



UNIDADE DE ENSINO SUPERIOR DE FEIRA DE SANTANA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

EDILAIARA RODRIGUES BARBOSA
IGHOR FERREIRA JACINTO DE MELO
TAYONARA BOAVENTURA DO ROZÁRIO

FILTROS HÍBRIDOS APLICADOS NO TRATAMENTO DOS DISTÚRBIOS HARMÔNICOS

FEIRA DE SANTANA
Março de 2022

EDILAIARA RODRIGUES BARBOSA
IGHOR FERREIRA JACINTO DE MELO
TAYONARA BOAVENTURA DO ROZÁRIO

FILTROS HÍBRIDOS APLICADOS NO TRATAMENTO DOS DISTÚRBIOS HARMÔNICOS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica, da Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Me. Rafael da Silva Gusmão Cardoso.

FEIRA DE SANTANA

Março de 2022

EDILAIARA RODRIGUES BARBOSA
IGHOR FERREIRA JACINTO DE MELO
TAYONARA BOAVENTURA DO ROZÁRIO

FILTROS HÍBRIDOS APLICADOS NO TRATAMENTO DOS DISTÚRBIOS HARMÔNICOS

Feria de Santana, 04 de março de 2022

Banca Examinadora:

Prof. Me. Rafael da Silva Gusmão Cardoso
Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana
Orientador

Prof. Me. Márcio da Silva Pereira Bove
Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana
Avaliador

Prof. Me. Flávio Couvo Teixeira Maia
Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana
Avaliador

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, pelas nossas vidas e por Ele não ter nos desamparado mesmo em meio a dificuldades que é conseguir conciliar a graduação com trabalho, atividades extracurriculares, família e igreja.

Aos nossos pais e irmãos, esposo e filha, somos gratos por todo apoio e confiança em nós desde sempre e que nos acompanhou durante toda a graduação. Agradecemos por entenderem as nossas ausências e o nossos cansaços, por tentarem compreender nossos estresses, pelos cafés que chegavam como forma de cuidado e carinho em nossas madrugadas de estudo que muitas vezes pareciam intermináveis e por acreditarem em nós quando muitas vezes não conseguíamos mais fazer isso.

Para os amigos de curso e breve de profissão, agradecemos por todo o suporte e incentivo desde o primeiro dia de aula, por termos sido força e incentivo um para o outro para não desistirmos durante o caminho e conseguirmos chegar juntos até aqui.

Aos nossos familiares e amigos da vida, agradecemos por todas as vezes que se tornaram o nosso refúgio para um abraço, um sorriso e um momento de respiro em meio a corrida que é cursar Engenharia Elétrica. Obrigada pelo apoio, pela paciência e por cada incentivo para continuarmos na caminhada.

Agradecemos ao nosso orientador, Prof. Me. Rafael da Silva Gusmão Cardoso e ao Prof. Me. Reginaldo Barnabé Gonzalez Grimaldi pela paciência em nos atender a todo momento em que solicitamos e por todo conhecimento compartilhado conosco para a elaboração de nosso trabalho.

Agradecemos a todos que passaram pelos nossos caminhos durante toda a formação e que auxiliaram de maneira direta ou indireta para chegarmos até aqui. Por fim, agradecemos a nossa banca avaliadora, que também foram nossos professores, pelos conhecimentos transmitidos e por aceitarem nos prestigiar avaliando o nosso trabalho.

“Só se pode alcançar um grande êxito quando nos mantemos fiéis a nós mesmos.”
Friedrich Nietzsche

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Matriz energética brasileira 2019. Fonte: (EPE e MME, 2020)..	13
Figura 2 - Formato de ondas: a) onda senoidal; b) tensão distorcida; c) corrente distorcida. Fonte: (CARDOSO e MAGRI, 2020)..	14
Figura 3 - Filtro passivo paralelo. Fonte: (ANTUNES et al., 2014).	16
Figura 4 - Topologia ativa e sua compensação de sinal. Fonte: (MISHRA et al., 2017).	16
Figura 5 - Topologia híbrida com indutância ativa. Fonte: (BHATTACHARYA, CHENG E DIVAN, 1997).	17
Figura 6 - Filtro híbrido para condutância variável. Fonte: (LEE et al., 2013)..	18
Figura 7 - Topologia híbrida aplicada ao neutro. Fonte: (HERNANDEZ et al., 2013).....	19
Figura 8 - Topologia híbrida e diagrama de bloco de controle modular. Fonte: (GONZATTI et al., 2013)..	20
Figura 9 - Topologia e blocos de controle otimizados. Fonte: (MISHRA et al., 2017).....	20
Figura 10 - Filtro híbrido com parcelas passiva, ativa e SVC. Fonte: (WANG E LAM, 2017)..	21

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados proporcionados através do desempenho eficiente do sistema proposto pela topologia. Fonte: (ZOBAA, 2013)...	18
Tabela 2 – Redução das harmônicas por topologia híbrida aplicada. Fonte: Autores.	22

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRADEE	Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DHT	Distorção harmônica total
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FP	Fator de Potência
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> - Transistor Bipolar de Porta Isolada
LC	Indutor – Capacitor
MME	Ministério de Minas e Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
OEP	Otimização por Enxame de Partículas
OLC	Otimização do Lobo Cinza
PI	Controlador Proporcional Integrativo
PID	Proporcional, Integral, Derivativo
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PQSF	Programação Quadrática Sequencial Fiável
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> - Modulação por Largura de Pulso
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
SIN	Sistema Integrado Nacional
SVC	<i>Static VAR Compensator</i> - Compensador Estático de Tensão

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Alfa
β	Beta
δ	Delta
%	Porcentagem
Hz	Hertz
I(h)	Corrente Harmônica de Carga
If(h)	Corrente Harmônica do Filtro
Is(h)	Corrente Harmônica de Alimentação
GWh	Gigawatt-hora
kHz	Quilohertz
km	Quilômetro
kVA	Quilovate Ampere
kW	Quilowatts
V	Tensão
Zs(h)	Impedância Harmônica de Alimentação
Zf(h)	Impedância Harmônica do Filtro

SUMÁRIO

1.	Introdução.....	11
2.	Fundamentação Teórica.....	13
2.1.	<i>Sistema Elétrico</i>	13
2.2.	<i>Qualidade de Energia</i>	14
2.3.	<i>Distorções Harmônicas</i>	14
2.4.	<i>Normas</i>	15
2.5.	<i>Filtros</i>	15
2.5.1.	<i>Filtros Passivos</i>	15
2.5.2.	<i>Filtros Ativos</i>	16
2.5.3.	<i>Filtros Híbridos</i>	17
2.5.3.1.	<i>Topologia híbrida com indutância ativa para compensação das harmônicas</i>	17
2.5.3.2.	<i>Topologia híbrida com indutância variável em frequências harmônicas</i>	17
2.5.3.3.	<i>Topologia híbrida com obtenção de parâmetros dos filtros passivos e ativos através de computação fiável</i> ..	18
2.5.3.4.	<i>Topologia híbrida de terceira ordem aplicada apenas ao neutro para redução de custos</i>	18
2.5.3.5.	<i>Topologia híbrida com impedância inteligente modular</i>	19
2.5.3.6.	<i>Topologia híbrida com otimização dos métodos de controle através das estratégias OEP, OLC e utilização de ordens fracionadas</i>	20
2.5.3.7.	<i>Topologia híbrida com filtragem ativa híbrida associada a um compensador VAR estático</i>	21
3.	Métodos.....	21
4.	Resultados	21
5.	Conclusão.....	24
6.	Referências.....	24

FILTROS HÍBRIDOS APLICADOS NO TRATAMENTO DOS DISTÚRBIOS HARMÔNICOS

EDILAIARA RODRIGUES BARBOSA, IGHOR FERREIRA JACINTO DE MELO, TAYONARA
BOAVENTURA DO ROZÁRIO

Departamento de Engenharia Elétrica, Unidade de Ensino Superior de Feira de Santana,
Feira de Santana, Bahia, Brasil.

Abstract: *With the increase in the repercussion of the Electric Power Quality (QEE) concept and also in the search for its improvement due to the problems encountered in its process due to the various disturbances that occur in the electrical network, which thus cause failures in the generated energy, it is necessary to find ways to reduce or mitigate them. In this sense, this article seeks to understand the harmonic disturbances that occur in electricity from its generation, through transmission and distribution, reaching its consumption, bringing a means to mitigate them. Aiming to theoretically approach and evaluate the technical aspects of the use of passive and active filters, with the greatest focus on hybrid filters, since they manage to mix not only the functions of passive and active filters, but also their different ways of installation in a system, aggregating the form of application of its topologies, being thus classified as a resource of better cost and benefit for the treatment and improvement of the QEE having as best result the study carried through Bhattacharya, Cheng and Divan (1997) reaching reductions in 70% of the harmonics present and with better performance when compared to the others taken into account. Thus proving how hybrid filters can treat and assist in the mitigation of harmonic-related disorders.*

Key-words: *Electric Power Quality, harmonic distortions, hybrid filters, active filters, passive filters.*

Resumo: Com o aumento da repercussão do conceito da Qualidade de Energia Elétrica (QEE) e também na busca por sua melhoria devido aos problemas encontrados no seu processo em virtude dos diversos distúrbios que ocorrem na rede elétrica, que com isso, causam falhas na energia gerada, é necessário encontrar meios para redução ou mitigação deles. Nesse sentido, este artigo busca entender os distúrbios harmônicos ocorrentes na energia elétrica desde a sua geração, passando pela transmissão e distribuição chegando até o consumo da mesma, trazendo um meio para mitiga-los. Tendo por objetivo abordar e avaliar teoricamente os aspectos técnicos da utilização de filtros passivos e ativos, sendo o foco maior nos filtros híbridos, visto que eles conseguem mesclar não só as funções dos filtros passivos e ativos, mas também suas diferentes maneiras de instalação em um sistema, agregando a forma de aplicação de suas topologias, sendo assim classificados como um recurso de melhor custo e benefício para a tratativa e melhoria da QEE tendo como melhor resultado o estudo realizado Bhattacharya, Cheng e Divan (1997) alcançando reduções em 70% das harmônicas presentes e com melhor rendimento quando comparada as demais levadas em consideração. Assim comprovando como os filtros híbridos conseguem tratar e auxiliar na mitigação dos distúrbios relacionados as harmônicas.

Palavras-chave: Qualidade de Energia elétrica, distorções harmônicas, filtros híbridos, filtros ativos, filtros passivos.

1. Introdução

Um assunto muito repercutido no setor elétrico atualmente é o conceito de QEE, e alguns dos motivos para isso são os problemas que ocorrem devido aos diversos distúrbios que influenciam na energia gerada (OLESKOVICS ET AL., 2007). O conceito da QEE está diretamente relacionado ao funcionamento adequado e sem perdas nas cargas elétricas que estejam ligadas ao sistema elétrico e que uma rede com boa QEE admite tensão e corrente o mais próximo possível de uma curva senoidal pura, sem distorções e com uma

frequência de 60Hz sem oscilações e/ou perturbações. Essa definição consegue ser aplicada a qualquer sistema elétrico, podendo ser uma instalação elétrica de um consumidor, uma indústria ou uma rede elétrica completa com a geração, transmissão, distribuição e consumo (PADILLA, 2008).

Atualmente, existem alguns distúrbios que afetam a QEE, sendo eles os surtos, também chamados de variações de tensão de curta duração e afundamento do inglês *sag*, elevação momentânea de tensão do inglês *swell*, e longa duração, distorções da

forma de onda, que podem ser de cinco formas, sendo elas: harmônicas, inter-harmônicas, nível CC (Corrente Contínua), *notching* e ruídos. Dentre os distúrbios um dos que mais se destacam é a distorção harmônica, que é o ponto de tratativa deste trabalho, responsável por muitos dos problemas em redes elétricas (AGALAR E KAPLAN, 2018).

As harmônicas nada mais são do que distorções nas formas de ondas das correntes e tensões de circuitos com cargas não lineares (ANTUNES ET AL., 2014). Essas alterações geram efeitos indesejados nos dispositivos afetados, desde leve aumento nas temperaturas de funcionamento até a queima completa dos equipamentos (KUMAR E ZARE, 2015).

Os problemas na QEE referentes às harmônicas chamam a atenção dos cientistas da área desde o início do desenvolvimento das indústrias de potência, onde a eletricidade em corrente alternada (CA) começou a ser notória. Geradores com campos magnéticos variantes, efeitos de histerese em materiais magnéticos saturáveis e pulsações causadas por resistências variáveis de fornos a arcos elétricos são exemplos de algumas das primeiras causas de harmônicas em sistemas elétricos (SUTHERLAND E BRUSSO, 2015).

Em sistemas modernos, onde há grande presença de elementos de eletrônica de potência, existem alguns problemas relacionados a QEE como superaquecimentos de transformadores, explosões dos bancos capacitores para correção do fator de potência, altas correntes de neutros entre outros, são causados em sua grande parte pela presença de distorções harmônicas em suas redes elétricas (RIBEIRO, 2015).

Em função disso, há muitas e variadas estratégias para a contenção desses problemas, dentre eles um dos métodos

mais utilizados é a aplicação de filtros, variando o tipo de filtragem (ativo, passivo e híbrido) e a localização da instalação deles, que pode ser em série e/ou em paralelo no circuito e especificamente na carga geradora do distúrbio ou na rede como um geral (ANTUNES ET AL., 2014).

No caso dos filtros passivos, são utilizados capacitores e indutores para manipular a passagem de determinadas faixas de frequências pelos circuitos (ZOBAA E ALEEM, 2014). Já os filtros ativos, trabalham injetando valores de correntes e tensões diretamente no sistema, fazendo a compensação dos distúrbios (ANTUNES ET AL., 2014). E os filtros híbridos atuam com a conexão, em série ou paralelo, dos filtros passivo e ativo, conseguindo assim trazer resultados melhores do que eles aplicados separadamente (ANTUNES, 2009).

A utilização dos filtros híbridos, associando a utilização dos passivos e ativos, consegue contribuir diretamente na atenuação dos distúrbios e de melhor maneira não só pelo seu melhor desempenho, mas somado também o seu custo benefício. Isso sendo realizado através da remoção de um conjunto de harmônicas principais que atualmente são o entrave para se atingir a QEE (ANTUNES ET AL., 2014).

Dessa maneira, a relevância da tratativa do tema se dá diretamente pela alta frequência de distúrbios harmônicos existentes nas redes de energia elétrica, tornando necessário a verificação de meios para redução desse problema e para conseguir atingir a QEE (DANTAS, 2020). Devido a isso, e pensando em conter esses problemas, analisou-se e comparou-se estudos dos métodos levantados por teóricos especializados que utilizaram os filtros híbridos para conseguir a estabilização dessas anomalias.

Assim, pretende-se responder ao

seguinte problema de pesquisa: qual é o melhor método de aplicação do filtro híbrido para filtragem das distorções harmônicas em sistemas elétricos?

Diante disso, o trabalho é desenvolvido com o intuito de aprimorar os conhecimentos ligados às técnicas para atenuação das harmônicas no setor elétrico que afetam desde a geração até o consumo de energia elétrica com o estudo e aplicação do filtro híbrido.

O Objetivo principal baseou-se em uma análise das técnicas utilizadas na aplicação dos filtros híbridos para a mitigação das distorções harmônicas na rede elétrica e o impacto da redução de perdas de energia. Tendo como objetivos secundários:

- Compreender as distorções harmônicas e os problemas causados;
- Analisar o comportamento dos filtros híbridos;
- Comparar modo de atuação dos filtros na mitigação de harmônicas.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Sistema Elétrico

Desde o período da revolução industrial a sociedade tem dependido da eletricidade para a realização das mais variadas tarefas e para conseguir essa progressiva demanda, é necessário que haja também uma rede elétrica tão robusta quanto (CARVALHO, 2006). Atualmente no Brasil existe o Sistema Integrado Nacional (SIN), que supre todas as regiões do país em quase sua totalidade de maneira interconectada, oferecendo assim maior confiança e segurança (ONS, 2021). Esse sistema conta com uma matriz majoritariamente hidráulica, com participação de destaque das fontes de biomassa, gás natural, eólica, conforme apresentado na Figura 1. Com

essa matriz o Brasil apresentou no ano de 2019 um recorde de produção de energia elétrica com um total de 626.328 GWh (EPE E MME, 2020).

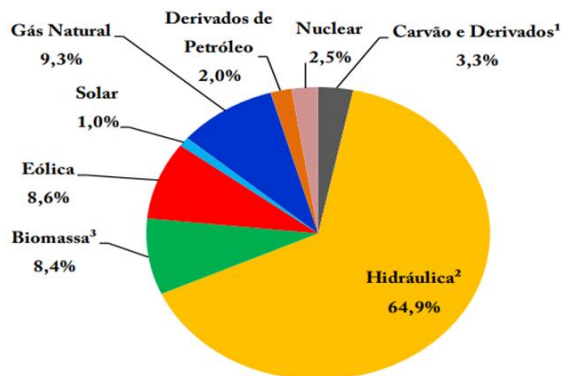


Figura 1 – Matriz energética brasileira 2019. Fonte: (EPE e MME, 2020).

Levando em conta esse nível de geração de energia e a extensão territorial do Brasil, é necessário que haja uma malha de linhas de transmissão equivalente para que a eletricidade chegue a todos. No final do ano de 2020 o Brasil contava com um total de 160.859,05 km construídos de linhas de transmissão espalhados por todo o país, sendo desses 6.159,34 km instalados apenas em 2020 (ANEEL, 2021). O uso de energia elétrica no Brasil apresentou constantemente um crescimento nas últimas 2 décadas e durante esse período a indústria representou de 35% a 47% e as residências 24% a 29% de todo esse consumo (EPE E MME, 2020).

Para que as unidades consumidoras tenham acesso à energia transportada pelas linhas de transmissão é necessário que hajam as linhas de distribuição. No Brasil essas linhas são administradas por empresas especializadas, onde aproximadamente 60% delas são de iniciativa privada e aproximadamente 40% são de iniciativa pública. A malha de distribuição brasileira é responsável por fornecer eletricidade em valores de média e baixa tensão a todos os clientes, desde residências até as indústrias, atendendo atualmente a quase 100 milhões de unidades consumidoras (ABRADEE, 2021).

Dado seu impacto na manutenção da vida contemporânea, a estabilidade e segurança das redes elétricas se tornam uma grande preocupação para os governos e empresas envolvidas na geração, transmissão e distribuição da energia elétrica. Entretanto, manter a confiabilidade e constância dos sistemas elétricos torna-se uma tarefa árdua devido à quantidade de variáveis que afetam a rede elétrica e que devem ser levadas em consideração. Para isso são estabelecidos parâmetros que devem ser seguidos para a garantia do fornecimento de energia elétrica e da sua devida qualidade (DECKMANN e POMILIO, 2017).

2.2. Qualidade de Energia

A qualidade da energia possui diversas definições que descrevem os mesmos fenômenos que podem afetar a forma da onda de tensão e corrente e também podem afetar a amplitude da energia. Para considerar que a energia fornecida possui qualidade, é ideal que a tensão tenha a forma de um senoide pura, sem alteração na frequência e amplitude, podendo ela sofrer desvios na rede inferiores em comparação aos indicadores previstos em norma, dessa maneira, não ocorrendo falha nos equipamentos e o mesmo consegue continuar o seu funcionamento sem interferência (ROCHA, 2016).

Para realizar uma análise da falta de qualidade da energia, deve ser observado quais são as causas do problema, como o desvio de frequência ou as distorções que podem ocorrer tanto na forma da onda de tensão como em corrente gerados através desvios superiores aos indicadores pré-estabelecidos por normas, ocasionando falhas no funcionamento dos equipamentos e até comprometendo o funcionamento do mesmo (PAULILLO, 2013).

Um dos aspectos importantes na qualidade da energia, é a eficiência energética que independente da definição

ou conceito atribuído a qualidade da energia elétrica, é um assunto que gera preocupação nas concessionárias de energia, bem como nos consumidores e é considerado um assunto técnico emergencial que encontrou respaldo internacional e com justificativas plausíveis, devido a quantidade progressiva de equipamentos eletrônicos e maquinário sensíveis aos distúrbios (PAULILLO, 2013).

O resultado da qualidade da energia não é somente de responsabilidade das concessionárias, mas é também dos consumidores que por muitas vezes acabam injetando harmônicas na rede elétrica como cargas não lineares, por exemplo computadores, conversores de frequência para acionamento de motores, entre outras. Essas cargas acabam gerando distorção na corrente elétrica, promovendo distorção na onda de tensão, podendo espalhar os problemas da qualidade por toda a instalação elétrica (CASTRO ET AL., 2010).

2.3. Distorções Harmônicas

As distorções harmônicas são geradas através de cargas não lineares que em vez de retirarem os sinais de maneira senoidal constante acabam que por fazendo de maneira súbita. Com isso, são gerados pulsos em formato de ondas distorcidas tanto na tensão como na corrente conforme demonstrado na Figura 2 e consequentemente obtendo correntes de harmônicas que passam por outras frações do sistema de energia elétrico (CARDOSO E MAGRI, 2020).

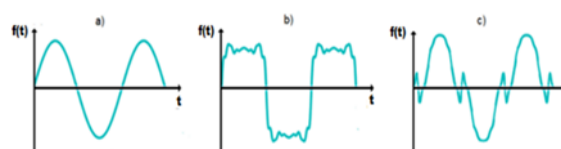


Figura 2 – Formato de ondas: a) onda senoidal; b) tensão distorcida; c) corrente distorcida. Fonte: (CARDOSO e MAGRI, 2020).

Para Ribeiro (2017) os harmônicos nada

mais são do que uma das categorias em distúrbios de energia elétrica que contêm formato de onda e transcorre em sistema permanente. Onde devido ao crescimento do uso de cargas não lineares decorrente das atualizações dos equipamentos eletroeletrônicos acabou se tornando cada vez mais efetivo no sistema elétrico.

A distorção harmônica pode ser definida como um problema que ocorre no sistema de proteção, ocasionando dos menores aos maiores erros e trazendo problemas financeiros para empresas, por exemplo, devido ao descontrole da tensão transmitida. Sendo assim, uma alteração no formato de onda da senoide que é instigado através de cargas conectadas a rede elétrica, como por exemplo, equipamentos de acionamentos estáticos e fontes chaveadas (BALADI, 2019).

É relevante observar que os harmônicos apresentam módulos e ângulos em frequências específicas, onde fazendo a adição escalar deles dentro de uma mesma frequência não conseguem caracterizar a harmônica dentro do circuito alimentador (STAROSTA, 2011).

Pode-se dizer que praticamente as distorções harmônicas possuem quatro tipos de perturbações que têm a possibilidade de acontecer tanto em uma tensão como também em correntes fornecidas, são elas: ligadas à amplitude da tensão, de frequência, desequilíbrio de tensão e/ou corrente em sistema trifásicos e alterações nas formas de onda (BALADI, 2019).

2.4. Normas

Os indicadores de qualidade da energia são definidos pelas agências reguladoras de energia. No Brasil, por exemplo, é a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), determinando se os indicadores de qualidade de energia estão dentro dos limites estabelecidos nas normas (ANEEL, 2012). Uma das preocupações das agências

reguladoras é a qualidade do produto, como a frequência, amplitude e forma de onda da tensão e corrente elétrica, distorções, e também com a qualidade do serviço como a quantidade de interrupções de energia e a sua duração (PRODIST, 2017).

Pensando em como proteger o sistema elétrico dos distúrbios ocorridos através das harmônicas, que influencia diretamente na QEE, os comitês responsáveis da normatização no ramo elétrico brasileiro, passaram a pesquisar sobre os efeitos ocorrentes devido a esse problema (KASSICK, 2016).

Através disso, a ANEEL, normatiza as distorções na tensão e realiza a tratativa através do módulo 8 do PRODIST, que trata sobre a Qualidade da Energia Elétrica (ANEEL, 2017). Nesse módulo, na seção 4.2, são tratadas e definidas algumas terminologias para o cálculo das distorções harmônicas.

2.5. Filtros

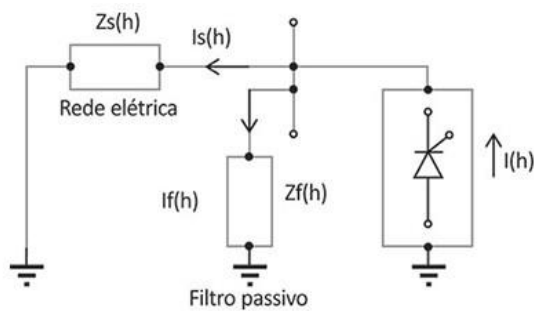
O aumento nas cargas não lineares na rede elétrica justifica a preocupação também crescente sobre a proliferação de harmônicas e suas consequências na qualidade da energia, visto que elas afetam equipamentos sensíveis, como eletrônicos, motores e instrumentos de telecom (LIMONGI ET AL., 2013; LEE ET AL., 2013).

Em função dessa preocupação, alguns métodos de mitigação das harmônicas foram desenvolvidos.

2.5.1. Filtros Passivos

O método mais antigo e mais utilizado é o da filtragem passiva, utilizando apenas indutores, capacitores e resistores. Esses filtros são subdivididos em quatro grupos principais: passa-falta, passa-baixa, passa-faixa e rejeita-faixa. Os filtros passa-alta permitem a passagem de altas frequências;

os filtros passa-baixa permitem a passagem de baixas frequências; os filtros passa-faixa permitem a passagem de determinadas porções de frequência e os filtros rejeita-faixa bloqueiam apenas uma porção específica de frequências. Esses filtros podem ser instalados em série ou em paralelo com a carga, funcionando em série como um caminho de impedância idealmente infinita para determinadas frequências e em paralelo como um caminho de impedância idealmente nula



para algumas frequências normalmente levando-as para o aterramento do sistema, como indicado na Figura 3 (ANTUNES, SAMPAIO & LEÃO, 2013).

Figura 3 – Filtro passivo paralelo. Fonte: (ANTUNES et al., 2014).

Sendo:

$Z_s(h)$ = Impedância Harmônica de Alimentação

$I_s(h)$ = Corrente Harmônica de Alimentação

$I_f(h)$ = Corrente Harmônica do Filtro

$Z_f(h)$ = Impedância Harmônica do Filtro

$I(h)$ = Corrente Harmônica de Carga

Os filtros passivos têm seus componentes dimensionados e configurados de modo a contornar frequências específicas das harmônicas, o que podemos chamar de sintonização do filtro. Porém as impedâncias criadas pelos filtros frequentemente acabam ressonando com a impedância da própria rede, o que pode reduzir a eficiência do filtro ou gerar danos ao sistema (BHATTACHARYA, CHENG E DIVAN, 1997; ZOBAA, 2013; ANTUNES, PIRES E SILVA, 2019).

ANTUNES, PIRES E SILVA, 2019).

Para evitar os problemas de ressonância com a rede, os filtros passivos costumam ser sintonizados levemente fora da frequência harmônica de ordem desejada, por exemplo, se deseja mitigar a 5ª frequência harmônica, o filtro vai ser sintonizado na 4.7ª frequência (BHATTACHARYA, CHENG E DIVAN, 1997; HERNANDEZ ET AL., 2013).

2.5.2. Filtros Ativos

Como uma solução para os problemas de imprecisão, ressonância e falta de dinâmica, foram desenvolvidos os filtros ativos (ANTUNES E SILVA, 2019; GONZATTI ET AL., 2015). Eles funcionam como geradores de tensão e/ou corrente que injetam sinais iguais em amplitude e opostos em sinal em relação aos causadores de distúrbios, mitigando-os dessa forma, conforme exemplificado pela Figura 4 (MISHRA et al., 2017).

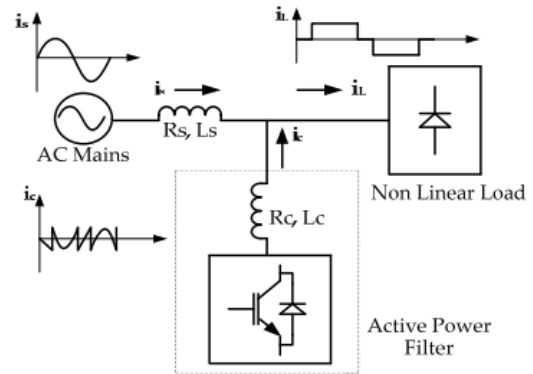


Figura 4 – Topologia ativa e sua compensação de sinal Fonte: (MISHRA et al., 2017).

Entretanto, esses filtros apresentam um problema sério em relação ao seu custo de desenvolvimento e aquisição, consumo ativo de potência e também o uso frequente de transformadores de acoplamento para altas potências (ZOBAA, 2013; ANTUNES E SILVA, 2019).

2.5.3. Filtros Híbridos

Para contornar todos os problemas anteriores, estão sendo utilizadas topologias híbridas, que associam a eficiência e baixo custo dos filtros passivos com a dinâmica dos filtros ativos (BHATTACHARYA, CHENG E DIVAN, 1997; ANTUNES E SILVA, 2019). Nesse trabalho serão abordadas estratégias que têm como objetivo, além da mitigação de frequências harmônicas específicas, múltiplas e/ou variáveis, a compensação de ressonâncias harmônicas, impedância dinâmica e correção de distorções nas tensões da rede.

2.5.3.1 Topologia híbrida com indutância ativa para compensação das harmônicas

Bhattacharya, Cheng e Divan (1997) propuseram um método híbrido focado na melhora de performance de filtros passivos através da implementação de uma parcela ativa para a geração de indutâncias ativas positivas e negativas para a compensação das correntes de frequências harmônicas de quinta e sétima ordens. Para isso, foi utilizado um quadro de referência síncrona para o monitoramento das correntes de fase nos ramos de quinta e sétima ordens do filtro. Com base nos sinais de correntes harmônicas de quinta e sétima ordens da carga e as correntes de referência dos ramos do filtro é gerado um valor de erro no controlador proporcional integrativo (PI) que faz com que os inversores gerem tensões que permitem a formação das indutâncias positivas e negativas para a sintonização precisa do filtro nas frequências harmônicas de quinta e sétima ordens. Como o valor de indutância ativa é gerado com base nas correntes locais de carga e filtragem, ele varia dinamicamente sob variações de carga e distorções na tensão de alimentação. Ao ser exposto a harmônicas de tensão da rede ou harmônicas ambientes de carga, os filtros podem ser sobrecarregados. Para evitar isso, é utilizado um bloco limitador de

corrente, que controla a corrente máxima processada pelo filtro. O processo descrito é exemplificado pela Figura 5. Dessa forma, as harmônicas de corrente causadas por essas distorções são tratadas como distúrbios e são rejeitadas já na fonte. Essa topologia apresentou resultados de simulação satisfatórios, porém, conta com a desvantagem de apresentar perda de eficiência em cenários com distorções de tensão de alimentação e a necessidade de transformadores de acoplamento para a conexão dos ramos de filtragem ativa.

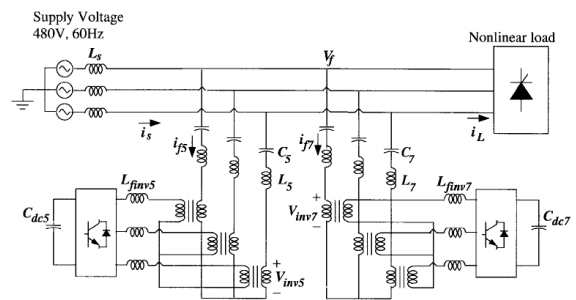


Figura 5 – Topologia híbrida com indutância ativa. Fonte: (BHATTACHARYA, CHENG E DIVAN, 1997).

2.5.3.2 Topologia híbrida com indutância variável em frequências harmônicas

Baseado no trabalho de Bhattacharya dentre outros, Lee et al. (2013) sugeriram uma topologia de filtragem híbrida planejada para funcionar como uma condutância variável em frequências harmônicas, demonstrado pela Figura 6, constituída por um filtro passivo de sétima ordem harmônica e para compensação de reativos e um inversor fonte de tensão trifásico em série. O filtro utiliza loops travados para o monitoramento das correntes e tensões do sistema. O controle do valor de ganho da condutância é dado pelo erro entre a distorção harmônica total (DHT) de tensão medida e a DHT aceitável de acordo com os padrões IEEE 519. Esse erro alimenta um controlador proporcional integral (PI) que regula o ganho do filtro, sendo a porção proporcional responsável

pelo controle no estado transitório e a porção integrativa proporcional pelo controle na fase transitória. A natureza capacitiva de filtros passa-baixa ou supressores de interferência pode causar ressonâncias harmônicas nos sistemas em que são instalados, deslocando as frequências ressonantes com a variação do seu valor de reatância capacitiva e criando um segundo ponto de ressonância de alta frequência. Essas distorções também são mitigadas pela topologia proposta.

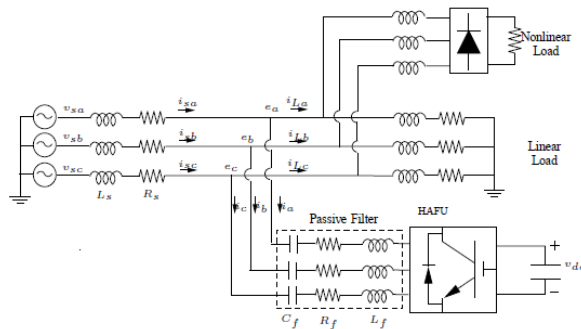


Figura 6 – Filtro híbrido para condutância variável.
Fonte: (LEE et al., 2013).

2.5.3.3 Topologia híbrida com obtenção de parâmetros dos filtros passivos e ativos através de computação fiável

Levando em consideração a complexidade da concepção dos valores iniciais necessários para o desenvolvimento dos filtros híbridos (indutância e capacitância para a parcela passiva e valores de ganho para a parcela ativa), [Zobaa \(2013\)](#) propôs uma estratégia de Programação Quadrática Sequencial Fiável (PQSF) focada na obtenção desses valores para aplicação de um filtro híbrido voltado para a compensação de harmônicas de tensão e correção do fator de potência da carga. Trata-se de um filtro tipo série composto por um filtro passivo LC (Indutor – Capacitor) em série com um filtro ativo sem transformador de acoplamento. O filtro ativo opera com um barramento CC de baixa tensão, visto que a componente fundamental da rede é sustentada pelo

capacitor do filtro, o que reduz o consumo ativo de potência do filtro e os ripples de tensão. A porção ativa do filtro se dá através de um IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor* - Transistor Bipolar de Porta Isolada) funcionando como fonte de tensão, injetando sinais de onda com a mesma amplitude das correntes harmônicas e oposta em sinal, gerando um “resistor harmônico”. Caso a DHT de tensão alcance valores iguais ou menores que 5% e o fator de potência esteja entre 90% e 95%, o filtro começará a compensar também as correntes harmônicas totais. O ponto mais interessante do funcionamento do PQSF é a divisão do problema de distorções em vários subproblemas mais simples e rápidos de serem resolvidos, reduzindo o tempo de processamento necessário para encontrar os valores de solução finais, mesmo tendo dados iniciais não confiáveis. Na Tabela 1 são mostrados três casos os parâmetros do filtro em reatâncias e ganho e dados de fator de potência (FP), como das correntes e tensões após a ativação da topologia.

Tabela 1 – Resultados proporcionados através do desempenho eficiente do sistema proposto pela topologia.

Parâmetros e casos	Caso 1	Caso 2	Caso 3
$X_c (\Omega)$	2.7279	2.7061	2.6171
$X_L (m\Omega)$	122.14	97.93	$0.99 \cdot 10^{-6}$
$G (\Omega)$	11.00	12.00	8.07
PF (%)	95.00	95.00	95.00
Dpf (%)	95.00	95.03	95.15
$I_s (A)$	753.84	753.54	752.90
$V_L (mV)$	2430.08	2430.80	2431.59

Fonte: (ZOBAA, 2013).

2.5.3.4 Topologia híbrida de terceira ordem aplicada apenas ao neutro para redução de custos

[Hernandez et al.\(2013\)](#) propuseram uma solução híbrida para compensação de harmônicas de terceira ordem em sistemas de distribuição em média tensão. A topologia de filtragem proposta tem como principal objetivo oferecer uma solução de baixo custo, visto que essa é uma das principais características necessárias para a

adesão de uma concessionária, assim como confiança e impacto na operação do sistema. As correntes de terceira harmônicas, que são as dominantes nos alimentadores estudados através de dados fornecidos por concessionárias, fluem majoritariamente pelo neutro da rede. Considerando isso e o objetivo de alcançar o melhor cenário na redução de custos, esse filtro foi pensado como parte de uma estratégia distribuída de filtragem, concentrado na mitigação de harmônicas de terceira ordem, onde utiliza apenas uma porção ativa instalada no neutro e utiliza o banco capacitivo de compensação de reativos já existente como o capacitor do filtro passivo. A porção ativa atua de modo a corrigir a má sintonização intencional da filtragem passiva e mitigar distorções de tensão de fundo, bloqueando corrente de terceira harmônica vindas da rede. O controle de compensação do filtro trabalha de maneira dinâmica, respeitando limites estabelecidos a fim de evitar sobrecargas no filtro capacitivo previamente instalado, conforme exemplificado na Figura 7.

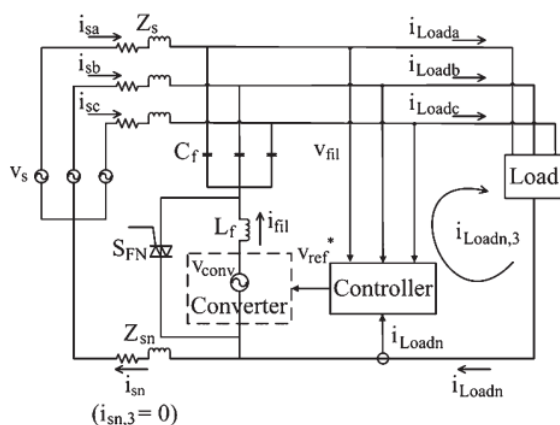


Figura 7 - Topologia híbrida aplicada ao neutro. Fonte: (HERNANDEZ et al., 2013).

2.5.3.5 Topologia híbrida com impedância inteligente modular

Gonzatti et al. (2015) propuseram uma nova estratégia de filtragem baseada no conceito da impedância inteligente, que

oferece impedância idealmente nulas nas frequências harmônicas desejadas e impedância idealmente infinita para as tensões harmônicas de alimentação, bloqueando o crescimento de correntes harmônicas advindas dessas distorções. O uso de impedâncias inteligentes já havia sido proposto anteriormente, no entanto, com o intuito de alcançar um fator de sintonização ideal e um fator de qualidade ideal para os filtros passivos. Porém, os autores trazem um método diferente com um filtro que se comporta como uma impedância totalmente diferente em cada ramo do seu circuito. A topologia proposta é composta apenas por um conversor de potência, um banco capacitivo e um transformador de acoplamento, ignorando o uso de indutores físicos e a necessidade de sintonização de filtragem passiva. Esse novo método é capaz de fazer a filtragem harmônica de maneira ideal, eliminando apenas frequências harmônicas desejadas, enquanto atenua ressonâncias entre alimentação e carga, compensar reativos de potência e dividir de maneira equilibrada a compensação entre parcelas ativas e passivas do filtro. Essa topologia, apresentada pela Figura 8, conta com um bloco de controle harmônico com um controlador proporcional + ressonante para compensação de harmônicas de até 21ª ordem através da manipulação da tensão entregue pelo filtro ativo, um bloco de controle de tensão CC para regulação da tensão nos conversores de potência e um bloco de regulação de fator de potência que controla a potência reativa total entregue pelo banco de capacitores. A estratégia de controle proporcional + ressonante extrai referências senoidais direto do quadro de sinais de correntes ABC naturais, eliminando a necessidade de transformações de referência e sincronização de *loops* de fase travada. Isso reduz significativamente o trabalho computacional geral, aumentando o número de componentes harmônicas compensadas em trabalhos anteriores de 3 para 10, com os mesmos componentes de processamento.

No processo de compensação harmônica o filtro gera a soma de duas tensões, sendo uma igual à tensão harmônica de fonte, para evitar que a corrente harmônica gerada pela mesma flua pelo filtro, e uma tensão dada pelo produto da impedância passiva do filtro pela corrente harmônica de carga, gerando um caminho de zero impedância para a corrente harmônica de carga. Por fim, para gerar a compensação de reativos, são extraídas as componentes fundamentais das tensões e correntes de alimentação que são utilizadas para encontrar a diferença de fase e alterar o sinal de tensão aplicada pelo filtro ativo no banco capacitivo, aumentando ou diminuindo a potência reativa gerada pelo mesmo.

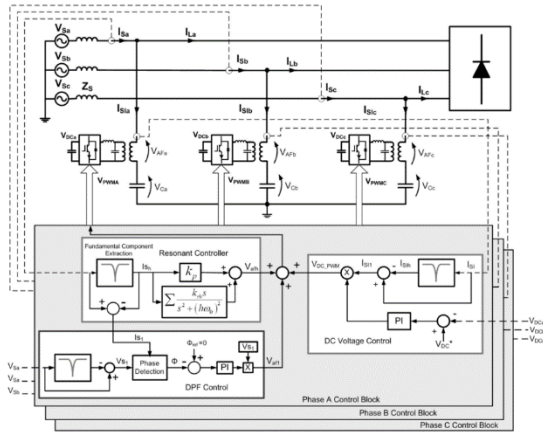


Figura 8 – Topologia híbrida e diagrama de bloco de controle modular. Fonte: (GONZATTI et al., 2013).

2.5.3.6 Topologia híbrida com otimização dos métodos de controle através das estratégias OEP, OLC e utilização de ordens fracionadas

Mishra et al. (2017) sugeriram um novo método de controle para um filtro híbrido ativo paralelo baseada em PID (Proporcional, Integral, Derivativo) de ordem fracionada associada às teorias de Otimização por Enxame de Partículas (OEP) e Otimização do Lobo Cinza (OLC). O OEP se apresenta como uma solução mais básica e efetiva, enquanto o OLC apresenta resultados balanceados de exploração e pesquisa de dados. Também é utilizado um método de controle PWM (*Pulse Width*

Modulation - Modulação por Largura de Pulso) por corrente de histerese. O filtro é composto por um conversor PWM, fonte de tensão e um filtro passivo LC. Esse filtro, demonstrado pela Figura 9, tem o objetivo de alcançar um valor unitário de fator de potência e reduzir a corrente harmônica. O método de OEP consiste em um grupo de partículas buscando a global optima, que é a melhor solução para o problema. Cada partícula compara seus melhores resultados de iterações com o melhor resultado global, o melhor resultado encontrado até então pelo grupo de partículas. Embora seja um método mais simples, robusto e de fácil implementação, há a desvantagem de acabar por vezes convergindo todos os resultados para o mesmo melhor resultado global ou cada partícula convergindo apenas para seu melhor resultado pessoal, dependendo da parametrização das variáveis. O método de OLC é similar ao OEP, porém, seguem os 3 melhores valores de soluções globais α , β e δ e utilizando valores aleatórios que decrescem ao longo das iterações, balanceando a exploração e pesquisa (exploração pode ser definida como uma busca aleatória e pesquisa como uma busca direcionada a uma área específica) por resultados durante a busca, evitando se prender no melhor resultado pessoal ou melhor resultado local.

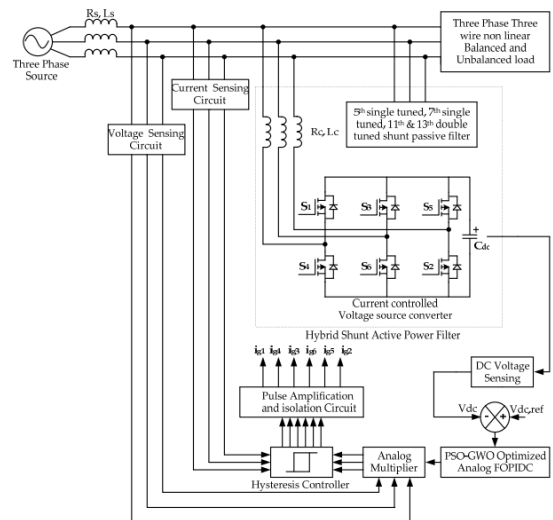


Figura 9 – Topologia e blocos de controle otimizados. Fonte: (MISHRA et al., 2017).

2.5.3.7 Topologia híbrida com filtragem ativa híbrida associada a um compensador VAR estático

Wang e Lam (2017) propuseram uma topologia de compensação de reativos de potência e harmônicas em sistemas de média tensão sob altas cargas composto por um filtro ativo híbrido em paralelo com um compensador VAR estático (*Static VAR Compensator – SVC*). Essa topologia, apresentada na Figura 10, foi desenvolvida com o objetivo de melhorar a compensação de harmônicas e tempo de resposta do SVC (Compensador Estático de Tensão) enquanto reduz suas interações ressonantes. Quando comparadas com outras topologias, o filtro híbrido associado ao SVC apresenta menores taxas de correntes e tensões ativas sob altas cargas mesmo em sistema de média tensão, o que reflete em uma redução considerável no custo geral do equipamento, visto que boa parte desse valor está associada às suas componentes ativas. A compensação de reativos é feita de maneira fixada pelo filtro LC passivo em série com o filtro ativo e de maneira dinâmica pela impedância do SVC, que é controlado por tiristores. Então, o filtro ativo entra em ação para compensar qualquer desvio no fator de potência da carga remanescente e realizar a compensação das correntes harmônicas que não foram contempladas pelo filtro passivo sintonizado na frequência harmônica de ordens dominantes, reduzindo as taxas de corrente e tensão requeridas pelo filtro ativo. O bloco de controle do filtro compara as potências ativas e reativas do filtro e da carga para alimentar a comutação do SVC e utiliza os quadros de referência ABC com transformações $\alpha - \beta$ e teoria p-q para comparar a corrente de referência do filtro com a corrente real do filtro para gerar os sinais de controle PWM por corrente de histerese do inversor da parte ativa do filtro.

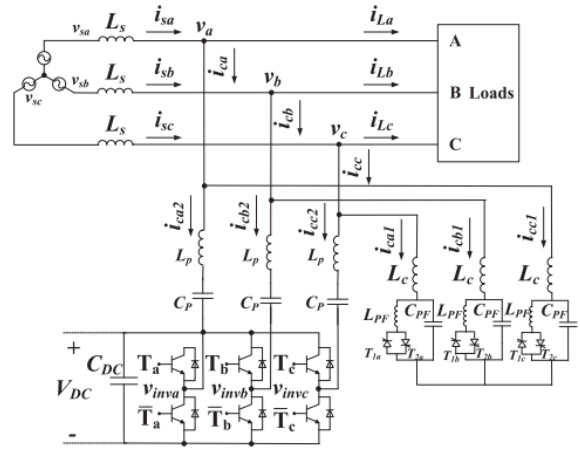


Figura 10 – Filtro híbrido com parcelas passiva, ativa e SVC. Fonte: (WANG E LAM, 2017).

3. Métodos

Para elaboração deste artigo, o método aplicado é caracterizado como exploratório, de natureza qualitativa do tipo revisão bibliográfica sistemática, conforme o descrito por Gil (2017), onde ele afirma que: “a revisão bibliográfica sistemática ocupa-se da investigação de eventos qualitativos, aqueles representados por dados qualitativos com referenciais teóricos menos restritivos e com maior oportunidade de manifestação para a subjetividade do pesquisador”.

Foram levantadas então informações e dados sobre o sistema elétrico, qualidade de energia, distorções harmônicas, normas e filtros, tendo um foco maior nos filtros híbridos e suas topologias elencando seus pontos fortes, meios de aplicação e comportamento dos sistemas.

4. Resultados

Com base nas análises dos trabalhos estudados elaborou-se a Tabela 2, onde são apresentados os filtros híbrido e suas respectivas reduções das harmônicas mediante as considerações encontradas para cada tipo de aplicação das topologias.

Tabela 2 – Redução de harmônicas por topologia híbrida aplicada.

Nº	AUTOR (ES) / (ANO)	TOPOLOGIA HÍBRIDA	REDUÇÃO DE HARMÔNICAS (MELHOR RESULTADO)										TOTAL
			3ª	5ª	7ª	9ª	11ª	13ª	15ª	17ª	19ª	21ª	
1	Bhattacharya, Cheng e Divan (1997)	Com Indutância Ativa para compensação das harmônicas		37,5 % > 3,53%	19,3% > 0,06%		16,6% > 2,07%	14,4% > 1,81%		8,7% > 1,12%	5,4% > 0,48%		43,4% > 4,68%
2	Lee et al. (2013)	Com Indutância Variável em frequências harmônicas.		16% > 3,3%	2,1% > 2,1%		0,6% > 0,4%	0,3% > 0,4%					17% > 4,3%
3	Zobaa (2013)	Com Obtenção de parâmetros dos filtros passivos e ativos através		17% > 2,8%	4,6% > 2,7%		2,4% > 2%	1,4% > 0,8%					38,62% > 0,54%
4	Hernandez et al. (2013)	De terceira ordem aplicada apenas ao neutro para redução de	68% > 6%										
5	Gonzatti et al. (2015)	Com Impedância inteligente modular											27,7% > 3,2%
6	Mishra et al. (2017)	Com Otimização dos métodos de controle através das estratégias de OPE, OLC e utilização de ordens fracionadas.											25,47% > 1,64%
7	Wang e Lam (2017)	Com Filtragem ativa híbrida associada a um compensador VAR											28,8% > 4,8%

Fonte: Autores.

Bhattacharya, Cheng e Divan (1997) propuseram 3 modelos de simulação, sendo o primeiro desconsiderando qualquer distorção na tensão de alimentação, no segundo caso considerando essa distorção e no terceiro utilizando o capacitor do banco de reativos como parte do filtro passivo, sendo esse último dividido em 2 cenários onde um não utiliza o indutor do inversor na sintonização do filtro passivo e no outro sim. No primeiro caso as harmônicas de 5ª e 7ª ordem reduziram, respectivamente, de 37,5% e 19,3% para 3,53% e 0,06%, alcançando uma redução na DHT de 43,4% para 4,68%. Lembrando que esse é o caso de alimentação mais ideal. Considerando a distorção na tensão de alimentação no segundo cenário as harmônicas de 5ª e 7ª ordem e DHT reduziram respectivamente para 15,8%, 4,74% e 16,65%. Ao implementar o capacitor do banco capacitivo como parte do filtro passivo, essas harmônicas reduziram para 0,85%, 0,27% e 1,58%, com 2,04% de distorção na

tensão de alimentação. No último cenário, onde o indutor do inversor é utilizado na sintonização do filtro, a DHT é reduzida para 1,76% com 3,0% de distorção nas correntes de tensão. Vale ressaltar que o penúltimo cenário faz um uso de 3,5% da potência não linear compensada e o último cenário faz uso de 3,2% dessa potência.

Lee et al. (2013) propuseram um protótipo para simulação de dois cenários com cargas não lineares de 1,8kW e 2,8kW. Em ambos casos o filtro se tornou uma fonte de ressonâncias harmônicas, principalmente na frequência de sétima ordem, quando a parcela ativa está desativada, visto que a sintonização do filtro está muito próxima dessa frequência harmônica. Quando a parcela ativa é ligada a distorção harmônica é significativamente reduzida, como pode ser visto nas distorções de tensão totais e de quinta ordem, caindo de 2,9% para 2,0% e 2,7% para 1,6%, respectivamente, no cenário de 1,8 kW e de 4,6% para 2,0% e 4,5% para 1,6%. A queda nas distorções

totais da corrente de alimentação é ainda mais expressiva, caindo 8,5% para 4,8% no cenário de 1,8kW e de 17,0% para 4,3%. No primeiro cenário a parcela ativa consumiu 4,6% de potência aparente e 16,7% no segundo cenário, valores esses inferiores aos utilizados por filtros puramente ativos.

Zobaa (2013) simulou 3 cenários de plantas industriais com poluições harmônicas em níveis acima dos encontrados em casos reais e estudos prévios com harmônicas totais de tensão ultrapassando 17% e harmônicas totais de corrente superando a faixa de 38% e também com valores baixíssimos de fator de potência, inferiores a 0,66. Após a implementação do filtro proposto com os dados encontrados através do método de sequenciação quadrática, essas harmônicas de tensão e corrente caíram abaixo de 1% e o fator de potência foi estabilizado em 0,95.

Hernandez et al (2013) propôs uma configuração experimental híbrida monofásica de 350V, que era constituído por duas cargas sendo uma delas usada para criar uma distorção de tensão de fundo. Foi utilizado um capacitor e um indutor, os quais foram ajustados para a terceira frequência harmônica, fornecendo um caminho de baixa impedância para tipo específico de harmônica. Para esse experimento foi implementado o conversor com um inversor ponte H, salientando que não é necessária nenhuma fonte de energia externa afim de manter a tensão CC do capacitor. O conversor foi operado em uma frequência de comutação de 5kHz, que além de sintetizar uma terceira tensão harmônica afim de fornecer compensação, gera também um componente fundamental fornecendo a energia necessária para fornecer essa compensação afim de compensar as perdas do sistema. Para as configurações desse experimento, a componente harmônica de terceira ordem é reduzida em 70% o seu componente fundamental a valores insignificantes. A terceira harmônica de fundo a distorção de

tensão era de cerca de 1,6% para esta configuração experimental, comprovando a característica de direcionalidade do filtro proposto.

Gonzatti et al (2015) utilizaram na configuração experimental o funcionamento da impedância inteligente em quatro situações diferentes sendo elas: tensão da fonte bloqueio harmônico, compensação do harmônico, carga harmônica de compensação e todas as três condições juntas, conseguindo assim o controle adequado da impedância inteligente permitindo a entrega de cerca de 45% mais potência reativa do que seu nominal e avaliando a presença a ddistorção harmônica típica para um retificador monofásico com indutor de suavização, uma distorção harmônica total (THD) reduzindo 27,7% e sendo compensando do 3° ao 21° harmônico, onde após a compensação, a fonte atual da THD cai para 3,2%.

Mishra et al. (2017) propuseram uma simulação e um protótipo para testar a capacidade do filtro. No cenário da simulação foi elaborado um sistema distorcido e desbalanceado implementando inicialmente apenas o filtro passivo, que reduziu a DHT de corrente de 25,47% para 15,27%, então foi implementada a parcela ativa do filtro com o PID otimizado que reduziu essa DHT para 3,52% e, por fim, o sistema com o PID fracionado que reduziu a DHT para apenas 1,64%. Já com o protótipo e utilizando os métodos de otimização + o PID de ordem fracionada, a DHT de corrente foi reduzida de 29,2% para 5,7% com um aumento no fator de potência de 0,95 para 0,99.

Wang e Lam (2017) propuseram um protótipo experimental de 110V até 5kVA com o SVC com os parâmetros propostos e o projeto de controle de métodos criados em laboratório. Tanto para a simulação quanto para o experimento o mínimo de frequência de comutação foi cerca de 0,7kHz. A pior

fase THDisx foi compensada em 8,4% do original 27,9% para compensação de cargas harmônicas leves. Após o SVC, o fator de potência da pior fase foi compensado de 0,96 a 0,99 para uma compensação de cargas harmônicas leves. A potência reativa da fonte fundamental foi reduzida de 650 var para aproximadamente 10 var. Além disso, o fator de potência foi otimizado de 0,77 para 0,99. Além disso, o THDisx de pior fase foi compensado para 3,5% dos 5,9% originais.

5. Conclusão

Com o decorrer da elaboração deste artigo, fica evidente que os objetivos conseguiram ser alcançados através da abordagem e compreensão das distorções harmônicas e os problemas causados por elas no sistema elétrico, assim encontrando meios para a redução com a utilização dos filtros, sendo eles os passivos, ativos e junção dos dois gerando os híbridos, que tiveram seu comportamento, eficiência e técnicas avaliados pelos autores, finalizando com a comparação do modo de atuação de cada topologia híbrida na mitigação de harmônicas.

Trazendo a função fundamental de um filtro híbrido que consiste na redução da amplitude de uma ou mais correntes harmônicas e, por consequência, das distorções harmônicas na tensão através da geração de um caminho de baixa impedância para as frequências desejadas, somado com a necessidade de filtragem harmônica em um sistema elétrico e que, normalmente, as instalações que apresentam problemas de perturbação harmônica, possuem um baixo fator de potência necessitando também de compensação reativa para evitar o pagamento de “multas” para a concessionária.

Por meio dos resultados apontados nos artigos estudados foi possível perceber que a topologia que apresenta um melhor

resultado é a proposta por Bhattacharya, Cheng e Divan em 1997, onde com a utilização da indutância ativa além de conseguir reduções em 70% das harmônicas presentes em seu total, consegue também chegar ao melhor rendimento quando comparada as demais que foram sugeridas nos anos posteriores.

Para os autores caso se tornasse possível o aperfeiçoamento dos trabalhos expostos nesse artigo seria aprofundado na topologia da otimização dos métodos de controle através das estratégias OEP, OLC e utilização de ordens fracionadas para obter os valores de parâmetro dos filtros, devido a sua execução necessitar de maneira conjunta da aplicação de dois métodos de melhoria e da pesquisa de dados computacionais associado a um controle PID convencional + PID de ordem fracionada. Dessa forma, conseguindo tratar as distorções harmônicas por caminhos distintos mais de maneira integrada.

Vale salientar também que, com os dados levantados para a elaboração deste artigo é evidenciado a quão impactante e necessária é a instalação dos filtros híbridos na redução das distorções harmônicas, além dos outros pontos abordados pontualmente, como balanceamento de tensões e correção do fator de potência para assim obter-se um padrão de QEE.

6. Referências

ABRADEE - Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica. **A DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA**, 2021. Disponível em: <<https://www.abradee.org.br/setor-de-distribuicao/a-distribuicao-de-energia/>>. Acesso em: 02 maio 2021.

AGALAR, Sener; KAPLAN, Yusuf Alper. *Power quality improvement using STS and DVR in wind energy system*. *Renewable Energy*, v. 118, p. 1031-1040, 2018.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **BRASIL termina 2020 com mais de 6 mil km novos em linhas de transmissão**, 2021. Disponível

em: <https://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/brasil-termina-2020-com-mais-de-6-mil-km-novos-em-linhas-de-transmissao-de-energia/656877?inheritRedirect=false>. Acesso em: 02 maio 2021.

ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – **PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**, Rev. 10, <http://www.aneel.gov.br/modulo-8>, 2017.

ANEEL. **Resolução Normativa Nº 493, de 5 de junho de 2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL**, 2012.

ANTUNES, Fernando et al. **Harmônicos em Sistemas Elétricos**. Elsevier Brasil, 2014.

ANTUNES, Hélio MA; PIRES, Igor A.; SILVA, Sidelmo M. *Evaluation of series and parallel hybrid filters applied to hot strip mills with cycloconverters*. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 55, n. 6, p. 6643-6651, 2019.

BHATTACHARYA, Subhashish; CHENG, Po-Tai; DIVAN, Deepak M. *Hybrid solutions for improving passive filter performance in high power applications*. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 33, n. 3, p. 732-747, 1997.

BALADI, Carolina. **O que é Distorção Harmônica, quais seus riscos e como evitá-la**. Blog 4Partner, 2019. Disponível em: <<https://blog.4partner.com.br/distorcao-harmonica-seus-riscos-como-evita/>>. Acesso em: 1 maio 2021.

CARDOSO, João Vitor Neto; MAGRI, Luiz Paulo. **Mitigação de distorções harmônicas na rede elétrica, utilizando filtros harmônicos passivos**. Caderno de Estudos da Engenharia Elétrica, v. 2, n. 2, 2020.

CARVALHO, T. C. D. S. D. **Qualidade da energia**. 1ª. ed. Londrina - PR: Educacional S.A, v. I, 2015.

CASTRO, Nivalde José et al. **Qualidade do fornecimento de energia elétrica: Aspectos regulatórios e perspectivas**. TDSE nº 76. Grupo de Estudos do Setor Elétrico UFRJ, 2017. Disponível em: <http://gesel.ie.ufrj.br/app/webroot/files/publications/47_ACD_Prova_Gesel_TDSE_76.pdf>. Acesso em: 23 março 2021.

DANTAS, Isabela Franco. **Estudo de correção das distorções harmônicas no lado de baixa tensão da**

subestação do IFSC Campus Florianópolis com filtros passivos. 2020.

DECKMANN, Sigmar Maurer; POMILIO, José Antenor. **Avaliação da qualidade da energia elétrica**. available in <http://www.dsce.fee.unicamp.br/antenor/pdf/qualidade/b5.pdf>, 2017.

EPE e MME, Empresa de Pesquisa Energética e Ministério de Minas e Energia. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL**. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf>. Acesso em: 2 maio 2021.

GIL, Antônio Carlos. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**, 6ª edição. Grupo GEN, 2017. 9788597012934. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788597012934/>>. Acesso em: 23 março 2021.

GONZATTI, Robson B. et al. *Smart impedance: A new way to look at hybrid filters*. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 7, n. 2, p. 837-846, 2015.

HERNANDEZ, Jorge E. et al. *A practical directional third harmonic hybrid active filter for medium-voltage utility applications*. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 49, n. 6, p. 2674-2683, 2013.

KASSICK, E. V. **Harmônicas em sistemas elétricos de baixa tensão**. 2016. 134 f. Apostila – Faculdade de Engenharia Elétrica, Instituto Federal de Educação, 2016.

KUMAR, Dinesh; ZARE, Firuz. *Harmonic analysis of grid connected power electronic systems in low voltage distribution networks*. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, v. 4, n. 1, p. 70-79, 2015.

LEE, Tzung-Lin et al. *Hybrid active filter with variable conductance for harmonic resonance suppression in industrial power systems*. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 62, n. 2, p. 746-756, 2014.

MISHRA, Alok Kumar et al. *PSO-GWO optimized fractional order PID based hybrid shunt active power filter for power quality improvements*. *IEEE Access*, v. 8, p. 74497-74512, 2017.

OLESKOVICZ, Mário et al. **Estudo comparativo de ferramentas modernas de análise aplicadas à qualidade da energia elétrica**. Sba: Controle &

Automação Sociedade Brasileira de Automatica, v. 17, n. 3, p. 331-341, 2006.

Industrial Electronics, v. 61, n. 1, p. 107-114, 2013.

ONS, Operador Nacional do Sistema Elétrico. **O QUE É O SIN**, 2021. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>. Acesso em: 02 maio 2021.

PADILLA, Julian Villelia. **Qualidade de energia elétrica**. O setor Elétrico, p. 93, 2008.

PAULILO, Gilson. **Conceitos gerais sobre qualidade da energia**. Revista O Setor Elétrico, ed, v. 84, 2013.

RIBEIRO, Luiz Roberto Borges. **Análise de harmônicos em cargas não lineares**. 2017.

RIBEIRO, Thatiane. **Qualidade da energia elétrica**. 1. Londrina: Educacional S.A., 2015.

ROCHA, Joaquim Eloir. **Qualidade da energia elétrica**. Departamento de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2016. Disponível em: <https://www.protcom.net/Literatura/Medicao/Qualidade/NOTAS%20DE%20AULA/NOTAS%20DE%20AULA_QUALIDADE%20ENERGIA%20EL%20C3%94TRICA.pdf>/. Acesso em: 23 março 2021.

STAROSTA, José. **Aspectos de operação e premissas de filtros de harmônicas em aplicações industriais – Parte II**, 2011. Disponível em: <<https://www.osetoreletrico.com.br/aspectos-de-operacao-e-premissas-de-filtros-de-harmonicas-em-aplicacoes-industriais-parte-ii/>>. Acesso em: 05 abril 2021.

SUTHERLAND, Peter E.; BRUSSO, Barry. **History of harmonics [History]**. *IEEE Industry Applications Magazine*, v. 21, n. 3, p. 6-11, 2015.

WANG, Lei; LAM, Chi-Seng; WONG, Man-Chung. **Hybrid structure of static var compensator and hybrid active power filter (SVC//HAPF) for medium-voltage heavy loads compensation**. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 65, n. 6, p. 4432-4442, 2017.

ZOBAA, Ahmed Faheem; ALEEM, Shady Hossam Eldeen Abdel. **A new approach for harmonic distortion minimization in power systems supplying nonlinear loads**. *IEEE transactions on Industrial informatics*, v. 10, n. 2, p. 1401-1412, 2014.

ZOBAA, Ahmed Faheem. **Optimal multiobjective design of hybrid active power filters considering a distorted environment**. *IEEE Transactions on*