desvantagem desse método (ANTUNES, 2009).

Como o eixo dq gira com respectiva velocidade angular na frequência fundamental (60 Hz), isso faz com que as correntes fundamentais apresentem um nível CC e as correntes harmônicas um CA, sendo possível utilizar um filtro passa-baixa para retirar a componente CC e assim possibilitar a subtração da corrente resultante da transformada de Park, obtendo assim as componentes da corrente harmônica.

Por fim utiliza-se a transformada inversa de Park para o cálculo da referência do domínio do tempo. Estas correntes são multiplicadas pelo ganho do filtro híbrido série  $K_v$ , são geradas as tensões harmônicas de referência que devem ser sintetizadas. O diagrama referente a detecção harmônica pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 – Diagrama de blocos para detecção harmônica.



Fonte: Antunes, 2009.

As transformações dos eixos a, b, c para o d-q e vice-versa são conhecidas respectivamente como transformação de Park e transformação inversa de Park e podem ser realizadas, respectivamente, através das equações (5) e (6):

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} x \begin{bmatrix} \text{sen } \theta_1 & \text{sen}(\theta_1 - \frac{2\pi}{3}) & \text{sen}(\theta_1 + \frac{2\pi}{3}) \\ \text{cos } \theta_1 & \text{cos}(\theta_1 - \frac{2\pi}{3}) & \text{cos}(\theta_1 + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} x \begin{bmatrix} \text{sen } \theta_1 & \text{cos } \theta_1 & 1 \\ \text{sen}(\theta_1 - \frac{2\pi}{3}) & \text{cos}(\theta_1 - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \text{sen}(\theta_1 + \frac{2\pi}{3}) & \text{cos}(\theta_1 + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Onde:

$i_d, i_q, i_0$  – Corrente de eixo direto, em quadratura e sequência zero no referencial síncrono;

$i_a, i_b, i_c$  – Corrente nas fases a, b, c no domínio do tempo;

$\theta_1$  – Ângulo da transformação no referencial síncrono do PLL;

### 3.7 Comentário Sobre Harmônicos

Nesta seção, foram apresentados a origem das distorções harmônicas em sistemas elétricos devido a circulação de correntes não lineares e suas principais consequência na QEE. Foi dado um maior enfoque na compensação desse efeito que, neste caso, ocorre por meio dos filtros harmônicos.

Foram apresentadas as topologias dos filtros e o método de controle para o filtro híbrido série que será utilizado neste projeto.

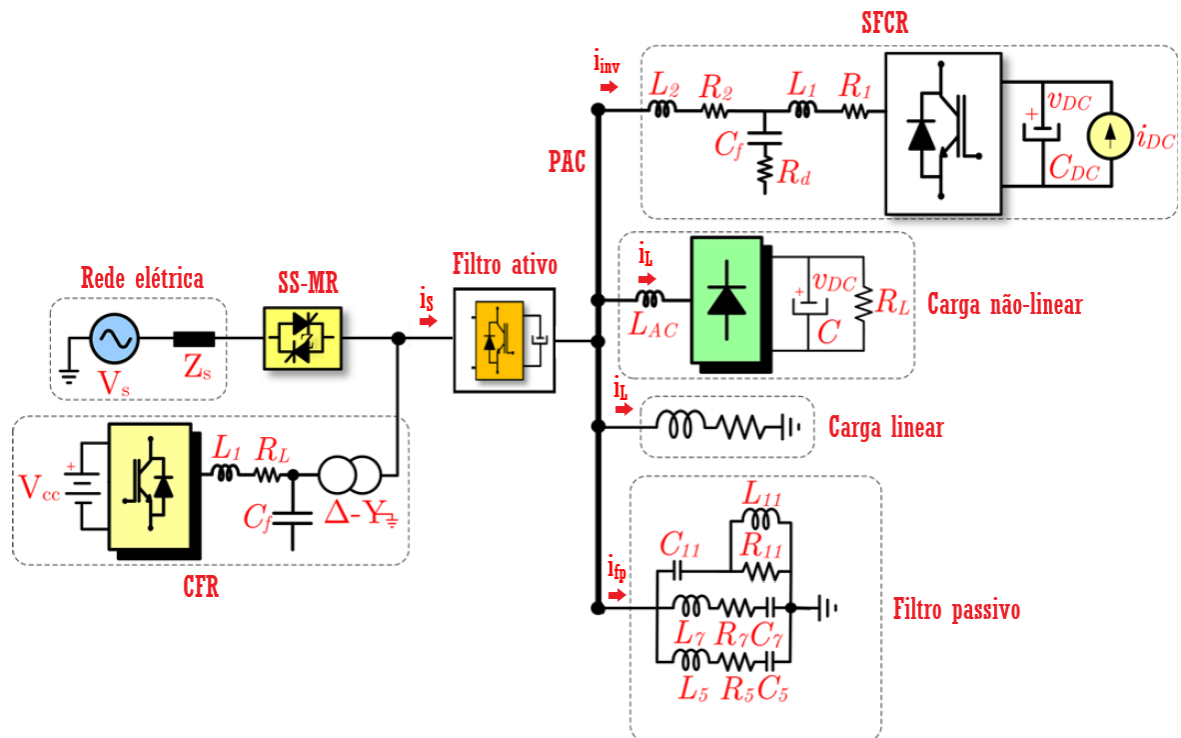
## 4 ESTUDO DA APLICAÇÃO DO FILTRO HÍBRIDO SÉRIE EM UMA MICRORREDE

Nesta seção, é apresentado o estudo da aplicação de um filtro híbrido série em uma MR com controle centralizado, do tipo mestre-escravo. São apresentados os parâmetros da microrrede, do filtro passivo e do filtro ativo utilizados na simulação.

### 4.1 A Microrrede em Estudo

A MR em estudo é apresentada na Figura 16, é composta por uma rede elétrica trifásica, um conversor formador de rede, um Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede (SFCR), uma carga linear, uma carga não linear, um filtro passivo e um filtro ativo.

Figura 16 – Configuração da microrrede em estudo



Fonte: Antunes (2018)

Nota: Adaptado pelo autor.

A chave SS-MR permite fazer a transição do modo conectado para ilhado e vice-versa.

Quando MR opera conectada à rede, a tensão e a frequência são definidas pela rede principal. Atuando no modo ilhado, o CFR opera como fonte de tensão no modo V-f suprindo a carga, sendo caracterizado por um VSI trifásico com um filtro LC e um transformador de baixa impedância, com uma ligação delta-estrela (ROCABERT et al., 2012; LOPES et al., 2006).

O SFCR é representado por uma fonte de corrente CC em paralelo com o barramento CC do inversor, representando assim uma simplificação de um sistema fotovoltaico. É utilizado um inversor trifásico do tipo VSI com modulação PWM senoidal (SPWM) e um filtro LCL.

A carga linear é caracterizada por uma impedância constante, do tipo RL. Já a carga não linear é formada por um retificador trifásico a diodos em ponte completa com um filtro indutivo no lado CA, e um capacitor e resistor do lado CC (ANTUNES et al., 2017).

Os dados bases das grandezas utilizadas nesse projeto são apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 – Parâmetros da microrrede em estudo

Sistema	Parâmetros
Rede elétrica	$3\phi$ , 220 V, 60 Hz, $S_{cc} = 750$ kVA, $X/R = 0,5$
CFR	Transformador $\Delta - Yg$ : 220/220 V, 75 kVA $Z_t = 6,3\%$ , $R_L = 10$ m $\Omega$ , $L_1 = 20$ $\mu$ H $C_f = 550$ $\mu$ F, $f_{sw} = 15,36$ kHz, $V_{cc} = 500$ V
SRCR	20 kVA, 220 V, $f_{sw} = 7.68$ kHz, $R_1 = 10$ m $\Omega$ $L_1 = 1,5$ mH, $R_f = 0,3\Omega$ , $C_f = 55$ $\mu$ F $R_2 = 10$ $\Omega$ , $L_2 = 35$ $\mu$ H, $C_{dc} = 9,4$ mF
Carga linear	220 V, 35 kVA, $fp = 0,73$ atrasado
Carga não linear	220 V, 30 kW, $C = 18,8$ mF, $R_L = 2,5\Omega$ , $L_{CA} = 0,5$ mH

Fonte: Produção do próprio autor.

## 4.2 Escolha do Filtro Passivo

Para a MR em estudo é utilizado um filtro passivo composto, formado por três estágios de filtragem. Sendo eles 2 filtros passa-faixa e 1 passa-altas. Esta configuração é escolhida por ser comumente utilizada em sistemas elétricos com uma carga formada por um retificador trifásico. Para o projeto dos filtros foram utilizadas as equações (7) a (11).

$$X_L - X_C = \frac{V_{ef}^2}{Q_{Comp}} \quad (7)$$

$$X_C = h^2 * X_L \quad (8)$$

$$f_h = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_h C_h}} \quad (9)$$

$$Q_{pf} = \frac{x}{R_h} \quad (10)$$

$$Q_{pa} = \frac{R_h}{\sqrt{\frac{L_h}{C_h}}} \quad (11)$$

Onde:

$X_L$  – Valor da reatância indutiva;

$X_C$  – Valor da reatância capacitiva;

$Q_{Comp}$  – Valor da compensação de reativos fundamental;

$V_{ef}^2$  – Valor da tensão eficaz;

$h$  – Ordem harmônica;

$Q_{pf}$  – Fator de qualidade do filtro passa-faixa;

$Q_{pa}$  – Fator de qualidade do filtro passa alta;

$R_h$  – Resistência do filtro passivo;

$L_h$  – Indutância do filtro sintonizado no harmônico de ordem h;

$C_h$  – Capacitância do filtro sintonizado no harmônico de ordem h;

Assim, utilizando as equações (5), (6), (7) e (8) e escolhendo as frequências de 300 e 420 Hz, sendo respectivamente o quinto e sétimo harmônico, é possível obter os parâmetros dos filtros passa-faixas. Já para o dimensionamento do filtro passa-alta utilizam-se as equações (5), (7) e (9) e a frequência de ressonância sintonizada em 660 Hz, referente decimo primeiro harmônico. No Quadro 5 são apresentados os parâmetros para cada estágio de filtragem passiva.

Quadro 5 – Parâmetros do filtro passivo composto

Sistema	Parâmetros
Filtro passivo composto	220 V, 6 kvar
	5 h: Q = 42, L = 2,7 mH, C = 105 $\mu$ F
	7 h: Q = 42, L = 1,3 mH, C = 107 $\mu$ F
	11 h: Q = 2,2, L = 0,5 mH, C = 109 $\mu$ F

Fonte: Produção do próprio autor.

### 4.3 Escolha do Ganho do Filtro Ativo ( $K_v$ )

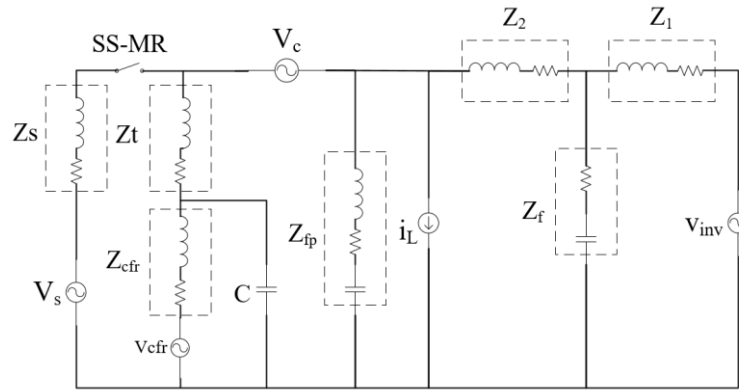
No capítulo anterior foi introduzida a equação (4), onde é possível observar que para o controle da tensão do filtro ativo é necessário escolher um ganho  $K_v$ . Devido a configuração adotada neste estudo, onde o filtro ativo se encontra em série com a rede, é aplicada uma tensão de compensação com valor de  $-K_v * I_{Sh}$  sendo, dessa forma, capaz de reduzir a carga harmônica da corrente  $I_{Sh}$  quando o ganho é escolhido adequadamente (AKAGI, 2005).

Na Figura 17 é feita uma representação por fase da MR em estudo, podendo ser observado a rede elétrica, o CFR, a carga, o SFRC e o filtro híbrido série.

Considerando a MR no modo conectado, a chave estática SS-MR opera fechada e o CFR desativado. Desta forma é possível modelar dois sistemas representados pelas Figuras 18 e 19 onde será feita a análise do circuito considerando, respectivamente, a carga e o SFRC como fonte poluidora de harmônicos.

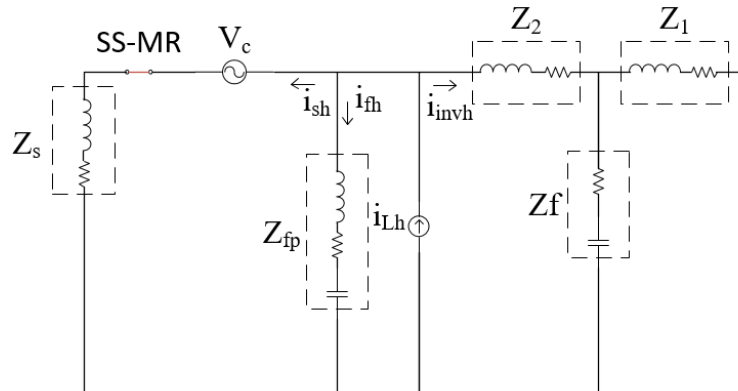
Utilizando o Teorema da Superposição e a Lei de Kirchhoff para as Correntes é possível encontrar as equações que relaciona as correntes do circuito e a corrente poluidora, representadas por meio das equações (12) a (16).

Figura 17 – Modelo do circuito da MR



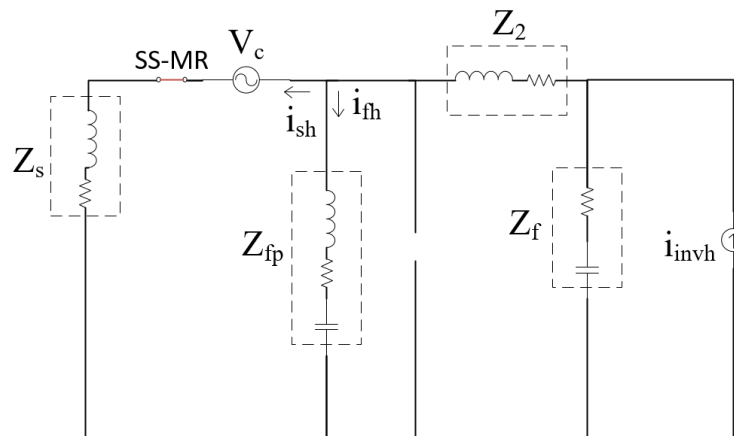
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 18 – Modelo do circuito da MR em modo conectado à rede com a carga como fonte poluidora



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 19 – Modelo do circuito da MR em modo conectado à rede com o SFCR como fonte poluidora



Fonte: Produção do próprio autor.



$$\frac{I_{Sh}}{I_{Lh}} = \frac{Z_{fp} * Z_{inv}}{Z_{fp} * Z_{inv} + Z_{inv}(Z_S + K_v) + Z_{fp}(Z_S + K_v)} \quad (12)$$

$$\frac{I_{Fh}}{I_{Lh}} = \frac{Z_{inv}(Z_S + K_v)}{Z_{fp} * Z_{inv} + Z_{inv}(Z_S + K_v) + Z_{fp}(Z_S + K_v)} \quad (13)$$

$$\frac{I_{Invh}}{I_{Lh}} = \left( \frac{Z_{fp} * Z_S}{Z_{fp} * Z_{inv} + Z_{inv} * Z_S + Z_{fp} * Z_S} \right) * \left( 1 + \frac{Z_{fp} * Z_{inv}}{Z_{fp} * Z_{inv}(Z_S + K_v) + Z_{fp}(Z_S + K_v)} \right) \quad (14)$$

$$\frac{I_{Sh}}{I_{Invh}} = \frac{Z_{fp} * Z_S}{Z_{fp}(K_v + Z_f + Z_S + Z_2) + Z_f(Z_S + K_v) + Z_2(Z_S + K_v)} \quad (15)$$

$$\frac{I_{Fh}}{I_{Invh}} = \frac{Z_f(Z_S + K_v)}{Z_{fp}(K_v + Z_f + Z_S + Z_2) + Z_f(Z_S + K_v) + Z_2(Z_S + K_v)} \quad (16)$$

Onde:

$I_{Lh}$  – Componente harmônica de corrente da carga;

$I_{Fh}$  – Componente harmônica de corrente da carga;

$Z_{fp}$  – Valor da impedância do filtro passivo;

$Z_S$  – Valor da impedância da rede;

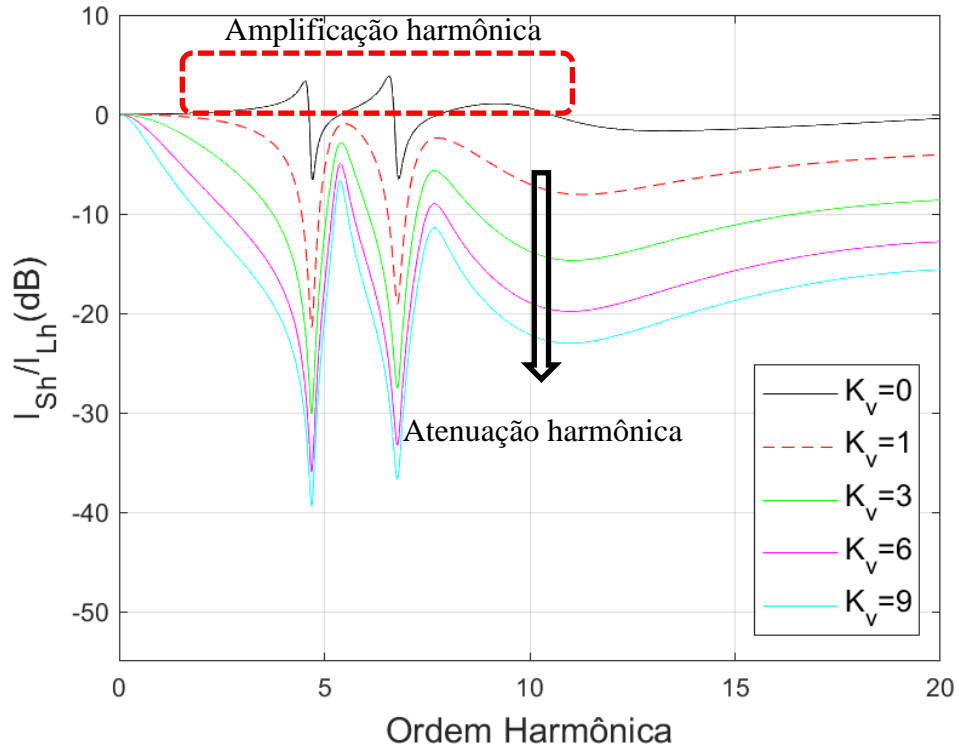
$Z_f$  – Valor da impedância do ramo de filtragem do inversor do SFCR;

$Z_2$  – Valor da impedância do ramo 2 do filtro do inversor do SFCR;

$Z_{inv}$  – Valor da impedância do inversor para a condição em que a carga é poluidora;

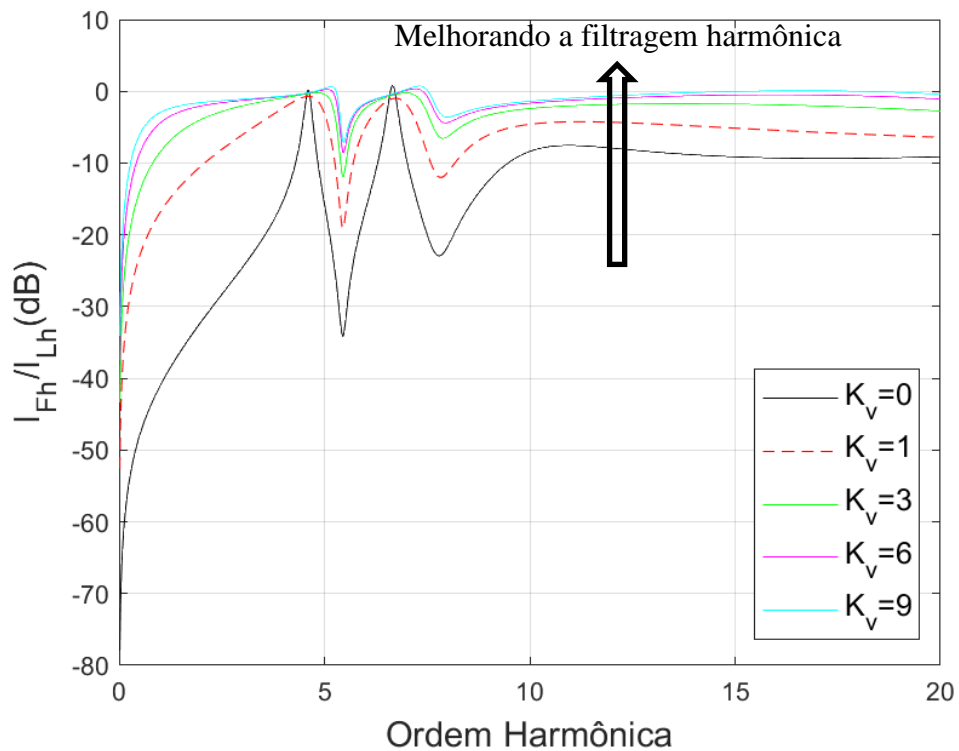
Para facilitar a análise das equações obtidas foram gerados gráficos, em decibéis (dB), e que são apresentados nas Figuras 20 a 24.

Figura 20 – Característica de filtragem modo conectado a rede – Relação entre  $I_{Sh}$  e  $I_{Lh}$



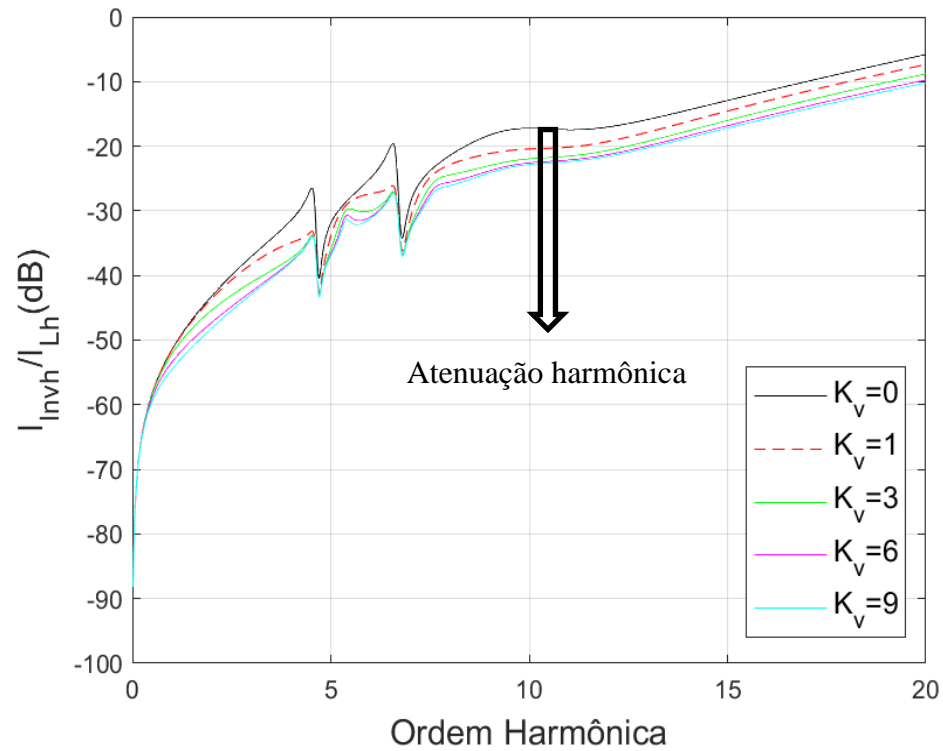
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 21 – Característica de filtragem modo conectado a rede – Relação entre  $I_{Fh}$  e  $I_{Lh}$



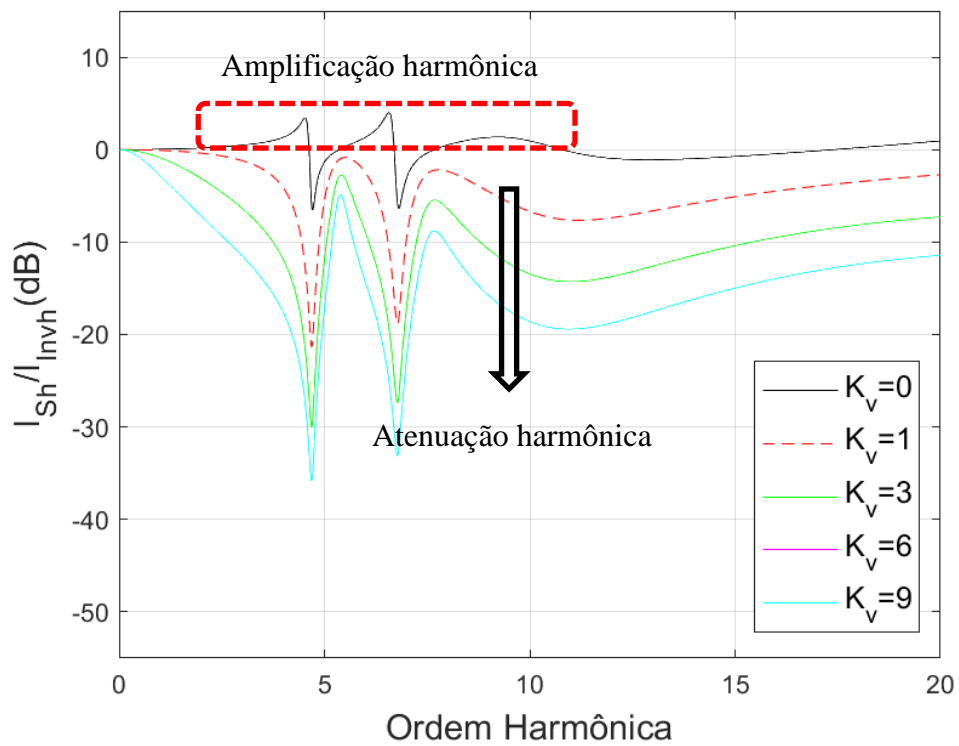
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 22 – Característica de filtragem modo conectado a rede – Relação entre  $I_{Invh}$  e  $I_{Lh}$



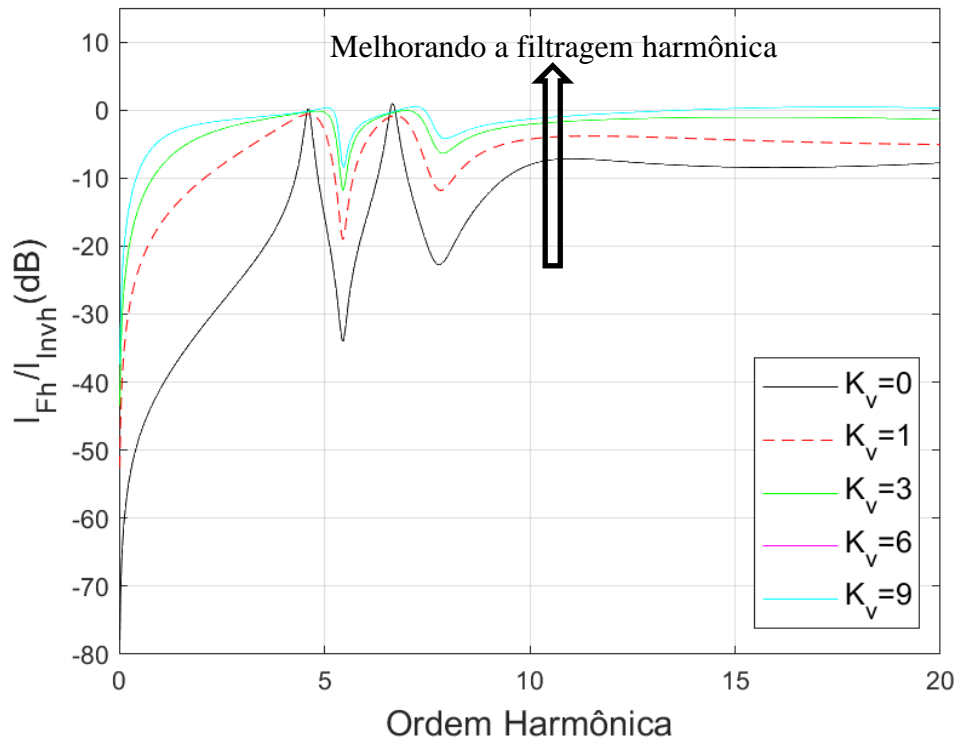
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 23 – Característica de filtragem modo conectado a rede – Relação entre  $I_{Sh}$  e  $I_{Invh}$



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 24 – Característica de filtragem modo conectado a rede – Relação entre  $I_{Fh}$  e  $I_{Invh}$



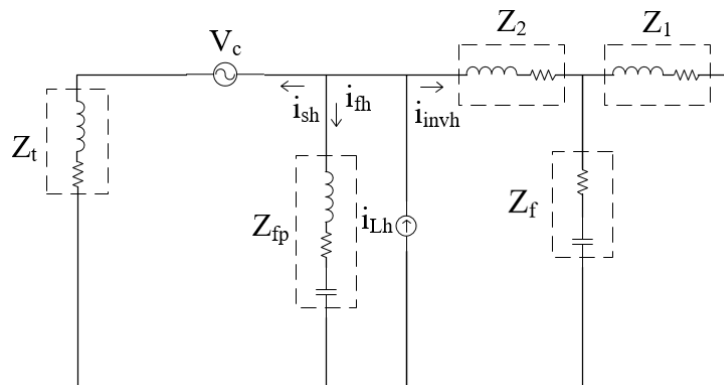
Fonte: Produção do próprio autor.

Analisando as figuras é possível verificar a influência do ganho  $K_v$  nas correntes do sistema. Para  $K_v = 0$  pode-se observar a amplificação harmônica na rede elétrica, o que comprova um baixo desempenho do filtro passivo, tanto quando a carga elétrica é considerada a fonte poluidora quanto o inversor do SFCR. Nas Figuras 20, 22 e 23 é possível ver a influência do ganho na fonte e no inversor e, como esperado, quanto maior o ganho menor a corrente harmônica que circula no PAC, realizando assim uma atenuação harmônica e eliminando a amplificação harmônica da rede. Observa-se ainda que nas Figuras 21 e 24 uma redução na amplificação harmônica, fazendo com que o filtro passe a absorver mais componentes harmônicas de corrente.

Realizando a mesma análise agora para a MR no modo ilhado, pode-se utilizar o CFR como uma fonte de tensão em série com a impedância do transformador. Portanto, o circuito será semelhante ao do modo conectado alterando apenas a impedância da rede pela impedância do secundário do transformador do CFR. Desta forma, é possível modelar dois sistemas representados pelas Figuras 25 e 26 onde é feita a análise do circuito considerando, respectivamente, a carga e o SFCR como fonte poluidora de harmônicos.

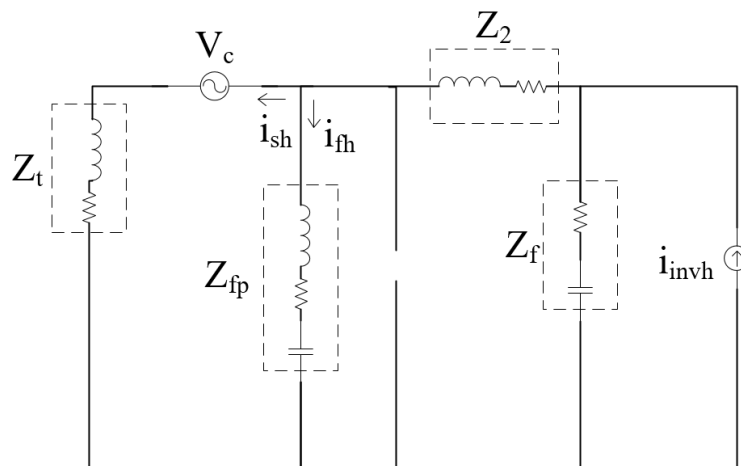
Utilizando o Teorema da Superposição e a Lei de Kirchhoff para as Correntes é possível encontrar as equações da relação entre as correntes do circuito e a corrente poluidora, representadas nas equações (17) a (21).

Figura 25 – Modelo do circuito da MR em modo ilhado com a carga como fonte poluidora



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 26 – Modelo do circuito da MR em modo conectado à rede com o SFCR como fonte poluidora



Fonte: Produção do próprio autor.

$$\frac{I_{Sh}}{I_{Lh}} = \frac{Z_{fp} * Z_{inv}}{Z_{fp} * Z_{inv} + Z_{inv}(Z_t + K_v) + Z_{fp}(Z_t + K_v)} \quad (17)$$

$$\frac{I_{Fh}}{I_{Lh}} = \frac{Z_{inv}(Z_t + K_v)}{Z_{fp} * Z_{inv} + Z_{inv}(Z_t + K_v) + Z_{fp}(Z_t + K_v)} \quad (18)$$

$$\frac{I_{Invh}}{I_{Lh}} = \left( \frac{Z_{fp} * Z_t}{Z_{fp} * Z_{inv} + Z_{inv} * Z_t + Z_{fp} * Z_t} \right) * \left( 1 + \frac{Z_{fp} * Z_{inv}}{Z_{fp} * Z_{inv}(Z_t + K_v) + Z_{fp}(Z_t + K_v)} \right) \quad (19)$$

$$\frac{I_{Sh}}{I_{Invh}} = \frac{Z_{fp} * Z_t}{Z_{fp}(K_v + Z_f + Z_t + Z_2) + Z_f(Z_t + K_v) + Z_2(Z_t + K_v)} \quad (20)$$

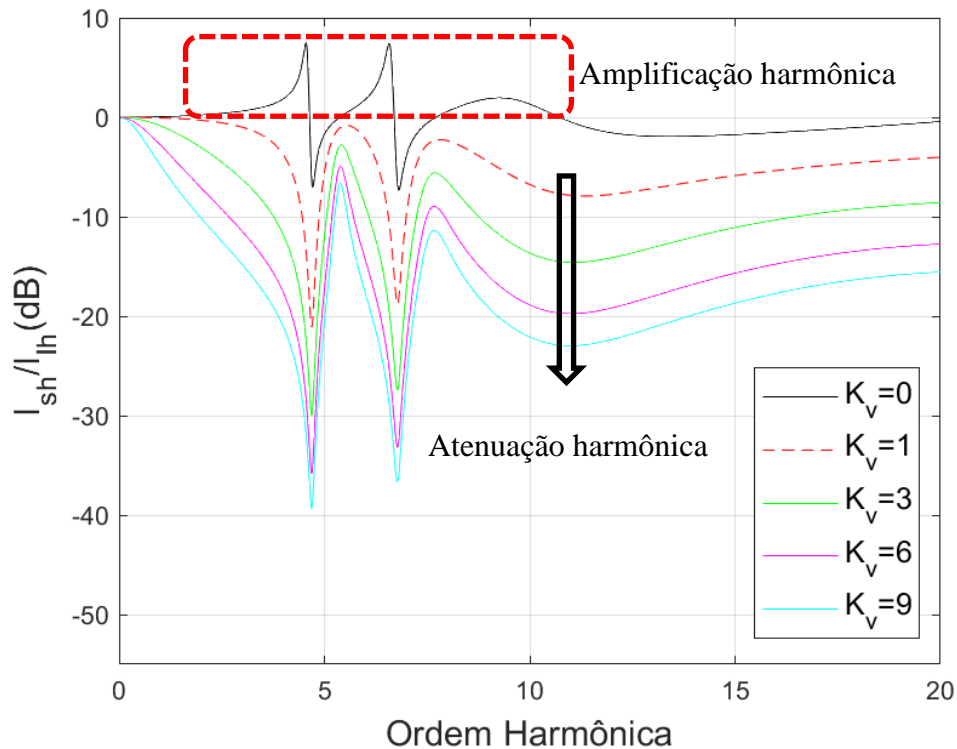
$$\frac{I_{Fh}}{I_{Invh}} = \frac{Z_f(Z_t + K_v)}{Z_{fp}(K_v + Z_f + Z_t + Z_2) + Z_f(Z_t + K_v) + Z_2(Z_t + K_v)} \quad (21)$$

Onde:

$Z_t$  – Valor da impedância do secundário do transformado do CFR;

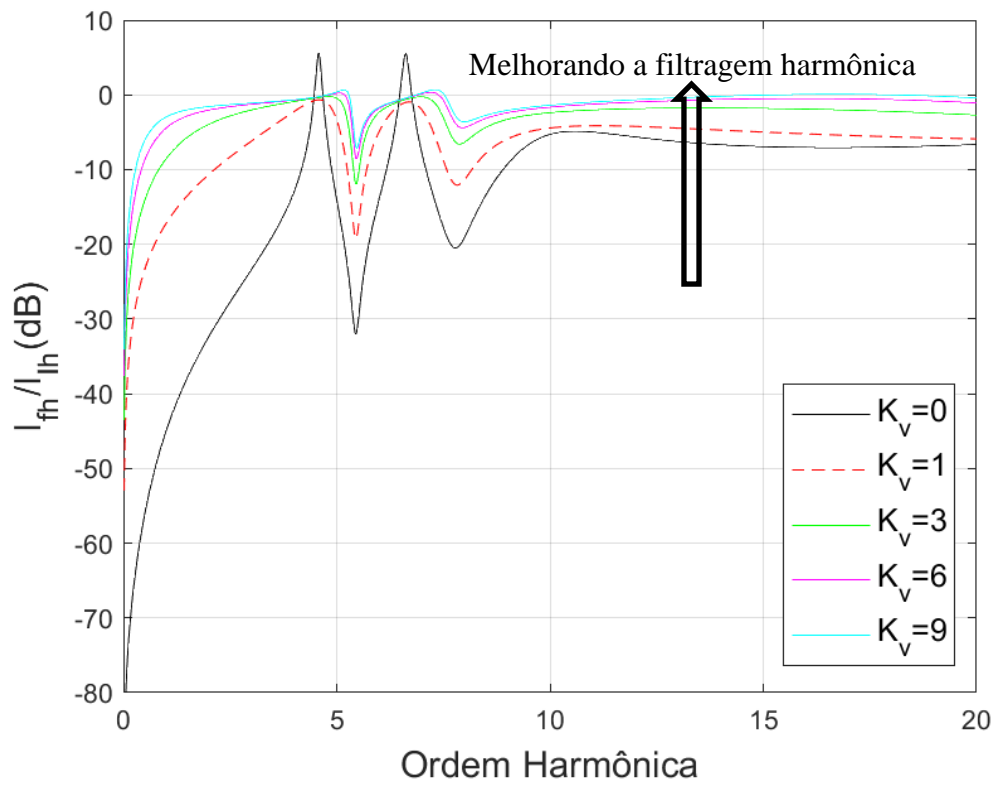
Para facilitar a análise das equações obtidas foram gerados gráficos, em decibéis (dB), que são apresentados nas Figuras 27 a 31.

Figura 27 – Característica de filtragem modo ilhado – Relação entre  $I_{Sh}$  e  $I_{Lh}$



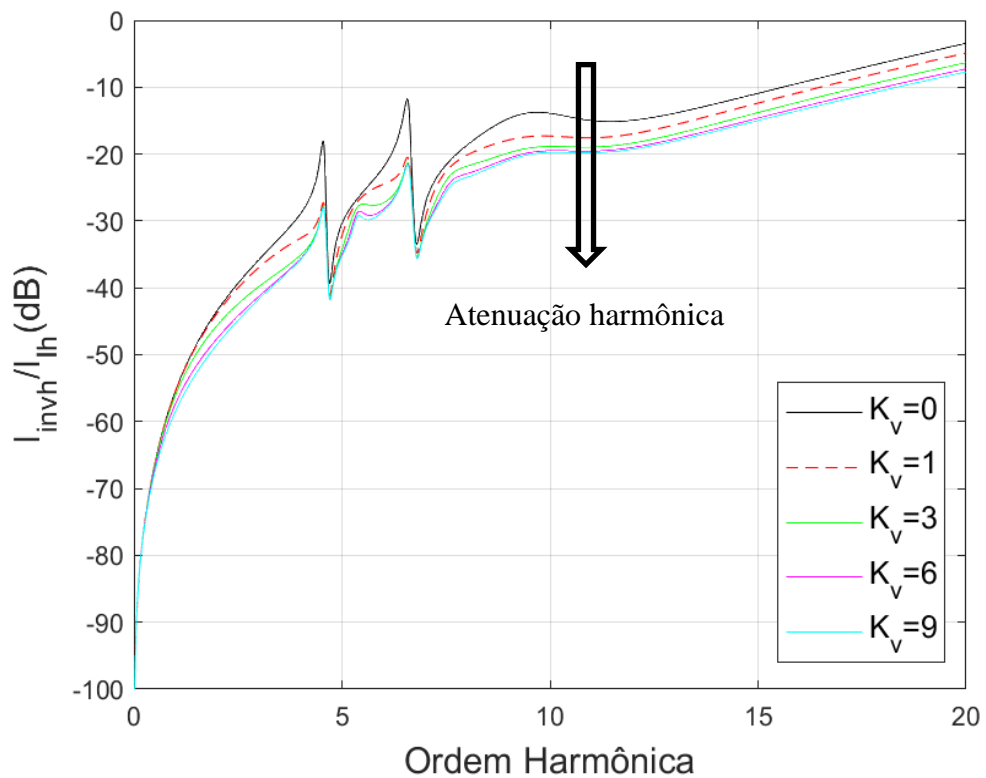
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 28 – Característica de filtragem modo ilhado – Relação entre  $I_{Fh}$  e  $I_{Lh}$



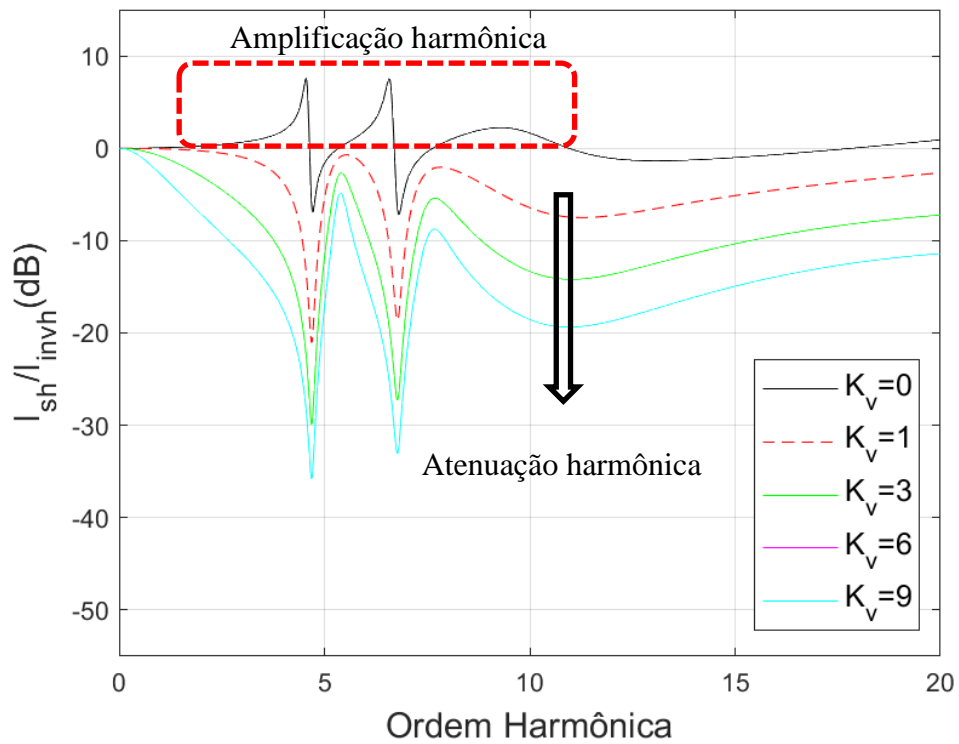
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 29 – Característica de filtragem modo ilhado – Relação entre  $I_{Invh}$  e  $I_{Lh}$



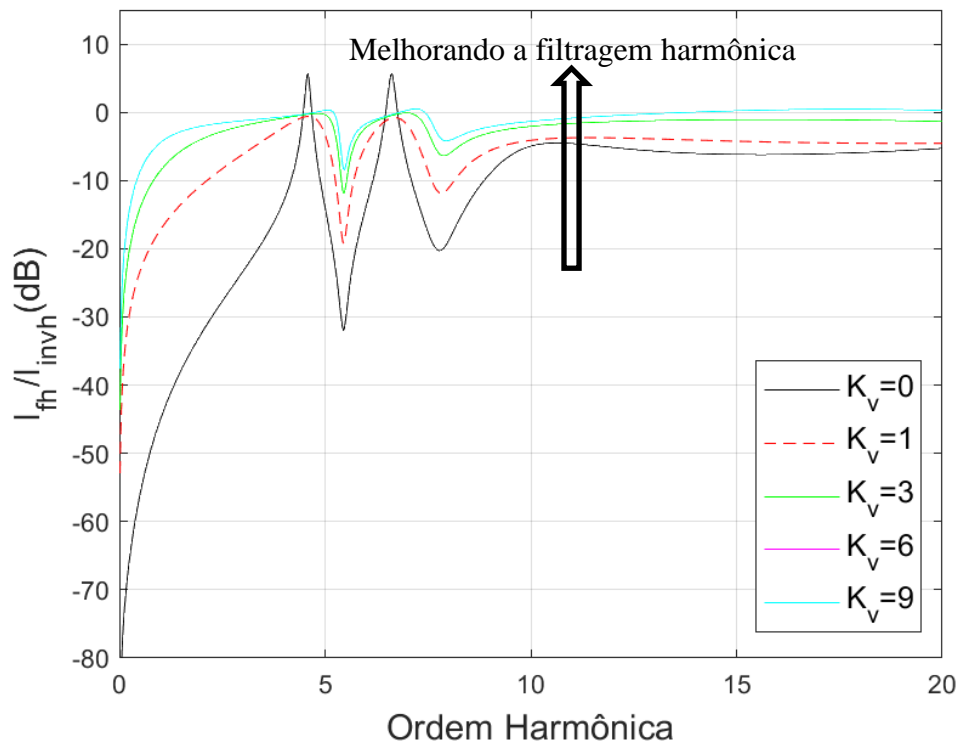
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 30 – Característica de filtragem modo ilhado – Relação entre  $I_{sh}$  e  $I_{Invh}$



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 31 – Característica de filtragem modo ilhado – Relação entre  $I_{fh}$  e  $I_{Invh}$



Fonte: Produção do próprio autor.



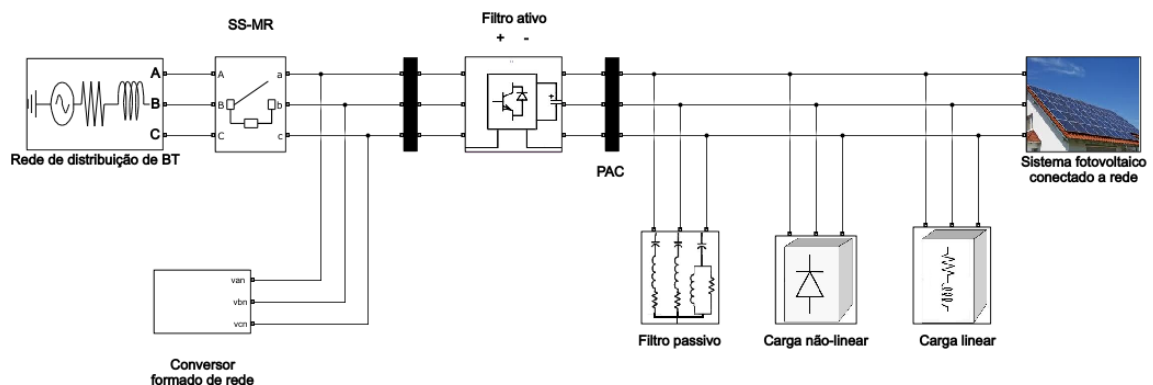
Analisando as funções de transferência da corrente da rede em relação a corrente carga poluidora pode-se observar que a MR operando no modo ilhado apresenta resultados com uma maior amplificação harmônica ( $K_v=0$ ), quando comparado ao modo conectado à rede. Nas Figuras 25, 27 e 28 fica evidenciada a influência do ganho na relação entre a corrente da rede e a do inversor pelas correntes poluidoras em que se percebe a atenuação harmônica com o aumento do ganho  $K_v$ . Já nas Figuras 26 e 29 é possível observar que com a redução da amplificação harmônica, ocorre uma melhora do desempenho do filtro passivo, pois o mesmo passa a absorver mais componentes harmônicas de corrente.

Para a determinação do ganho  $K_v$ , utiliza-se o método apresentado por AKAGI (1991). O método consiste em aumentar o ganho até que a curva de  $I_{sh}$  esteja abaixo de 0 dB. Desta forma, evita-se a circulação de corrente harmônica pela rede e cancela-se o efeito da amplificação harmônica. Observa-se que todos os valores de  $K_v$  escolhidos nas figuras atendem o método escolhido. Portanto será escolhido  $K_v = 1$ , pois pode-se observar uma notável redução na amplificação harmônica no PAC, com a corrente da rede com ganho menor do que 0 dB. Este ganho também propicia uma menor influência na distorção harmônica de tensão no PAC, como será explicado posteriormente nos resultados de simulação.

#### 4.4 Simulação do Filtro Híbrido na MR

Para se avaliar o desempenho do filtro híbrido série, este é implementado por meio de uma simulação digital no *software Simulink*. O sistema é representado pela rede de distribuição, a chave estática SS-MR e por 6 subsistemas, sendo eles o CFR, o filtro ativo, o filtro passivo, a carga não linear, a carga linear e o SFCR como pode ser observado na Figura 32.

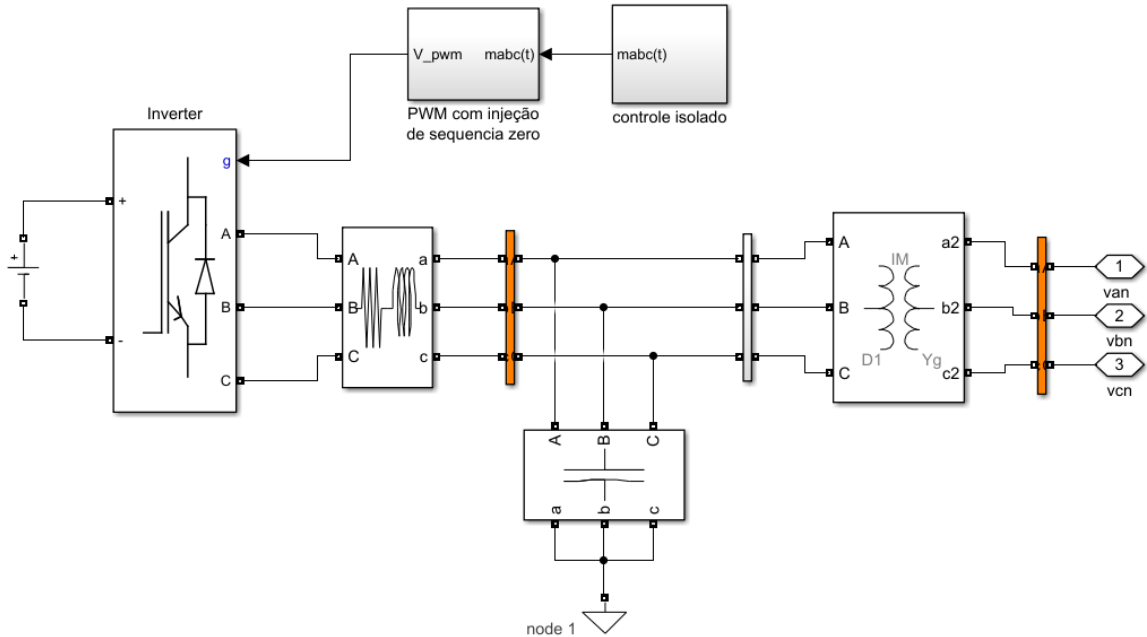
Figura 32 – Modelo da MR completo



Fonte: Produção do próprio autor.

Para serem melhor observados, os subsistemas serão exibidos individualmente. Sendo o primeiro deles o subsistema que representa o conversor formador de rede, com seu esquema representado na Figura 33.

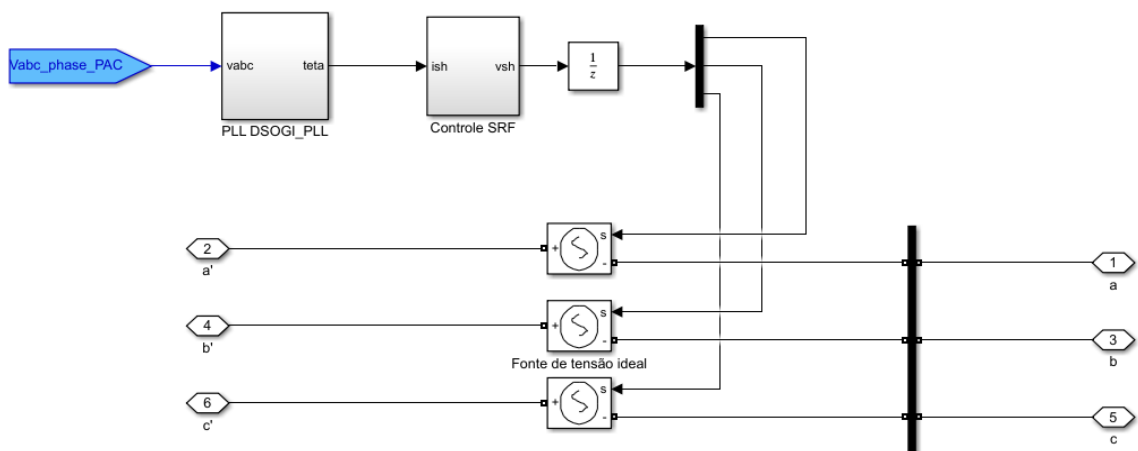
Figura 33 – Subsistema: conversor formador de rede



Fonte: Produção do próprio autor.

O segundo subsistema representa o filtro ativo que neste caso é representado por fontes de tensão ideais controladas, como apresentado na Figura 34.

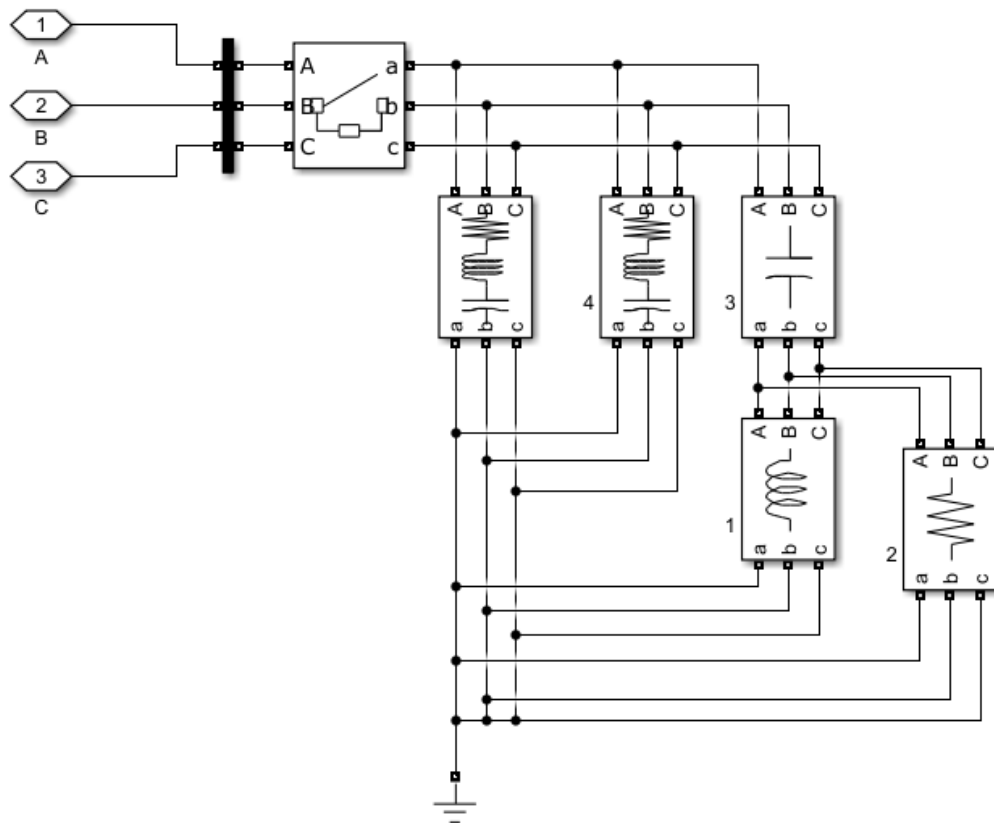
Figura 34 – Subsistema: filtro ativo ideal e seu sistema de controle



Fonte: Produção do próprio autor.

O terceiro subsistema representa o filtro passivo composto detalhado na Figura 35, com as respectivas unidades de filtragem passivas definidas na sessão 4.2.

Figura 35 – Subsistema: filtro passivo com três estágios

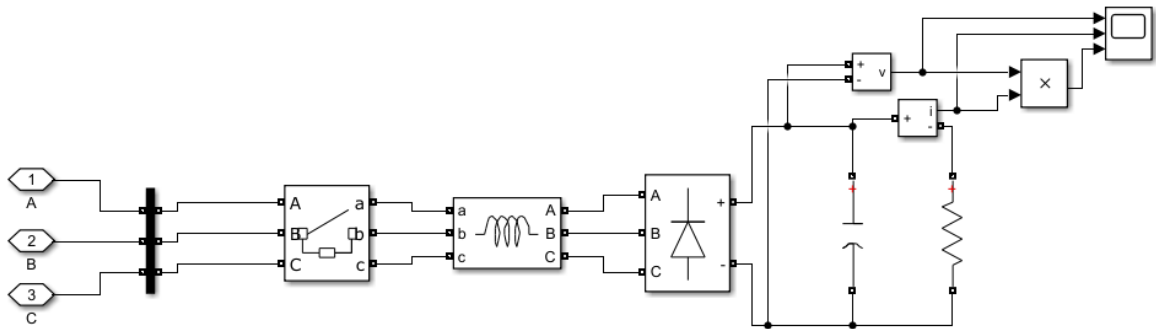


Fonte: Produção do próprio autor.

O quarto e o quinto subsistemas representam respectivamente a carga não linear e a linear, sendo representados nas Figuras 36 e 37.

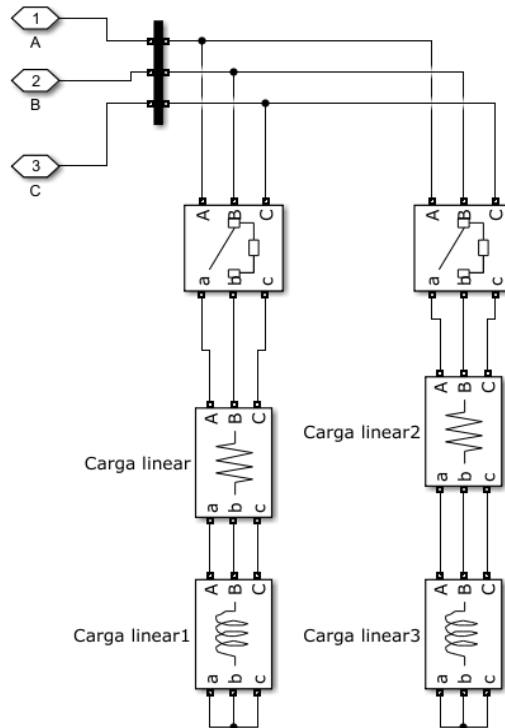
Como pode ser visto na Figura 38 o sexto subsistema representa o SFCR, onde pode-se notar a representação de uma unidade fotovoltaica representada por uma fonte de corrente, um conversor *boost* controlado pelo algoritmo MPPT perturba e observa, um inversor trifásico VSI e um filtro LCL.

Figura 36 – Subsistema: carga não linear



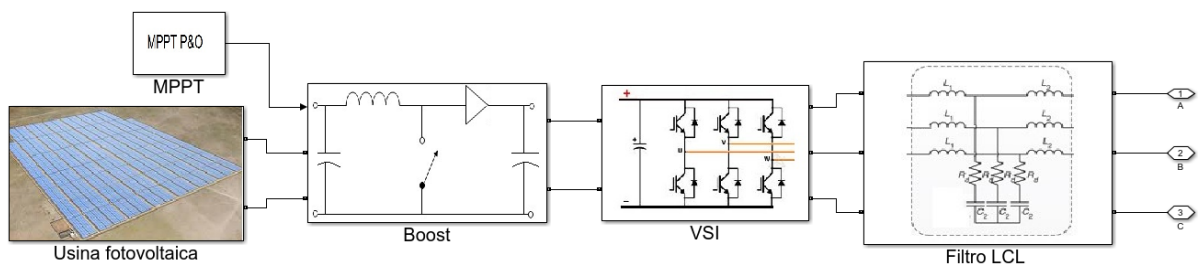
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 37 – Subsistema: carga linear



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 38 – Subsistema: sistema fotovoltaico conectado à rede



Fonte: Produção do próprio autor.

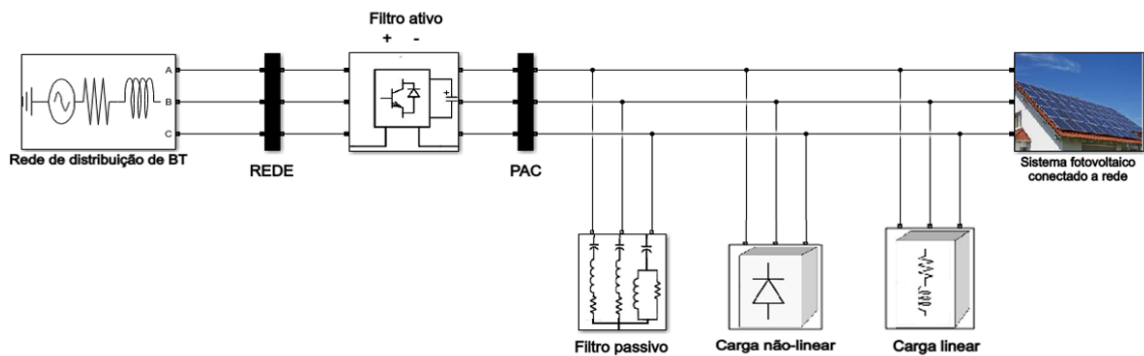
## 4.5 Resultados de Simulação

As simulações foram realizadas utilizando um ganho  $K_v = 1$ , como foi definido anteriormente. O filtro passivo entra em operação a partir do instante 400 ms e o filtro ativo a partir de 700 ms.

### 4.5.1 Análise no modo conectado

Para melhor entendimento foi separado o modelo do modo conectado, sendo possível observar os pontos onde serão verificadas as distorções harmônicas, sendo a rede antes do filtro ativo e a do PAC após o filtro ativo. Esse modelo pode ser visto na Figura 39.

Figura 39 – Modelo da MR no modo conectado à rede



Fonte: Produção do próprio autor.

Para a MR no modo conectado é possível observar os níveis de distorção harmônica antes do funcionamento dos filtros, somente com o filtro passivo e com o filtro híbrido série. No PAC, o  $DHT_v$  teve uma redução de 3,33 % com a conexão do filtro passivo e ao adicionar o filtro ativo ocorreu um aumento de 0,2%. Esse aumento se deve a injeção de harmônicos de tensão no PAC pelo filtro ativo série. Esses harmônicos são oriundos da correção dos harmônicos da corrente que é utilizada como referência pelo controle do filtro, e dessa forma o filtro ativo faz o papel de isolador harmônico, forçando as componentes harmônicas de corrente em direção a filtro passivo, porém acaba injetando harmônicos diretamente no PAC ocasionando um aumento na  $DHT_v$ . Analisando a tensão de rede à montante do filtro ativo pode-se perceber que a redução do  $DHT_v$  ocorre não somente com a atuação do filtro passivo como também continua após o início da operação do ativo. Obtendo, assim, uma redução total na tensão de 4,3%, e não sendo influenciada pela injeção de harmônicos descrita acima.

Considerando a MR sem filtro, a  $DHT_I$  no PAC é igual a 12,03 %. Quando é adicionado o filtro passivo obtém-se valores de  $DHT_I$  próximos de 4,6 %, e ao adicionar o filtro ativo observa-se uma redução para valores próximos de 1,94%. Esse resultado pode ser atribuído, principalmente à eliminação do efeito da ressonância paralela com a utilização do filtro ativo. O Quadro 6 representa os valores de DHT em cada estágio da simulação.

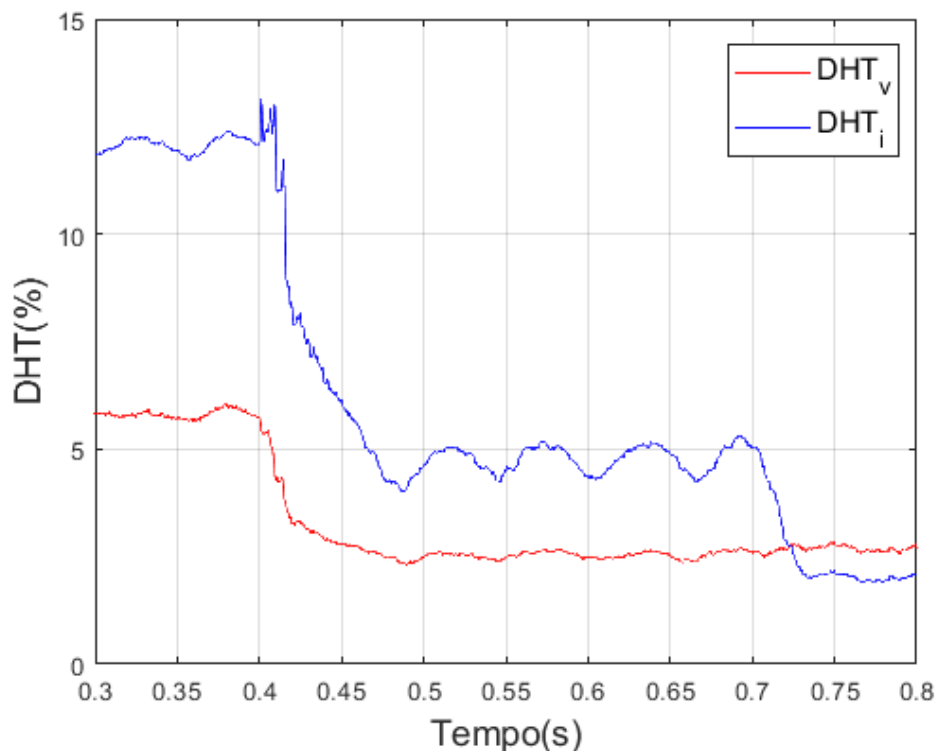
Nas Figuras 40 e 41 é possível observar, respectivamente o DHT de uma fase do PAC e da rede ao decorrer da simulação. Nelas são possíveis observar o efeito da implementação dos filtros.

Quadro 6 – Valores de DHT para cada estágio da simulação no modo conectado

Grandezas	Sem filtro	Filtro Passivo	Filtro Híbrido Série
DHT Tensão no PAC (%)	5,7896	2,4562	2,6623
DHT Corrente no PAC (%)	12,0321	4,6052	1,9421
DHT Tensão de rede elétrica (%)	5,7896	2,4562	1,5552

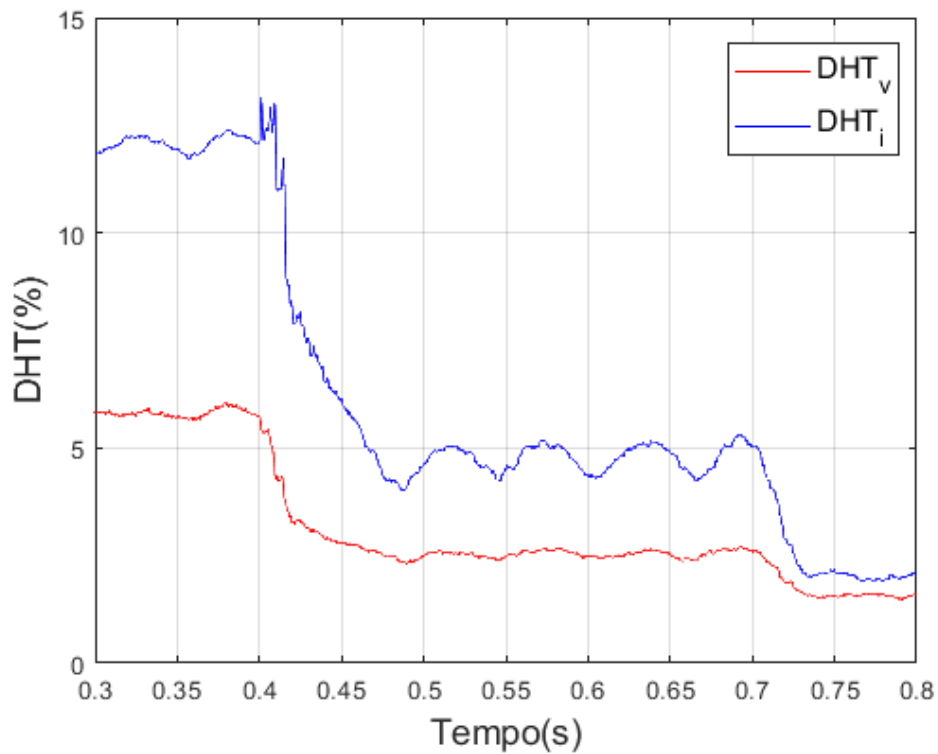
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 40 – Distorção harmônica de tensão e corrente no PAC



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 41 – Distorção harmônica de tensão e corrente na rede elétrica

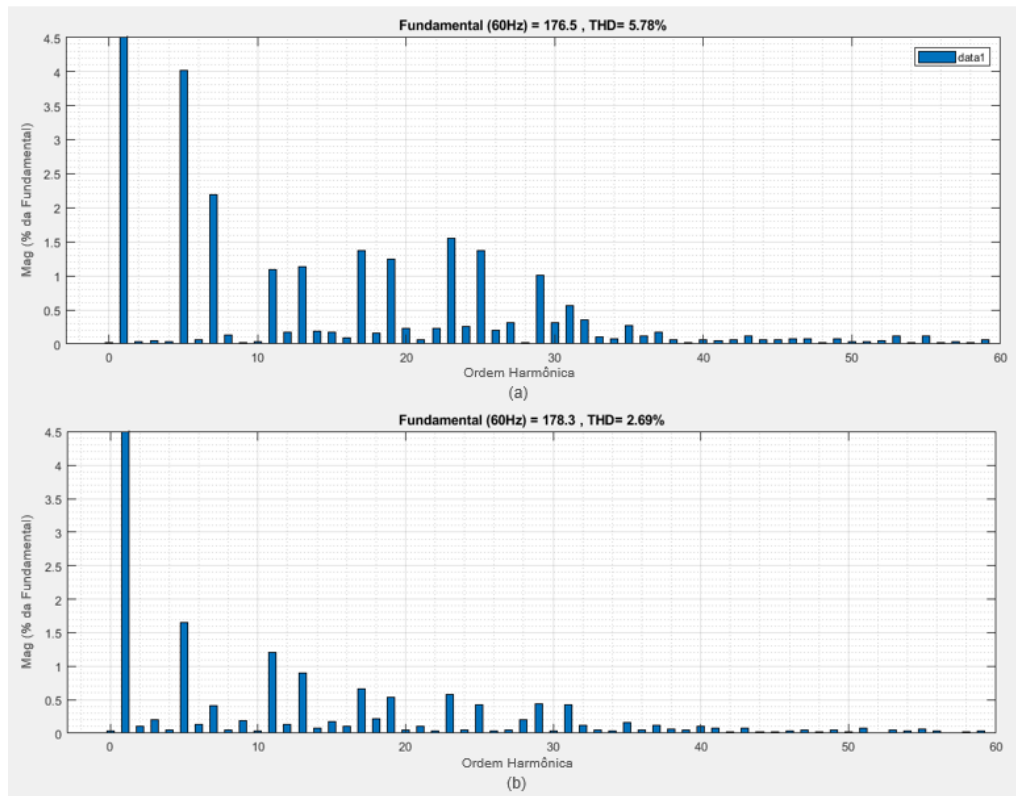


Fonte: Produção do próprio autor.

Utilizando a ferramenta *PowerGUI* no *Simulink* é possível obter as Figuras 42 e 43 que representam, respectivamente, o espectro harmônico da tensão e da corrente obtidos sem filtro e com o filtro híbrido. É possível observar uma redução acentuada nos harmônicos individuais tanto na tensão quanto na corrente.

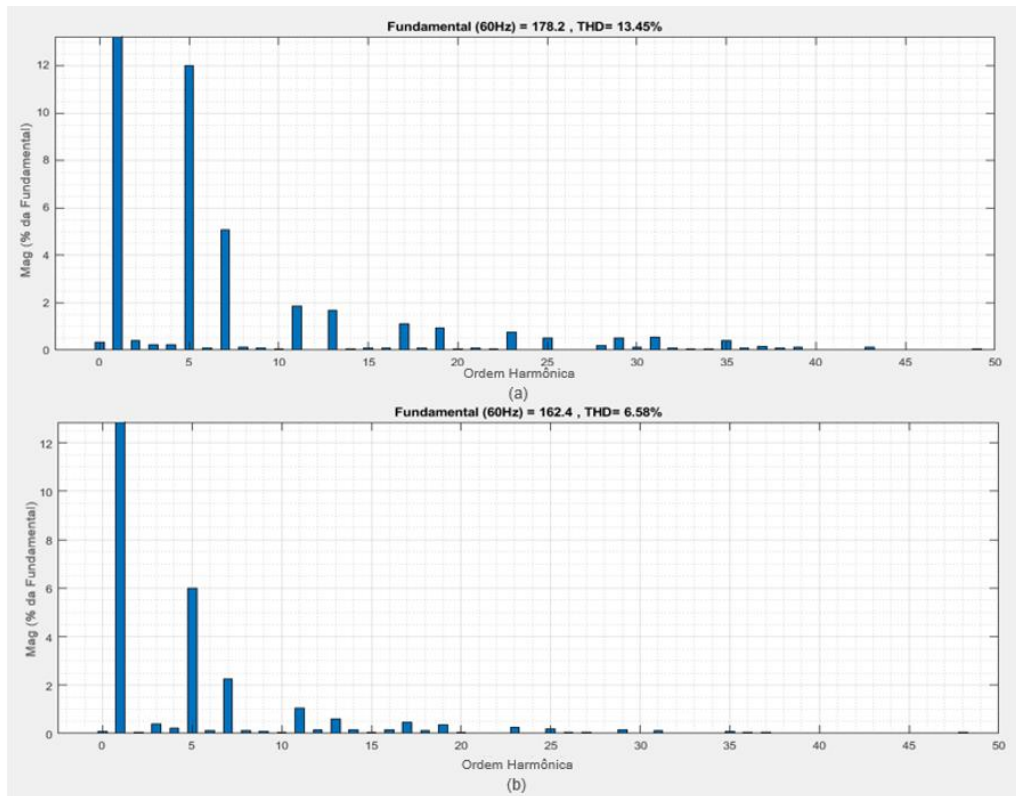
Por fim, pode-se dizer que os níveis de DHT obtidos foram satisfatórios, pois é possível reduzir a DHT do PAC e da rede em relação ao seu valor inicial, fazendo com que esses valores estejam dentro dos limites estabelecidos pela IEEE 519 (5% para corrente) e o modulo 8 do PRODIST (10% para tensão). O pequeno acréscimo no  $DHT_v$  no PAC é compensado pela redução no  $DHT_i$  e se deve a injeção de tensão do filtro ativo, já que esse valor aumenta com o ganho  $K_v$ .

Figura 42 – Espectro da tensão. (a) Sem filtro e (b) com filtro híbrido série



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 43 – Espectro da corrente. (a) Sem filtro e (b) com filtro híbrido série



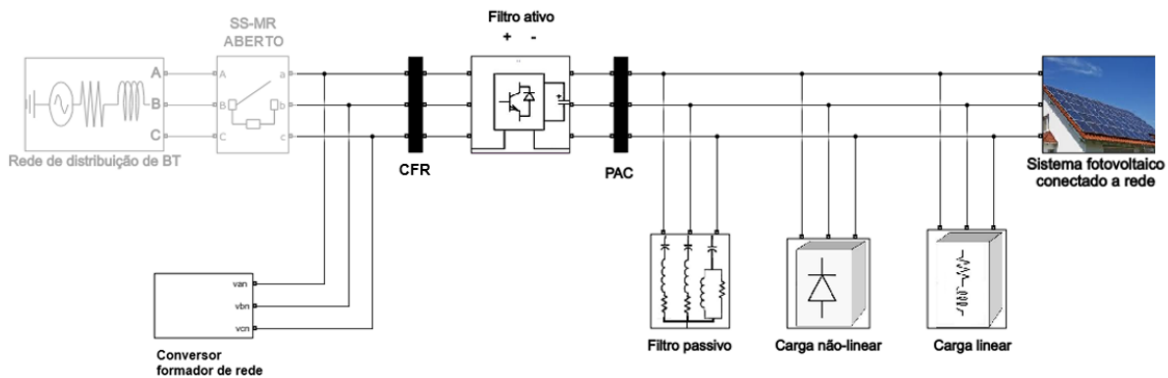
Fonte: Produção do próprio autor.



#### 4.5.2 Análise no modo ilhado

Já para o modo ilhado as grandezas de referência serão medidas no CFR e no PAC, podendo ser observadas na Figura 44.

Figura 44 – Modelo da MR em modo ilhado



Fonte: Produção do próprio autor.

Analisando o modo ilhado pode-se observar que este cenário se torna mais crítico para a compensação harmônica, devido à baixa robustez do CFR que possui uma baixa potência de curto-circuito. Os valores de DHT obtidos serão representados no Quadro 7. As Figuras 45 e 46 representam o DHT da corrente e da tensão para o estágio sem filtro, com filtro passivo e com filtro híbrido.

Quadro 7 – Valores de DHT para cada estágio da simulação no modo ilhado

Grandezas	Sem filtro	Filtro Passivo	Filtro Híbrido Série
DHT Tensão no PAC (%)	4,5082	3,2351	4,7318
DHT Corrente no PAC (%)	13,4565	11,3212	6,5813
DHT Tensão do CFR (%)	4,5082	3,2351	2,2116

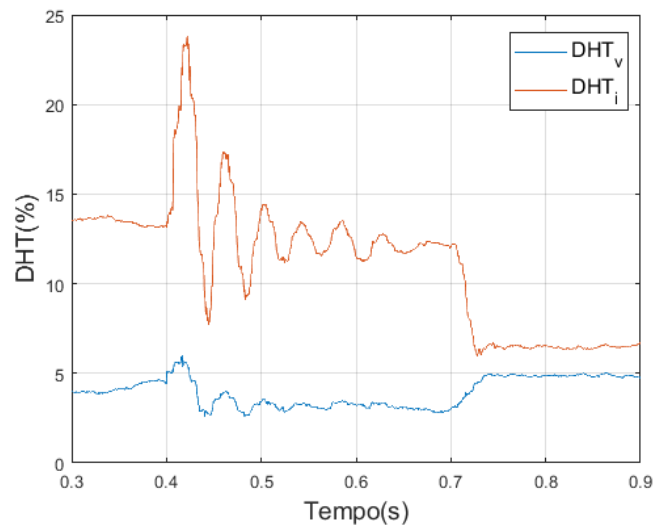
Fonte: Produção do próprio autor.

Observa-se que com a utilização do filtro híbrido houve um aumento na  $DHT_V$  no PAC de 0,23% e uma redução de 6,9% na  $DHT_I$ . Esse aumento se deve ao mesmo motivo citado no modo conectado, como o filtro ativo utiliza a corrente como referência acaba injetando harmônicos no para compensar a distorção da corrente acarretando num acréscimo da  $DHT_V$ .

Já o  $DHT_v$  dá rede quando adicionado o filtro ativo reduz o em 2,3%, não sofrendo o efeito dos harmônicos injetados pelo filtro ativo.

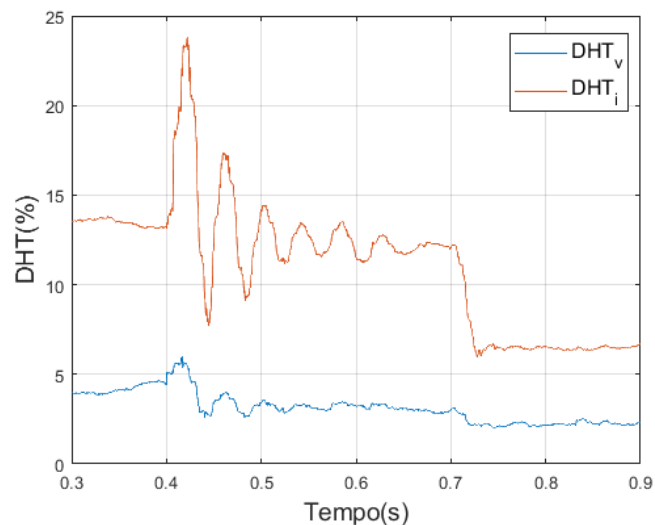
Utilizando a ferramenta *PowerGUI* no *Simulink* é possível obter as Figuras 43 e 44. Na Figura 43 é possível ver o espectro da tensão no PAC e comprovar que com o filtro híbrido série as componentes harmônicas apresentam porcentagens menores se comparadas a quando não possui o filtro, e apenas no quinto harmônico apresenta um acréscimo de 1% devido a impedância do secundário do transformador do CFR. Já na Figura 47 observa-se o espectro da corrente no PAC, apresentando uma redução mais acentuada nas componentes harmônicas compensando o pequeno aumento citado anteriormente.

Figura 45 – Distorção harmônica de tensão e corrente no PAC



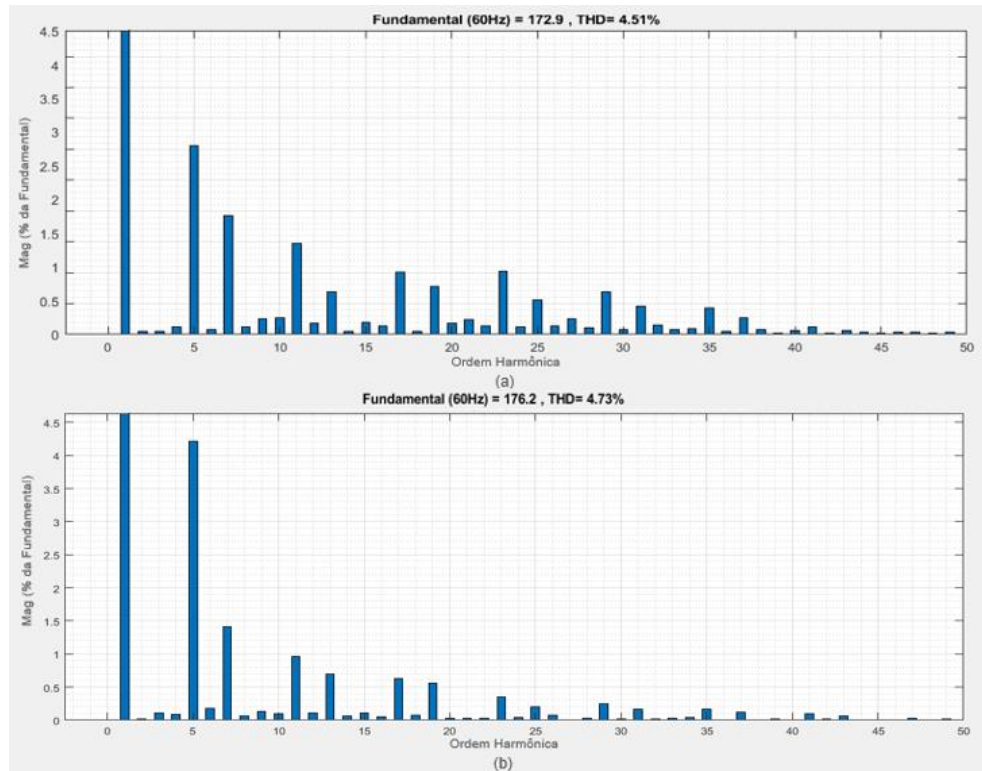
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 46 – Distorção harmônica de tensão e corrente no CFR



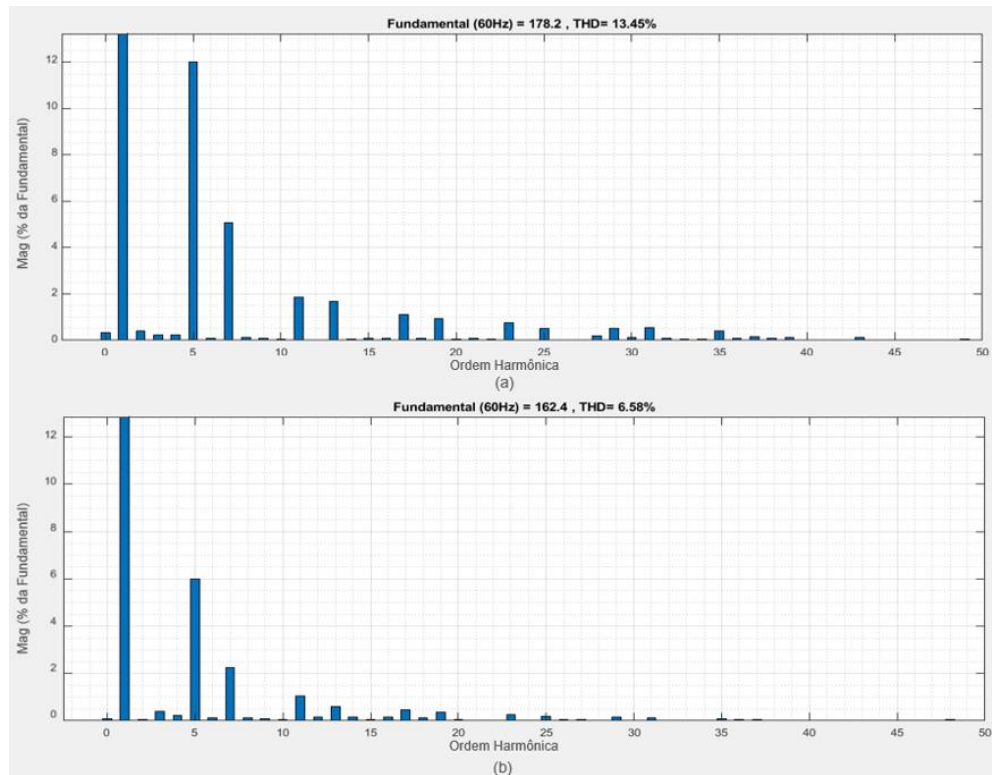
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 47 – Espectro da tensão. (a) Sem filtro e (b) com filtro híbrido série



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 48 – Espectro da tensão. (a) Sem filtro e (b) com filtro híbrido série



Fonte: Produção do próprio autor.

Por fim, pode-se concluir que os resultados obtidos são satisfatórios, mesmo com o aumento do  $DHT_V$  do PAC no modo ilhado, a redução no  $DHT_I$  é mais expressiva.

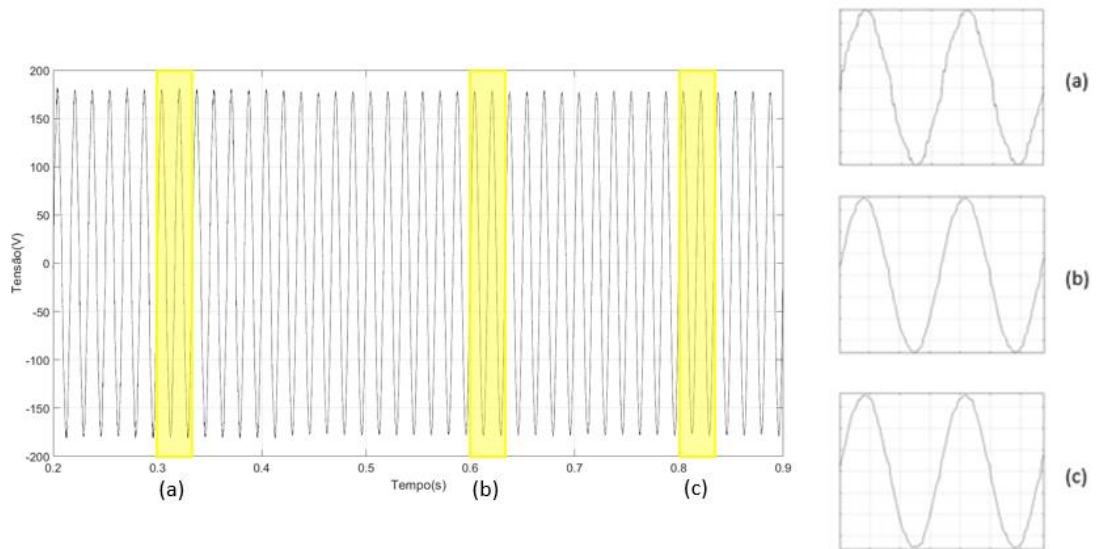
## 4.6 Grandezas Elétricas

### 4.6.1 Análise no modo conectado

As Figuras 49 a 51 representam, respectivamente, as formas de onda de uma fase da tensão no PAC, da corrente no PAC e da tensão na rede, antes da atuação do filtro passivo, com o filtro passivo e com o filtro híbrido.

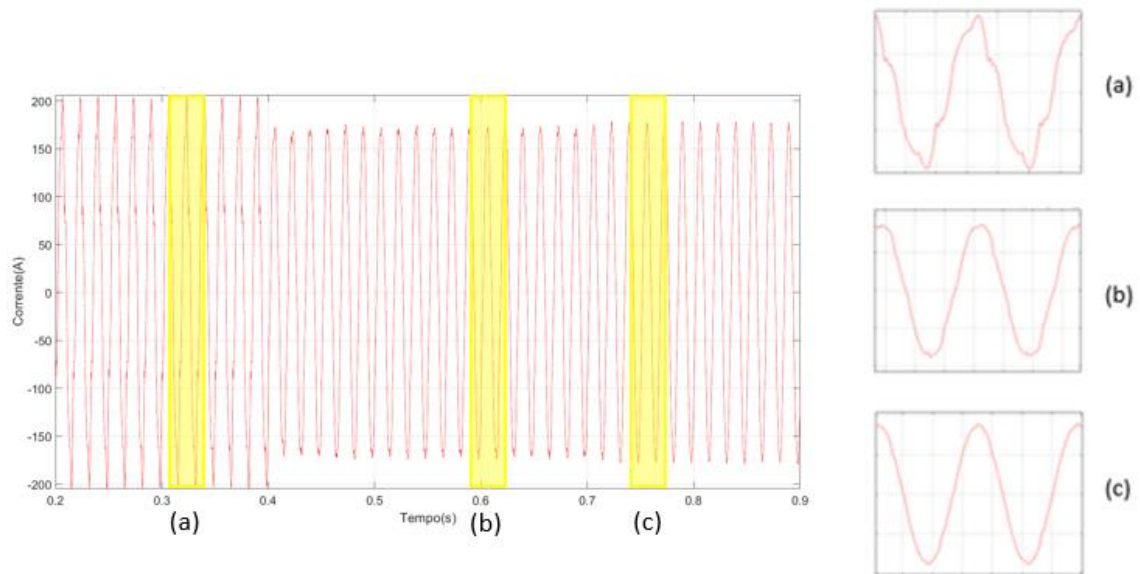
Na Figura 49 é possível observar a melhoria do formato da onda da tensão no PAC, ocasionada pela implementação do filtro híbrido. Na Figura 50 percebe-se uma redução da corrente do PAC devido a implementação do filtro passivo. Já na Figura 51 está demonstrada a tensão na rede, que apresenta resultado semelhante ao do PAC mesmo com pequeno aumento do  $DHT_V$ .

Figura 49 – Tensão de fase no PAC -  $V_{an}$  no domínio do tempo. (a) Sem filtro, (b) filtro passivo e (c) filtro híbrido



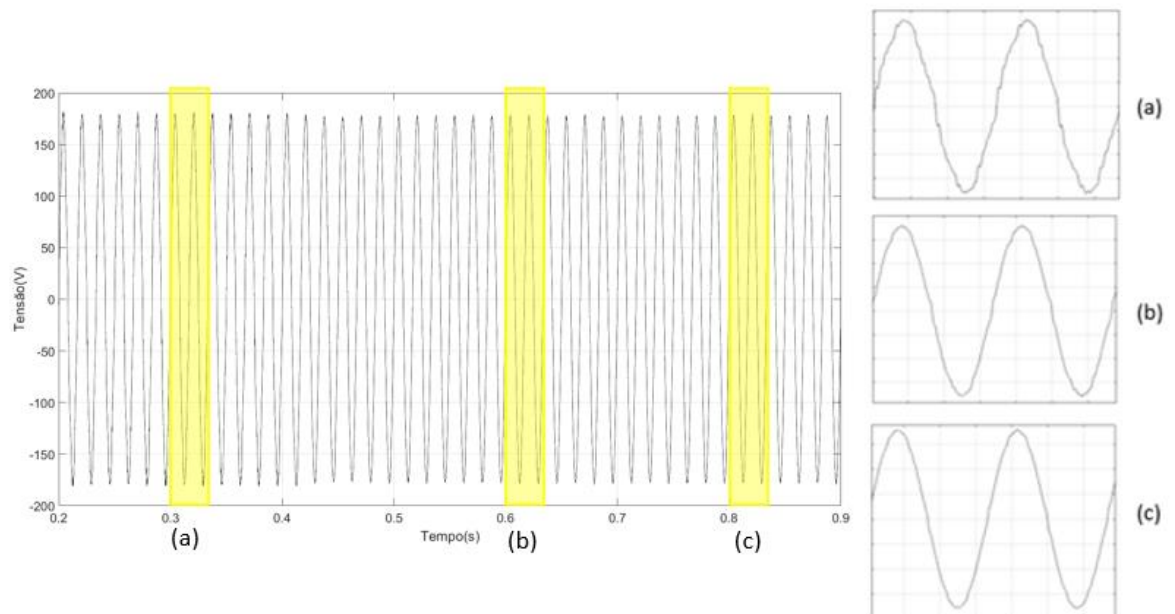
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 50 – Corrente de fase no PAC -  $I_{an}$  no domínio do tempo. (a) Sem filtro, (b) filtro passivo e (c) filtro híbrido



Fonte: Produção do próprio autor.

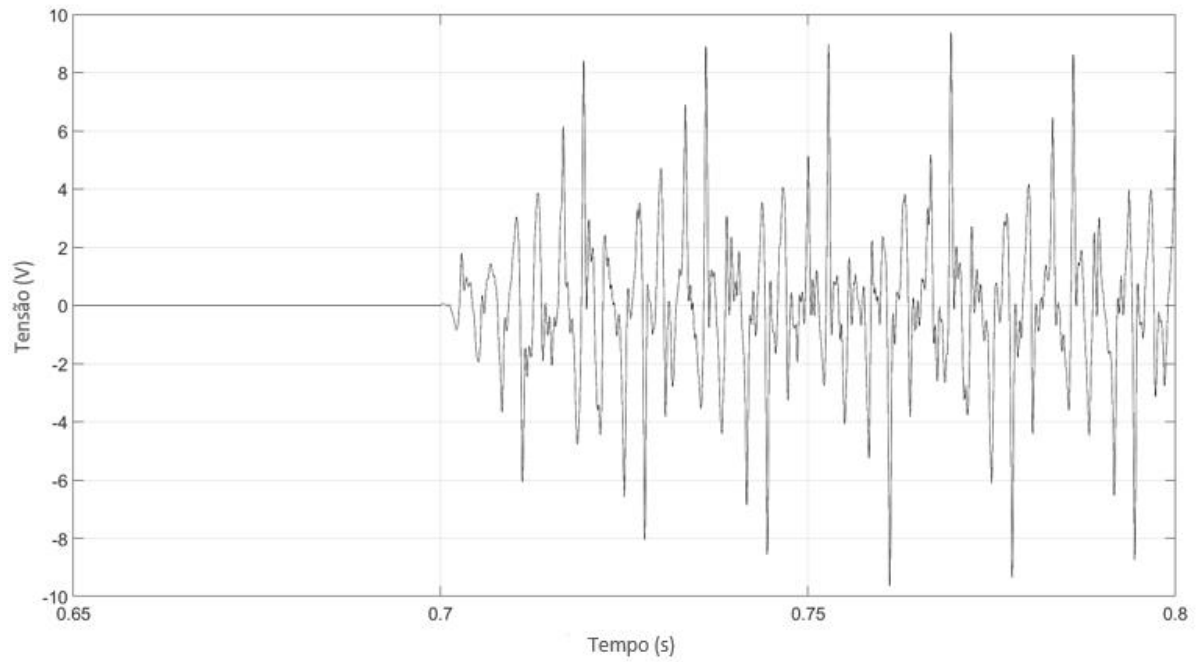
Figura 51 – Tensão de fase na rede -  $V_{an}$  no domínio do tempo. (a) Sem filtro, (b) filtro passivo e (c) filtro híbrido



Fonte: Produção do próprio autor.

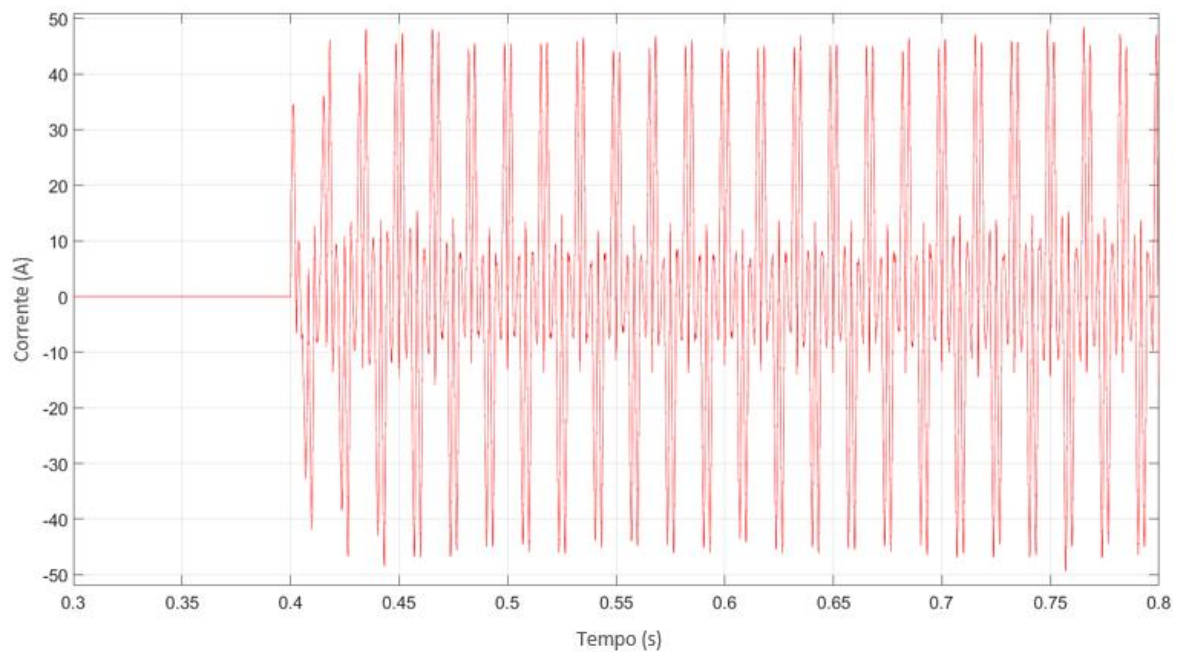
Também é possível observar a tensão no filtro ativo e a corrente no filtro passivo nas Figuras 52 e 53. A tensão será utilizada posteriormente para o cálculo da potência nominal do filtro.

Figura 52 – Tensão no filtro ativo



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 53 – Corrente no filtro passivo

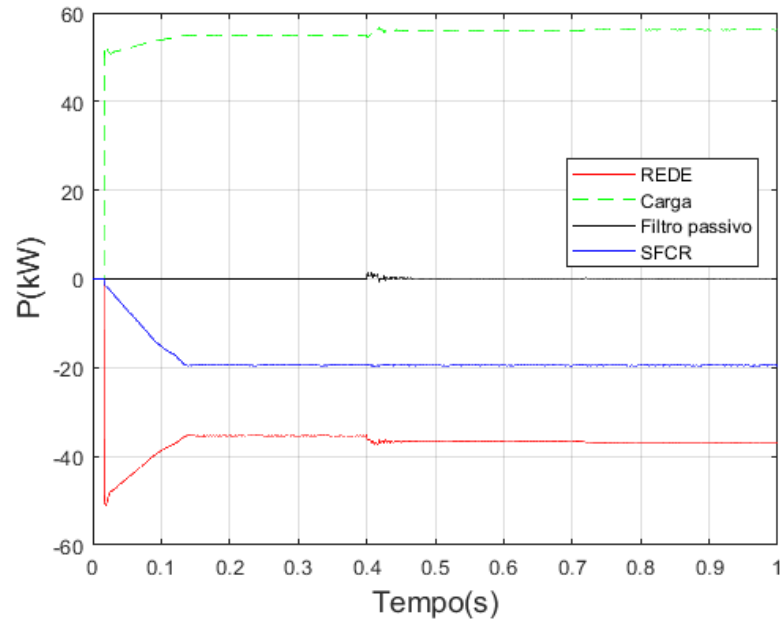


Fonte: Produção do próprio autor.

Por fim, podem ser observados, respectivamente, nas Figuras 54 e 55 os fluxos de potência ativa e reativa. Por meio dos valores encontrados foi possível confeccionar a Figura 56, que

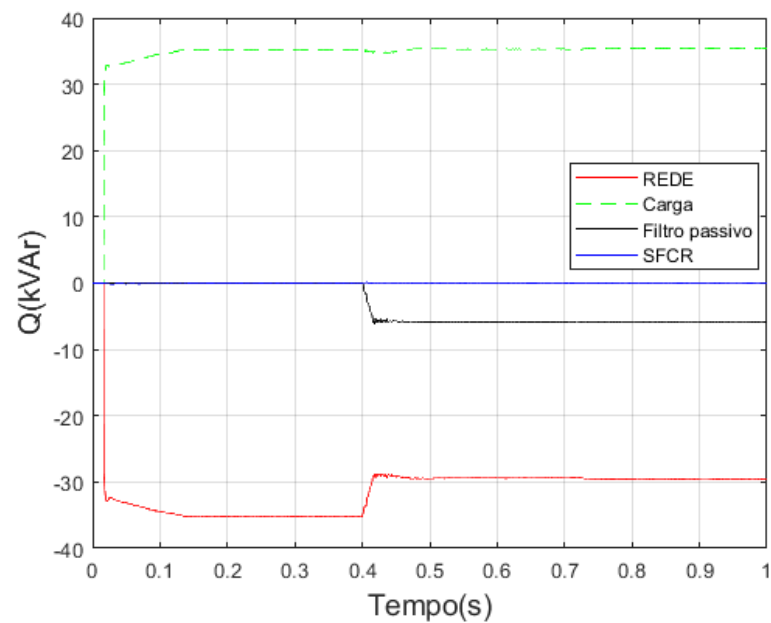
representa o fator de potência no PAC da MR. É possível notar um aumento do fator de potência ao adicionar os filtros ao sistema.

Figura 54 – Fluxo de potência ativa



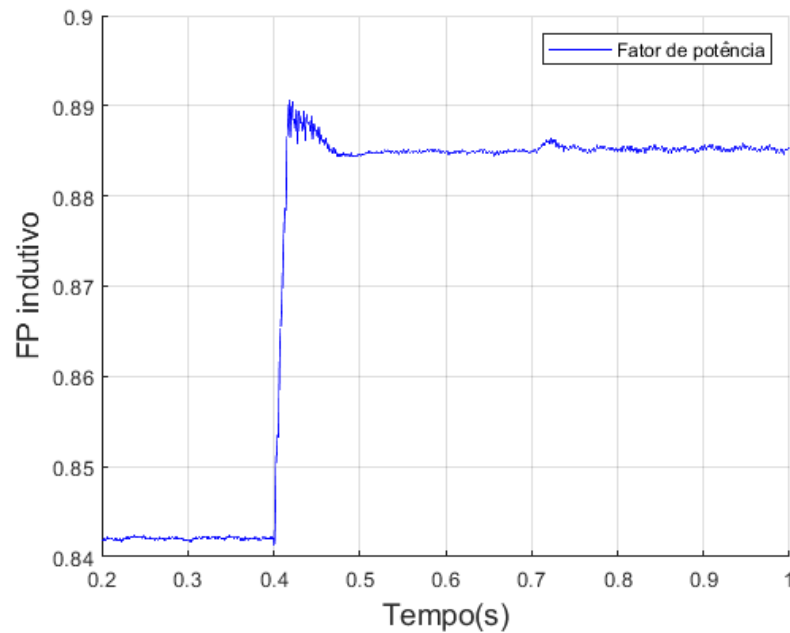
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 55 – Fluxo de potência reativa (Q(kVAR)) versus Tempo(s).



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 56 – Fator de potência no PAC da MR



Fonte: Produção do próprio autor.

#### 4.6.2 Análise no modo ilhado

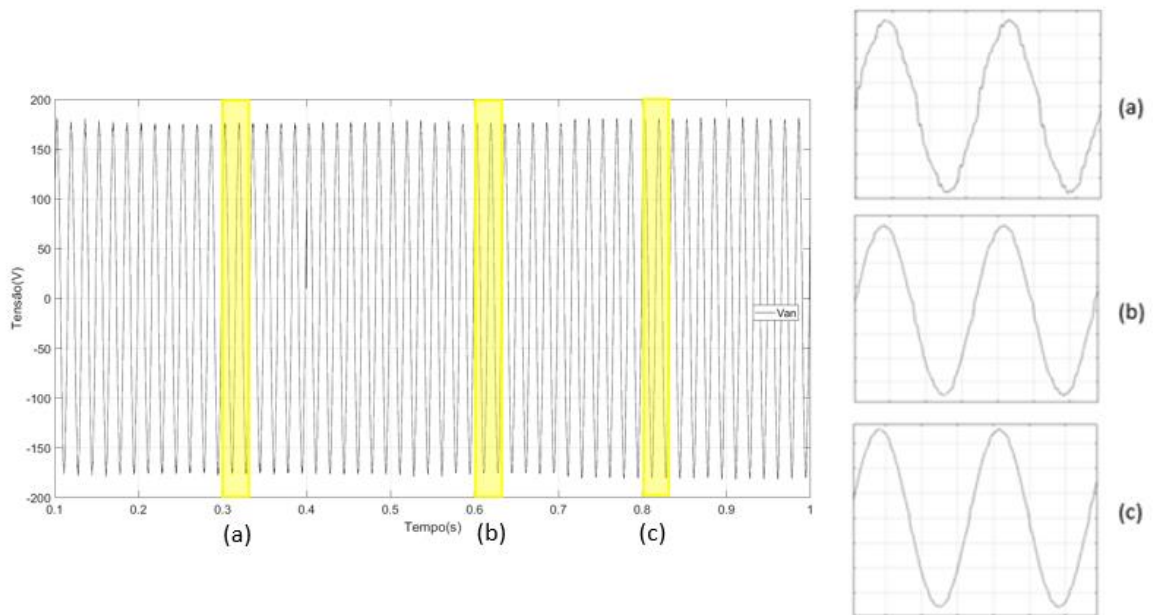
As Figuras 57 a 59 representam, respectivamente, as formas de onda de uma fase da tensão no PAC, da corrente no PAC e da tensão na rede, antes da implementação do filtro passivo, com o filtro passivo e com o filtro híbrido.

Assim como no modo conectado é possível observar uma melhoria na corrente gerada pela compensação harmônica. Na Figura 57 é visualizado que não houve uma melhoria na tensão do PAC ocasionada pela injeção de harmônico do filtro ativo ao compensar a corrente. Porém, na tensão da rede é visível a melhora da sua forma de onda quando o filtro híbrido está operando, por não ser afetada pela injeção de harmônicos descrita anteriormente e sua simulação está representada na Figura 59.

Assim como no modo conectado, pode-se observar a tensão no filtro ativo na Figura 60 e a corrente no filtro passivo na Figura 61.

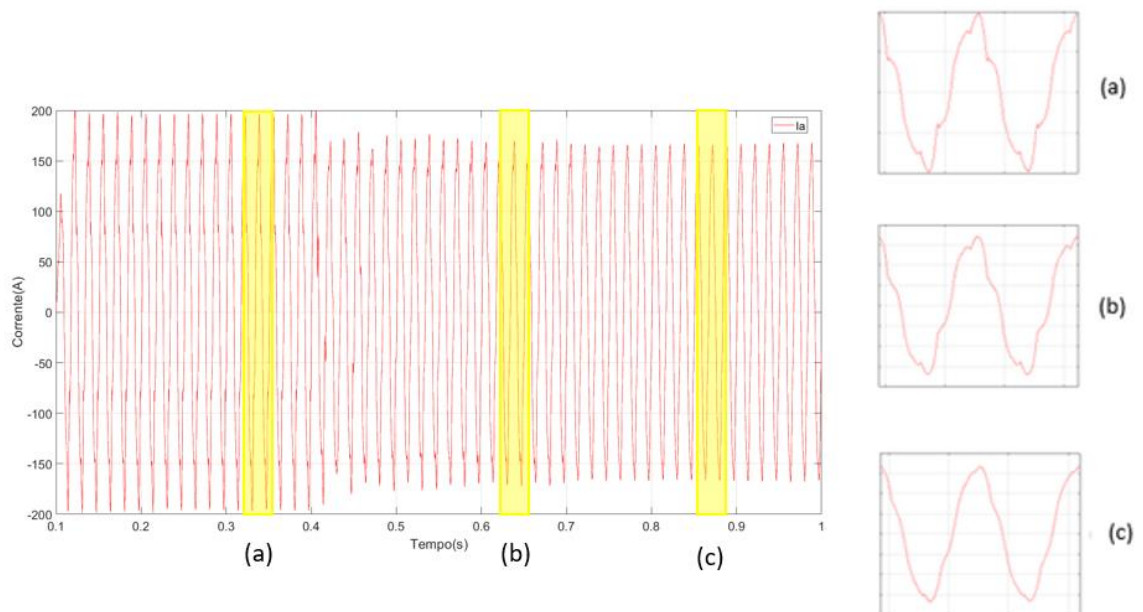


Figura 57 – Tensão de fase no PAC -  $V_{an}$  no domínio do tempo. (a) Sem filtro, (b) Filtro passivo e (c) Filtro híbrido



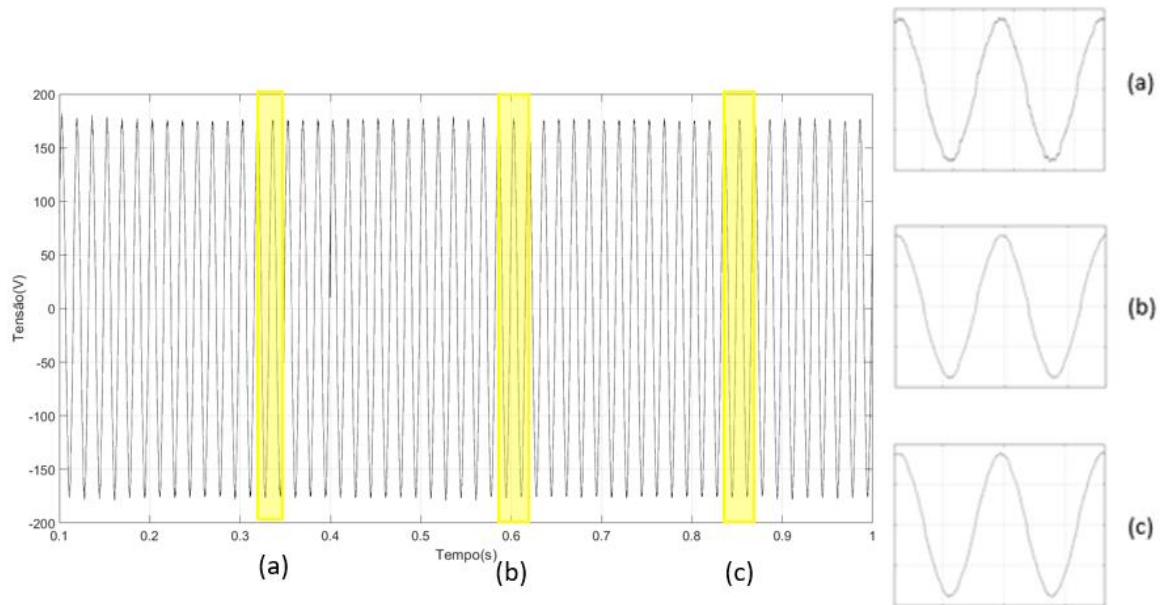
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 58 – Corrente de fase no PAC -  $I_{an}$  no domínio do tempo. (a) Sem filtro, (b) Filtro passivo e (c) Filtro híbrido



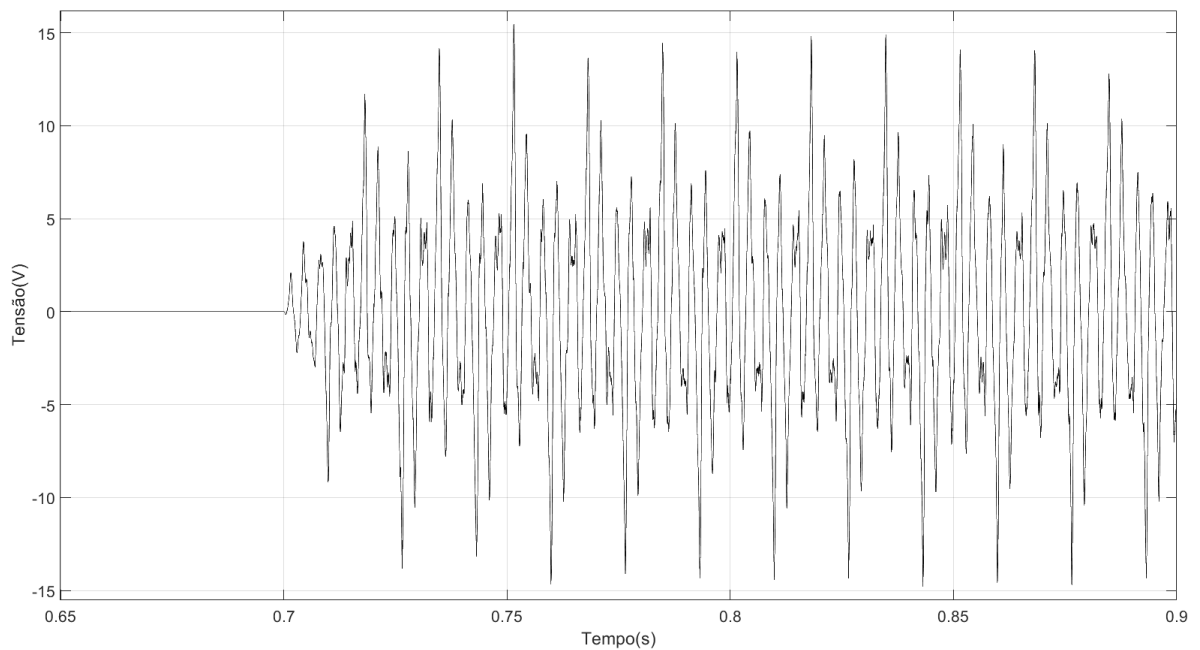
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 59 – Tensão de fase na rede -  $V_{an}$  no domínio do tempo. (a) Sem filtro, (b) Filtro passivo e (c) Filtro híbrido



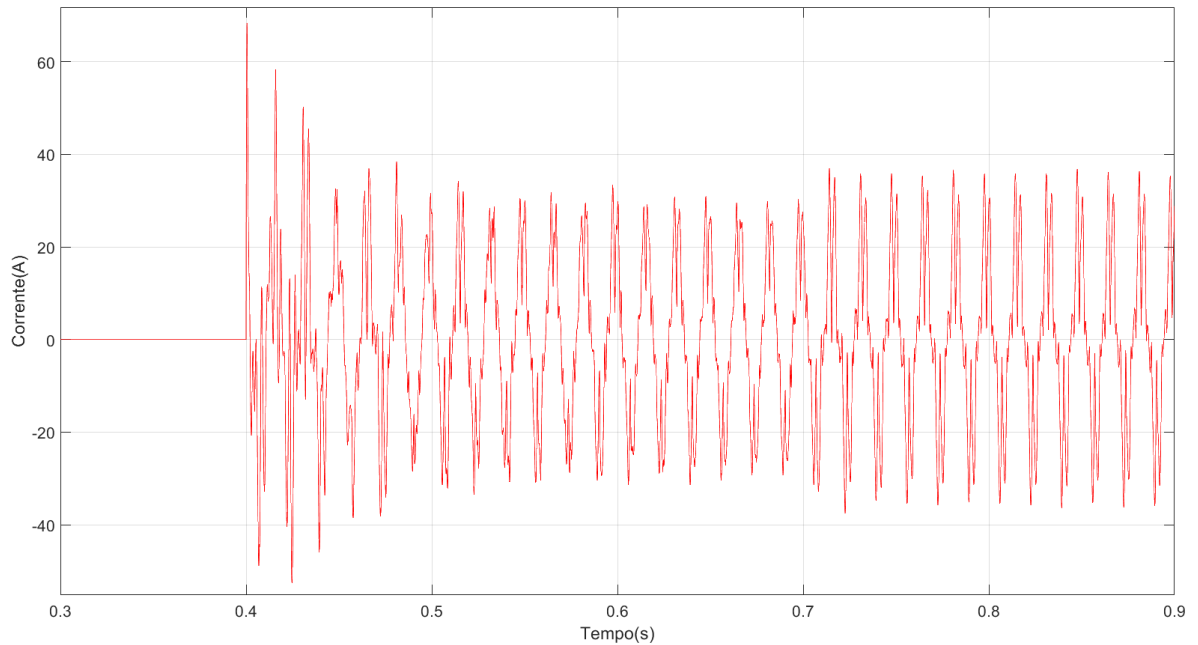
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 60 – Tensão no filtro ativo



Fonte: Produção do próprio autor.

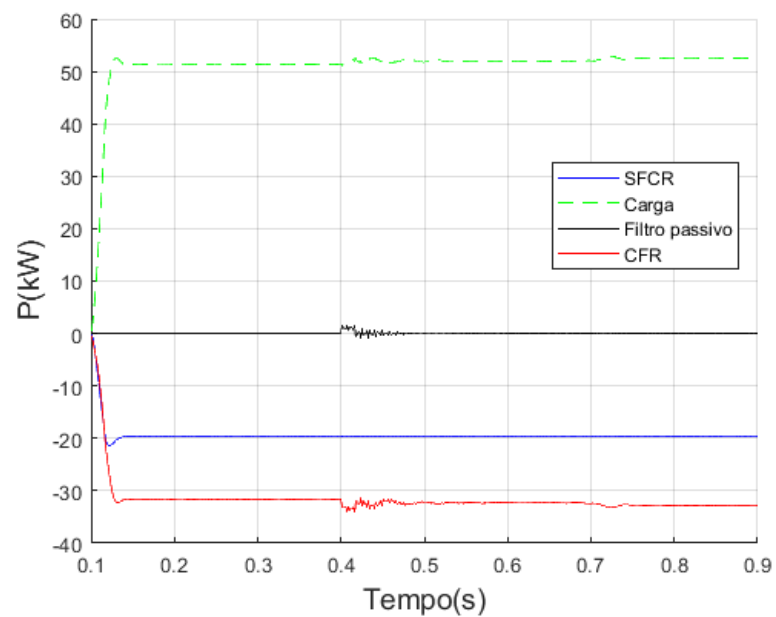
Figura 61 – Corrente no filtro passivo



Fonte: Produção do próprio autor.

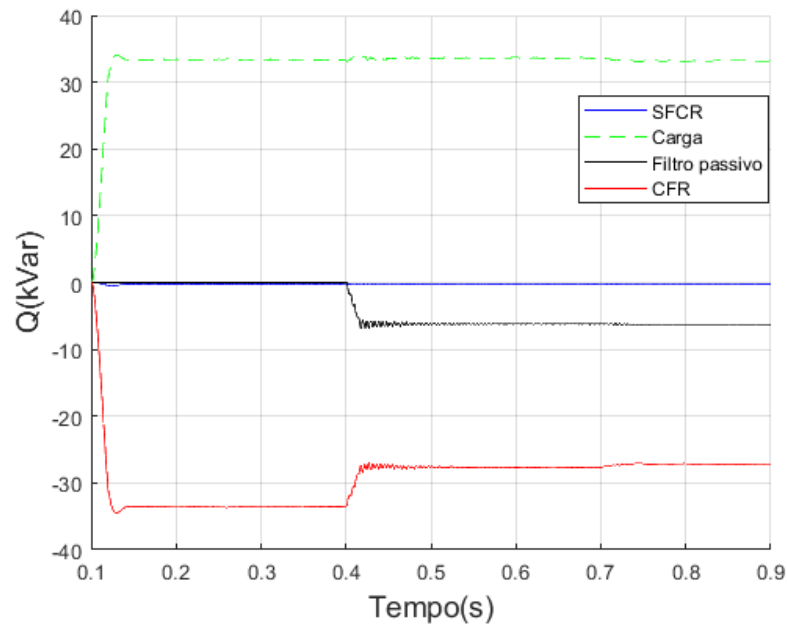
Por fim, podem ser observados, respectivamente, nas Figuras 62 e 63 os fluxos de potência ativa e reativa. Assim como no modo conectado pode-se calcular os valores do fator de potência no PAC MR, como ilustrado na Figura 64. Nela é possível perceber um aumento do fator de potência ao se adicionar os filtros no sistema.

Figura 62 – Fluxo de potência ativa



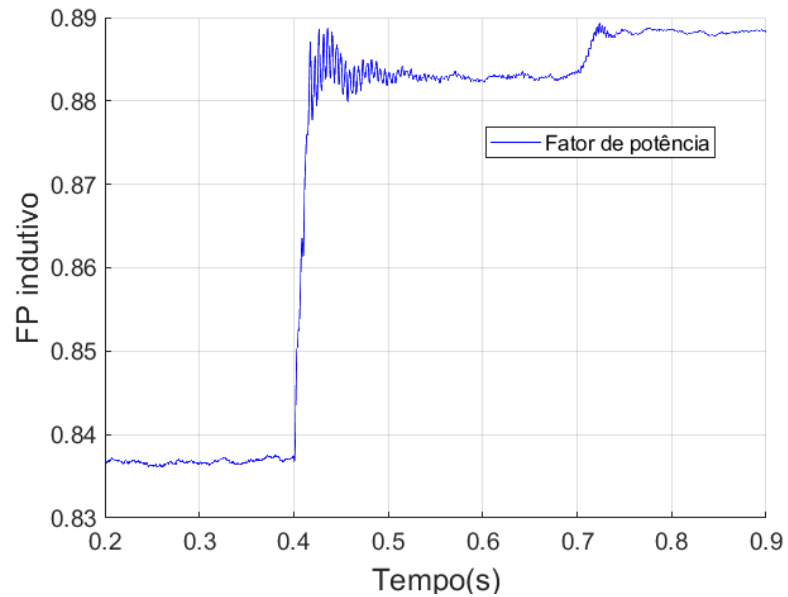
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 63 – Fluxo de potência reativa



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 64 – Fator de potência no PAC da MR



Fonte: Produção do próprio autor.

## 4.7 Projeto do Filtro Ativo

### 4.7.1 Modo conectado à rede

O cálculo da potência necessária para o projeto do filtro ativo é determinado pela equação (22) (AKAGI, 2005).

$$S_{fh} = \sqrt{3} \times \frac{V_{DC}}{\sqrt{2}} \times \frac{I_{Fmax}}{\sqrt{2}} \quad (22)$$

Onde:

$S_{fh}$  – Valor de potência aparente do filtro;

$V_{DC}$  – Valor de tensão do link CC;

$I_{Fmax}$  – Valor máximo de corrente instantânea nos terminais do filtro ativo;

Adotando um inversor trifásico com modulação PWM a dois níveis, a tensão do *link* CC é igual a duas vezes o valor da tensão instantânea de pico nos terminais da fonte de tensão ideal.

Observa-se na Quadro 8 os valores encontrados na simulação da rede.

Quadro 8 – Tensão e corrente no filtro ativo no modo conectado a rede

Grandeza	Valor
Tensão de pico (V)	9,36
Corrente de pico (A)	179,64

Fonte: Produção do próprio autor.

Para esse filtro ativo, o valor de potência nominal encontrado é de 2.912,0 VA

### 4.7.2 Modo ilhado

Utilizando a equação (5) e os valores encontrados na Quadro 9 é possível obter o valor da potência nominal para MR em modo ilhado. Pode-se perceber comparando as Figuras 48 e 55 que os valores de tensão no filtro ativo são maiores no modo ilhado portanto apresentarão maior potência nominal.

Portanto para o filtro ativo conectado na rede em modo ilhado a potência nominal encontrada é de 4.385,0 VA

Quadro 9 – Tensão e corrente no filtro ativo no modo ilhado

Grandeza	Valor
Tensão de pico (V)	15,16
Corrente de pico (A)	167,00

Fonte: Produção do próprio autor.

#### 4.7.3 Escolha do filtro

Observando os dois modos analisados pode-se perceber que em modo ilhado a MR encontra seu estado mais crítico, portanto o filtro deve ser escolhido para tratar essa situação. Portanto, a potência do filtro escolhida será de 4.385,0 VA.

Considerando que a carga linear tem a potência de  $25,55 + j23,92$  kVA e a carga não linear  $30+11,70$  kVA, obtém-se uma potência total de 66 kVA, portanto a escolha do filtro em seu estado mais crítico representa apenas 6,64 % da carga da MR.

#### 4.8 Comentários Sobre os Resultados da Simulação

Neste capítulo foram apresentados os parâmetros da MR utilizada. O método de escolha do filtro passivo e do ganho do filtro ativo, ilustrando as funções de transferência relativas as correntes harmônicas permitiram definir o ganho do filtro híbrido série. Por fim, foi mostrado a modelagem do sistema no *software Simulink*, apresentando o sistema completo e seus subsistemas.

Em sequência foi realizada uma análise quantitativa da aplicação do filtro híbrido na MR escolhida na seção 4. Foi possível visualizar as grandezas elétricas da rede e a melhora da DHT com a aplicação do filtro passivo e do filtro híbrido. Como comentado a piora do  $DHT_V$  no PAC se deve pela injeção de harmônico diretamente no PAC para compensação harmônica da corrente, e esse valor é compensado pela grande redução da  $DHT_I$ . Além de melhorar o fator de potência tanto no modo ilhado como conectado.

Quanto a potência do filtro ativo deve-se ser utilizada a potência do modo ilhado por ser a situação mais crítica, portanto a potência utilizada será 4.385,0 VA o que corresponde a 6,64% da potência da carga.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizado o estudo da aplicação do filtro híbrido série em uma MR CA. Foi contemplada a aplicabilidade do filtro, sendo apresentado, por meio de simulações desenvolvida no *software Simulink*, em seus dois modos de operação. Para desenvolvimento desse projeto foi utilizado um modelo de uma MR trifásica composta por um conversor formador de rede, cargas lineares e não-lineares, um sistema fotovoltaico conectado à rede e o filtro em estudo.

Inicialmente foi apresentado um contexto na qual a MR se encontra, introduzindo o seu conceito básico e aplicabilidade no estudo proposto. Sendo explicitados o conceito de conversores eletrônicos e explicitando a topologia utilizada. Também foram apresentados o conceito de distorção harmônica e os principais métodos de compensação, sendo escolhido o filtro híbrido série como objetivo de estudo. Foram apresentados os valores dos parâmetros da microrrede utilizada e o método de escolha dos filtros utilizados na simulação.

Após a simulação foi verificado que o filtro escolhido é capaz de mitigar a amplificação harmônica do PAC, melhorando a distorção harmônica da rede e do PAC. Quanto à tensão, é possível observar que o filtro foi capaz de mitigar a amplificação da rede, porém houve um pequeno acréscimo no DHT do PAC quando o filtro ativo entra em operação devido à injeção de harmônicos em série com a rede. Considerando os valores padronizados para as distorções harmônicas é possível afirmar que o filtro também foi eficiente, pois no modo conectado fez com que tanto a distorção da corrente quanto a da tensão diminuíssem abaixo do recomendado. Já no modo ilhado a corrente ainda ficou acima do valor recomendado por norma, porém com um valor muito menor quando comparado ao caso sem sistema de filtragem harmônica.

Analisando os seus modos de operação é possível perceber que o estado mais crítico para a compensação harmônica é quando a MR se encontra no modo ilhado, portando o dimensionamento do filtro ativo deve considerar essa situação. Esse estado se deve ao conversor formador de rede não ser tão robusto quanto a rede, a qual funciona como um barramento infinito fornecendo a tensão e frequência especificada, proporcionando piores resultados.



Portanto o filtro estudado obteve um resultado promissor, reduzindo a compensação harmônica do PAC e da rede, comprovando uma melhora nas características da filtragem do filtro passivo, além de reduzir o efeito da ressonância paralela. Todo esse resultando utilizando um filtro ativo de baixa potência nominal comparada com a carga da MR.

Para trabalho futuros, propõe-se realizar a mesma análise utilizando filtro ativo com sua representação real, utilizando inversores com IGBT em vez de uma fonte de tensão, e por final comparar o resultado obtido com o do presente trabalho. Também é possível analisar mais profundamente a relação entre o ganho  $K_v$  e as DHTs, observando a relação da melhoria da distorção harmônica da corrente com o aumento da injeção de tensão harmônica no PAC.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. Brasília, DF: ANEEL, jan. 2021. Disponível em <https://www.aneel.gov.br/modulo-8>. Acesso em: 25 set. 2020.
- AKAGI, H. Active Harmonic Filter. **Proceedings of the IEEE**, Torino, 2005 v. 93, n. 12, December 2005, p. 2128-2138.
- AKAGI, H.; FUJITA, H. A Practical Approach to Harmonics Compensation in Power Systems-Séries Connection of Passive and Active Filters. **IEEE Transaction Industry Applications**, [s. l.], v. 27, n. 6, p. 1020–1025,1991.
- ALEMAM, A.; ADAM, A.; HASSAN, E.; IBRAHIM, M. **Eliminação e efeitos de fontes de harmônicos no sistema de energia**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade de Ciência e Tecnologia, Cartum, 2018.
- ANAND, S.; FERNANDES, B. G. Optimal voltage level for dc microgrids. *In: IECON 2010, 2010, Glendale. Proceedings [...]*. Glendale: IEEE, 2010. p. 3034–3039.
- ANTUNES, H. M. A. **Análise Comparativa entre Filtros Híbridos Aplicados a Cicloconvertidores em uma Siderúrgica**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.
- ANTUNES, H. M. A. **Conversor multifuncional reconfigurável e tolerante a falhas para microrredes de energia elétrica**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.
- ANTUNES, H.; SILVA, S.; BRANDAO, D.; MACHADO A.; CARDOSO, F. Harmonic Compensation Using a Series Hybrid Filter in a Centralized AC Microgrid. **Journal of Control, Automation and Electrical Systems**, Belo Horizonte, v. 29, p. 219-229, 2018.
- ASIMINOAEL, F.; BLAABJERG, L.; HANSEN, S. Detection is key - Harmonic detection methods for active power filter applications. **Industry Applications Magazine IEEE**, [s. l.], v. 13, p. 22-33, 2007.
- BEVRANI, H.; WATANABE, M.; MITANI, Y. **Power System Monitoring and Control**. 1. ed. [S. l.]: Wiley, 2014.
- BHENDE, C.; KALAM, A. Power quality conditioner for microgrid. *In: IEEE. AUSTRALASIAN UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE (AUPEC), 2013, Hobart. Proceedings [...]*. Hobart: Australian Power Institute, 2013. p. 1–4.

BOUZID, A.; GUERRERO, J.; CHERITI, A; BOUHAMIDA, M.; SICARD, P. A survey on control of electric power distributed generation systems for microgrid applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdã, v. 44, p. 751–766, abr. 2015.

DECKMANN, S; POMILIO, J. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**. 2. ed. Campinas: Unicamp, 2018. 212 p.

DUGAN, R.; BEATY H.; MCGRANAGHAN, M; SANTOSO S. **Electrical power systems quality**. 3. ed. New York: McGrawHill, 2012. 555 p.

EID, B.; RAHIM, N; SELVARAJ, J.; KHATEB, A. Control methods and objectives for electronically coupled distributed energy resources in microgrids: A review. **IEEE Systems Journal**, [s. l.], v. 10, n. 99, p. 446–458, 2014.

GARCIA, F. **Harmônicas em sistemas industriais**. 2. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2002. 284 p.

GUO, X.-Q.; WU, W.-Y.; GU, H.-R. Phase-locked loop and synchronization methods for grid-interfaced converters: a review. **Electrical Review**, Hebeiy, v. 2011, n. 4, p. 182–187, Abril 2011.

GYUGYI, L., STRYCUDA, E., Active AC Power Filters, in Proc. IEEE IAS ANNUAL MEETING, 1976, Chicago. **Proceedings** [...]. Chicago: IEEE, 1976, v. 19-C, p. 529-535.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Std 519-2014: IEEE Recommended Practices for Harmonic Control in Electric Power System**. New York: IEEE, 2014.

KAUR, A.; KAUSHAL, J.; BASAK, P. A review on microgrid central controller. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdã, v. 55, p. 338–345, 2016.

LASSETER, B. Microgrids [distributed power generation]. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING, 1., 2001, Columbus. **Proceedings** [...]. Columbus: IEEE, 2001. p. 146-149.

LASSETER, R. H. Microgrids. In: IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING, 1., 2002, New York. **Proceedings** [...]. New York: IEEE, 2002. p. 305-308.

LIMONGI, L. **Filtros Ativos de Potência para Compensação de Harmônicos de Corrente e Potência Reativa**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia e Geociência, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

LOPES, B.; SILVA, S.; FILHO, B.; BRITO, J.; SILVA, G. Análise crítica de dispositivos estáticos de compensação série de baixa tensão com transformadores shunt: Custos versus funcionalidade. **Eletrônica de Potência**, Rio de Janeiro, 2006, v. 11, n. 1, p. 53–60, mar. 2006.

LUO, A.; XU, Q.; MA, F.; CHEN, Y. Overview of power quality analysis and control

technology for the smart grid. **Journal of Modern Power Systems and Clean Energy**, [s. l.], v. 4, n. 1, p. 1–9, 2016.

MAHMOUD, M. **Microgrid**. Dhahran, Elsevier, 2017.

MAHMOUD M.; MOHAMMED, A; HUSSAIN, S.; ABIDO, M. Modeling and control of microgrid: An overview. **Journal of the Franklin Institute**, [s. l.], v. 352, n. 1, p. 2822-2859, 2014.

MAJUMDER, R.; BAG, G. Parallel operation of converter interfaced multiple microgrids. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, [s. l.], v. 55, p. 486–496, 2014.

MATOS, J. G. DE; RIBEIRO, L. A. S.; SILVA, F. S. F. Controle da potência gerada em microrredes autônomas e isoladas com fontes de energia renováveis e sistema de armazenamento com bancos de baterias. **Revista Eletrônica de Potência**, Joinville, v. 19, n. 2, p. 152–162, 2014.

NATESAN, C; AJITHAN, S.; PALANI, P.; KANDHASAMY, P. Survey on Microgrid: Power Quality Improvement Techniques. **International Scholarly Research Notices**, London, v. 2014, p. 1-7, 2014

NOROOZIAN, R.; GHAREHPETIAN, G. B. Combined operation of converter-based distributed generation unit in dc distribution system in order to have premium power quality. **European Transactions on Electrical Power**, [s. l.], v. 22, n. 4, p. 449–470, 2012.

OLIVARES, D.; SANI, A.; ETEMADI, A.; CANIZARES, C.; IRAVANI, R.; KAZERANI M.; HAJIMIRAGHA, A.; BELLMUNT, O.; SAEEDIFARD, M.; BEHNKE, R.; ESTEVEZ, G. Trends in Microgrid Control. **IEEE Transactions on Smart Grid**, [s. l.], v. 5, n. 4, p. 1905-1919, 2014.

ORTMANN, M. **Filtro Ativo Trifásico com Controle Vetorial Utilizando DSP: Projeto e Implementação**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

PAQUETTE, A.; DIVAN, D. Providing improved power quality in microgrids: difficulties in competing with existing power-quality solutions. **IEEE Industry Applications Magazine**, [s. l.], v. 20, n. 5, p. 34–43, 2014.

PARHIZI, S.; LOTFI, H.; KHODAEI, A. BAHRAMIRAD, S. State of the art in research on microgrids: A review. **IEEE Access**, [s. l.], v. 3, p. 890–925, 2015.

PATRAO, I.; FIGUERES, E.; GARCERA, G; MEDINA, R. Microgrid architectures for low voltage distributed generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdã, v. 43, p. 415–424, 2015.

PIRES, I. Medidas de mitigação de harmônicos. **O Setor Elétrico**, São Paulo, ed. 59, p. 38-47, 2010.

POMILIO, J.; DECKMANN, S. **Condicionamento de Energia Elétrica e Dispositivos FACTS**. Campinas: Unicamp, 2009.

ROCABERT, J.; LUNA, A.; BLAABJERG, F.; RODRIGUEZ, P. Control of power converters in ac microgrids. **IEEE Transactions on Power Electronics**, [s. l.], v. 27, n. 11, p. 4734–4749, nov. 2012. ISSN 0885-8993.

RODRÍGUEZ, P.; TEODORESCU, R.; CAMDELA, I.; TIMBUS, M.; LISERRE, M.; BLAABJERG, F. New positive-sequence voltage detector for grid synchronization of power converters under faulty grid conditions. *In: POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE*, 35, 2006, Jeju. **Proceedings [...]**. Jeju: IEEE, 2006, p 1-7.

SANTOS, B; MELO, P; DANELUZ, W. **Projeto e Implementação de um Filtro Ativo Série Monofásico Para Correção de Distorção Harmônica de Tensão Controlado Por Processador Digital de Sinais**. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

SEPÚLVEDA, C.; PAGNOSSIN R.; CANHA L.; SPERANDIO, M. Estudo de impacto dos armazenadores de energia nas perdas dos sistemas de distribuição com geração distribuída. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS*, 6., 2016, Natal. **Anais [...]**. Natal: SBSE, 2016. p. 1–6.

SINGH, B.; VERMA, V; CHANDRA, A; HADDAD, K. Hybrid filters for power quality improvement. **IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution**, [s. l.], v. 152, n. 3, p. 365-378, 2005

TABATABAEE, S.; KARSHENAS, H.; BAKHSHAI, A.; JAIN, P. Investigation of droop characteristics and x/r ratio on small-signal stability of autonomous microgrid. *In: POWER ELECTRONICS, DRIVE SYSTEMS AND TECHNOLOGIES CONFERENCE*, 2., 2011, Tehran. **Proceedings[...]** Tehran: IEEE, 2011. p. 223–228.

TAHIM, A. **Controle de Microrredes de Distribuição de Energia Elétrica em Corrente Contínua**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

UNAMUNO, E.; BARRENA, J. Primary control operation modes in islanded hybrid AC/DC microgrids. *In: IEEE. INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER AS A TOOL*, 2015, Salamanca. **Proceedings [...]** Salamanca: IEEE, 2015. p. 1–6.

WANG, X.; GUERRERO, J.; BLAABJEG, F.; ZHE, C. A review of power electronics based microgrids. **Journal of Power Electronics**, Daedeok, v. 12, n. 1, p. 181–192, 2012.