

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

SEBASTIÃO GIRELI FILHO

**Análise comparativa de desempenho entre filtros híbridos
aplicados em uma microrrede C.A.**

VITÓRIA
2023

SEBASTIÃO GIRELI FILHO

**Análise comparativa de desempenho entre filtros híbridos
aplicados em uma microrrede C.A.**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Sebastião Gireli Filho**, 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.

Orientador: Prof. Dr. Hélio Marcos André Antunes

VITÓRIA
2023

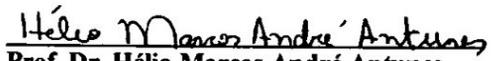
SEBASTIÃO GIRELI FILHO

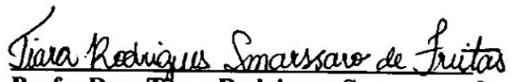
Análise comparativa de desempenho entre filtros híbridos aplicados em uma microrrede C.A.

Parte manuscrita do Projeto de Graduação do aluno **Sebastião Gireli Filho**, 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 21 de julho de 2023.

COMISSÃO EXAMINADORA:


Prof. Dr. Hélio Marcos André Antunes
UFES
Orientador


Profa. Dra. Tiara Rodrigues Smarssaro de Freitas
UFES
Examinador


Prof. Dr. Walbermark Marques dos Santos
UFES
Examinador

AGRADECIMENTOS

Expresso minha profunda gratidão à minha família, especialmente aos meus pais e minha madrinha, Alessandra, Sebastião e Claudia, pelo constante incentivo e apoio durante toda a minha vida. À minha bisavó, Natalina, pelo amor e altruísmo que demonstrou, especialmente durante o período da graduação.

Meus sinceros agradecimentos ao meu orientador, Professor Dr. Hélio Marcos André Antunes, por sua compreensão e orientação valiosa ao longo do processo de construção do projeto. Sou profundamente grato por todo o suporte recebido.

Agradeço ao meu psiquiatra, Gilson Gilberti, e ao meu psicólogo, Hélio Júnior, pelo atendimento humanizado e apoio profissional que foram essenciais para a conclusão deste trabalho.

Aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica e aos colaboradores do Centro Tecnológico pelo aprendizado e apoio durante o curso. Agradeço pelo ensino de qualidade e pela dedicação em oferecer uma educação pública de excelência. Sou grato por fazer parte dessa comunidade educacional e por todo o conhecimento adquirido.

Aos meus queridos amigos pelo apoio e amor incondicional, e por terem sido minha família nos momentos mais desafiadores.

Por fim, agradeço aos meus colegas de curso pelo apoio e cooperação ao longo da nossa jornada. Levarei com muito carinho todos os desafios que enfrentamos e conquistas que vencemos juntos.

RESUMO

As microrredes (MR) em corrente alternada (C.A.) estão ganhando notoriedade com o crescimento da geração distribuída; porém, estas possuem problemas relacionados à qualidade de energia elétrica (QEE) devido à presença de cargas não-lineares e conversores eletrônicos dos geradores distribuídos. Neste trabalho, é apresentado um projeto para a melhoria da QEE de uma microrrede C.A. com controle centralizado por meio da aplicação de filtros híbridos. Serão feitas análises comparativas entre as aplicações de diferentes tipos de filtros híbridos, sendo estes o filtro híbrido série (FHS) e o filtro híbrido paralelo (FHP). Assim, serão apresentados os conceitos gerais das microrredes, seus componentes e modos de operação como também as características dos tipos de filtros híbridos citados. A aplicação das topologias de filtragem híbrida terá como um foco a compensação harmônica e amortecimento da ressonância harmônica.

Palavras-chave: Microrredes. Geração distribuída. Filtros híbridos.

ABSTRACT

Microgrids in alternating current are gaining prominence with the growth of distributed generation. However, they face issues related to power quality due to the presence of non-linear loads and electronic converters of distributed generators. This work presents a project for improving the power quality of an AC microgrid with centralized control through the application of hybrid filters. Comparative analyses will be conducted between different types of hybrid filters, namely, the series hybrid filter and the parallel hybrid filter. Thus, the general concepts of microgrids, their components, and operating modes will be presented, as well as the characteristics of the mentioned types of hybrid filters. The application of hybrid filtering topologies will focus on harmonic compensation and harmonic resonance damping.

Keywords: Microgrids. Distributed generation. Hybrid filters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura básica de uma MR em C.A.	20
Figura 2 – Distorção de corrente causada por carga não-linear.....	25
Figura 3 – Topologia de um filtro híbrido série.	30
Figura 4 – Diagrama de blocos para detecção harmônica.	30
Figura 5 – Diagrama de blocos para DSOGI-PLL.	31
Figura 6 – Topologia de um FHP.	32
Figura 7 – Configuração da MR em estudo conectada ao FHS.....	35
Figura 8 – Diagrama esquemático equivalente da MR conectada ao FHS.....	36
Figura 9 – Diagrama esquemático equivalente da MR com a carga não-linear como fonte poluidora.	36
Figura 10 – Diagrama esquemático da MR com o SFCR como fonte poluidora.	36
Figura 11 – Característica de filtragem da MR conectada ao FHS – Relação entre <i>ish</i> e <i>ilh</i>	38
Figura 12 – Característica de filtragem da MR conectada ao FHS – Relação entre <i>ifh</i> e <i>ilh</i>	38
Figura 13 – Característica de filtragem da MR conectada ao FHS – Relação entre <i>isfcr</i> e <i>ilh</i>	39
Figura 14 – Característica de filtragem da MR conectada ao FHS – Relação <i>ishe isfcr</i>	39
Figura 15 – Característica de filtragem da MR conectada ao FHS – Relação entre <i>ifh</i> e <i>isfcr</i>	39
Figura 16 – Configuração da MR em estudo conectada ao FHP.....	41
Figura 17 – Diagrama esquemático equivalente da MR conectada ao FHP.....	42
Figura 18 – Diagrama esquemático equivalente da MR com a carga não-linear como fonte poluidora.	42
Figura 19 – Diagrama esquemático equivalente da MR com o SFCR fonte poluidora.	42
Figura 20 – Característica de filtragem da MR conectada ao FHP – Relação entre <i>ish</i> e <i>ilh</i>	43
Figura 21 – Característica de filtragem da MR conectada ao FHP – Relação entre <i>ifh</i> e <i>ilh</i>	43
Figura 22 – Característica de filtragem da MR conectada ao FHP – Relação entre <i>isfcr</i> e <i>ilh</i>	44
Figura 23 – Característica de filtragem da MR conectada ao FHP – Relação <i>ishe isfcr</i>	44
Figura 24 – Característica de filtragem da MR conectada ao FHP – Relação entre <i>ifh</i> e <i>isfcr</i>	45
Figura 25 – Modelo da MR em estudo.	46

Figura 26 – Modelo do subsistema da carga não-linear.	47
Figura 27 – Modelo do subsistema da carga linear.	47
Figura 28 – Modelo do subsistema do SFCR.	48
Figura 29 – Modelo do subsistema do FHS.....	48
Figura 30 – TDH de tensão e corrente no PAC da MR conectada ao FHS.	50
Figura 31 – Modelo do subsistema do FHP.....	51
Figura 32 – DHT de tensão e corrente no PAC da MR conectada ao FHP.	52
Figura 33 – Tensão no PAC da MR conectada ao FHS.	53
Figura 34 – Corrente no PAC da MR conectada ao FHS.	54
Figura 35 – Corrente no FHS.....	55
Figura 36 – Fluxo de potência ativa da MR conectada ao FHS.	56
Figura 37 – Fluxo de potência reativa da MR conectada ao FHS.	57
Figura 38 – Tensão no PAC da MR conectada ao FHP.	59
Figura 39 – Corrente no PAC da MR conectada ao FHP.	59
Figura 40 – Corrente no filtro ativo da MR conectada ao FHP.	60
Figura 41 – Corrente no filtro da MR conectada ao FHP.	60
Figura 42 – Fluxo de potência ativa da MR conectada ao FHP.	61
Figura 43 – Fluxo de potência reativa da MR conectada ao FHP.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de DHT para cada estágio da simulação na MR conectada ao FHS.	49
Tabela 2 – Valores de DHT para cada estágio da simulação na MR conectada ao FHP.	51
Tabela 3 – Tensão e corrente no FHS aplicado à MR.	58
Tabela 4 – Tensão e corrente no FHP aplicado à MR.	62

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Parâmetros dos sistemas da MR em estudo34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BT	Baixa tensão
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CCMR	Centro de controle da microrrede
CE	Chave estática
CL	Controlador local
CDSR	Conversor de suporte à rede
CFR	Conversor formador de rede
CSR	Conversor supridor de rede
DHT	Distorção harmônica total da tensão
DHT _i	Distorção harmônica total da corrente
DHT _v	Distorção harmônica total
DIT _h	Distorção harmônica individual de tensão
DSOGI-PLL	<i>Double Second Order Generalized Integrator</i>
DTT	Distorção harmônica total de tensão
FA	Filtro ativo
fp	Fator de potência
FP	Filtro passivo
FHP	Filtro híbrido paralelo
FHS	Filtro híbrido série
F _{sw}	Frequência de comutação
GD	Geração distribuída
Hz	Hertz
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
kVa	Quilovolt-ampere,
kW	Quilowatt
LCA	Indutância da carga não-linear
LPF	Filtro passa-baixa
mF	Microfarad
MT	Média tensão
MR	Microrrede
PAC	Ponto de acoplamento comum

PLL	<i>Phase-Locked Loop</i>
PQ	Potência ativa e reativa
QEE	Qualidade da energia elétrica
RL	Resistência da carga não-linear
S_{cc}	Potência de curto-circuito
SFCR	Sistema fotovoltaico conectado à rede
SRF	Eixo de referência síncrona
SS-MT	Chave estática da microrrede
UPS	Fonte ininterrupta de energia
V-f	Tensão e frequência

LISTA DE SÍMBOLOS

C_f	Capacitância do sistema fotovoltaico
C_{dc}	Capacitância de acoplamento do sistema fotovoltaico
DIT_h	Distorção harmônica individual
DTT	Distorção harmônica total
$I_{FA}(t)$	Corrente de compensação harmônica do filtro ativo
I_{FA}	Pico da corrente no FA do FHP
I_{PF}	Pico da corrente do FA do FHS
i_{fh}	Componentes harmônicas de corrente do filtro passivo–
$i_{sfc r}$	Componentes harmônicas de corrente do SFCR
$i_{sh}(t)$	Componentes harmônicas de corrente da rede elétrica
$i_{Lh}(t)$	Componente de corrente harmônica da carga
K_a	Ganho do filtro híbrido paralelo
K_v	Ganho do filtro híbrido série
h	Henry
L_1	Indutância do sistema fotovoltaico
L_2	Indutância do ramo 2 do sistema fotovoltaico
P_{FA}	Potência aparente do FA do FHP
R_f	Resistência do sistema fotovoltaico
R_1	Resistência do sistema fotovoltaico
R_2	Resistência do ramo 2 do sistema fotovoltaico
S_{FA}	Potência aparente do FA do FHS
V_{CC}	Tensão na ligação CC do FA
V_h	Amplitude de tensão harmônica de ordem h
V_1	Amplitude de tensão fundamental
$v_c(t)$	Tensão de componente da harmônica
$v_{FA}(t)$	Tensão nos terminais do filtro passivo
Z_t	Impedância do CFR
Z_{fp}	Impedância do filtro passivo
$Z_{sfc r}$	Impedância do SFCR
Z_{cfr}	Impedância do CFR
Z_f	Impedância no ramo de filtragem do inversor do SFCR

Z_2	Impedância no ramo 2 de filtragem do inversor do SFCR
RL	Resistência do CFR
Δ	Transformador do CFR
3ϕ	Sistema trifásico
Ω	Resistência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA	17
1.2	OBJETIVOS	17
	1.2.1 Objetivo geral.....	17
	1.2.2 Objetivos específicos.....	17
1.3	METODOLOGIA	18
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	MICRORREDES	20
	2.1.1 Elementos das microrredes.....	21
	2.1.2 Modos de operação das microrredes.....	22
	2.1.3 Conversores eletrônicos nas microrredes CA.....	23
	2.1.3.1 Conversor supridor de rede.....	23
	2.1.3.2 Conversor formador de rede.....	23
	2.1.3.3 Conversor de suporte à rede.....	24
2.2	DISTORÇÕES HARMÔNICAS	24
2.3	FILTROS HARMÔNICOS	26
	2.3.1 Filtro passivo.....	27
	2.3.2 Filtro ativo.....	28
	2.3.3 Filtro híbrido série.....	29
	2.3.3.1 Controle do filtro híbrido série.....	30
	2.3.4 Filtro híbrido paralelo.....	32
	2.3.4.1 Controle do filtro híbrido paralelo.....	32
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO REFERENCIAL TEÓRICO	33
3	ESTUDO DA APLICAÇÃO DO FILTROS HÍBRIDOS SÉRIE E PARALELO NA MICRORREDE C.A.	34
3.1	A MICRORREDE EM ESTUDO	34
	3.1.1 Parâmetros da microrrede.....	34
	3.1.2 Filtro híbrido série.....	35
	3.1.2.1 Definição do ganho K_v do filtro ativo.....	35
	3.1.3 Filtro híbrido paralelo.....	41

3.1.3.1 Definição do Ganho K_a do filtro ativo.....	41
3.1.4 Análise comparativa dos filtros no estudo do ganho e suas simulações	45
3.2 SIMULAÇÃO DA MICRORREDE	46
3.2.1.1 Simulação do filtro híbrido série	48
3.2.1.2 Resultados da simulação do MR conectada ao filtro híbrido série	48
3.2.2 Simulação do filtro híbrido paralelo	50
3.2.2.1 Resultados da simulação da MR conectada ao filtro híbrido paralelo	51
3.2.3 Análise comparativa das simulações da MR conectada com FHS e com o FHP	52
3.3 GRANDEZAS ELÉTRICAS	53
3.3.1 Filtro híbrido série	53
3.3.1.1 Potência nominal do FA do FHS	57
3.3.2 Filtro híbrido paralelo	58
3.3.2.1 Potência no nominal do FA do FHP	62
3.3.3 Análise comparativa das grandezas elétricas da MR com o FHS e o FHP	63
4 CONCLUSÕES	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o mundo tem experimentado uma rápida mudança na produção e no consumo de energia elétrica (ANTUNES *et al.*, 2018). O sistema elétrico tradicional opera transportando grandes quantidades de energia produzidas por centrais de energia localizadas longe do consumidor (ANTUNES, 2018). Contudo, com a geração distribuída (GD), o cenário tem mudado devido ao uso de fontes renováveis de energia e produção de energia próxima aos consumidores finais (MALIK, 2013).

Com o crescimento da geração distribuída, as microrredes (MR) tem ganhado notoriedade (LASSETER, 2002). Uma microrrede é definida como uma rede de eletricidade formada por microfuentes de geração de energia elétrica, cargas elétricas e elementos de armazenamento de energia (MAHMOUD *et al.*, 2014). Uma MR possui conexão a uma rede elétrica principal, mas não necessariamente funciona por meio dela, podendo, assim, funcionar no modo ilhado (KARIMI; NIKKHAJOEI; IRAVANI, 2008).

Todavia, as MRs em corrente alternada (CA) possuem problemas na Qualidade da Energia Elétrica (QEE), sendo seus principais problemas os desequilíbrios de tensão, distorções harmônicas, baixo fator de potência e desvios de frequência (ANTUNES *et al.*, 2018).

Os filtros híbridos são considerados uma boa opção para fornecer melhoria na QEE, pois possuem alto custo-benefício. Ademais, eles podem ser uma solução ideal para a compensação de cargas não-lineares provendo um sistema elétrico livres de distúrbios harmônicos (SINGH *et al.*, 2005).

Em virtude dos problemas presentes nas MR e a importância do desenvolvimento e consumo da GD, é necessário um estudo visando à melhoria e à otimização do funcionamento das MR, aumentando, assim, seu desempenho e mitigando os problemas relacionados com a QEE.

Diante disso, o trabalho propõe melhorar o desempenho das microrredes por meio da inserção de filtros híbridos em virtude das vantagens dos mesmos em relação aos problemas presentes nas MR, focando nas topologias do filtro híbrido série (FHS) e filtro híbrido paralelo (FHP). Para obter estes resultados, o trabalho propõe simulações computacionais no *software*

Matlab/Simulink com parâmetros pertinentes das MR para análise comparativa com a aplicação de filtros híbridos.

1.1 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento da geração distribuída é fundamental para promover o consumo da energia renovável e, principalmente, com menores perdas na transmissão, tendo em vista a geração de energia elétrica mais próxima ao consumidor. Sendo assim, é fundamental incentivar pesquisas relativas a fontes renováveis e armazenamento de energia devido à importância e às vantagens da geração distribuída. As MRs abrangem todos os elementos e todas as vantagens citadas. Todavia, as MRs em C.A. possuem problemas na QEE, como distorções harmônicas e ressonância harmônica. Neste cenário, a aplicação de filtros híbridos nas MRs podem solucionar os problemas citados, podendo promover uma melhoria na QEE.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é comparar o desempenho de duas topologias de filtragem híbrida do tipo série e paralela aplicadas em uma MR C.A. para melhorar a QEE.

1.2.2 Objetivos específicos

Para o objetivo geral ser cumprido, é necessária a realização dos objetivos específicos que são apresentados a seguir:

- Detalhar os principais problemas de QEE apresentados numa MR C.A. com o intuito de obter os parâmetros necessários para a análise;
- Elaborar um modelo computacional para uma MR trifásica a quatro fios composta por formador de rede, supridor de rede, cargas elétricas e a rede elétrica de baixa tensão (BT);
- Analisar o desempenho da MR C.A. com a inserção do FHS por meio de simulação computacional;
- Analisar o desempenho da MR C.A. com a inserção do FHP por meio de simulação computacional;

- Realizar análise comparativa de desempenho entre filtro híbrido série e paralelo.

1.3 METODOLOGIA

A metodologia deste projeto estava baseada inicialmente em uma revisão bibliográfica sobre as MR de energia elétrica, e, desse modo, foram feitas pesquisas baseadas em livros, artigos e teses. Esse estudo inicial possibilitou a identificação da topologia mais adequada para compor a MR de energia elétrica que foi analisada.

Finalizada a fase bibliográfica e definida a topologia da MR a ser desenvolvida, foi criado um modelo matemático para representá-la, e, assim, buscar os indicadores energéticos e elétricos que foram analisados.

Posteriormente, foi aplicado um FHS na MR desenvolvida e, assim, foram analisados os indicadores citados por meio de simulação computacional no *software* Matlab/Simulink. Após isso, foi feita a mesma análise com a aplicação de um FHP na MR. Em conclusão, foi feita a análise comparativa entre os resultados obtidos através da aplicação dos filtros híbridos na MR.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O primeiro capítulo serve como a seção introdutória, fornecendo uma visão geral do tema da pesquisa e da importância da análise comparativa de uma MR com um FHS e um FHP. Ele esboça os objetivos do estudo e fornece uma visão geral das seções subsequentes.

O segundo capítulo aborda o embasamento teórico da pesquisa. Ele explora os elementos de uma MR, incluindo os componentes e o funcionamento dos conversores, o conceito de qualidade de energia elétrica e os desafios apresentados pela distorção harmônica. Além disso, esse capítulo discute o papel dos filtros harmônicos na mitigação de problemas de qualidade de energia e apresenta uma visão geral de diferentes tipos de filtros harmônicos.

O terceiro capítulo concentra-se na análise comparativa de uma MR usando duas diferentes topologias de filtros híbridos: o FHS e o FHP. Essa seção fornece uma descrição detalhada da

MR em estudo, incluindo suas especificações, condições de operação e parâmetros relevantes. Além disso, apresenta as definições de ganho para cada topologia e descreve os resultados da simulação obtidos. Também são discutidos os aspectos de projeto dos filtros híbridos utilizados na MR, incluindo suas configurações, seleção de componentes e considerações de implementação.

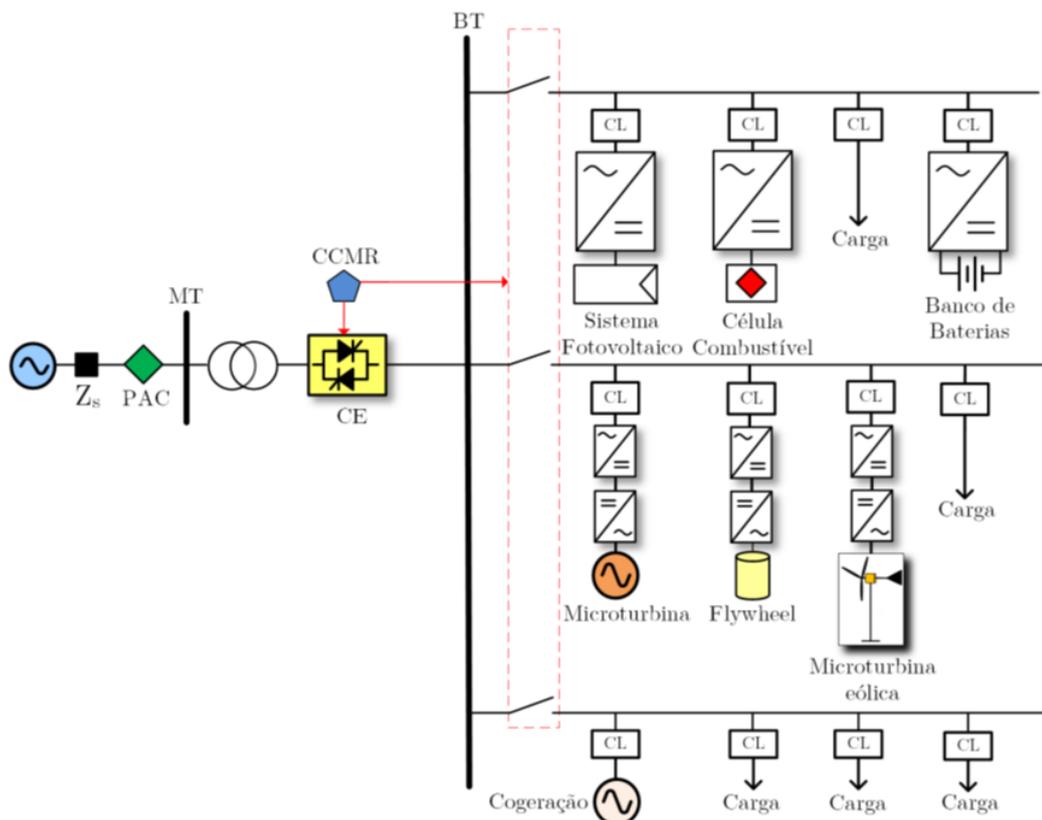
A última seção do trabalho abrange as conclusões do estudo. Ela destaca as principais descobertas da análise comparativa entre os filtros no contexto da MR. Essa seção discute as vantagens e desvantagens de cada topologia e fornece recomendações com base nos resultados da pesquisa. A conclusão enfatiza a topologia mais adequada para aprimorar a qualidade de energia e atender aos requisitos específicos da MR em investigação.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 MICRORREDES

Uma MR é um conjunto de microfones elétricas, cargas e elementos de armazenamento controlados como uma unidade despachável (MAHMOUD *et al.*, 2014), as quais as gerações distribuídas (GDs) são geralmente baseadas em fontes de energia renováveis (LI; NEJABAKHAH, 2014) e as microfones são conectadas a um barramento de baixa tensão (BT) ou média tensão (MT) (BEVRANI; WATANABE; MITANI, 2014). A Figura 1 apresenta uma típica MR em C.A.

Figura 1 – Estrutura básica de uma MR em C.A.



Fonte: EID *et al.*, 2014.

Os sistemas de armazenamentos são compostos de bancos de baterias, compressores de ar e *flywheels* (PARHIZI *et al.*, 2015). Esses sistemas operam em coordenação com o objetivo de fornecer eletricidade de forma confiável com conexão ao sistema interligado em nível de distribuição por um ponto de conexão, que se denomina ponto de acoplamento comum (PAC) (OLIVARES *et al.*, 2014). Todavia, uma MR é um sistema elétrico fraco com baixa potência

de curto-circuito e, desse modo, com a expansão de cargas não lineares e alta penetração das GD, acarretam no aumento das taxas de distorção de tensão e corrente no PAC de uma MR (BALANUTA *et al.*, 2012; BHENDE e KALAM, 2013; DO NASCIMENTO *et al.*, 2014). Os principais fenômenos que afetam a qualidade de energia elétrica (QEE) de uma MR são desequilíbrio de tensão, harmônicos, baixo fator de potência e desvio de frequência (NATESAN *et al.*, 2014).

O controle da microrrede (CCMR) tem a responsabilidade de coordenar globalmente as microfones de GD, os sistemas de armazenamento de energia e as cargas elétricas (BEVRANI; WATANABE; MITANI, 2014; KAUR; KAUSHAL; BASAK, 2016a). O CCMR também tem a função de definir as potências ativa e reativa que devem ser despachadas pelas microfones, além de controlar a tensão e frequência no PAC em BT (EID *et al.*, 2014).

2.1.1 Elementos das microrredes

As microfones são fontes que produzem energia elétrica e estão localizadas próximas ao ponto de uso, possuindo, geralmente, uma faixa de potência entre 1KW a 10MW (BHENDE; KALAM, 2013; BALANUTA *et al.*, 2012).

Combinar fontes de energia não convencionais ou renováveis de baixa emissão de carbono em sistema de geração de alta eficiência é um dos objetivos principais das MR (PASSOS, 2014). As fontes renováveis são muito importantes para o desenvolvimento das MR, pois em muitas localidades é possível explorar o potencial de tais fontes para uma produção de energia elétrica com alta eficiência (CHEN; GOOI; WANG, 2012; HE *et al.*, 2013).

Cada microfone e cada carga elétrica possui um controlador local (CL) do fluxo de potência, o qual é controlado pelo CCMR instalado na subestação. Este é responsável pelo controle da produção e armazenamento de energia, além de definir a demanda da carga (LOPES *et al.*, 2005).

A garantia do controle e da flexibilidade necessária em uma MR é garantida por meio de interfaces baseadas em eletrônica de potência. Assim, o controle dos conversores das microfones é de grande importância, tanto para a produção de energia quanto para a

estabilidade da MR em si (TABATABAEE *et al.*, 2011). Frequentemente, em uma MR são utilizados conversores C.C.-C.A. e C.A.-C.C. (BEVRANI; WATANABE; MITANI, 2014).

Um elemento fundamental da interligação com a rede elétrica em uma MR é a chave estática (CE), pois é ela que permite que a MR possa funcionar nos seus modos de operação, sem interrupção de energia elétrica para as cargas elétricas (POPOV *et al.*, 2009; KAMEL; KERMANSHAHI, 2010b). Todo o controle da CE é feito pelo CCMR (ALLAF, 2010), permitindo, então, um planejamento nos modos de operação da MR, atendendo requisitos de segurança ou fatores econômicos (PARHIZI *et al.*, 2015).

2.1.2 Modos de operação das microrredes

Uma MR é capaz de operar conectada à rede e de modo ilhado, e de realizar a transição entre esses dois modos (KARIMI; NIKKHAJOEI; IRAVANI, 2008). Neste trabalho, serão abordados apenas o modo conectado à rede e o modo ilhado. A norma IEEE 1547 define orientações para interconexão de GD em uma MR (IEEE, 2011).

No modo conectado à rede, a diferença entre potência gerada e consumida dentro da MR pode ser trocada com a rede principal (OLIVARES, 2014). Quando a MR se encontra no modo conectado à rede, sua tensão e frequência de operação são impostas pela rede principal (ROCABERT *et al.*, 2012). Nessa condição, a MR pode estar suprindo total ou parcialmente as cargas ou até mesmo injetando energia na rede (LOPES; MADUREIRA; MOREIRA, 2013). Para este modo, o CCMR deve estar ativo para, assim, garantir o recebimento de informações das cargas e microfontes, do nível de tensão e frequência da rede (BHASKARA; CHOWDHURY, 2012).

Já no modo ilhado, a desconexão da rede que define este modo pode ocorrer de forma intencional ou não intencional. O ilhamento pode ocorrer devido a uma manutenção programada ou quando a QEE da rede principal pode afetar a operação da MR. A desconexão não intencional pode ocorrer devido às faltas ou outros eventos aleatórios e desconhecidos pela MR (GONZATTI, 2015). Neste modo, a potência ativa e reativa geradas, incluindo a transferida, que podem ser para os sistemas de armazenamento ou vindas deles, precisam estar

equilibradas com a demanda das cargas locais, necessitando, assim, do controle adequado (OLIVARES *et al.*, 2014).

2.1.3 Conversores eletrônicos nas microrredes CA

Os conversores eletrônicos nas MR CA são classificados de acordo com sua função e topologia. A divisão é feita em três tipos de conversores, sendo eles o conversor supridor de rede (CSDR), conversor formador de rede (CFR) e o conversor de suporte à rede (CSR) (ANTUNES, 2018).

2.1.3.1 Conversor supridor de rede

O CSDR é um conversor eletrônico de potência que tem como função converter a energia produzida por alguma microfonte de energia, entregando-a à rede elétrica e desempenhando um importante papel no contexto da geração distribuída e das MR. As principais microfuentes são os sistemas fotovoltaicos e de geração eólica, mas ainda podem ser destacadas outras microfuentes como células combustíveis, microturbinas a gás e diversos outros tipos (PARHIZI *et al.*, 2015). Em algumas aplicações específicas, é possível também encontrar a associação entre uma microfonte de energia e um sistema de armazenamento como, por exemplo, em sistemas fotovoltaicos (FERREIRA *et al.*, 2017).

O CSDR é visto pela rede elétrica CA como uma fonte de corrente controlada, com alta impedância de entrada. Esse conversor eletrônico é sincronizado com a rede elétrica, permitindo que o mesmo opere injetando potência ativa e reativa na rede (ROCABERT *et al.*, 2012; AZEVEDO *et al.*, 2013).

2.1.3.2 Conversor formador de rede

Quando a rede elétrica principal está presente, ela impõe tensão e frequência no PAC. Porém, em algumas condições isso pode não ocorrer, seja em caso de falha na rede ou em uma MR operando no modo ilhado. Toda a questão se resume no fato de que, sem uma referência, o supridor de rede não irá operar garantindo valores nominais de tensão no PAC, pois sua saída tem característica de FC (MESSENGER; ABTAHI, 2010).

O princípio de operação do formador de rede é oriundo de uma fonte ininterrupta de energia (UPS), que pode suprir uma dada carga elétrica independente da presença da rede elétrica, por possuir um banco de baterias estacionárias. Em uma MR, quando a rede elétrica principal estiver ausente, um ou múltiplos formadores de rede podem impor uma referência para todos os supridores de rede e as cargas elétricas, dependendo da arquitetura de controle da MR (ROCABERT *et al.*, 2012).

2.1.3.3 Conversor de suporte à rede

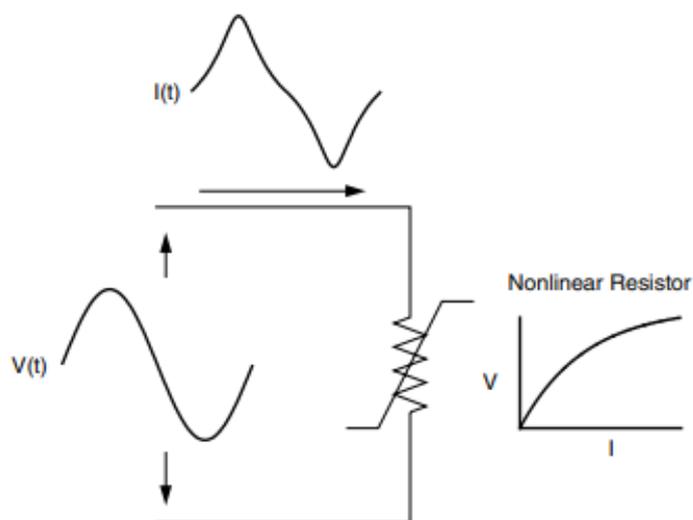
Um CSR tem como principal função o fornecimento de serviços ancilares ou auxiliares à MR. Isso se dá com a regulação de tensão e frequência, por meio do controle de potência ativa e reativa produzida ou absorvida na saída do conversor. Outras funcionalidades que se destacam são a função de compensador harmônico e *low voltage ride through* (AZEVEDO *et al.*, 2013).

Dependendo da característica de impedância da MR pode ser necessário armazenar potência ativa, o que obriga a presença de um sistema para armazenamento de energia (ROCABERT *et al.*, 2012). Deve ser destacado que o CSR pode exercer as mesmas funções que um supridor e formador de rede, dependendo da topologia do conversor e seu controle (FILHO *et al.*, 2015).

2.2 DISTORÇÕES HARMÔNICAS

A distorção harmônica é causada por dispositivos não lineares no sistema de energia. Um dispositivo não linear é aquele em que a corrente não é proporcional para a tensão aplicada. A Figura 2 ilustra este conceito pelo caso de uma tensão senoidal aplicada a um resistor não linear simples no qual a tensão e corrente variam de acordo com a curva mostrada. Enquanto a tensão aplicada é perfeitamente senoidal, a corrente resultante é distorcida. Aumentar a tensão em alguns por cento pode fazer com que a corrente dobre e assumir uma forma de onda diferente. Esta é a fonte de maior distorção harmônica em um sistema de potência. (DUNGAN *et al.*, 2002).

Figura 2 – Distorção de corrente causada por carga não-linear.



Fonte: DUNGAN *et al.*, 2002.

A Figura 2 ilustra que qualquer forma de onda distorcida periódica pode ser expressa como uma soma de senoides. Quando uma forma de onda é idêntica de um ciclo para o próximo, ela pode ser representada como uma soma de ondas senoidais puras em que a frequência de cada senoide é um múltiplo inteiro da frequência fundamental da onda distorcida. Esse múltiplo é chamado de harmônico da fundamental, daí o nome deste assunto. A soma de senoides é chamada de série de Fourier, em homenagem ao grande matemático que descobriu o conceito. (DUNGAN *et al.*, 2002).

Devido à propriedade acima, o conceito de série de Fourier é universalmente aplicado na análise de problemas harmônicos. O sistema pode ser analisado separadamente em cada harmônico. Além disso, encontrar a resposta do sistema para cada senoide de cada harmônico individualmente é muito mais simples em comparação com a forma de onda distorcida completa. As saídas em cada frequência são então combinadas para formar uma nova série de Fourier, a partir da qual a forma de onda de saída pode ser calculada, se desejado. Muitas vezes, apenas as magnitudes dos harmônicos são de interesse (DUNGAN *et al.*, 2002).

Os dois índices mais comumente usados para medir o conteúdo harmônico de uma forma de onda são a distorção harmônica total e a distorção harmônica total de demanda. Ambas são medidas do valor eficaz de uma forma de onda e podem ser aplicadas tanto à tensão quanto à corrente (DUNGAN *et al.*, 2002).

A Distorção Harmônica Total (DHT) é uma medida do valor eficaz dos componentes harmônicos de uma forma de onda distorcida, ou seja, é o potencial de aquecimento dos harmônicos em relação ao fundamental. Este índice pode ser calculado tanto para tensão quanto para corrente (DUNGAN *et al.*, 2002).

As relações para o cálculo da Distorção Harmônica Individual de Tensão (DHI_V) e Distorção Harmônica Total de Tensão (DHT_V) são dadas nas equações (1) e (2) (DUNGAN *et al.*, 2002):

$$DHI_V = \frac{V_h}{V_1} \times 100\% \quad (1)$$

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} V_h^2}}{V_1} \times 100\% \quad (2)$$

Onde:

- V_h – amplitude de tensão harmônica de ordem h ;
- V_1 – amplitude de tensão fundamental.

2.3 FILTROS HARMÔNICOS

Durante as últimas décadas, o número e tipos de cargas não lineares aumentaram tremendamente. Isso motivou as empresas de energia elétrica e os consumidores a implementar diferentes filtros de harmônicas. Os filtros são capazes de compensar harmônicas de cargas não lineares por meio de compensação baseada em corrente. Eles também podem melhorar a qualidade da alimentação C.A., por exemplo, compensando harmônicas de tensão, afundamentos, sobretensões, cortes, picos, oscilações e desequilíbrios por meio de técnicas baseadas em tensão (FUCHS e MASOUM, 2015).

Os filtros geralmente são instalados perto ou próximos aos pontos de distorção, por exemplo, em cargas não lineares, para garantir que as correntes harmônicas não interajam com o sistema elétrico. Eles são projetados para fornecer uma derivação para as correntes harmônicas, para bloqueá-las de entrar no sistema de energia, ou para compensá-las fornecendo correntes harmônicas e/ou tensões harmônicas localmente. Os filtros podem ser projetados para absorver

correntes harmônicas e desviá-las para o solo através do uso de capacitores, bobinas e resistores (FUCHS e MASOUM, 2015).

Devido à impedância mais baixa de um elemento do filtro (em uma determinada frequência) em comparação com a impedância da fonte C.A., as correntes harmônicas circularão entre a carga e o filtro e não afetarão todo o sistema. Isso é chamado de ressonância em série. Um filtro pode conter vários desses elementos de filtro, cada um projetado para compensar uma frequência harmônica específica ou um conjunto de frequências. Os filtros são frequentemente as abordagens de solução mais comuns usadas para mitigar harmônicas em sistemas de energia. Ao contrário de outras soluções, os filtros oferecem uma alternativa simples e barata com altos benefícios (FUCHS e MASOUM, 2015).

Os filtros híbridos são considerados uma boa opção para fornecer melhoria na QEE, pois eles têm um bom custo-benefício. Além disso, eles têm uma solução ideal para a compensação de cargas não lineares provendo sistemas elétricos que são livres de distúrbios harmônicos (SINGH *et al.*, 2005).

Esses tipos de filtros são aplicados através de associações de filtros ativos e passivos, melhorando, assim, o desempenho, e reduzindo custos se comparados aos filtros puramente ativos e passivos (JAIN *et al.*, 2007). Em uma MR, um filtro híbrido série ou paralelo tem a função de conversor de suporte à rede (ANTUNES, 2018).

2.3.1 Filtro passivo

Os filtros passivos (FP) são baratos em comparação com a maioria dos outros dispositivos de mitigação. Eles são compostos apenas de elementos passivos (indutâncias, capacitâncias e resistências) ajustados para as frequências harmônicas das correntes ou tensões que devem ser atenuadas. (FUCHS e MASOUM, 2015).

Os FP têm um desempenho melhor quando colocados perto das cargas não lineares que produzem harmônicos. Eles criam uma ressonância paralela acentuada em uma frequência abaixo da frequência de entalhe (afinada). Na prática, FP são adicionados aos sistemas de

energia monofásicos e trifásicos, de três ou quatro fios, em configurações em shunt e série. (FUCHS e MASOUM, 2015).

Filtros passivos *shunt* são o tipo mais comum de filtro em uso. Eles fornecem caminhos de baixa impedância para o fluxo de correntes harmônicas. Um FP conectado em *shunt* carrega apenas uma fração da corrente total da carga e terá uma classificação mais baixa do que um FP conectado em série que deve carregar toda a corrente da carga. Conseqüentemente, os filtros *shunt* são desejáveis devido ao seu baixo custo e capacidade fina de fornecer potência reativa na frequência fundamental (FUCHS e MASOUM, 2015).

2.3.2 Filtro ativo

Os FAs são alternativas viáveis aos FP. Para aplicações onde a configuração do sistema e/ou o espectro harmônico das cargas não lineares (por exemplo, ordens, magnitudes e ângulos de fase) mudam, elementos ativos podem ser usados em vez dos componentes passivos para fornecer compensação dinâmica (FUCHS e MASOUM, 2015).

Um FA é implementado quando os números de ordem das correntes harmônicas estão variando. Isso pode ser devido à natureza das cargas não lineares que injetam espectros harmônicos dependentes do tempo (por exemplo, acionamentos de velocidade variável) ou pode ser causado por uma mudança na configuração do sistema. A estrutura de um FA pode ser de arquiteturas em série ou em paralelo. A estrutura adequada para implementação depende dos tipos de fontes harmônicas no sistema de energia e dos efeitos que diferentes soluções de filtro causariam ao desempenho geral do sistema (FUCHS e MASOUM, 2015).

Os FAs dependem do condicionamento de energia ativa para compensar as correntes harmônicas indesejáveis, substituindo uma parte da forma de onda de corrente distorcida originada da carga não linear. Isso é alcançado produzindo componentes harmônicos de amplitude igual, mas ângulos de fase opostos, que cancelam os componentes harmônicos injetados das cargas não lineares. A principal vantagem dos FAs em relação aos FPs é sua resposta precisa às variações de carga e harmônicas. Além disso, um único FA pode compensar mais de uma harmônica e melhorar ou mitigar outros problemas de QEE, como *flicker* (FUCHS e MASOUM, 2015).

Os FAs são caros em comparação com seus equivalentes passivos e não são viáveis para pequenas instalações. A principal desvantagem dos FAs é que sua classificação às vezes está muito próxima da carga (até 80% em algumas aplicações típicas) e, portanto, se torna uma opção custosa para melhorar a qualidade de energia em várias situações. Além disso, um único FA pode não fornecer uma solução completa em muitas aplicações práticas devido à presença de problemas de qualidade de tensão e corrente (FUCHS e MASOUM, 2015).

2.3.3 Filtro híbrido série

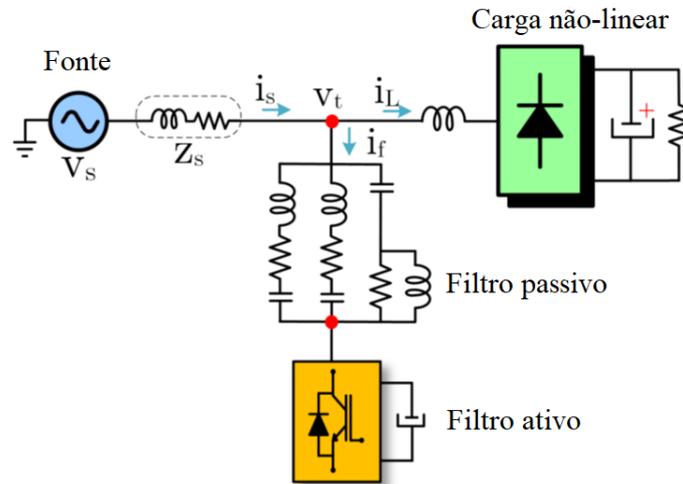
Um filtro híbrido série (FHS) é formado pela conexão em série de um filtro ativo e um filtro passivo, em paralelo a um sistema elétrico e uma carga não linear (ANTUNES *et al.*, 2018).

A Figura 3 apresenta a topologia citada. Nesta configuração, o filtro passivo absorve as componentes não-lineares da carga enquanto o filtro ativo atua como um isolador harmônico entre a fonte da rede e o filtro passivo, eliminando, assim, a ressonância harmônica no sistema elétrico (ANTUNES *et al.*, 2018).

A vantagem dessa combinação é a possibilidade de melhorar as características da compensação harmônica do sistema de filtragem passiva, eliminando as desvantagens da aplicação individual dos filtros passivos e ativos (FUJITA e AKAGI, 1991).

Como a maior parte da tensão é aplicada ao filtro passivo, o filtro ativo se comporta como um curto-circuito para a componente fundamental e assim, é possível obter uma redução significativa de potência se comparado a um filtro ativo puro. Sendo assim, devido ao seu baixo custo, esta topologia se torna uma opção atrativa para a compensação harmônica (NA *et al.*, 2006; LIN *et al.*, 2001; BHATTACHARYA *et al.*, 1997).

Figura 3 – Topologia de um filtro híbrido série.



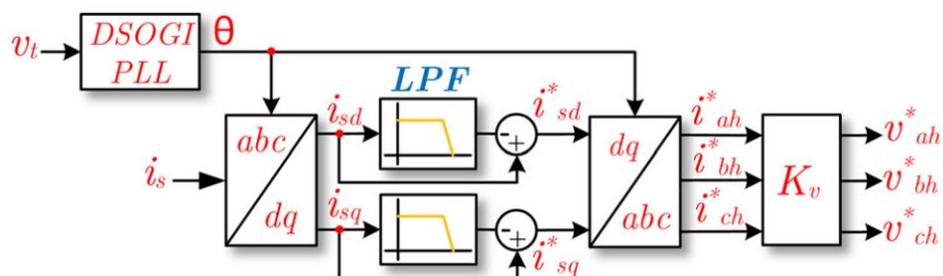
Fonte: ANTUNES *et al.*, 2018

As principais funções de um FHS são a isolamento e compensação harmônica, regulação de tensão, compensador de desequilíbrio e controle da potência reativa fundamental (RASHID, 2010). O FHS possui desvantagens como o baixo desempenho na compensação harmônica em altas frequências (INZUNZA e AKAGI, 2005).

2.3.3.1 Controle do filtro híbrido série

Uma das exigências fundamentais para um Sistema de Filtros Híbridos é um método adequado de detecção harmônica como mostrado na figura 4.

Figura 4 – Diagrama de blocos para detecção harmônica.

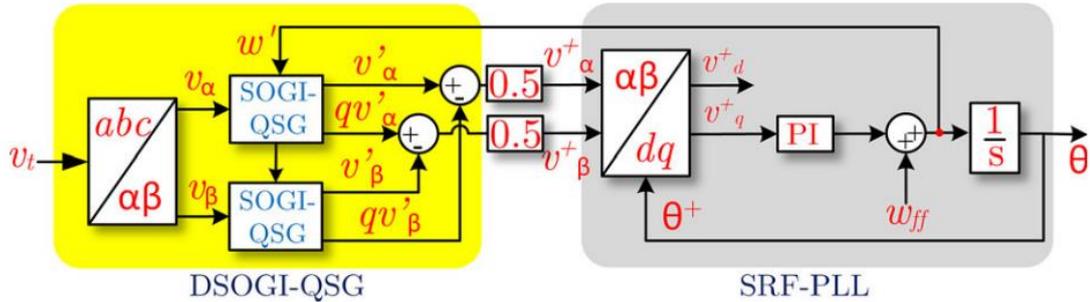


Fonte: ANTUNES *et al.*, 2018.

O FHS possui simplicidade em sua implementação e imunidade à distorção de tensão devido ao uso de um PLL (*Phase-Locked Loop*) (ASIMINOAEL *et al.*, 2007). As correntes da rede elétrica são amostradas e transformadas em coordenadas DQ. A frequência angular da rede

elétrica é determinada usando um DSOGI-PLL (*Double Second Order Generalized Integrator*) apresentado pelas referências (RODRIGUEZ *et al.*, 2006; SEN *et al.*, 2012) e é mostrado na Figura 5, permitindo, assim, obter a transformação (3).

Figura 5 – Diagrama de blocos para DSOGI-PLL.



Fonte: ANTUNES *et al.*, 2018.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta_1 & \sin(\theta_1 - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta_1 + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos\theta_1 & \cos(\theta_1 - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_1 + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Usando um filtro passa-baixa (LPF), a componente C.C. é extraída e depois subtraída da corrente da rede elétrica, como mostrado na Figura 4. As correntes de referência harmônicas no sistema abc são obtidas com a transformação de Park em coordenadas dq. A tensão de referência que deve ser sintetizada pelo inversor é gerada por meio da multiplicação da corrente FHS por um ganho (K_v) (ANTUNES *et al.*, 2018).

Na topologia FHS, o FA é implementado como uma fonte ideal controlada por tensão. A tensão de saída do FA pode ser representada pela equação (4).

$$v_c(t) = K_v \cdot i_{sh}(t) \quad (4)$$

Onde:

- $v_c(t)$ - Tensão de compensação harmônica;
- $i_{sh}(t)$ - Componentes harmônicas da fonte de corrente;
- K_v - - Ganho do filtro híbrido série

Como mostrado em (4), os componentes harmônicos da rede elétrica são usados para gerar uma tensão nos terminais do filtro passivo. Ao fazer isso, é produzida para cada corrente harmônica uma tensão proporcional que emula uma resistência (RIVAS *et al.*, 2003; DAN *et al.*, 2005). Essa resistência é também conhecida como ganho do filtro híbrido e tem sua função no isolamento harmônico, além de ser um dos parâmetros para a especificação do filtro ativo (ANTUNES *et al.*, 2016).

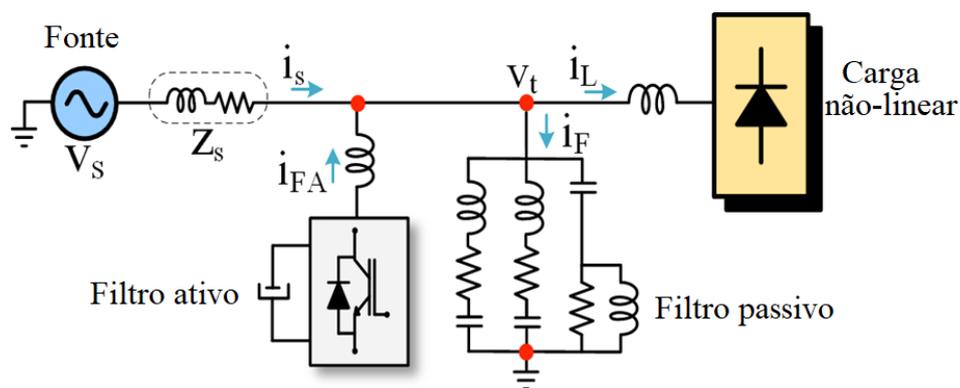
2.3.4 Filtro híbrido paralelo

O filtro híbrido paralelo (FHP) consiste numa combinação de um FA conectado em *shunt* com o sistema de filtragem híbrida, a carga não linear e o sistema elétrico (ANTUNES; PIRES; SILVA, 2017). A topologia do FHP é ilustrada na Figura 6.

O FP cria um caminho de baixa impedância para a carga das correntes harmônicas e atua como um compensador de reativos, cancelando as harmônicas em partes, ou inteiramente (IEEE, 2014).

Um FHP pode prover compensação harmônica, desequilíbrios de corrente, potência reativa e ressonância harmônica (RASHID, 2010; CHEN; BLAABJERG; PEDERSEN, 2004).

Figura 6 – Topologia de um FHP.



Fonte: ANTUNES; PIRES; SILVA, 2017.

2.3.4.1 Controle do filtro híbrido paralelo

O método de detecção harmônica tem a mesma implementação do FHS, utilizando o eixo de referência síncrona (SRF). As correntes de referência são geradas e multiplicadas pelo ganho

do FHP (K_a), para que possam ser posteriormente sintetizadas de forma parcial ou em sua totalidade pela fonte de corrente. (ANTUNES, 2009). Nesta topologia, o filtro ativo opera como uma fonte de corrente (idem.). Essa relação é ilustrada na Equação (5):

$$I_{FA}(t) = K_a \cdot i_{Lh}(t) \quad (5)$$

Onde:

- $I_{FA}(t)$ - Corrente de compensação harmônica do filtro ativo;
- K_a - Ganho do filtro híbrido paralelo;
- $i_{Lh}(t)$ - Componente de corrente harmônica da carga.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO REFERENCIAL TEÓRICO

No presente capítulo de referencial teórico, foram abordados diversos aspectos relacionados à MR e seus elementos, incluindo os problemas de distorções harmônicas que podem afetar seu desempenho. Nesse contexto, foram discutidos os filtros híbridos como uma solução efetiva para mitigar os efeitos nocivos das distorções harmônicas em MR C.A. Em particular, foram destacados os filtros série e paralelo, ambos considerados como estratégias eficientes para a correção dessas distorções. Essa fundamentação foi essencial para o desenvolvimento do estudo da aplicação dos filtros híbridos série e paralelo na MR C.A., o qual será detalhado no próximo capítulo. A compreensão dos princípios teóricos permitiu uma análise aprofundada da eficácia e desempenho dessas soluções na QEE das MRs.

3 ESTUDO DA APLICAÇÃO DO FILTROS HÍBRIDOS SÉRIE E PARALELO NA MICRORREDE C.A.

3.1 A MICRORREDE EM ESTUDO

A MR do trabalho é composta por uma rede trifásica, uma carga linear, uma carga não-linear, um FA, um FP, um sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR) e um CFR. A análise será realizada no modo conectado à rede. O trabalho apresenta uma análise comparativa da MR com a aplicação de filtros híbridos para a melhoria da qualidade da energia elétrica.

3.1.1 Parâmetros da microrrede

A MR em estudo é composta por diferentes sistemas e componentes, cada um com seus parâmetros específicos, que desempenham um papel crucial em seu desempenho. Esses parâmetros são de extrema importância para compreender o comportamento dos sistemas, bem como para realizar análises comparativas entre as topologias de filtros híbridos aplicados na MR.

É válido ressaltar que os parâmetros foram obtidos por meio de análises teóricas e medições experimentais, garantindo a confiabilidade dos resultados apresentados. A partir dessas informações, serão desenvolvidos os projetos dos filtros híbridos em série e em paralelo, e os resultados das simulações serão analisados para determinar a topologia mais adequada para a melhoria da QEE na MR. No Quadro 1, são apresentados os parâmetros de cada sistema que compõe a MR em estudo.

Quadro 1 – Parâmetros dos sistemas da MR em estudo

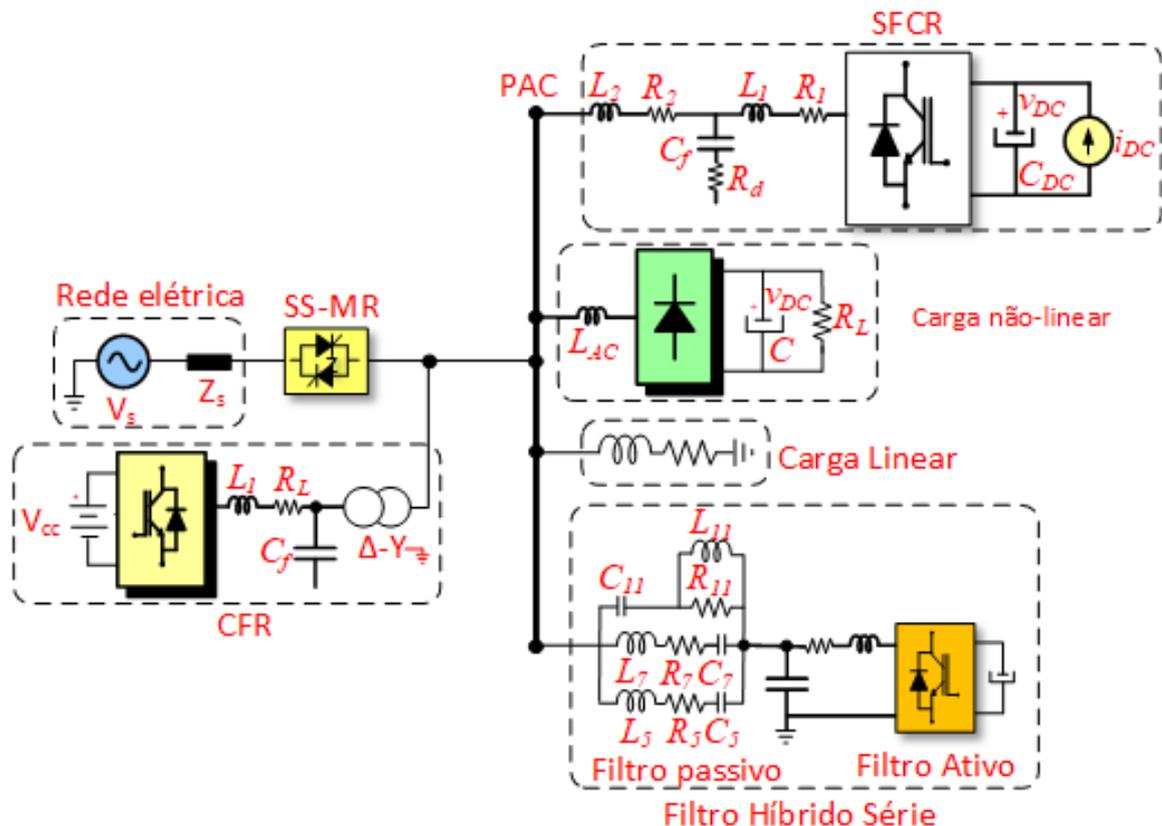
Grandezas	Parâmetros
Rede elétrica	3ϕ , 220 V, 60 Hz, $S_{cc} = 750$ kVA, $X/R = 0,5$
Carga linear	Transformador $\Delta - Y_g$: 220/220 V, 75 kVA; $Z_t = 6,3\%$, $R_L = 10$ m Ω , $L_1 = 20$ μ H; $C_f = 550$ μ F, $f_{sw} = 15,36$ kHz, $V_{cc} = 500$ V
Carga não-linear	20 kVA, 220 V, $f_{sw} = 7.68$ kHz, $R_1 = 10$ m Ω ; $L_1 = 1,5$ mH; $R_f = 0,3$ Ω , $C_f = 55$ μ F; $R_2 = 10$ Ω , $L_2 = 35$ μ H, $C_{dc} = 9,4$ mF
SFCR	220 V, 35 kVA, $fp = 0,73$ atrasado
CFR	220 V, 30 kW, $C = 18,8$ mF, $R_L = 2,5$ Ω , $LCA = 0,5$ mH
Filtro passivo	220 V, 6 kvar; 5 h: $Q = 42$, $L = 2,7$ mH, $C = 105$ μ F; 7 h: $Q = 42$, $L = 1,3$ mH $C = 107$ μ F; 11 h: $Q = 2,2$, $L = 0,5$ mH, $C = 109$ μ F

Fonte: Produção do próprio autor

3.1.2 Filtro híbrido série

A topologia da MR em estudo, juntamente com o FHS é ilustrada na Figura 7. Nessa configuração, o filtro ativo está conectado em série com o filtro passivo.

Figura 7 – Configuração da MR em estudo conectada ao FHS.



Fonte: Antunes, 2018 (adaptado).

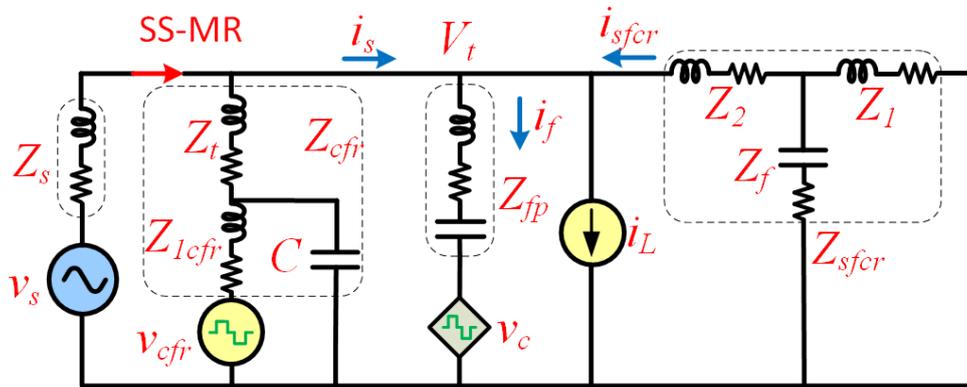
3.1.2.1 Definição do ganho K_v do filtro ativo

De acordo com a equação (4) da seção 2.3.3.1, é necessário obter o ganho K_v para o controle do FA no modelo do FHS. Para isso, é essencial avaliar as funções de transferência ideais, que requerem a construção dos modelos dos diagramas esquemáticos do circuito da MR. Esses modelos permitem analisar o comportamento do circuito em relação às componentes harmônicas e identificar os pontos essenciais para o controle do ganho K_v .

As Figuras 8, 9 e 10 representam os diagramas esquemáticos utilizados para obter as funções de transferência na análise do sistema. A Figura 8 apresenta o circuito equivalente do sistema

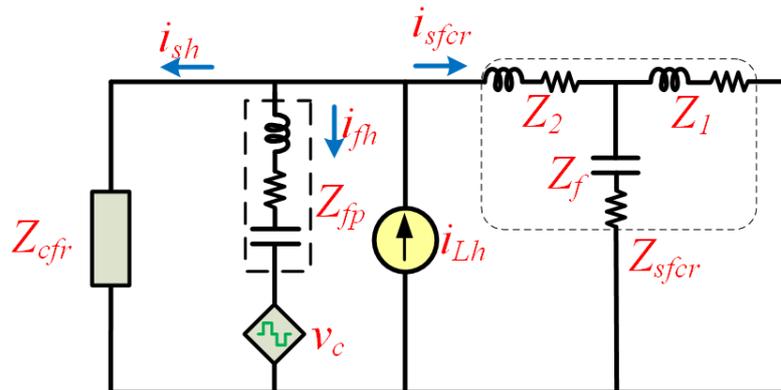
da MR conectada ao FHS, enquanto a Figura 9 representa o circuito da MR onde a carga não-linear é considerada como fonte poluidora. Já a Figura 10 representa o circuito com o SFCR como fontes poluidoras.

Figura 8 – Diagrama esquemático equivalente da MR conectada ao FHS.



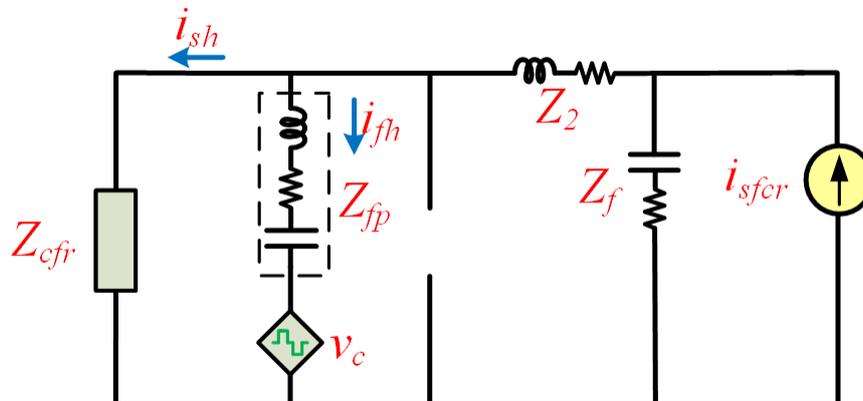
Fonte: Antunes, 2018 (adaptado).

Figura 9 – Diagrama esquemático equivalente da MR com a carga não-linear como fonte poluidora.



Fonte: Antunes, 2018 (adaptado).

Figura 10 – Diagrama esquemático da MR com o SFCR como fonte poluidora.



Fonte: Antunes, 2018 (adaptado).

Com base no diagrama esquemático da Figura 9 e utilizando o Teorema da Superposição e a Lei de Kirchhoff para as correntes, a corrente harmônica da rede elétrica, do FP e do SFCR em função da carga não linear foram obtidas e expressas nas equações (6), (7), e (8).

$$\frac{i_{sh}}{i_{lh}} = \frac{Z_{fp} \cdot Z_{sfcr}}{Z_{fp} \cdot Z_{sfcr} + (Z_{sfcr} + K_v) \cdot Z_{sfcr} + Z_{cfr} \cdot Z_{sfcr}} \quad (6)$$

$$\frac{i_{fh}}{i_{lh}} = \frac{(Z_{sfcr} + K_v) \cdot Z_{sfcr}}{Z_{fp} \cdot Z_{sfcr} + (Z_{sfcr} + K_v) \cdot Z_{sfcr} + Z_{cfr} \cdot Z_{sfcr}} \quad (7)$$

$$\frac{i_{scfr}}{i_{lh}} = \frac{Z_{sfcr} \cdot Z_{fp}}{Z_{fp} \cdot Z_{sfcr} + (Z_{sfcr} + K_v) \cdot Z_{sfcr} + Z_{cfr} \cdot Z_{sfcr}} \quad (8)$$

Onde:

- i_{sh} - componente harmônica de corrente da rede elétrica;
- i_{lh} - componente harmônica de corrente da carga;
- i_{fh} - componente harmônica de corrente do FP;
- i_{scfr} – componente harmônica de corrente do SFCR;
- Z_{fp} - impedância do filtro passivo;
- Z_{sfcr} - impedância do SFCR;
- Z_{cfr} - impedância do CFR.

Com base no diagrama esquemático da Figura 10 e utilizando o Teorema da Superposição e a Lei de Kirchhoff para as correntes, a corrente harmônica da rede elétrica e do FP em função do SFCR foram obtidas e estão expressa nas equações (9) e (10):

$$\frac{i_{sh}}{i_{scfr}} = \frac{Z_{fp} Z_f}{Z_{fp} \cdot (Z_{cfr} + Z_2 + Z_f) + Z_f \cdot (Z_{cfr} - K_v) \cdot Z_2 \cdot (Z_{cfr} - K_v)} \quad (9)$$

$$\frac{i_{fh}}{i_{scfr}} = \frac{Z_f \cdot (Z_{cfr} - K_v)}{Z_{fp} \cdot (Z_{cfr} + Z_2 + Z_f) + Z_f \cdot (Z_{cfr} - K_v) \cdot Z_2 \cdot (Z_{cfr} - K_v)} \quad (10)$$

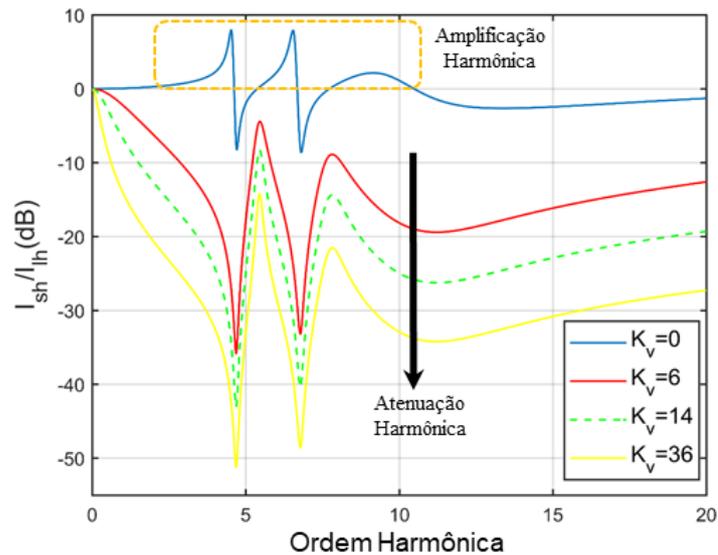
Onde:

- Z_f - impedância do ramo de filtragem do inversor do SFCR;

- Z_2 —impedância do ramo 2 do filtro do inversor do SFCR.

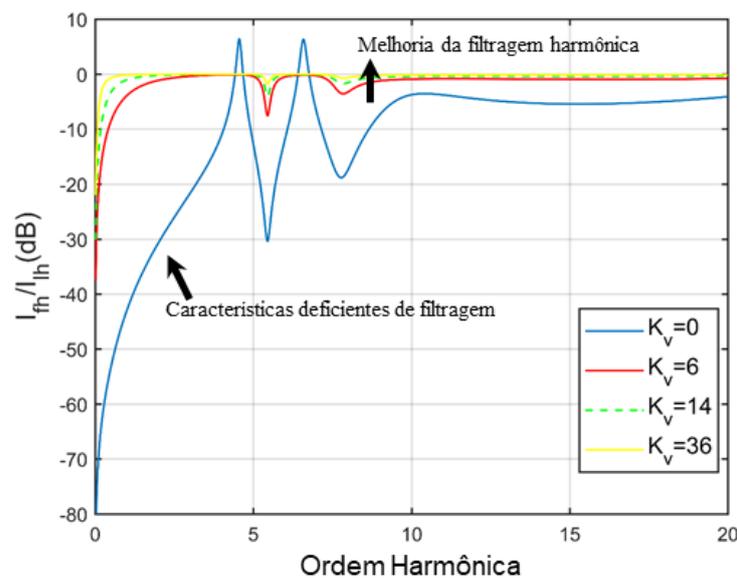
Para uma melhor análise das equações, foram gerados gráficos utilizando o *software* MATLAB. As equações (6) a (10) estão representados nas Figuras 11 a 15, respectivamente. Os referidos gráficos permitem visualizar e compreender os resultados das equações de forma mais clara e facilitam a análise dos dados obtidos.

Figura 11 – Característica de filtragem da MR conectada ao FHS – Relação entre i_{sh} e i_{lh}



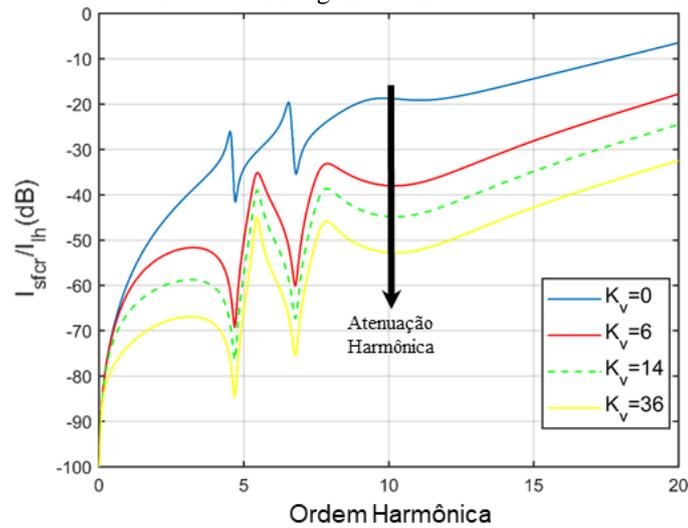
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 12 – Característica de filtragem da MR conectada ao FHS – Relação entre i_{fh} e i_{lh}



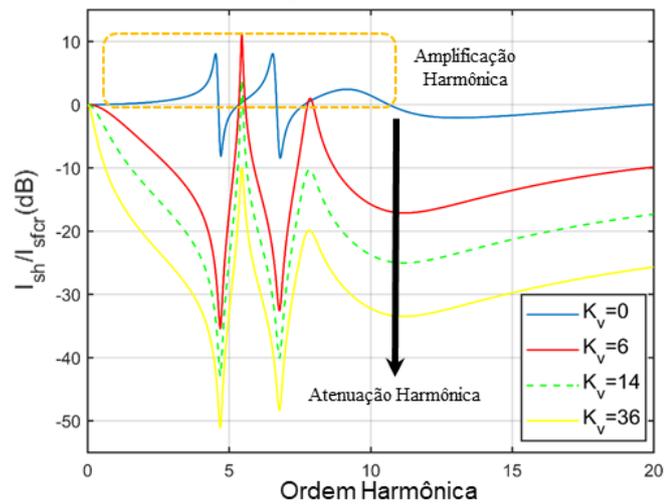
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 13 – Característica de filtragem da MR conectada ao FHS – Relação entre i_{sfc} e i_{lh}



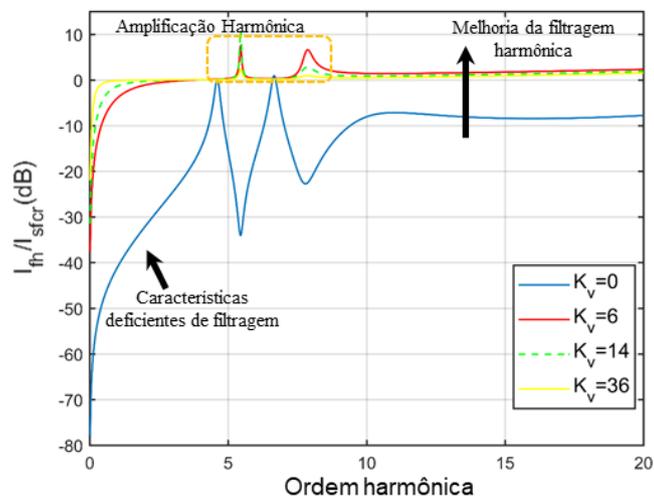
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 14 – Característica de filtragem da MR conectada ao FHS – Relação i_{sh} e i_{sfc}



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 15 – Característica de filtragem da MR conectada ao FHS – Relação entre i_{fh} e i_{sfc}



Fonte: Produção do próprio autor.

Com o objetivo de avaliar o impacto do ganho K_v na MR em estudo, as funções de transferência foram plotadas em relação aos valores de impedância.

Observou-se que, ao realizar simulações dos ganhos de K_v , utilizou-se o valor $K_v = 0$ como ponto de referência na primeira simulação. Nesse cenário, foi constatado que ocorre amplificação harmônica na MR e um desempenho inadequado do filtro passivo, considerando a carga e o SFCR como fontes poluidoras.

Posteriormente, ao aumentar o ganho K_v , foi observado que houve diminuição da amplificação harmônica e por isso, foram realizadas simulações com valores positivos de K_v . Como observado principalmente as Figuras 11 e 15, os resultados demonstraram que, com o aumento de K_v , a amplificação harmônica foi diminuída tanto na rede elétrica quanto no FP. Também é possível observar por meio da Figura 11 que a amplificação harmônica, presente inicialmente, foi eliminada. Isso ressalta a importância de um ajuste adequado do parâmetro K_v para um controle efetivo do FHS.

Conforme observado nas Figuras 12 e 15, foi constatado que, à medida que o valor do ganho K_v é aumentado, os gráficos exibem uma tendência de convergir para zero. Essa tendência é desejável, pois implica em uma atenuação cada vez maior das componentes harmônicas da corrente do filtro em relação à componente harmônica da corrente da carga. Assim, um gráfico que tende a zero indica que o filtro está sendo eficiente na atenuação das componentes harmônicas, garantindo um melhor desempenho da MR.

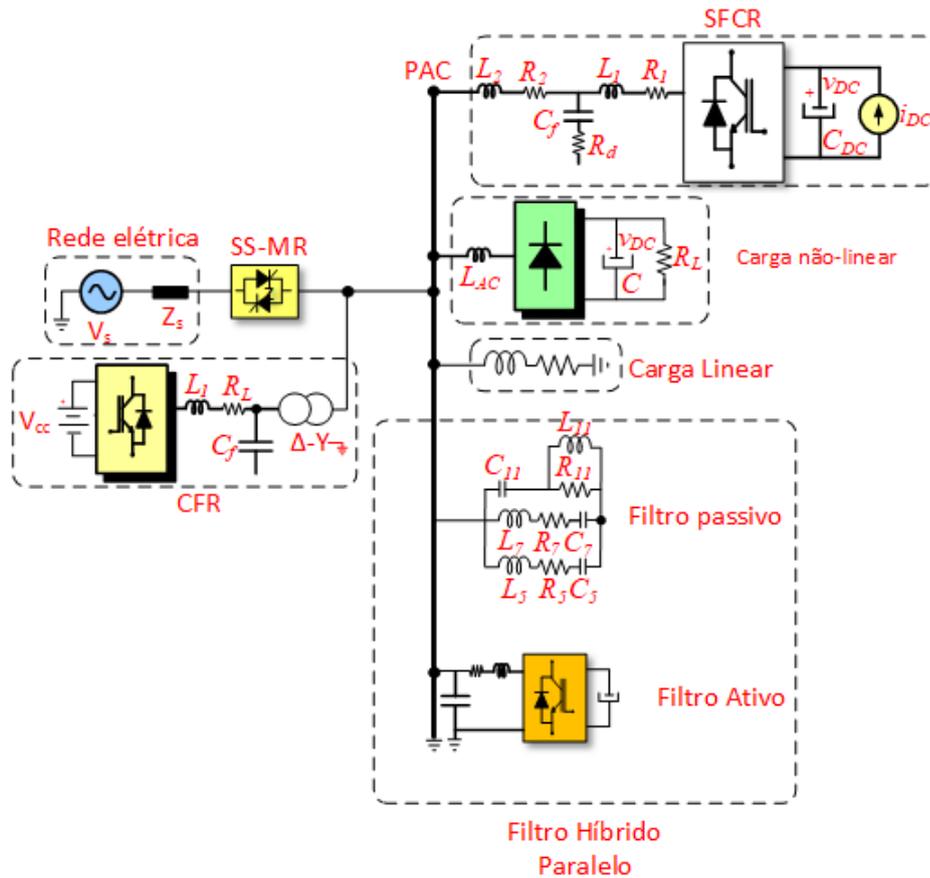
Durante as simulações, identificaram-se diversos valores de K_v que proporcionam melhorias nas características de filtragem da MR. Entretanto, é essencial considerar que um valor elevado de K_v resulta em uma capacidade nominal consideravelmente alta para o FA, pois pela equação (4), com o aumento do ganho, aumenta-se a injeção de tensão pelo filtro ativo, concluindo assim que a potência nominal processada é diretamente proporcional à tensão injetada.

Com base na análise dos gráficos obtidos, concluiu-se que a escolha de K_v igual a 6 possibilita uma significativa aprimoração no desempenho de filtragem e no amortecimento de ressonâncias harmônicas na MR, em todos os modos de operação.

3.1.3 Filtro híbrido paralelo

A topologia da MR em estudo, juntamente com o FHP, é ilustrada na Figura 16. Conforme mencionado anteriormente, os parâmetros específicos da MR, como os da rede elétrica, carga linear, carga não-linear, sistema fotovoltaico e CFR, foram explicitados. Nessa configuração, o FA está conectado em paralelo com o FP.

Figura 16 – Configuração da MR em estudo conectada ao FHP.



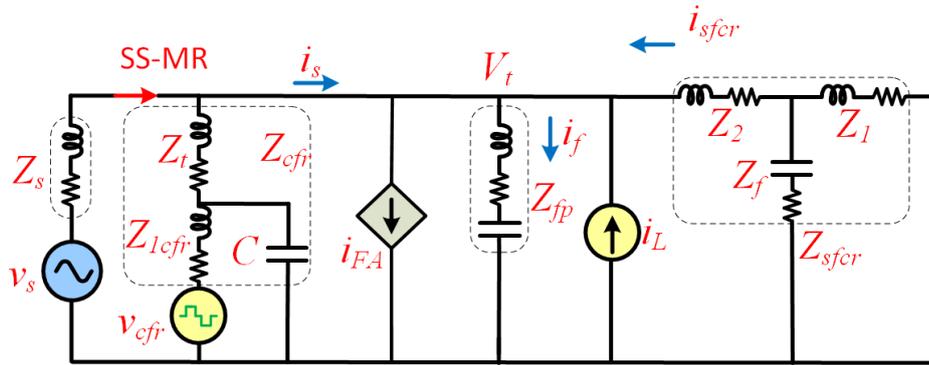
Fonte: Antunes, 2018 (adaptado).

3.1.3.1 Definição do Ganho K_a do filtro ativo

De acordo com a equação (5) da seção 2.3.4.1, é necessário obter o ganho K_a para o controle do filtro ativo no modelo do FHP.

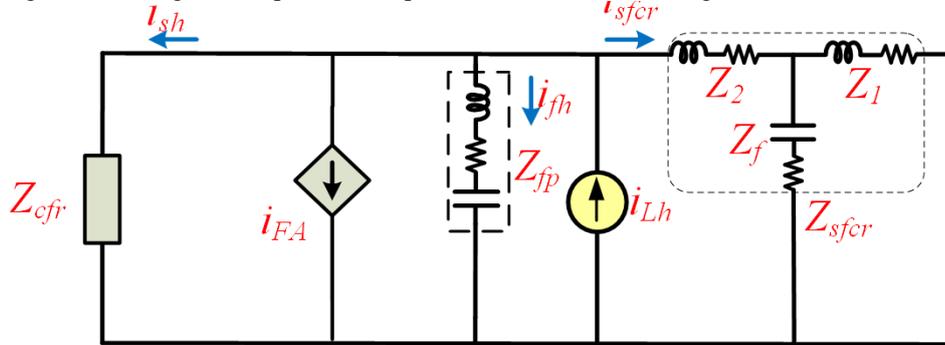
O processo de análise da MR com o FHP segue uma abordagem semelhante ao do FHS. Deste modo, por meio dos diagramas esquemáticos representados nas Figuras 17, 18 e 19, foi possível obter as funções de transferência correspondentes, expressas nas equações (11), (12), (13), (14) e (15).

Figura 17 – Diagrama esquemático equivalente da MR conectada ao FHP.



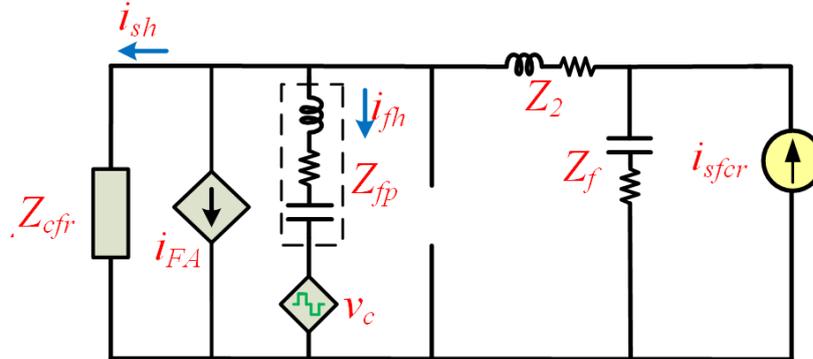
Fonte: Antunes, 2018 (adaptado).

Figura 18 – Diagrama esquemático equivalente da MR com a carga não-linear como fonte poluidora.



Fonte: Antunes, 2018 (adaptado).

Figura 19 – Diagrama esquemático equivalente da MR com o SFCR fonte poluidora.



Fonte: Antunes, 2018 (adaptado).

$$\frac{i_{sh}}{i_{lh}} = \frac{Z_{fp} \cdot Z_{sfcr}}{Z_{fp} \cdot Z_{sfcr} + (Z_{sfcr} + K_a) \cdot Z_{sfcr} + Z_{cfr} \cdot Z_{sfcr}} \quad (11)$$

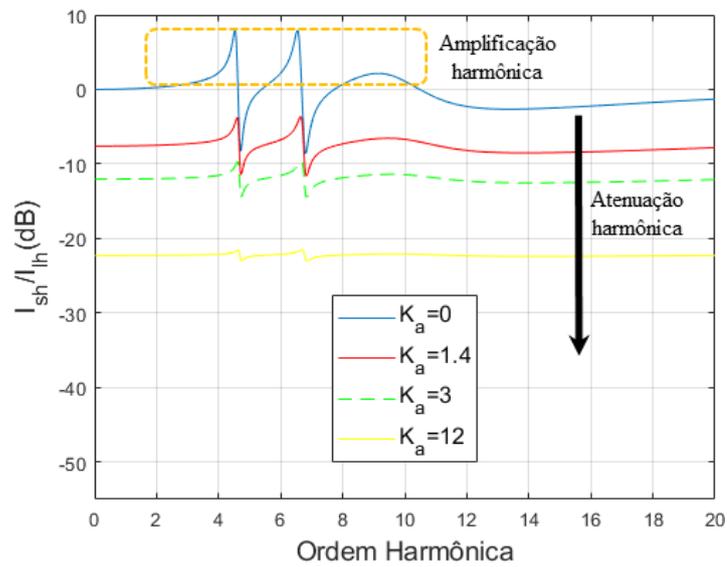
$$\frac{i_{fh}}{i_{lh}} = \frac{(Z_{sfcr} + K_a) \cdot Z_{sfcr}}{Z_{fp} \cdot Z_{sfcr} + (Z_{sfcr} + K_a) \cdot Z_{sfcr} + Z_{cfr} \cdot Z_{sfcr}} \quad (12)$$

$$\frac{i_{sfcr}}{i_{lh}} = \frac{Z_{cfr} \cdot Z_{fp}}{Z_{fp} \cdot Z_{sfcr} + (Z_{sfcr} + K_a) \cdot Z_{sfcr} + Z_{cfr} \cdot Z_{sfcr}} \quad (13)$$

$$\frac{i_{sh}}{i_{sfcr}} = \frac{Z_{fp} Z_f}{Z_{fp} \cdot (Z_{cfr} + Z_2 + Z_f) + Z_f \cdot (Z_{cfr} - K_a) \cdot Z_2 \cdot (Z_{cfr} - K_a)} \quad (14)$$

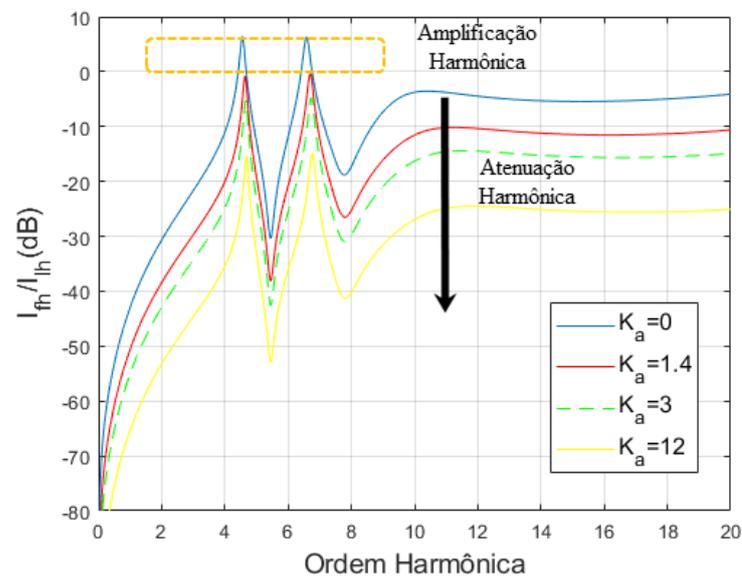
$$\frac{i_{fh}}{i_{sfcr}} = \frac{Z_f \cdot (Z_{cfr} - K_a)}{Z_{fp} \cdot (Z_{cfr} + Z_2 + Z_f) + Z_f \cdot (Z_{cfr} - K_a) \cdot Z_2 \cdot (Z_{cfr} - K_a)} \quad (15)$$

Figura 20 – Característica de filtragem da MR conectada ao FHP – Relação entre i_{sh} e i_{lh}



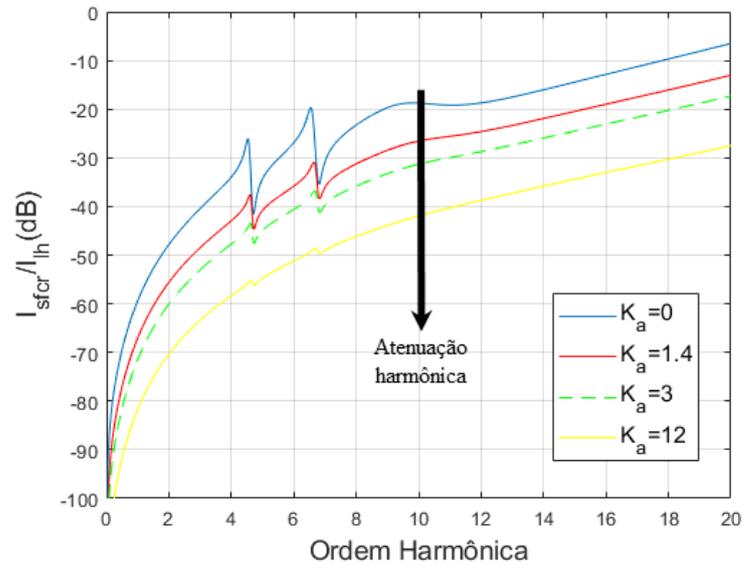
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 21 – Característica de filtragem da MR conectada ao FHP – Relação entre i_{fn} e i_{lh}



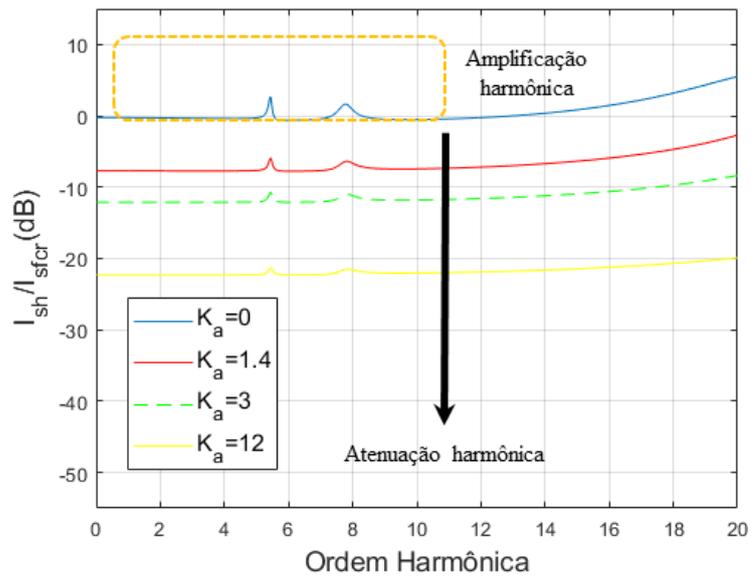
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 22 – Característica de filtragem da MR conectada ao FHP – Relação entre i_{sfc} e i_{th}



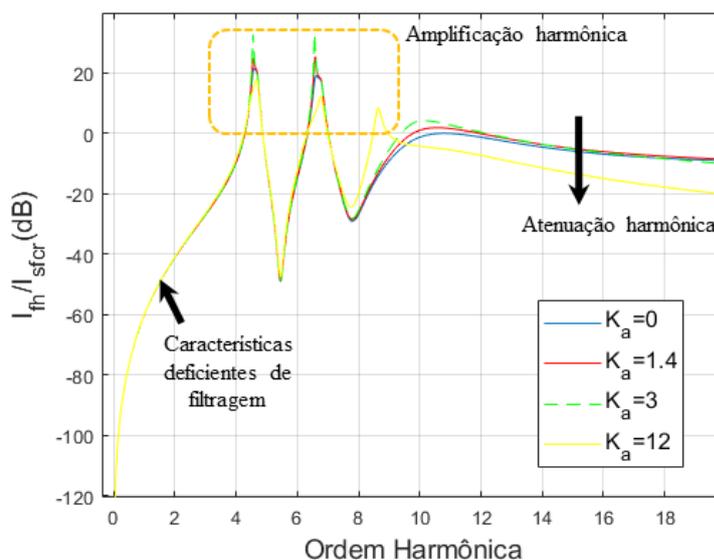
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 23 – Característica de filtragem da MR conectada ao FHP – Relação i_{sh} e i_{sfc}



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 24 – Característica de filtragem da MR conectada ao FHP – Relação entre i_{fh} e i_{sfc}



Fonte: Produção do próprio autor.

Com o objetivo de avaliar o impacto do ganho K_a na MR em estudo, foram realizadas simulações e plotadas as funções de transferência em relação aos valores de impedância. Inicialmente, ao utilizar o valor $K_a = 0$ como referência, observou-se amplificação harmônica na MR e um desempenho insatisfatório do FP em relação à mitigação das harmônicas geradas pela carga e pelo SFCR. Posteriormente, ao aumentar o ganho K_a , foram conduzidas simulações em uma escala mais ampla. Os resultados obtidos nas Figuras 20, 21 e 23 evidenciaram a atenuação da amplificação harmônica tanto na rede elétrica quanto no filtro passivo. Especificamente nas Figuras 20 e 23, a amplificação harmônica foi completamente eliminada. Esses resultados destacam a importância de um ajuste adequado do parâmetro K_a para um controle efetivo do filtro híbrido em série. Com base na análise das figuras e considerando o critério de manter a corrente da rede abaixo de 0dB e evitar amplificações na corrente do filtro, o valor escolhido para o ganho K_a foi de 1,4, visando otimizar a eficiência do filtro sem aumentar desnecessariamente a potência nominal requerida

3.1.4 Análise comparativa dos filtros no estudo do ganho e suas simulações

Ao comparar a MR conectada com o FHS e a MR conectada com o FHP, é possível observar diferenças significativas no desempenho dos filtros em relação à atenuação das componentes harmônicas e análise da potência nominal do filtro.

Na MR conectada com o FHS, o ganho do filtro foi de 6, o que resultou em uma efetiva redução da amplificação harmônica. O FHS demonstrou uma capacidade notável de melhorar a filtragem, reduzindo a influência das harmônicas na corrente total da carga. Isso indica que o FHS foi eficiente na minimização dos efeitos indesejados das harmônicas, contribuindo para uma melhor qualidade de energia elétrica na MR.

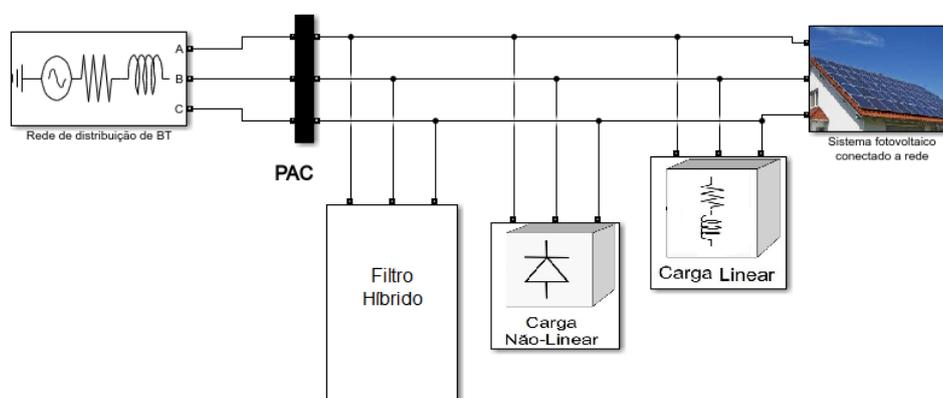
Na MR conectada com o FHP, apesar de uma redução na amplificação harmônica e ganho resultante de 1,4, menor que o ganho K_v , foram observados valores relativamente altos de amplificação harmônica, especialmente na corrente do filtro em relação à corrente proveniente do SFCR como fonte poluidora. Isso indica uma eficácia limitada do FHP na atenuação das harmônicas.

Portanto, com base na análise comparativa dos resultados e simulações no estudo do ganho dos filtros, pode-se concluir que o FHS apresentou um desempenho superior em relação ao FHP, por apresentar um desempenho superior na atenuação das harmônicas e melhoria da filtragem na MR.

3.2 SIMULAÇÃO DA MICRORREDE

Com o objetivo de avaliar o desempenho dos filtros híbrido, foi realizada uma simulação digital utilizando o *software* Simulink. O sistema simulado é composto pela rede de distribuição, pela chave estática SS-MR e por quatro subsistemas interconectados. Esses subsistemas incluem o filtro híbrido, a carga não linear, a carga linear e o SFCR, como ilustrado na Figura 25.

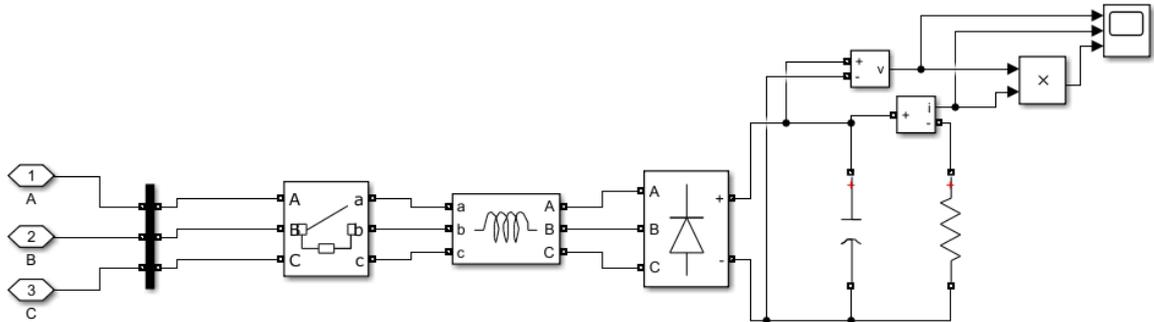
Figura 25 – Modelo da MR em estudo.



Fonte: Produção do próprio autor.

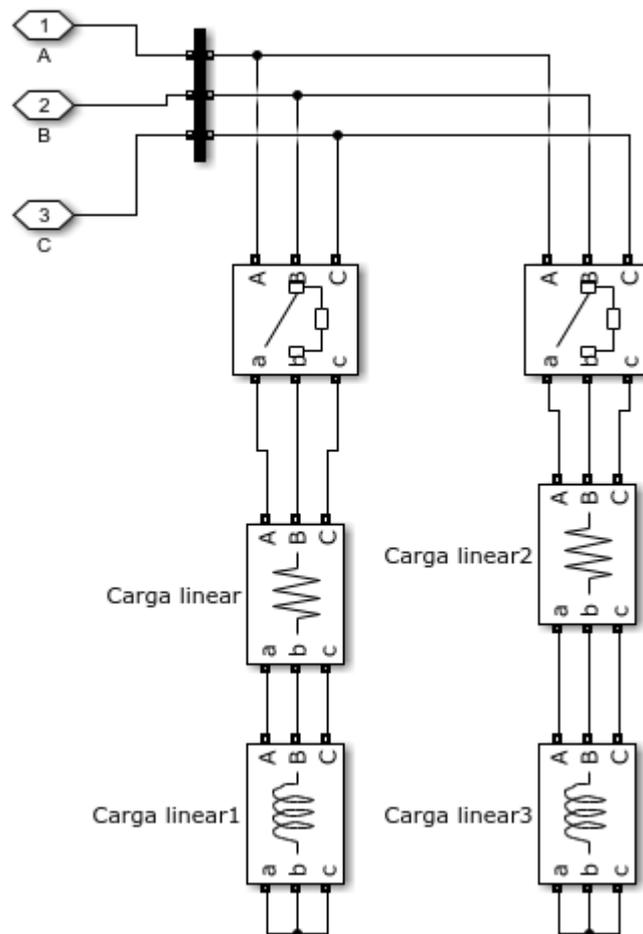
Nesta seção, serão apresentados os subsistemas de carga não-linear, carga linear e SFCR. Na próxima seção, será abordada a topologia do filtro híbrido, com foco nas configurações série e paralelo.

Figura 26 – Modelo do subsistema da carga não-linear.



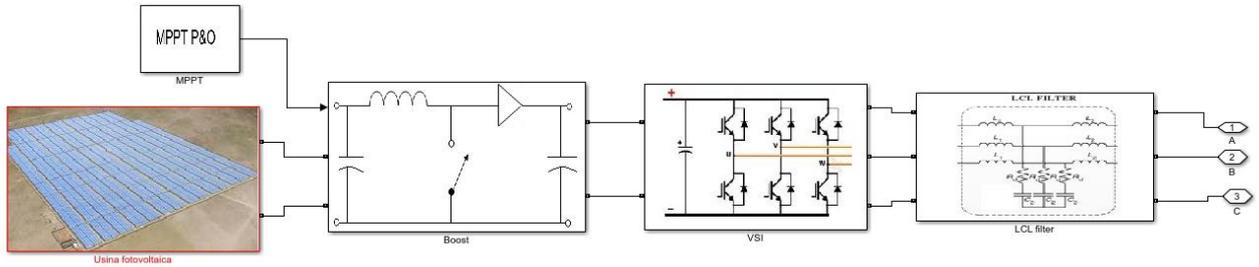
Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 27 – Modelo do subsistema da carga linear.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 28 – Modelo do subsistema do SFCR.

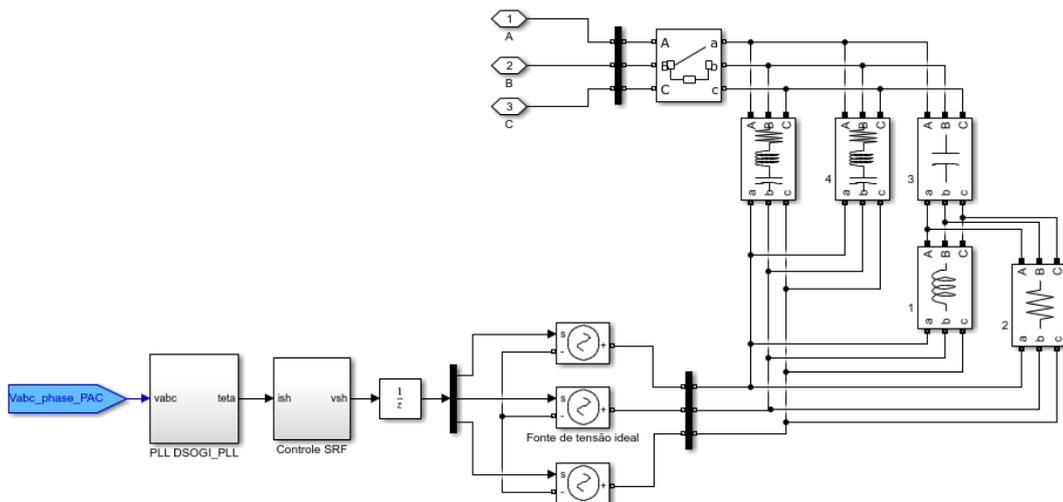


Fonte: Produção do próprio autor.

3.2.1.1 Simulação do filtro híbrido série

Nesta seção, vamos explorar a MR conectada ao FHS. Na seção anterior, apresentamos a topologia da MR na Figura 25. Agora, o foco é o subsistema do FHS, onde o FA é conectado em série com o FP como mostrado na Figura 29:

Figura 29 – Modelo do subsistema do FHS.



Fonte: Produção do próprio autor.

3.2.1.2 Resultados da simulação do MR conectada ao filtro híbrido série

O ganho K_v utilizado na simulação é igual a 6, conforme obtido na seção 3.1.2.1 do estudo. O FP inicia sua operação em 0,4 segundos, enquanto a corrente do FA começa a operar em 0,7 segundos.

A ferramenta *PowerGUI* no Simulink foi empregada para obter os valores de distorção harmônica total da tensão (DHT_v) no PAC e da corrente (DHT_i) no PAC em três diferentes condições de operação da MR. Os resultados dessas análises estão documentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de DHT para cada estágio da simulação na MR conectada ao FHS.

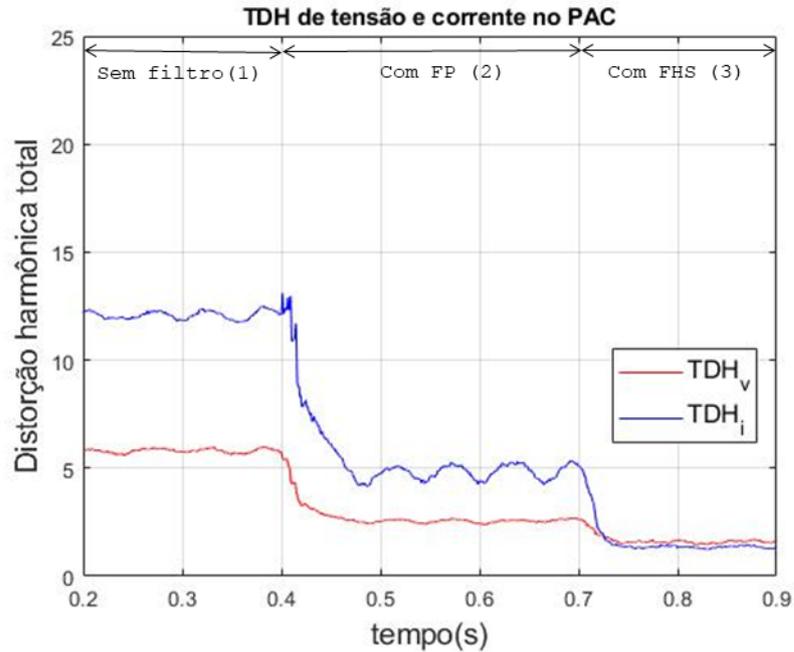
Grandezas	Sem Filtro	Filtro Passivo	Filtro Híbrido Série
DHT Tensão no PAC (%)	5,86	3,53	1,52
DHT Corrente no PAC (%)	12,22	8,88	1,37

Fonte: Produção do próprio autor.

Na Tabela 1, pode-se observar os valores máximos em regime permanente de DHT_v e da DHT_i para as três condições de operação da MR. Ao analisar os valores na tabela, é possível perceber que o DHT de tensão no PAC da MR sem filtro é igual a 5,86%. De acordo com a ANEEL. PRODIST Módulo 8, o limite da distorção harmônica para tensão menor que 1kV deve ser menor ou igual a 10%, sendo assim, é possível concluir que mesmo sem filtro, a MR está com os padrões dentro de DHT_v dentro da norma. Contudo, fica evidente que a introdução do filtro passivo resultou em uma redução de 2,33% no DHT_v em relação à operação sem filtro. Além disso, ao operar com o FHS, houve uma redução ainda maior, de 4,34%, em comparação à operação sem filtro. Quanto ao DHT_i , foi observada uma redução significativa no PAC com uma diminuição de 3,34% com o filtro passivo e uma redução ainda mais expressiva de 10,85% com o FHS em relação à operação da MR sem filtro. Esses resultados indicam a efetividade dos filtros na redução da distorção harmônica no sistema elétrico.

Para realizar uma análise gráfica do DHT de corrente e tensão no PAC, foi realizada uma simulação no MATLAB, onde foi plotado um gráfico para cada parâmetro em função do tempo. Na Figura 30, é possível observar os gráficos correspondentes ao DHT de corrente e tensão no PAC, ao longo dos três intervalos de tempo definidos.

Figura 30 – TDH de tensão e corrente no PAC da MR conectada ao FHS.



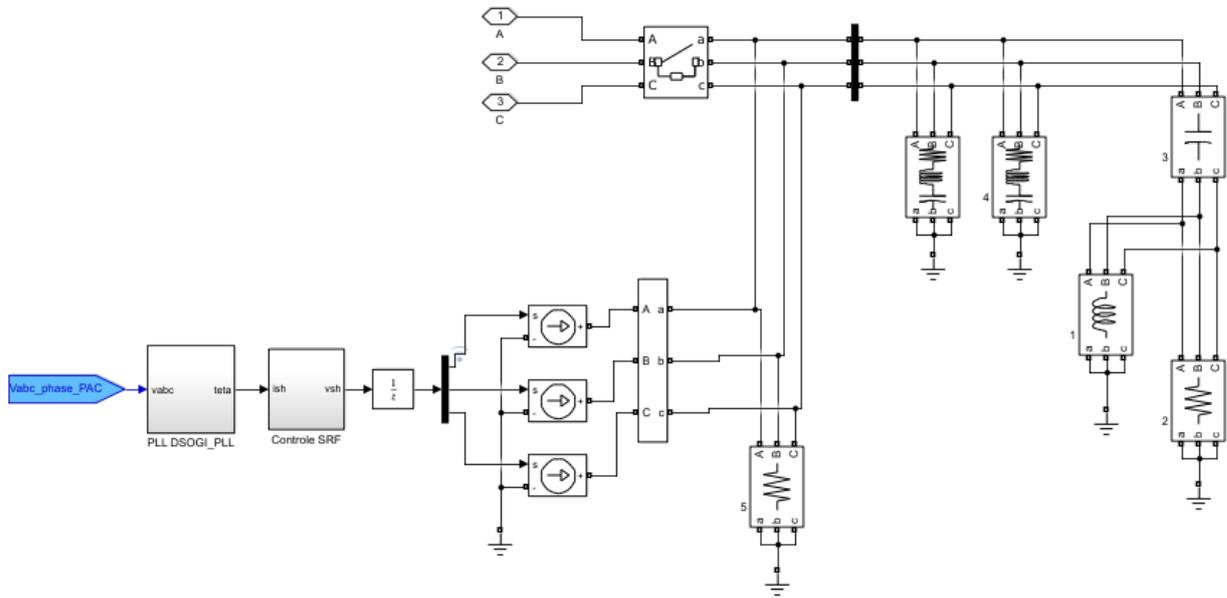
Fonte: Produção do próprio autor.

Por meio da análise gráfica dos dados obtidos na Tabela 1, é possível observar visualmente a redução do DHT_v e DHT_i no PAC com a aplicação do filtro ativo e do FHS. Os gráficos representam de forma clara e visual os resultados quantitativos apresentados na tabela, permitindo uma melhor compreensão dos efeitos da filtragem harmônica.

3.2.2 Simulação do filtro híbrido paralelo

Nesta seção, será explorada a MR conectada ao FHP. Na seção 3.2, foi apresentada a topologia da MR e seus subsistemas. Agora, será apresentado subsistema do FHP, onde o FA é conectado em paralelo com o FP, conforme mostrado na Figura 31.

Figura 31 – Modelo do subsistema do FHP.



Fonte: Produção do próprio autor.

3.2.2.1 Resultados da simulação da MR conectada ao filtro híbrido paralelo

Os intervalos definidos e a metodologia aplicada para o FHS são os mesmos utilizados para o FHP. Os resultados do DHT_v e do DHT_i no PAC em três diferentes condições de operação da MR estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores de DHT para cada estágio da simulação na MR conectada ao FHP.

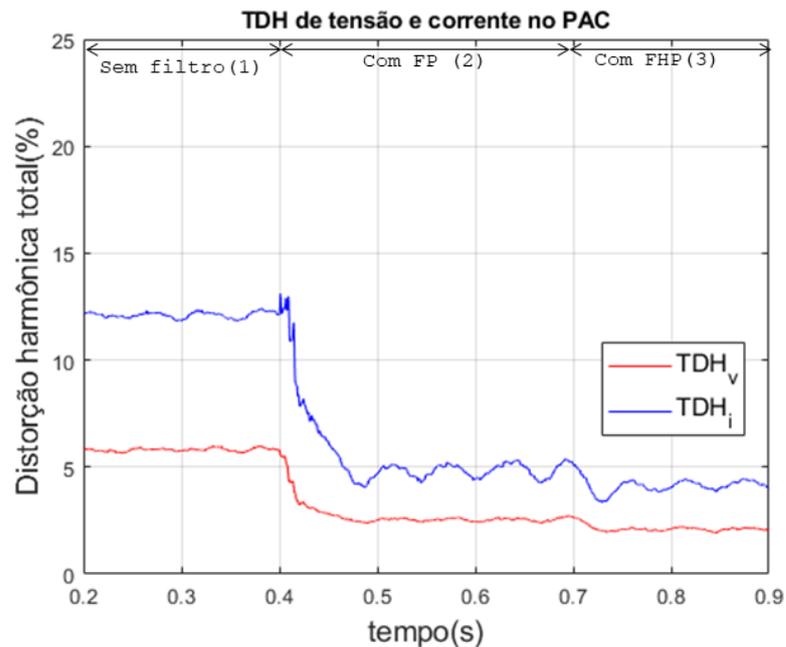
Grandezas	Sem Filtro	Filtro Passivo	Filtro Híbrido Paralelo
DHT Tensão no PAC (%)	5,83	3,51	2,03
DHT Corrente no PAC(%)	12,05	4,84	4,16

Fonte: Produção do próprio autor.

Ao analisar os valores na tabela, é evidente que a introdução do FP resultou em uma redução de 2,32% no DHT_v em comparação à operação sem filtro. Além disso, ao operar com o FHP, foi observada uma redução ainda maior de 3,8%. No que diz respeito ao DHT_i , foram observadas reduções significativas, com uma diminuição de 7,21% com o FP e uma redução ainda mais expressiva de 7,89% com o FHP em comparação à operação da MR sem filtro. Esses resultados indicam que a utilização dos filtros passivo e FHP é eficaz na redução da distorção harmônica, tanto em relação à tensão quanto à corrente, contribuindo para melhorar a QEE do sistema elétrico.

Para realizar uma análise gráfica do DHT de corrente e tensão no PAC, foi realizada uma simulação no MATLAB, onde foi plotado um gráfico para cada parâmetro em função do tempo. Na Figura 32, é possível observar os gráficos correspondentes ao DHT de corrente e tensão no PAC, ao longo dos três intervalos de tempo definidos.

Figura 32 – DHT de tensão e corrente no PAC da MR conectada ao FHP.



Fonte: Produção do próprio autor.

Por meio da análise gráfica dos dados obtidos na Tabela 2, é possível observar visualmente a redução do DHT_v e DHT_i no PAC com a aplicação do FA e do FHP. Os gráficos representam de forma clara e visual os resultados quantitativos apresentados na tabela, permitindo uma melhor compreensão dos efeitos da filtragem no sistema elétrico.

3.2.3 Análise comparativa das simulações da MR conectada com FHS e com o FHP

Ao comparar as simulações da MR conectada com o FHS e a MR conectada com o FHP, observa-se que ambos os filtros foram eficazes na redução das distorções harmônicas nas grandezas elétricas. No entanto, os resultados indicam que o FHS obteve uma maior redução percentual tanto na DHT_v no PAC (4,34%) quanto na DHT_i no PAC (10,85%). Por outro lado, o FHP alcançou uma redução percentual de 3,8% na DHT_v no PAC de 7,89% na DHT_i no PAC.

Ao analisar as Figuras 30 e 31, é perceptível que o desempenho do FHS foi superior ao FHP. Os gráficos demonstram uma queda mais acentuada nos valores de DHT da tensão e corrente para a MR conectada com o FHS em comparação com a MR conectada com o FHP.

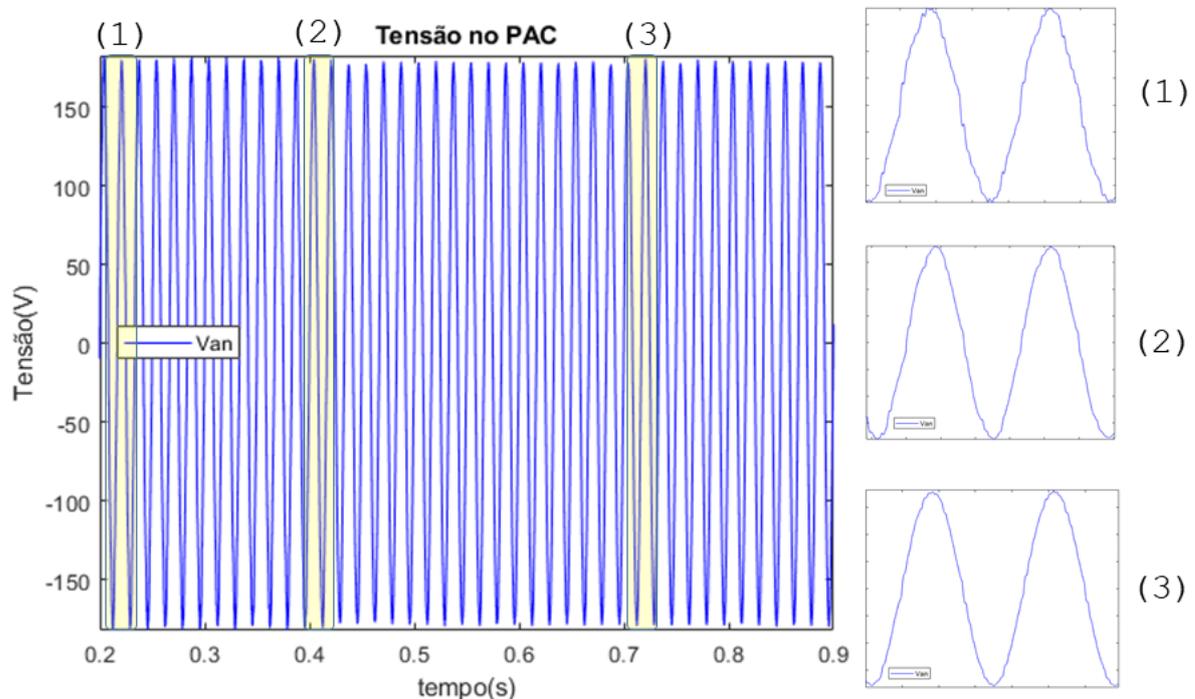
Essa análise evidencia que o FHS apresentou um desempenho superior na atenuação das distorções harmônicas em comparação ao FHP, resultando em uma melhoria mais significativa da qualidade da energia elétrica na MR.

3.3 GRANDEZAS ELÉTRICAS

3.3.1 Filtro híbrido série

Na Figura 33, é apresentada a variação da tensão do PAC no domínio do tempo. Os intervalos de operação dos filtros, que foram aplicados nas seções anteriores, são os mesmos utilizados para gerar os dados do gráfico.

Figura 33 – Tensão no PAC da MR conectada ao FHS.



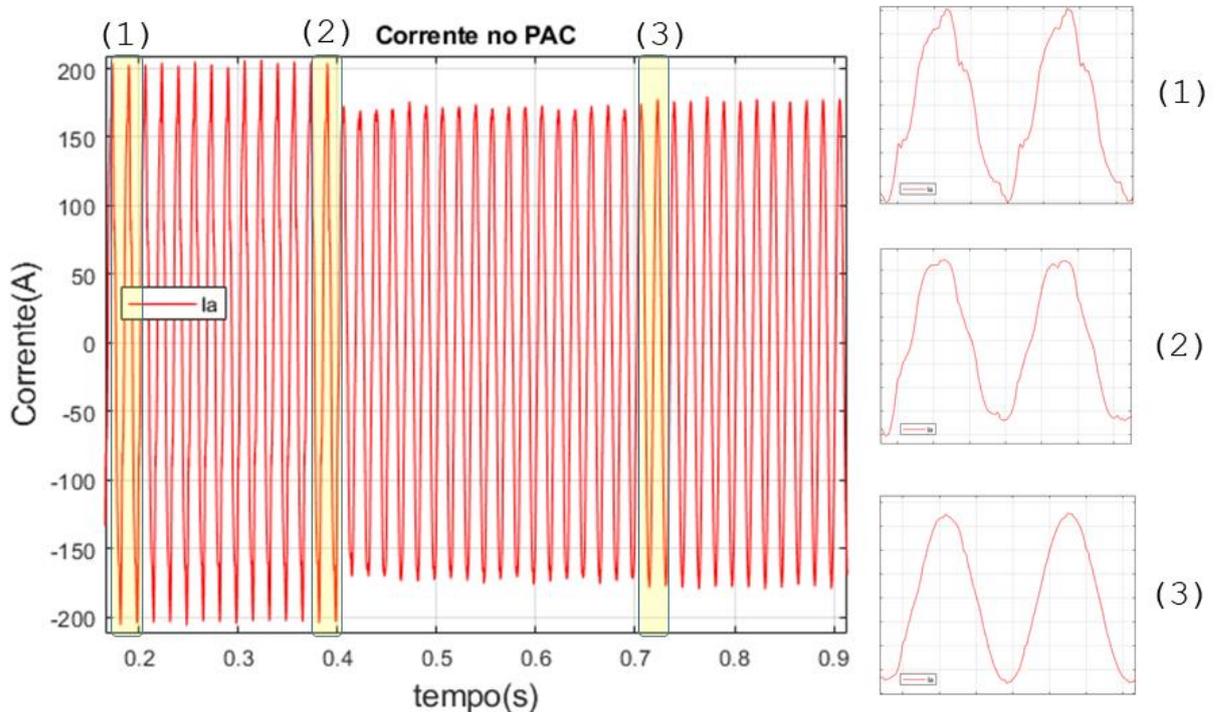
Fonte: Produção do próprio autor.

Ao analisar a Figura 33, é possível concluir que a aplicação do FA resulta em uma forma de onda da tensão mais senoidal, indicando uma melhora na QEE. Além disso, ao aplicar o FHS, pode-se observar uma otimização ainda maior na forma de onda, com uma redução adicional

das distorções harmônicas. Isso demonstra que o FHS é capaz de atenuar de forma mais eficiente as componentes indesejadas, contribuindo para uma melhora significativa da QEE no sistema elétrico em análise.

Na Figura 34, é possível visualizar a variação da corrente no PAC ao longo do tempo, considerando os mesmos intervalos e condições de operação previamente definidos.

Figura 34 – Corrente no PAC da MR conectada ao FHS.



Fonte: Produção do próprio autor.

Ao analisar a Figura 34, é possível concluir que a aplicação do FA resulta em uma forma de onda da corrente mais senoidal, indicando uma melhora na QEE. Essa melhora é ainda mais perceptível com a aplicação do FHS. Isso ocorre devido à capacidade do FHS de reduzir as componentes harmônicas do sistema. Ele realiza uma atenuação seletiva das harmônicas indesejadas e cancela as correntes harmônicas em fase oposta. Como resultado, a corrente no PAC se torna mais senoidal e de melhor qualidade, contribuindo para a estabilidade e cumprimento das normas de QEE.

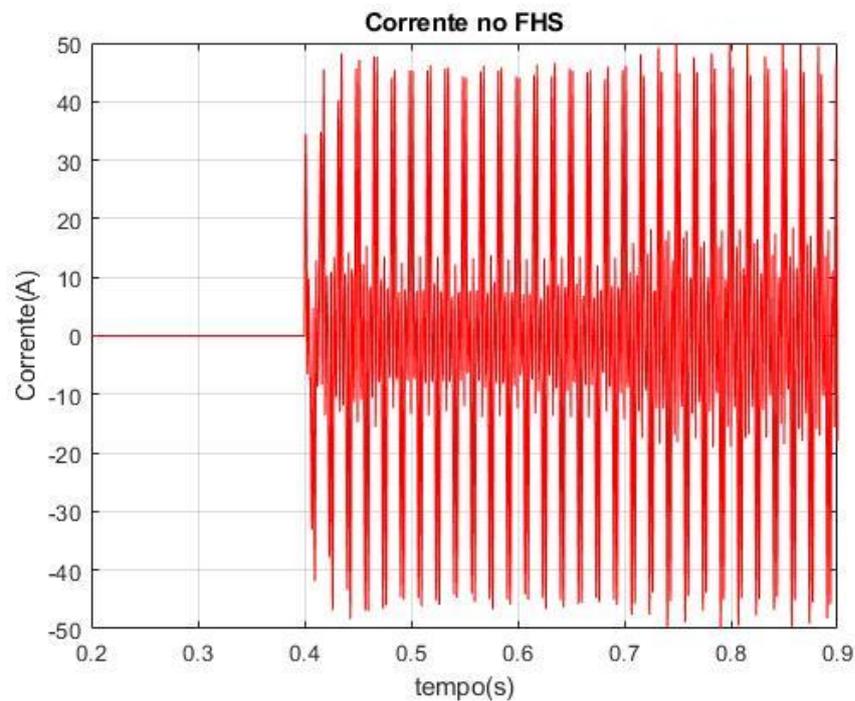
Na Figura 35, é representada a corrente do FHS. Nessa topologia, a corrente do filtro ativo é igual à corrente do filtro passivo. A partir dessa figura, é possível obter, por meio de simulações,

o pico da corrente, que é equivalente a 50,80A. Esse valor será utilizado para o cálculo da potência nominal do FA.

A Figura 36 mostra o fluxo de potência ativa da MR considerando a seguinte sequência de ações no sistema elétrico:

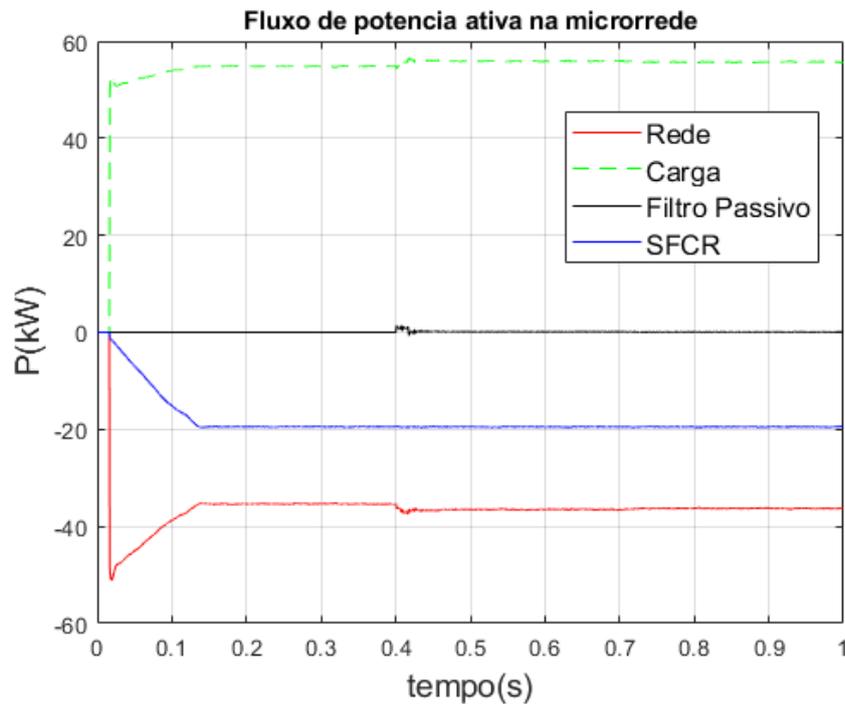
- $t = 0$ s - a simulação é iniciada com a energização do PAC, conexão do SFCR e cargas;
- $t = 0,4$ s - o FP é conectado à MR;
- $t = 0,7$ s - o FA é conectado em série com o FP, operando assim, o FHS.

Figura 35 – Corrente no FHS.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 36 – Fluxo de potência ativa da MR conectada ao FHS.

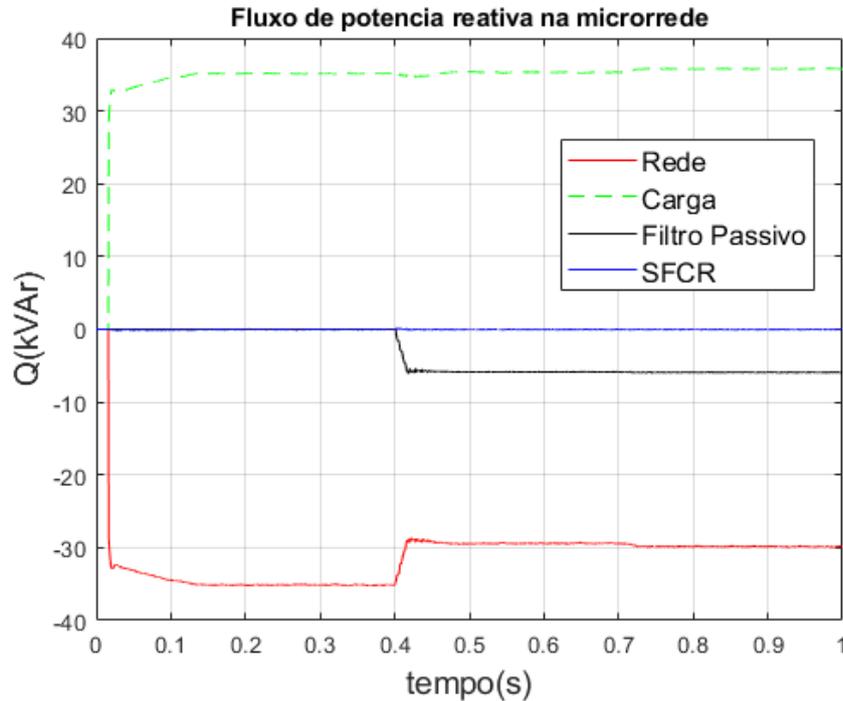


Fonte: Produção do próprio autor.

Ao analisar a Figura 36, podemos concluir que tanto o SFCR quanto a rede elétrica estão fornecendo potência ativa ao sistema elétrico. Essa conclusão é baseada no fato de que o fluxo de potência ativa é negativo, indicando uma contribuição de energia para o sistema. Por outro lado, as cargas estão demandando energia, como evidenciado pelo aumento levemente gradual no fluxo de potência. Essa diferença de fluxo de potência entre as fontes geradoras, SFCR e rede, e as cargas resulta em um equilíbrio entre a geração e a demanda de energia na MR.

A Figura 37 apresenta o gráfico do fluxo de potência reativa da MR, considerando a mesma sequência de ações que no fluxo de potência ativa.

Figura 37 – Fluxo de potência reativa da MR conectada ao FHS.



Fonte: Produção do próprio autor.

Ao analisar a Figura 37, é possível inferir que o FP, quando ativado, desempenha a função de compensação na potência reativa, resultando em uma redução na quantidade de potência reativa absorvida pela rede elétrica. Essa redução no fluxo de potência reativa absorvida pelo FP acarreta um leve aumento proporcional na potência reativa da rede elétrica. Portanto, o aumento observado na potência reativa da rede é uma resposta direta ao início da atuação do FP no sistema. É importante ressaltar que o SFCR, projetado para operar predominantemente na geração de potência ativa, pode apresentar potência reativa nula.

3.3.1.1 Potência nominal do FA do FHS

Para o FHS, é necessário a definir a capacidade nominal do FA. A potência nominal do filtro é determinada pela equação 16 (AKAGI, 2005).

$$|S_{FA}| = \sqrt{3} \frac{V_{CC}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{PF}}{\sqrt{2}} \quad (16)$$

Onde:

- VCC - tensão na ligação CC do FA;
- I_{PF} - corrente de pico no FP;
- S_{FA} - potência aparente do FA.

Adotando um inversor do tipo fonte de tensão (VSI) trifásico com modulação PWM de dois níveis, a tensão no barramento CC é duas vezes o pico da tensão de fase de saída do FA. Os valores obtidos na simulação da rede estão explicitados na Tabela 3.

Tabela 3 – Tensão e corrente no FHS aplicado à MR.

Grandeza	Valor obtido
Tensão de pico (V)	20,50
Corrente de pico (A)	50,80

Fonte: Produção do próprio autor.

Ao substituir os valores da Tabela 3 na equação 16, é possível calcular a potência aparente do FA resultante, que é de 1,80 kVA. Considerando que a carga linear possui $(25,55 + j23,92)$ kVA e a carga não linear possui $(30 + j11,7)$ kVA, a potência aparente total da carga é $(55,55 + j35,62)$ kVA ou 65,99 kVA. Sendo assim, a potência nominal do FHS é igual a 2,72% da carga da MR.

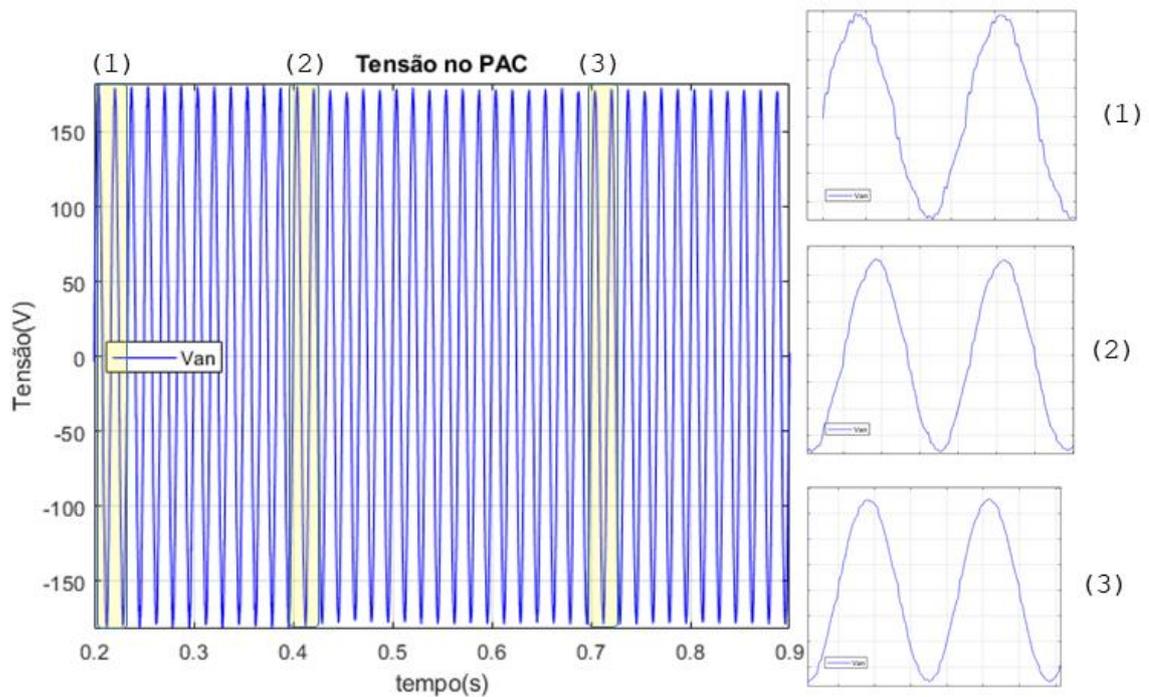
3.3.2 Filtro híbrido paralelo

Na Figura 38, é apresentada a variação da tensão do PAC no domínio do tempo. Os intervalos de operação dos filtros, que foram aplicados nas seções anteriores, são os mesmos utilizados para gerar os dados do gráfico.

A aplicação do FA melhora a qualidade da energia elétrica, tornando a forma de onda da tensão mais senoidal. Ao utilizar o FHP, essa melhoria é ampliada, resultando em uma redução adicional das distorções harmônicas.

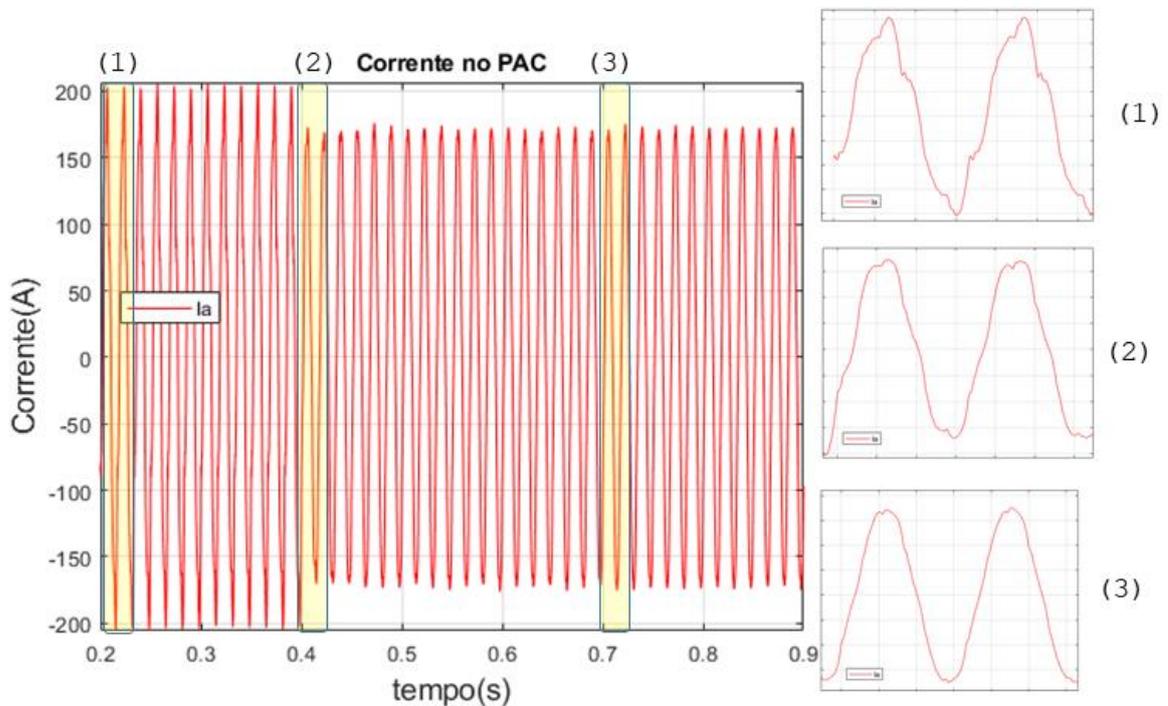
Na Figura 39, é possível visualizar a variação da corrente no PAC ao longo do tempo, considerando os mesmos intervalos e condições de operação previamente definidos.

Figura 38 – Tensão no PAC da MR conectada ao FHP.



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 39 – Corrente no PAC da MR conectada ao FHP.



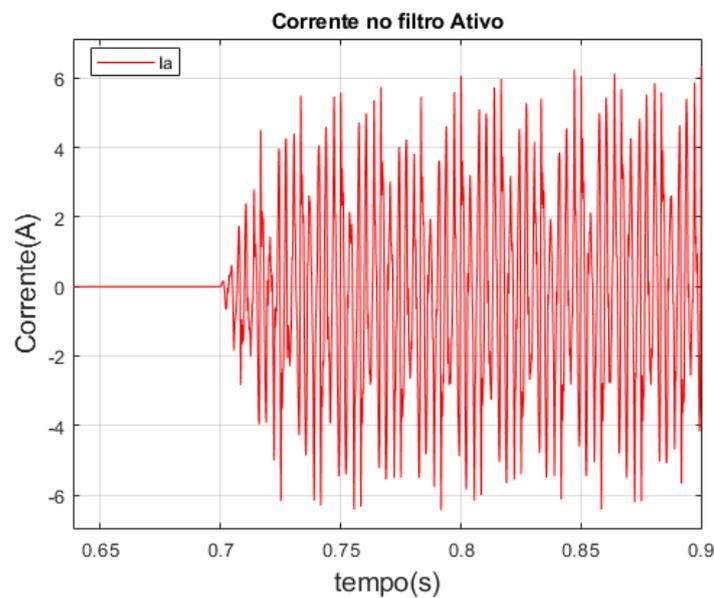
Fonte: Produção do próprio autor.

A análise da figura 39 evidencia que a implementação do FA resulta em uma melhoria na QEE, refletida em uma forma de onda mais senoidal da tensão. Ao utilizar o FHP, essa melhoria é ampliada, resultando em uma redução das distorções harmônicas. O FHP atua de forma eficaz

na corrente do PAC ao combinar os efeitos do FA e do FP em paralelo. O FA é responsável pela redução de distorções harmônicas de alta frequência, enquanto o FP lida com as componentes de baixa frequência.

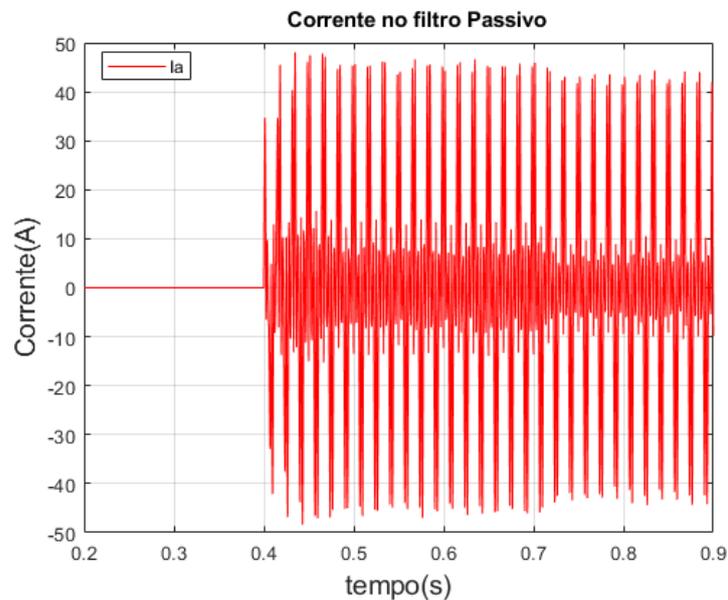
As Figuras 40 e 41 são gráficos que mostram a corrente do FA e do FP, respectivamente. O pico da corrente do FA foi utilizado para calcular a potência nominal do FA. Por meio do *software* Matlab, foi obtido um valor de pico de corrente de 6,3A. Esse valor é relevante para determinar a capacidade de operação do FA no sistema.

Figura 40 – Corrente no filtro ativo da MR conectada ao FHP.



Fonte: Produção do próprio autor.

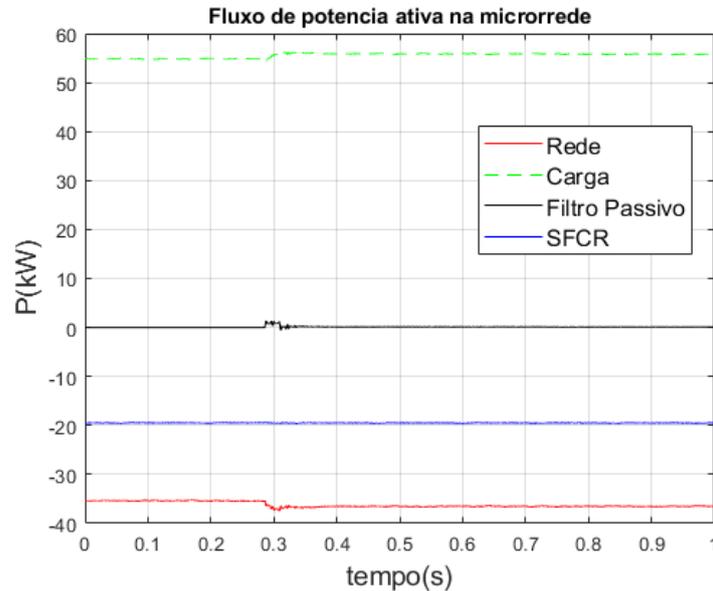
Figura 41 – Corrente no filtro da MR conectada ao FHP.



Fonte: Produção do próprio autor

A Figura 42 apresenta o fluxo de potência ativa da MR. Os parâmetros analisados e os intervalos de tempo correspondem aos mesmos utilizados na análise do FHS.

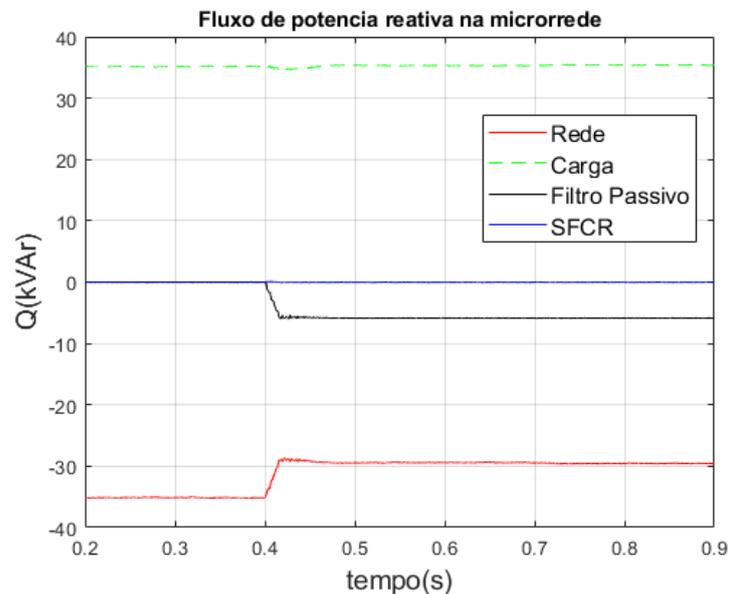
Figura 42 – Fluxo de potência ativa da MR conectada ao FHP.



Fonte: Produção do próprio autor.

Ao analisar a Figura 42, podemos concluir que o SFCR fornece potência ativa ao sistema, indicando uma contribuição energética para suprir as demandas. Por outro lado, a rede elétrica absorve potência ativa, utilizando-a para atender suas necessidades de consumo. Além disso, podemos observar que a carga consome potência ativa, caracterizando o seu papel de demanda no sistema. Por fim, o filtro passivo apresenta fluxo de potência ativa praticamente nulo.

Figura 43 – Fluxo de potência reativa da MR conectada ao FHP.



Fonte: Produção do próprio autor.

Ao analisar a Figura 43, podemos concluir que, ao acionar o filtro passivo em 0,4s, ocorre uma redução na potência reativa absorvida pela rede elétrica, resultando em um aumento proporcional no valor absoluto do fluxo de potência reativa. O FP, por sua vez, compensa essa potência reativa, resultando em um fluxo de potência reativa negativo menor e estável. Essa relação demonstra o equilíbrio das potências reativas no sistema. Além disso, podemos observar que a carga consome potência reativa, enquanto o SFCR, projetado para geração de potência ativa, apresenta potência reativa nula.

3.3.2.1 Potência no nominal do FA do FHP

Para o FHP, também é necessário a definir a capacidade nominal do FA. A potência nominal do filtro é determinada pela equação 17 (AKAGI, 2005).

$$|P_{FA}| = \sqrt{3} \frac{V_{CC}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{FA}}{\sqrt{2}} \quad (17)$$

Onde:

- V_{CC} - Tensão na ligação CC do FA;
- I_{FA} - Corrente de pico no FA;
- P_{FA} - Potência aparente do FA.

Para o FHP, a tensão V_{CC} é obtida a partir da tensão de linha, e I_{FA} representa o pico de corrente do FA que foi simulado. Esses dados estão mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Tensão e corrente no FHP aplicado à MR.

Grandeza	Valor obtido
Tensão de pico (V)	311
Corrente de pico (A)	6,3

Fonte: Produção do próprio autor.

Ao substituir os valores da Tabela 4 na equação 17, podemos calcular a potência aparente do FA resultante, que é de 1,70kVA. Sendo assim, a potência nominal do FHP é igual a 2,58% da carga da MR.

3.3.3 Análise comparativa das grandezas elétricas da MR com o FHS e o FHP

Com os resultados obtidos do FHP, é possível concluir que a potência nominal do FHS, que corresponde a 2,72% da carga da MR, é superior à potência nominal do FHP, equivalente a 2,58% da carga da MR. Com base nessa comparação, é possível inferir que, neste cenário, o desempenho do FHP é sutilmente superior ao do FHS na MR em questão.

4 CONCLUSÕES

Neste estudo, foi conduzida uma análise da aplicação do FHS e do FHP em uma MR de C.A., com o objetivo de determinar o sistema que proporciona uma melhor QEE.

Com a utilização do *software* Matlab/Simulink, foram realizadas simulações no modo de operação conectado à rede, utilizando um modelo de MR trifásica que inclui um conversor formador de rede, cargas lineares e não-lineares, um sistema fotovoltaico conectado à rede, além dos filtros híbridos série e paralelo.

O estudo teve início com uma revisão teórica abrangendo conceitos fundamentais de MRs, conversores eletrônicos, distorções harmônicas e filtros. Em seguida, foi detalhada a aplicação dos filtros híbridos na MR C.A., apresentando-se os parâmetros do projeto. Por meio de funções de transferência, foi definido o ganho dos filtros e realizadas simulações para analisar o desempenho das duas topologias em termos de DHT de tensão e corrente no PAC. As simulações foram concluídas com a análise das grandezas elétricas, incluindo a tensão e corrente no PAC, os fluxos de potência ativa e reativa, bem como as correntes do filtro ativo e passivo. Essa análise permitiu o cálculo da potência nominal do filtro ativo nos dois cenários.

Os resultados obtidos indicaram que ambos os filtros resultaram em uma melhoria na QEE no sistema da MR. Apesar de a potência nominal do FA no sistema da MR conectada ao FHP ter sido inferior à do sistema da MR conectada FHS, a MR conectada ao FHS demonstrou um desempenho superior. Essa conclusão foi fundamentada nos menores valores DHT de tensão e corrente no PAC, bem como na maior atenuação harmônica. Esses aspectos contribuem significativamente para melhorar a QEE da MR.

Como sugestão para futuras pesquisas, recomenda-se realizar uma análise comparativa considerando o modo ilhado da MR explorando as funcionalidades do CFR e suas contribuições para a estabilidade e QEE do sistema.

Em suma, este estudo contribui para o avanço do conhecimento no campo das MRs e filtros híbridos, fornecendo informações relevantes para a tomada de decisões em relação à implementação de sistemas de energia elétrica mais eficientes e com melhor qualidade.

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: 27 jul. 2023.

AKAGI, H. **Active Harmonic Filter**. Proceedings of the IEEE. Torino, v. 93, n. 12, 2005, p. 2128-2138, 2005.

ALLAF, B. A. Power system monitoring and analysis. *In: ENERGY CONFERENCE AND EXHIBITION*, 2010, Manama. **Proceedings**[...]. Manama: IEEE, 2010. p. 297–301, 2010.

ANTUNES, H. M. A. **Análise Comparativa entre Filtros Híbridos Aplicados a Cicloconvertidores em uma Siderúrgica**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2018.

ANTUNES, H. M. A. **Conversor Multifuncional Reconfigurável e Tolerante a Falhas para Microrredes de Energia Elétrica**. 2018. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

ANTUNES, H. M. A. *et al.* **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.

ANTUNES, H. M. A.; PIRES, I. A.; SILVA, S. M. Evaluation of series and parallel hybrid filters applied to hot strip mills with cycloconverters. *In: INDUSTRY APPLICATIONS SOCIETY ANNUAL MEETING*, 2018, Portland. **Proceedings** [...]. Portland: IEEE, 2018. p. 1047-1053.

BALANUTA, C. *et al.* Improving micro-grid power quality using three-phase four-wire active power conditioners. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE - SYSTEM THEORY, CONTROL AND COMPUTING (ICSTCC)*, 2012, [S.l.]. **Proceedings**[...]. [S. l.]: IEEE, 2012, p. 1-5.

BEVRANI, H.; WATANABE, M.; MITANI, Y. **Power System Monitoring and Control**. 1. ed. [S.l.]: Wiley. 2014.

BHASKARA, S. N.; CHOWDHURY, B. H. Microgrids—a review of modeling, control, protection, simulation and future potential. *In: POWER AND ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING*, 2012, [S.l.]. **Proceedings**[...]. [S.l.]: IEEE, 2012. p. 1–7.

BHATTACHARYA S; CHENG P. T; DIVAN D.M. **Hybrid solutions for improving passive filter performance in high power applications**. IEEE Transactions on Industry Applications, [S. l.], v. 33, n. 3, p. 732-747, 1997.

BHENDE, C. N.; KALAM, A. Power quality conditioner for microgrid. *In: POWER ENGINEERING CONFERENCE (AUPEC)*, 2013, Hobart, **Proceedings**[...]. Hobart: IEEE, 2013, p. 1-4.

CHEN, S. X.; GOOI, H. B.; WANG, M. Q. **Sizing of energy storage for microgrids**. IEEE Transactions on Smart Grid, [S. l.] v. 3, n. 1, p. 142–151, 2012.

CHEN, Z; BLAABJERG, F; PEDERSEN, J. K. **Harmonic resonance damping with a hybrid compensation system in power systems with dispersed generation**. In: ANNUAL POWER

DO NASCIMENTO, S. *et al.* **Harmonic state and power ow estimation in distribution systems using evolutionary strategy**. Journal of Control, Automation and Electrical Systems, [S. l.], v. 25, n. 3, p. 358-367, 2014.

DUNGAN, Roger C. **Electrical Power Systems Quality**. 2. nd. New York: McGraw-Hill Professional, 2002, p. 187-185.

EID, B. M. *et al.* **Control methods and objectives for electronically coupled distributed energy resources in microgrids: A review**. IEEE Systems Journal, p. 1–13, 2014.

FUCHS, Ewald F.; MASOUM, Mohammad AS. **Power Quality in Power Systems and Electrical Machines**. 2nd ed. Elsevier: Academic Press, p. 781-810, 2011.

FUJITA H; AKAGI H. **A practical approach to harmonic compensation in power systems-series connection of passive and active flters**. IEEE Transactions on industry applications, [S. l.], v. 27, n. 6, 1991.

GONZATTI, R. B. **Filtro Ativo Híbrido na Transformação de Microrredes com Alta Impedância em Barramento Quasi-infinito**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.

HE, J. *et al.* **Investigation and active damping of multiple resonances in a parallel-inverterbased microgrid**. IEEE Transactions on Power Electronics, [S. l.] v. 28, n. 1, p. 234–246, 2013.

INZUNZA, R; AKAGI, H. **A 6.6-kV transformerless shunt hybrid active filter for installation on a power distribution system**. IEEE Transactions on Power Electronics, [S.l.], v. 20, n.4, p.893-900, 2005.

IEEE STANDARTS ASSOCIATION. IEEE Std 1547.4: **IEEE guide for design, operation, and integration of distributed resource island systems with electric power systems**. New York, p. 1-217, 2011.

IEEE STANDARTS ASSOCIATION. IEEE Std 519: **IEEE recommended practice and requirements for harmonics control in electric power systems**. New York, p. 11-14, 2014.

JAIN, T.; JAIN, S.; AGNIHOTRI, G. Comparison of topologies of hybrid active power filter. In: IET CONFERENCE PROCEEDINGS, 2007, Tamil Nadu. **Proceedings[...]**. Tamil Nadu: IEEE, 2007, p. 503-509.

KAMEL, R. M.; KERMANSHAHI, B. **Enhancement of micro-grid dynamic performance subsequent to islanding process using storage batteries**. Iranian Journal of Science and Technology, [S.l.], v. 34, n. B6, p. 1–6, 2010.

KARIMI, H., NIKKHAJOEI, H.; IRAVANI, R. **Control of an electronically-coupled distributed resource unit subsequent to an islanding event**. IEEE Transactions Power Delivery, [S. l.], v. 23, n.1, p. 2631 – 2673, 2008.

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

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

LI, Y.; NEJABATKAK F. **Overview of control, integration and energy management of microgrids**. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, [S. l.], v. 2, n. 3, p. 212-222, 2014.

LIN B. R.; YANG B. R.; TSAI H. J. The operation of hybrid active filter for harmonic elimination. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS AND DRIVE SYSTEMS, 2001, Denpasar. Proceedings[...]*. Denpasar: IEEE, 2001, p. 72–76.

LOPES, B. M. *et al.* **Análise crítica de dispositivos estáticos de compensação série de baixa tensão com transformadores shunt**: Custos versus funcionalidade. Eletrônica de Potência, Rio de Janeiro, v. 11, p. 53–60, 2006.

LOPES, J. P.; MOREIRA, C.; RESENDE, F. Control strategies for microgrids black start and islanded operation. **International Journal of Distributed Energy Resources**. [S, l.], v. 1, n. 3, p. 241–261, 2005.

MAHMOUD M. S. *et al.* **Modeling and control of microgrid**: An overview. Journal of the Franklin Institute, [S.l.], v. 352, n. 1, p. 2822-2859, 2014.

MALIK, O. P. **Evolution of power systems into smarter networks**. Journal of Control, Automation and Electrical System, Calgary, v.24, p. 139-147, 2013.

NA, H. *et al.* A novel shunt hybrid power filter for suppressing harmonics in Industrial Electronics. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON, IEEE, 2006, [S.l.]. Proceedings[...]*. [S.l.]: IEEE, 2006, p. 1155-1160.

NATESAN, C. *et al.* **Survey on microgrid: power quality improvement techniques**. ISRN Renewable Energy, Chennai, v. 2014, n. 1, p. 1-7, 2014.

OLIVARES, D. E. *et al.* **Trends in Microgrid Control**, IEEE Transactions on Smart Grid, [S. l.], v. 5, n .4, p.1905-1919, 2014.

PARHIZI, S. *et al.* **State of the art in research on microgrids**: A review. IEEE Access, [S. l.], v. 3, p. 890–925, 2015.

PASSOS, R. S. D. **Estudo de caso do impacto da microgeração na tensão e nas perdas de um sistema de distribuição**. 2014. Trabalho de conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2014.

POPOV, M. *et al.* Dynamic model and control of a microgrid with passive loads. *In: CONFERENCE PROCEEDINGS ON POWER SYSTEMS TRANSIENTS, 2009, Kyoto. Proceedings [...]*. Kyoto: IPST, 2009. p. 605–618.

RASHID, M. H. **Power electronics handbook: devices, circuits and applications**. Academic press. 2. ed. [S.l.]: Elsevier, 2010.

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, 2012.

SINGH, B. *et al.* **Hybrid filters for power quality improvement**. IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, [S.l.], v. 152, n. 3, p. 365-378, 2005.

TABATABAEE, S. *et al.* Investigation of droop characteristics and x/r ratio on small-signal stability of autonomous microgrid. *In: Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC), 2011, Proceedings[...]* 2nd. [S.l.: s.n.], 2011. p. 223–228.