

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**EDUARDO TAVARES SILVÉRIO**

**ANÁLISE DOS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DAS CORRENTES DE  
COMPENSAÇÃO EM FILTROS ATIVOS**

**UBERLÂNDIA**

**Julho de 2019**

**EDUARDO TAVARES SILVÉRIO**

**ANÁLISE DOS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DAS CORRENTES DE  
COMPENSAÇÃO EM FILTROS ATIVOS**

**Dissertação de mestrado apresentada à  
Faculdade de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Uberlândia como parte  
dos requisitos necessários para a obtenção do  
título de mestre em ciências.**

**Orientador: Prof. Dr. José Rubens Macedo Junior**

**UBERLÂNDIA**

**Julho de 2019**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA – UFU

Reitor: Valder Steffen Junior

Pró-Reitor de Graduação: Armino Quillici Neto

Pró-Reitor de Pós-graduação: Carlos Henrique de Carvalho

Diretor da Faculdade de Engenharia Elétrica: Sérgio Ferreira de Paula Silva

Coordenador do Programa de Pós-Graduação Engenharia Elétrica: José Roberto Camacho

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S587 Silvério, Eduardo Tavares, 1994-  
2019 Análise dos Métodos de Determinação das Correntes de  
Compensação em Filtros Ativos [recurso eletrônico] /  
Eduardo Tavares Silvério. - 2019.

Orientador: JOSÉ RUBENS MACEDO JUNIOR.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de  
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Elétrica.  
Modo de acesso: Internet.

Disponível em: [http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.](http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.2035)

2019.2035

Inclui bibliografia.

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2: Gizele  
Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

**EDUARDO TAVARES SILVÉRIO**

**ANÁLISE DOS MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DAS CORRENTES DE  
COMPENSAÇÃO EM FILTROS ATIVOS**

**Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica da  
Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do título de Mestre em Ciências.**

**Comissão examinadora:**

**Prof. Dr. José Rubens Macedo Junior  
(Orientador – UFU)**

**Prof. Dr. Wellington Maycon Santos Bernardes  
(Examinador – UFU)**

**Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior  
(Examinador – USP São Carlos)**

**Uberlândia, 25 de julho de 2019**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE  
UBERLÂNDIA

## ATA DE DEFESA

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Elétrica				
Defesa de:	<a href="#">Dissertação de Mestrado Acadêmico, 712, COPEL</a>				
Data:	25/07/2019	Hora de início:	14:30	Hora de encerramento:	<a href="#">17:00</a>
Matrícula do Discente:	11722EEL016				
Nome do Discente:	<a href="#">Eduardo Tavares Silvério</a>				
Título do Trabalho:	Análise dos métodos de determinação das correntes de compensação em filtros ativos				
Área de concentração:	Sistemas de Energia Elétrica				
Linha de pesquisa:	Qualidade da Energia Elétrica				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Título: Desenvolvimento de uma nova metodologia para quantificação das perdas técnicas da distribuição em condições distorcidas e desequilibradas Agência Financiadora: ENERGISA Início: 27/07/2018 Término: 26/07/2020 No. do Projeto na agência: PD-00404-1803/2018 Professor Coordenador: Prof. José Rubens Macedo Junior				

Reuniu-se no Anfiteatro 1E da Faculdade Energia Elétrica, Campus Santa Mônica, da Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, assim composta: Professores Doutores: Wellington Maycon Santos Bernardes - FEELT/UFU, José Carlos de Melo Vieira Júnior- USP, José Rubens Macedo Júnior - FEELT/UFU, orientador(a) do(a) candidato(a).

Iniciando os trabalhos o(a) presidente da mesa, Dr(a). José Rubens Macedo Júnior, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

[Aprovado\(a\).](#)

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de [Mestre](#).

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.

---

Documento assinado eletronicamente por **Wellington Maycon Santos Bernardes, Professor(a) do Magistério Superior**, em 26/07/2019, às 09:40, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#)



Documento assinado eletronicamente por **José Carlos de Melo Vieira Júnior, Usuário Externo**, em 26/07/2019, às 09:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Rubens Macedo Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 26/07/2019, às 10:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1421078** e o código CRC **E33DEB4B**.

---

**Referência:** Processo nº 23117.050778/2019-76

---

## AGRADECIMENTOS

Sou eternamente grato a minha família. Apesar do clichê, estes realmente são meu apoio e, principalmente, neste ano de 2019, estas pessoas têm elevado meu conceito de amor a níveis que eu ainda não conhecia. Agradeço minha irmã e, especialmente, meu pai e minha mãe, por serem seres humanos lindos e cuidarem de mim por todo esse tempo. Eu amo vocês.

Agradeço à espiritualidade por atuar de forma positiva, sempre me impulsionando na direção que se faz necessária para minha evolução durante a vida.

Sou grato também pelos amigos que seguem a vida ao meu lado, especialmente Juliane, que me ensina todos os dias o significado da palavra amizade, além de me mostrar como ter o coração leve, e Aline, sua alegria, confiança e fé me ensinam como viver em sintonia com a paz. Muito obrigado por me permitirem participar da vida de vocês. Além de todos os meus amigos espalhados pelo Brasil que é a família construída em Chicago, sou muito grato por ter vocês comigo.

Expresso minha gratidão ao meu companheiro, Juliano, por viver as dores e as delícias da vida ao meu lado e me mostrar, cada dia, diversas formas de amar e sentir.

Agradeço ao meu orientador José Rubens, por ter confiado em mim para a realização deste trabalho. Gostaria de agradecer também pelos conselhos e direcionamentos dados para a confecção desta dissertação. Sua contribuição foi imprescindível para a criação deste trabalho.

Gostaria de agradecer aos ótimos amigos que me acompanharam durante todo este trabalho: Guilherme, Lara, Rodrigo, Gabriel, Isabela, Barata, Lucas e Hélio. Agradeço por todos os conselhos, orientações e conversas, vocês me ajudaram e contribuíram bastante, fico feliz por ter tido a oportunidade de trabalhar com vocês no Laboratório de Distribuição de Energia Elétrica (LADEE).

Ainda, agradeço às pessoas que diretamente ou indiretamente contribuíram para este trabalho.

Gostaria de agradecer ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pela bolsa de fomento, esta foi de grande valia.

Expresso também gratidão ao Grupo Energisa pela bolsa de fomento por meio do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento realizado junto ao LADEE.

*Dedico este trabalho  
a toda comunidade LGBTQI+  
“Ninguém solta a mão de ninguém.”*



“Na vida, não existe nada a temer, mas a entender.”

**Marie Curie**

## RESUMO

Não apenas formas de onda de tensão e corrente distorcidas, mas também sistemas desequilibrados são comumente encontrados em sistemas elétricos de potência devido, sobretudo, ao crescimento da disseminação de cargas monofásicas não lineares conectadas à rede de distribuição. Estes fenômenos podem ser atenuados com a utilização de filtros ativos. Com o objetivo de reduzir os impactos negativos das distorções e desequilíbrios no sistema elétrico, o filtro ativo sintetiza uma forma de onda de corrente capaz de compensar os efeitos indesejados na forma de onda da corrente da carga, o que permite atenuar as perturbações inseridas no sistema. Neste cenário, o atual trabalho investiga dois métodos de sintetização de corrente elétrica por meio de filtragem ativa: (i) corrente senoidal e (ii) fator de potência unitário. O primeiro método é baseado na injeção de corrente de compensação de modo que a corrente na linha seja perfeitamente senoidal e equilibrada. Por outro lado, o segundo método almeja promover uma corrente na linha que seja uma réplica da forma de onda de tensão no ponto de conexão da carga, resultando fator de potência unitário e um comportamento linear para a carga, quando vista pelo lado da fonte. Desta forma, o objetivo do estudo é especificar qual dos métodos apresenta o melhor desempenho considerando a atenuação harmônica, redução de desequilíbrio de tensão e uso adequado do sistema de distribuição. Para atingir a proposta desta dissertação foi realizada a modelagem matemática de ambos os métodos, além de simulações computacionais por meio do *software* Matlab-Simulink®. Os resultados obtidos sugerem que dependendo do objetivo do uso do filtro ativo o método de fator de potência unitário é melhor que o método de corrente senoidal.

**Palavras chave** — Filtro ativo paralelo, método da corrente senoidal, método do fator de potência unitário, qualidade da energia elétrica, cargas não lineares.

## ABSTRACT

Not only distorted voltage and current waveforms, but also unbalanced systems are commonly found on power systems, notably due to the increasing number of single-phase non-linear loads. These phenomena may be mitigated by shunt active power filters (SAPF). In order to reduce the negative impact of distortions and unbalances in the electrical system, the active power filter synthesizes a compensation current waveform, which eliminates possible disturbances inserted into the system, especially those related to single-phase non-linear loads. In this scenario, the present work investigates two different methods of synthesizing the electrical current through SAPF: (i) sinusoidal current and (ii) unity power factor method. The first method is based on the injection of compensating currents in such a way that the line current becomes perfectly sinusoidal. In the second method, the line current is adjusted to have a waveform which is a replica of the voltage waveform, so that the set of the nonlinear load and the active filter behave as a nonlinear load of unity power factor. In this way, the purpose of this study is to determine which of the two methods presents the best performance in terms of harmonic mitigation, reduction of voltage unbalances and in a better use of the system as well. Aiming this purpose, the mathematical modeling of both methods was carried out and several simulations using Matlab-Simulink were performed. The obtained results suggest that depending on the purpose the unity power factor methodology is better than the sinusoidal current methodology.

**Keywords** — Shunt active power filters, sinusoidal current methodology, unity power factor methodology, power quality, non-linear loads.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Representação Gráfica da Transformação das coordenadas abc para $\alpha\beta$ , como mostra (8).....	14
<b>Figura 2.</b> Circuito Trifásica com Carga Puramente Resistiva .....	17
<b>Figura 3.</b> Potência total instantânea calculada pela Teoria Clássica de Potência.....	17
<b>Figura 4.</b> Circuito para simulação de condição não-senoidal da carga.....	18
<b>Figura 5.</b> Formas de onda de corrente para um retificador controlado.....	19
<b>Figura 6.</b> Espectro harmônico da corrente de carga. ....	19
<b>Figura 7.</b> Forma de onda instantânea da potência (a) real e (b) imaginária calculada por (24). .....	19
<b>Figura 8.</b> Componentes de (a) valor médio e (b) oscilante para (c) potência instantânea real .	20
<b>Figura 9.</b> Componentes de (a) valor médio e (b) oscilante para (c) potência instantânea imaginária. ....	21
<b>Figura 10.</b> Significado físico das potências instantâneas real e imaginária.....	22
<b>Figura 11.</b> Forma de onda das correntes de compensação calculadas conforme (28), com sequência abc. ....	23
<b>Figura 12.</b> Soma algébrica das correntes (a) da carga e (b) de compensação resultando na (c) corrente da fonte .....	24
<b>Figura 13.</b> Comportamento de (a) $p_{3\phi}$ e (b) tensões agregadas para condições ideais .....	27
<b>Figura 14.</b> Comportamento de (a) $p_{3\phi}$ e (b) tensões agregadas para condições não ideais .....	28
<b>Figura 15.</b> Comportamento de $G_e$ para (a) condições ideais e (b) condições não ideais .....	28
<b>Figura 16.</b> Representação gráfica de (45), em que (a) corrente de carga, (b) corrente ativa e (c) corrente de compensação são esboçadas.....	29
<b>Figura 17.</b> Formas de onda da tensão e corrente na Fase A .....	29
<b>Figura 18.</b> Cálculo dos erros quadráticos para determinação do Coeficiente de Pearson .....	30
<b>Figura 19.</b> Exemplo da aplicação do Coeficiente de Correlação de Pearson para quantificação da linearidade entre sinais instantâneos de tensão e corrente.....	32
<b>Figura 20.</b> Diagrama esquemático básico para conexão de filtro ativo paralelo. ....	37
<b>Figura 21.</b> Diagrama elétrico do filtro ativo conectado ao sistema de potência.....	37
<b>Figura 22.</b> Ilustração do funcionamento da Banda de Histerese. ....	39
<b>Figura 23.</b> Fluxograma de controle do filtro ativo usando a metodologia da corrente senoidal equilibrada. ....	41
<b>Figura 24.</b> Implementação do controle da metodologia da corrente senoidal equilibrada. ....	42
<b>Figura 25.</b> Controlador PI para estabilidade da tensão no elo CC, para metodologia da corrente senoidal equilibrada. ....	43

<b>Figura 26.</b> Sinal de tensão no elo CC para metodologia da corrente senoidal equilibrada.....	43
<b>Figura 27.</b> Banda de Histerese implementada no Matlab Simulink. ....	44
<b>Figura 28.</b> Fluxograma de controle do filtro ativo metodologia do fator de potência unitário.	45
<b>Figura 29.</b> Implementação do controle da metodologia do fator de potência unitário. ....	46
<b>Figura 30.</b> Controlador PI para estabilidade da tensão no elo CC, para metodologia do fator de potência unitário.....	46
<b>Figura 31.</b> Sinal de tensão no elo CC para metodologia do fator de potência unitário. ....	46
<b>Figura 32.</b> Característica v-i da (a) carga não linear, (b) Característica v-i do conjunto filtro + carga pela metodologia da corrente senoidal e (c) Característica v-i do conjunto filtro + carga pela metodologia do fator de potência unitário, para o Caso 1. ....	50
<b>Figura 33.</b> Perfil harmônico da carga para Caso 1. ....	51
<b>Figura 34.</b> Característica v-i da (a) carga não linear, (b) Característica v-i do conjunto filtro + carga pela metodologia da corrente senoidal e (c) Característica v-i do conjunto filtro + carga pela metodologia do fator de potência unitário, para o Caso 2. ....	51
<b>Figura 35.</b> Perfil harmônico da carga para Caso 2. ....	52
<b>Figura 36.</b> Característica v-i da (a) carga não linear, (b) Característica v-i do conjunto filtro + carga pela metodologia da corrente senoidal e (c) Característica v-i do conjunto filtro + carga pela metodologia do fator de potência unitário, para o Caso 3. ....	53
<b>Figura 37.</b> Perfil harmônico da carga para Caso 3. ....	53
<b>Figura 38.</b> Característica v-i da (a) carga não linear, (b) do filtro pela metodologia da corrente senoidal e (c) da metodologia da minimização das correntes de carga, para o Caso 4.....	54
<b>Figura 39.</b> Perfil harmônico da carga para Caso 4. ....	55
<b>Figura 40.</b> Característica v-i da (a) carga não linear, (b) do filtro pela metodologia da corrente senoidal e (c) da metodologia da minimização das correntes de carga, para o Caso 5.....	56
<b>Figura 41.</b> Perfil harmônico da carga para Caso 5. ....	56
<b>Figura 42.</b> Característica v-i da (a) carga não linear, (b) do filtro pela metodologia da corrente senoidal e (c) da metodologia da minimização das correntes de carga, para o Caso 6. ....	58
<b>Figura 43.</b> Perfil harmônico da carga para o Caso 6. ....	58
<b>Figura 44.</b> Potência aparente (S). ....	59
<b>Figura 45.</b> Potência aparente fundamental ( $S_1$ ). ....	59
<b>Figura 46.</b> Potência ativa fundamental ( $P_1$ ). ....	60
<b>Figura 47.</b> Potência reativa fundamental ( $Q_1$ ). ....	60
<b>Figura 48.</b> Potência aparente harmônica ( $S_h$ ). ....	61
<b>Figura 49.</b> Potência ativa harmônica ( $P_h$ ). ....	61

<b>Figura 50.</b> Potência reativa harmônica ( $Q_h$ ).....	62
<b>Figura 51.</b> Potência de distorção de corrente ( $D_i$ ).....	62
<b>Figura 52.</b> Potência de distorção de tensão ( $D_v$ ). ....	62
<b>Figura 53.</b> Potência aparente harmônica ( $S_h$ ).....	63
<b>Figura 54.</b> Fator de potência fundamental ( $FP_1$ ) ou fator de deslocamento. ....	64
<b>Figura 55.</b> Fator de potência (FP). ....	64

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela I.</b> Descrição dos Casos Analisados .....	48
<b>Tabela II.</b> Configurações Para Simulação .....	49
<b>Tabela III.</b> Comportamento de cada metodologia perante desequilíbrio na tensão de fornecimento, FD (%) .....	57
<b>Tabela IV.</b> Resumo - Casos e Metodologias .....	65

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>3</b>
1.1 CONTRIBUIÇÕES E OBJETIVOS .....	4
1.2 ESTADO DA ARTE .....	6
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	9
<b>2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>11</b>
2.1 TEORIA DA POTÊNCIA INSTANTÂNEA.....	12
2.1.1 Transformada de Clarke.....	13
2.2 TEORIA PQ PARA TEORIA DA POTÊNCIA INSTANTÂNEA.....	16
2.2.1 Teoria PQ para condições não ideais .....	17
2.2.2 Correntes de Compensação de acordo com Teoria PQ.....	22
2.3 MINIMIZAÇÃO DAS CORRENTES DA CARGA.....	24
2.4 COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON .....	30
2.5 DEFINIÇÕES DE POTÊNCIA ELÉTRICA SOB CONDIÇÕES SENOIDAIS, NÃO SENOIDAIS, EQUILIBRADAS E DESEQUILIBRADAS.....	32
<b>3 MODELAGEM COMPUTACIONAL DO FILTRO ATIVO.....</b>	<b>36</b>
3.1 ESTRUTURA DO FILTRO ATIVO .....	36
3.2 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE .....	40
3.2.1 Metodologia da Corrente Senoidal Equilibrada (Método I).....	41
3.2.2 Metodologia do Fator de Potência Unitário (Método II) .....	45
<b>4 ESTUDOS DE CASOS.....</b>	<b>48</b>
4.1 CASO 1.....	50
4.2 CASO 2.....	51
4.3 CASO 3.....	52
4.4 CASO 4.....	53
4.5 CASO 5.....	55
4.6 CASO 6.....	57
4.7 ANÁLISE DE POTÊNCIA PARA OS CASOS ESTUDADOS.....	59
4.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	64
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>66</b>



5.1 TRABALHOS FUTUROS .....	68
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>69</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No âmbito dos sistemas de distribuição de energia elétrica, a cada dia torna-se mais comum a utilização de cargas eletrônicas em diversas unidades consumidoras, sejam elas residenciais, comerciais ou industriais. Estas cargas apresentam características que promovem efeitos indesejados nas redes de distribuição de energia elétrica, como por exemplo, as distorções harmônicas de tensão e corrente. Adicionalmente, a presença de cargas monofásicas também contribui para o aparecimento de condições não ideais para o funcionamento adequado do sistema de distribuição de energia elétrica, proporcionando o surgimento do fenômeno do desequilíbrio de tensão.

Em outras palavras, novas questões acerca da otimização do uso da rede de distribuição de energia surgiram, uma vez que a tipologia das cargas sofreu mudanças. Uma carga não linear, por exemplo, apresenta forma de onda não-senoidal de corrente, isto é, outras componentes elétricas, chamadas de componentes harmônicas que compõem a forma de onda de corrente requerida pela carga e, consequentemente, demandada do sistema. Nesse contexto, sabe-se que parte da energia absorvida pela carga é devolvida ao sistema na forma de potência harmônica. Devido a isto, a modelagem de cargas não lineares é comumente representada por equivalentes de Norton, sendo, portanto, indicada em parte como fontes de correntes harmônicas geradas nas cargas em direção à fonte [1]. Como consequência da presença de componentes harmônicas de corrente em uma rede de distribuição, têm-se mais perdas técnicas nas redes de distribuição, problemas de ressonância série e paralela, menor vida útil de equipamentos elétricos como motores e transformadores, assim como aquecimento de componentes elétricos aumentando o desgaste material destes.

Além da questão das distorções harmônicas, a conexão de cargas monofásicas com diferentes demandas nas fases do sistema de distribuição acarreta o desbalanceamento da magnitude da tensão, assim como, também, dos ângulos de fase dessas tensões. Este fenômeno estabelece não apenas um deslocamento da tensão de neutro, mas também a circulação de correntes por este condutor, resultando efeitos prejudiciais às cargas conectadas neste sistema, como o incremento e a variação da tensão de neutro. Ao mesmo tempo, no caso dos motores elétricos, especificamente, ocorre um incremento da temperatura de operação e aumento das perdas internas. Além disso, em retificadores CA/CC, controlados ou não, verificam-se, além das harmônicas características, harmônicas múltiplas de 3, isto é, harmônicas predominantemente de sequência zero que

circulam pelo neutro, assim como as correntes de sequência zero provenientes do desequilíbrio de tensão, aumentando, assim, as perdas técnicas no sistema de distribuição de energia elétrica.

Em busca de atenuar esses problemas, uma das possíveis soluções desenvolvidas pela comunidade científica é a filtragem ativa, a qual consiste em injetar corrente no ponto de conexão das cargas com o objetivo de eliminar as componentes indesejadas presentes na corrente de linha. Deste modo, para determinar a corrente a ser injetada no sistema elétrico, é utilizada duas escolas de atenuação das componentes indesejadas, as quais correspondem à teoria da potência instantânea e as correntes de minimização de carga, ainda, no desenvolvimento da metodologia de cálculo das correntes de compensação tem-se: (i) corrente senoidal e (ii) fator de potência unitário. Ambas metodologias almejam atenuar os efeitos prejudiciais que as cargas não lineares proporcionam ao sistema elétrico, entretanto, cada método utiliza um parâmetro diferente para correção dos distúrbios. No método da corrente senoidal o objetivo é sintetizar uma corrente de linha perfeitamente senoidal e equilibrada, por outro lado, a metodologia do fator de potência unitário tem como referência a forma de onda da tensão, ou seja, a corrente de linha se torna uma réplica da forma de onda da tensão verificada no ponto de conexão.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo principal a avaliação de duas diferentes metodologias de filtragem ativa para atenuação dos efeitos associados às distorções harmônicas e desequilíbrios de tensão em redes de distribuição de energia elétrica, minimizando os efeitos supracitados, garantindo uma melhor qualidade da energia elétrica, assim como o uso mais adequado do sistema.

## 1.1 CONTRIBUIÇÕES E OBJETIVOS

Considerando o contexto apresentado, este trabalho realiza uma análise comparativa entre duas diferentes metodologias para sintetização das correntes a serem injetadas por filtros ativos. Uma das metodologias é a corrente senoidal, a qual utiliza da teoria da potência instantânea para especificar as correntes de compensação no ponto de acoplamento comum. Este método almeja segregar as componentes de potência que são provenientes dos distúrbios elétricos com o intuito de utilizar desta grandeza para promover o cálculo das correntes de compensação [2], isto é, as correntes elétricas capazes de atenuar os distúrbios verificados nas correntes de linha. Por outro lado, a metodologia de fator de potência unitário faz uso da abordagem de potência proposta por

Fryze [3], para especificar a corrente de compensação, a qual busca adequar a forma de onda da corrente de linha a uma réplica perfeita da forma de onda da tensão de fornecimento do sistema de distribuição de energia. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo principal determinar em quais aspectos cada um dos dois métodos apresenta melhor desempenho, assim como verificar qual deles proporciona uma melhor atenuação da distorção harmônica de tensão, do desequilíbrio de tensão, correção do fator de potência, além de uma melhor utilização do sistema elétrico.

Para alcançar tal objetivo, foram realizados testes contemplando diversas situações de carga e tensão de fornecimento visando uma análise detalhada do desempenho de cada um dos dois métodos de filtragem ativa. Para esse propósito, foram considerados os seguintes aspectos:

- Construção da característica  $v-i$  no ponto de conexão.
- Análise do perfil harmônico da corrente demandada do sistema com a atuação do filtro ativo para cada metodologia.
- Análise do fator de desequilíbrio.
- Análise das componentes de potência.
- Análise do fator de potência.

Através da análise destes diferentes aspectos, é possível analisar como as diferentes metodologias se comportam em cada situação especificada, possibilitando:

- Estabelecer a metodologia que proporciona maior linearidade para carga vista pelo sistema.
- Verificar qual método proporciona melhor atenuação das componentes harmônicas em diversas situações de carregamento e tensão de fornecimento.
- Indicar a metodologia com melhor desempenho na redução do fator de desequilíbrio de tensão.
- Verificar qual método proporciona um melhor uso do sistema elétrico, do ponto de vista de demanda de potência.
- Verificar qual das metodologias realiza uma melhor correção do fator de potência.

## 1.2 ESTADO DA ARTE

A discussão acerca da temática e as diferentes formas de realizar eletricamente tal atenuação dos distúrbios elétricos, assim como, o desenvolvimento de teorias eficazes na segregação do conteúdo indesejado do que é, de fato, relevante para o funcionamento dos demais equipamentos elétricos conectados ao sistema, é abordado desde [2] em 1984, com o surgimento da teoria instantânea de potência PQ, ou Teoria PQ, a qual sugere a segregação das componentes de potência capazes de realizar trabalho útil das componentes de potência originárias dos diversos distúrbios elétricos que ocorrem na rede de distribuição de energia elétrica. O desenvolvimento desta teoria e a aplicação dela para a atenuação de distúrbios elétricos foi primordial para o surgimento do filtro ativo, uma vez que esta teoria possibilita a determinação do método das correntes senoidais, o qual especifica uma metodologia de atenuação de harmônicos e desequilíbrios de tensão na carga elétrica que será abordada nesta Dissertação.

Assim, [4] em 2004, discute alguns aspectos da Teoria PQ acerca da compensação de distúrbios elétricos, como problemas e soluções que tal equipamento ainda enfrentava na atenuação de conteúdo harmônico. Em conjunto com [4], houve o lançamento de [5], consolidando as teorias aplicadas, por meio do filtro ativo paralelo e série, para atenuação de fenômenos elétricos indesejados. Desta forma, a extensa discussão acerca do filtro ativo em [5] possibilitou o conhecimento de toda a comunidade científica a respeito do tema, ampliando as pesquisas em sistemas de controle no comando das chaves do filtro, assim como no desenvolvimento de novas teorias de controle, além da utilização de tecnologias recentes, como Inteligência Artificial para um desempenho ainda melhor, no processamento de dados e informações do filtro ativo.

Deste modo, a ampliação do uso da filtragem ativa não é utilizada apenas para compensação de harmônicos ou desequilíbrios, mas também para compensação estática, como explica [6]. Exemplificando como esta metodologia de atenuação de distúrbios elétricos é utilizada largamente. Além disso, o artigo busca apresentar aspectos construtivos do dispositivo, determinando seu circuito equivalente, assim como informações acerca da modelagem dos elementos passivos para o funcionamento do filtro ativo. Ainda, em [7] é abordada a Teoria PQ com filtro ativo controlado por filtro adaptativo neural, o qual realiza uma sintonização automática do controle multirressonante que reconhece as harmônicas com maiores magnitudes que devem ser atenuadas para determinar uma corrente na fonte livre de distúrbios harmônicos.

Não apenas em [7], mas também em [8] há uma proposta de uso de filtro digital para sintonização do sistema de controle e comando da atuação das chaves do filtro ativo paralelo utilizando a Teoria PQ. Nesse trabalho, o filtro digital utilizado é o de Wiener, o qual especifica o processamento digital de sinais para aplicação da teoria instantânea de potência no cálculo das correntes de compensação. Por fim, em [9] há também a utilização da Teoria PQ para atenuação em distúrbios elétricos, assim como o detalhamento de procedimento para modelagem, implementação e projeto do filtro ativo paralelo, tal como em [10], [11], [12], [13] e [14].

Em seguida, além da teoria instantânea de potência, também foi desenvolvida a teoria de composição da corrente em componentes ortogonais, como sugere Czarnecki, em [15], em que a decomposição das componentes de corrente ortogonais de um circuito trifásico assimétrico e não senoidal permite o uso do conceito de condutância e susceptância equivalente, de forma a enfatizar os aspectos de cada fenômeno físico na determinação das componentes de potência na fonte de alimentação do sistema. Esta proposição realizada em [15] é o início do desenvolvimento do conceito defendido pela metodologia de minimização das correntes de carga, especificando o uso de condutância equivalente no cálculo de correntes elétricas.

Com [5] abordando as duas metodologias de atenuação de distúrbios elétricos, trabalhos como [16] ficam em evidência, devido a sua relevância, uma vez que aborda unicamente o método proposto como Correntes Generalizadas de Fryze, também conhecido como minimização das correntes de carga, o qual prioriza o fator de potência unitário na fonte de alimentação do sistema elétrico. Mais tarde, esta metodologia também fica conhecida como *Unity Power Factor* [17], ocasião na qual se propõe uma melhoria no algoritmo de controle de chaveamento das chaves estáticas.

Ainda, com o avanço da tecnologia, os controles digitais foram implementados na construção do filtro ativo paralelo com o objetivo de determinar um sistema capaz de realizar a compensação com exatidão, precisão, rapidez e eficiência, de acordo com cada metodologia de compensação. Assim, trabalhos como [18] e [19] exploram os aspectos do controle e construção para a metodologia de atenuação de distúrbios elétricos proposta por Fryze [3], além de especificar como as características específicas de cada sistema de controle utilizado impactam o desempenho do equipamento. Neste âmbito, o trabalho realizado em [20] busca alcançar os padrões propostos pela norma IEEE Std. 519-2014 [21], a qual apresenta recomendações a respeito de componentes harmônicas, uma vez que o filtro ativo discutido em [20] é exposto às condições de fornecimento distorcidas

de tensão, considerando-se a utilização do método do fator de potência unitário para compensação das componentes harmônicas.

O trabalho apresentado em [22] sugere uma estrutura de filtro ativo que não realiza monitoramento constante das componentes harmônicas a serem atenuadas, melhorando a resposta em atuação do filtro, uma vez que uma configuração com alto poder de processamento em cálculo das correntes de compensação é realizada. Ao mesmo tempo, essa referência especifica condições primordiais para o projeto e implementação do filtro ativo, sendo que as especificidades do filtro, nesse caso, são distintas das apresentadas em [18] e [19], visto que cada trabalho realizou a modelagem do filtro ativo por meio diferentes abordagens. Entretanto, o resultado dos trabalhos é convergente, isto é, promovem a atenuação desejada das componentes prejudiciais ao sistema de distribuição de energia elétrica. Faz-se ainda necessário apontar que os trabalhos mencionados anteriormente são variações da aplicação do método do fator de potência unitário, em outras palavras, não é apenas uma forma fixa e imutável de desenvolvimento do filtro ativo paralelo, mas sim várias formas distintas que especificam um uso adequado para cada tipo de situação, às quais o filtro estará sujeito.

Da mesma forma, a referência [23] aborda a especificação da modelagem e do projeto do filtro ativo pela visão do controle digital, utilizando-se filtro de Kalman, determinando mais uma vez outra possível abordagem acerca da construção do filtro ativo. Em [24] são apresentados algoritmos de atenuação de distúrbios associados as correntes harmônicas, os quais foram de grande ajuda para a compreensão do desempenho do filtro ativo em diferentes condições de operação. Por fim, o trabalho realizado em [25] aborda aspectos construtivos do filtro ativo, detalhando a sintonia do controle proporcional integral, método de controle mais comum na construção de filtros ativos. Estes trabalhos proveram o conhecimento necessário para a implementação computacional dos dois métodos de filtragem ativa abordados nesta Dissertação, auxiliando na maneira como foi realizado o controle de histerese para sintetização das correntes elétricas, assim como no comando da comutação das chaves estáticas. Além disso, os mesmos foram de grande ajuda no projeto dos elementos de potência do filtro ativo, fornecendo equações e parâmetros necessários para a adequada modelagem de tais elementos, possibilitando uma melhor performance da simulação computacional.

Entretanto, apesar de todos os trabalhos especificarem e discutirem com excelência os aspectos acerca da implementação e melhor desempenho do sistema de controle para a determinação do filtro ativo, há uma escassez nos trabalhos a respeito da comparação

de cada método e como estes influenciam nos resultados para diversas situações de operação, além de não especificarem claramente qual metodologia apresenta melhor desempenho em diferentes situações. Deste modo, esta Dissertação toma a comparação entre estas duas metodologias como objeto de estudo e pontua a contribuição a ser realizada, além de discorrer sobre os aspectos mais atuais a respeito do tema neste subitem.

Com a compreensão a respeito do avanço tecnológico no que tange ao estudo dos filtros ativos, é possível vislumbrar os aspectos teóricos acerca da temática e assim abordar a comparação entre os métodos estudados neste trabalho. Desta forma, os seguintes capítulos almejam determinar as características fundamentais, tanto na teoria, quanto na simulação computacional do filtro ativo, para a compreensão dos estudos de caso.

O capítulo seguinte aborda sobre a conceituação teórica a respeito das teorias abordadas nessa Dissertação, assim como o conhecimento acerca das formas de análise dos dados obtidos com as simulações e ferramentas matemáticas para compreensão destes resultados.

### 1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos. O Capítulo 1 contempla a introdução do tema a ser discutido, no qual é abordada a relevância do estudo, como este trabalho contribui para o crescimento do conhecimento científico acerca do assunto, além de especificar os objetivos principais, assim como a motivação para exploração do tema proposto. Adicionalmente, este capítulo apresenta o Estado da Arte sobre o assunto, apresentando trabalhos e estudos de relevância acerca do tema, apontando as contribuições que cada um trouxe para a construção desta Dissertação, bem como especificando a ausência de uma análise comparativa a respeito das metodologias de filtragem ativa, indicando, mais uma vez, a relevância deste estudo.

No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica necessária tanto para compreender as metodologias aplicadas em filtros ativos, tal como para entender os artifícios matemáticos e teoria a respeito da potência elétrica que foram de grande ajuda para a interpretação dos dados obtidos. Este capítulo fornece as bases teóricas acerca das temáticas discutidas, permitindo ao leitor vislumbrar todos os aspectos discutidos nesta Dissertação com propriedade, isto é, com conhecimento amplo das técnicas utilizadas.



Em seguida, no Capítulo 3 é realizada a abordagem de como as metodologias discutidas teoricamente no Capítulo 2 tomam um caráter prático no filtro ativo, além de descrever como é executada a simulação computacional do equipamento no ambiente de simulação *Simulink*, assim como foi especificado o sistema de controle para a performance de filtragem ativa ser adequada para cada metodologia. Além disto, este capítulo também trata da estrutura do circuito de potência do filtro ativo, bem como sua forma de conexão ao sistema elétrico. Entretanto, não apenas o circuito de potência é especificado como também a estratégia de controle para a geração dos pulsos que comandam as chaves estáticas que compõem o filtro ativo. O controle para chaveamento estático é um dos principais fatores para o funcionamento adequado do equipamento, uma vez que esta parte é responsável pela sintetização adequadas das correntes de compensação do filtro, assim, caso tenha algum erro nesta etapa a compensação é feita erroneamente e o objetivo de atenuar distúrbios elétricos não é alcançado.

No Capítulo 4 são realizados os estudos de caso para o desenvolvimento dos objetivos desta Dissertação, em outras palavras, os dados para análise são apresentados neste capítulo. Desta forma, todos os aspectos a serem observados acerca do comportamento de cada metodologia perante diferentes condições de carregamento e tensão de fornecimento da rede elétrica são discutidas à luz do impacto da atuação da filtragem ativa. Assim como ocorre a apresentação dos dados obtidos, há também a discussão de como estes dados foram influenciados pela ação de cada metodologia, permitindo constatações a respeito de cada método, como aponta os objetivos desta Dissertação.

Por fim, no Capítulo 5 é executado o término da análise, ou seja, a sintetização de todas as apurações apresentadas ao longo deste trabalho. Neste capítulo, as conclusões sobre a atuação do filtro ativo e o impacto que tal equipamento tem nas condições de carregamento e tensão de fornecimento são estabelecidas de forma a construir ciência acerca deste tema. Ainda, há o fechamento do estudo no que tange aos objetivos e contribuições desta dissertação, apontando as condições, as quais cada metodologia é indicada para melhor desempenho, ou ainda, designar para quais parâmetros primordiais, que devem ser atenuados, qual metodologia apresenta resultados mais satisfatórios.

## 2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capítulo serão apresentados e discutidos alguns conceitos teóricos e analíticos a respeito das duas estratégias de controle aplicadas em filtros ativos, as quais são objetos de estudo desta Dissertação. O propósito deste item é possibilitar a compreensão das teorias defendidas por cada escola de atenuação de distúrbios elétricos, como conteúdo harmônico e desequilíbrios. Além disso, explicar como as definições de potência sob condições não senoidais e desequilibradas são uma ferramenta que possibilita uma análise mais precisa dos impactos dos distúrbios elétricos no uso do sistema elétrico de potência.

Contudo, o entendimento acerca da teoria de potência instantânea e Teoria PQ, a qual é o alicerce teórico da metodologia de corrente senoidal para cálculo da corrente de compensação no filtro ativo, é imprescindível. A compreensão e discussão da forma de cálculo e desenvolvimento analítico dessa teoria possibilita uma percepção mais clara e objetiva da atuação da filtragem ativa, assim como ocorre na discussão da teoria de minimização das correntes de carga, que defende a metodologia de fator de potência unitário no terminal de conexão da carga. Ambos os conceitos exploram características importantes para o conhecimento a respeito das técnicas de atenuação de perturbações no sistema elétrico devido à inserção de cargas não lineares.

Ainda, com o intuito de corroborar os resultados fornecidos pelos dois procedimentos de atenuação de distúrbios elétricos, é fundamental a compreensão de dois conceitos: (i) coeficiente de correlação de Pearson e (ii) definições de potência elétrica sob condições senoidais, não senoidais, equilibradas e desequilibradas. Primeiramente, o coeficiente de correlação de Pearson é necessário para averiguar quantitativamente a correspondência entre duas curvas. Neste trabalho, este conceito foi utilizado para determinar se a atuação do filtro ativo para cada metodologia específica uma relação de tensão e corrente linear no terminal de conexão da carga, portanto compreender como é realizado o cálculo deste indicador é indispensável. Em seguida, para especificar como cada procedimento de cálculo de corrente de compensação faz uso da rede de distribuição, no que se refere às componentes de potência, são também discutidos as definições de potência propostas por [26], uma vez que especificam potências provenientes de conteúdo harmônico, logo indicando a finalidade de cada parcela no uso do fio no sistema de distribuição de energia. Deste modo, a seguir são discutidos em detalhes estes itens, a fim de prover ao leitor maior entendimento em relação ao estudo realizado nesta Dissertação.

## 2.1 TEORIA DA POTÊNCIA INSTANTÂNEA

Esta formulação de potência desenvolvida por Akagi, Watanabe e Aredes, explicitada em [2], tem como princípio fundamental o cálculo da potência por meio das componentes elétricas instantâneas, isto é, tensão  $v(t)$  e corrente  $i(t)$ . Uma vez que tensão da rede e corrente demandada da carga são perfeitamente senoidais e equilibradas, esta formulação determina componentes instantâneas de potência ativa e reativa como a teoria clássica de potência. Ou seja, em sistemas trifásicos as tensões e correntes de fase senoidais e equilibradas são dadas como mostram de (1) à (6).

$$v_a(t) = \sqrt{2}V \operatorname{sen}(\omega t + \phi_V) \quad (1)$$

$$v_b(t) = \sqrt{2}V \operatorname{sen}\left(\omega t + \phi_V - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2)$$

$$v_c(t) = \sqrt{2}V \operatorname{sen}\left(\omega t + \phi_V + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (3)$$

$$i_a(t) = \sqrt{2}I \operatorname{sen}(\omega t + \phi_I) \quad (4)$$

$$i_b(t) = \sqrt{2}I \operatorname{sen}\left(\omega t + \phi_I - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (5)$$

$$i_c(t) = \sqrt{2}I \operatorname{sen}\left(\omega t + \phi_I + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (6)$$

Em que:

$V$  – magnitude da tensão em [V]

$I$  – magnitude da corrente em [A]

$\omega$  – velocidade angular igual à  $2\pi(60)$  [rad/s]

$\phi_V$  – ângulo de fase da tensão elétrica [°]

$\phi_I$  – ângulo de fase da corrente elétrica [°]

Destas expressões matemáticas no domínio do tempo é possível calcular a potência trifásica  $p_{3\Phi}$ , como indica (7).

$$p_{3\phi}(t) = v_a(t) \times i_a(t) + v_b(t) \times i_b(t) + v_c(t) \times i_c(t) \quad (7)$$

De acordo com a teoria da potência instantânea, para o cálculo da potência trifásica, utiliza-se de um artifício físico-matemático que busca simplificar os cálculos e trata o sistema elétrico trifásico como uma unidade, contrária à abordagem expressa em (7), em que a compreensão do sistema trifásico pode ser dada como três sistemas monofásicos em conjunto. O princípio em questão é a Transformada de Clarke.

### 2.1.1 TRANSFORMADA DE CLARKE

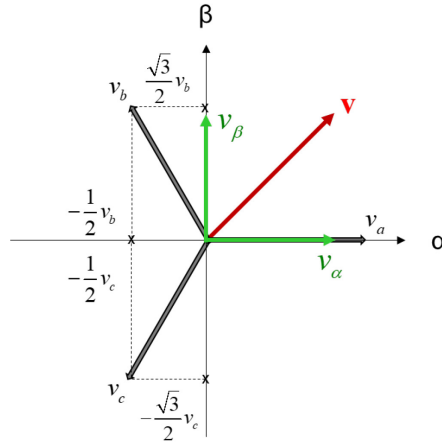
A Transformada de Clarke foi desenvolvida por Edith Clarke, a primeira mulher engenheira eletricitista, e determina o mapeamento das tensões e correntes trifásicas em coordenadas  $abc$  para coordenadas  $\alpha\beta$  [27]. Para isso utiliza-se de uma matriz de transformação direta e inversa [2], como expressam (8) e (9), respectivamente.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (9)$$

Acerca de (8) e (9), é importante salientar que a transformação das coordenadas  $abc$  para  $\alpha\beta$  não contemplou a componente de sequência zero, pois este estudo utiliza do sistema trifásico a três fios, isto é, três fases sem o condutor neutro, portanto em toda a análise que será realizada as componentes de sequência zero não existirão. Ainda que nos estudos de caso haja desequilíbrios e componentes harmônicas, em tensão e corrente elétricas, que determinem componentes desta sequência, devido ao fato da ausência do condutor neutro, tal componente de sequência é nula. Além disso, a escolha por trabalhar com um sistema trifásico a três fios é devido ao objetivo do trabalho, uma vez que é especificar qual metodologia é mais adequada para determinada situação de operação da carga e da fonte, ou seja, para restringir as diferenças apenas às metodologias, optou-se por não considerar o efeito do condutor neutro no sistema.

Ainda, a Transformada de Clarke possibilita a mudança de eixo das coordenadas  $abc$ , que são defasadas igualmente em  $120^\circ$  elétricos, para  $\alpha\beta$ , defasadas  $90^\circ$  elétricos entre eixos de coordenada, permitindo o tratamento do sistema trifásico como unidade, já que as componentes de Clarke podem ser representadas como vetores no plano complexo, como indicam (10) e (11) e Figura 1.



**Figura 1.** Representação Gráfica da Transformação das coordenadas  $abc$  para  $\alpha\beta$ , como mostra (8).

As tensões e correntes instantâneas em coordenadas  $\alpha\beta$  podem ser reescritas como um vetor complexo, uma vez que os eixos  $\alpha$  e  $\beta$  são ortogonais, representação similar ao eixo real e imaginário no plano complexo. Desta forma, as expressões (10) e (11) explicitam tal definição.

$$\mathbf{v} = v_\alpha + j v_\beta \quad (10)$$

$$\mathbf{i} = i_\alpha + j i_\beta \quad (11)$$

Sendo  $v_\alpha$ ,  $v_\beta$ ,  $i_\alpha$  e  $i_\beta$  representados por (12), (13), (14) e (15) após aplicação de (8), considerando as grandezas elétricas instantâneas.

$$v_\alpha = \sqrt{3}V \cos(\omega t + \phi_V) \quad (12)$$

$$v_\beta = \sqrt{3}V \sin(\omega t + \phi_V) \quad (13)$$

$$i_\alpha = \sqrt{3}I \cos(\omega t + \phi_I) \quad (14)$$

$$i_\beta = \sqrt{3}I \sin(\omega t + \phi_I) \quad (15)$$

Assim (10) e (11) podem ser reescritas substituindo-se  $v_\alpha$ ,  $v_\beta$ ,  $i_\alpha$  e  $i_\beta$ , (12) a (15), respectivamente, obtendo (16) e (17).

$$\mathbf{v} = \sqrt{3}V e^{j(\omega t + \phi_V)} \quad (16)$$

$$\mathbf{i} = \sqrt{3}I e^{j(\omega t + \phi_I)} \quad (17)$$

Deste modo, para determinar que as coordenadas  $abc$  são correspondentes em velocidade angular  $\omega$  e sentido de rotação será desenvolvido um cálculo analítico que relaciona os vetores representativos de cada sequência,  $abc$  e  $\alpha\beta$ , por meio de uma constante, isto é, não há alteração no sentido de rotação das componentes e na velocidade angular das mesmas. Assim, (18) representa o vetor de sequência  $abc$ .

$$\mathbf{v}_{abc} = v_a e^{j0} + v_b e^{j\left(\frac{2\pi}{3}\right)} + v_c e^{-j\left(\frac{2\pi}{3}\right)} \quad (18)$$

Substituindo (1), (2) e (3) em (18), tem-se (19).

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{abc} &= \frac{3\sqrt{2}}{2}V \left[ \cos(\omega t + \phi_V) + j \left( \sin(\omega t + \phi_V) \right) \right] = \\ &= \frac{3\sqrt{2}}{2}V e^{j(\omega t + \phi_V)} \end{aligned} \quad (19)$$

Rearranjando matematicamente os termos de (19) e substituindo (16) em (19) tem-se (20).

$$\mathbf{v} = \sqrt{\frac{2}{3}} \mathbf{v}_{abc} \quad (20)$$

Portanto, (20) determina que ambas as coordenadas,  $abc$  e  $\alpha\beta$ , rotacionam na mesma velocidade angular e no sentido horário de giro, permitindo assim, uma atuação síncrona das duas sequências de fase. Uma vez compreendida a relação entre as sequências de fase, é relevante especificar também como cada uma trata as componentes de potência elétrica instantânea. Como a Transformada de Clarke é invariante em potência, o cálculo da potência trifásica instantânea é dado como mostra (21).

$$p_{3\phi} = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \quad (21)$$

## 2.2 TEORIA PQ PARA TEORIA DA POTÊNCIA INSTANTÂNEA

Após compreender a participação da teoria da potência instantânea, assim como o papel da Transformada de Clarke no cálculo de potência, é relevante apontar como estes conceitos físico-matemáticos se completam para construir a Teoria PQ, base fundamental para a metodologia de corrente senoidal.

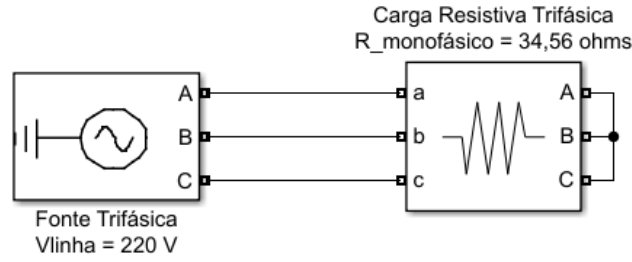
Deste modo, assumindo um sistema trifásico a três fios, como indicam as componentes vetoriais de tensão e corrente apresentadas em (10) e (11), a potência complexa vetorial pode ser calculada de acordo com (22).

$$\begin{aligned}\mathbf{s} &= \mathbf{v} \cdot \mathbf{i}^* = (v_\alpha + jv_\beta) \cdot (i_\alpha + ji_\beta)^* = \\ &= (v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) + j(v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta) = \\ &= p + jq\end{aligned}\tag{22}$$

Em (22) são determinadas duas componentes de potência, potência instantânea real  $p$  e potência instantânea imaginária  $q$  e isto possibilita uma representação matricial de (22), exposta em (23).

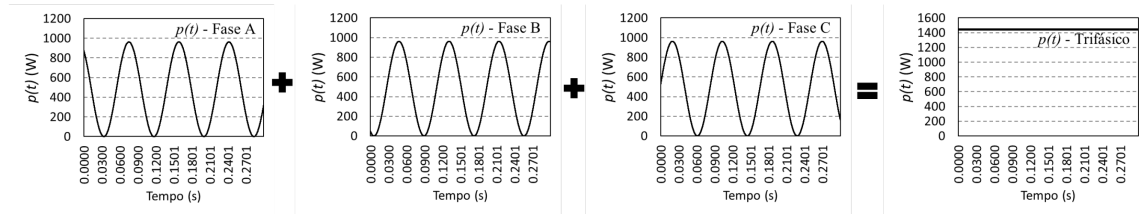
$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}\tag{23}$$

Em condições ideais, ou seja, para tensão e corrente perfeitamente senoidais e equilibradas, as componentes instantâneas real e imaginária de potência são numericamente iguais e possuem mesmo significado físico das componentes de potência ativa e reativa da teoria clássica. A Figura 2 mostra um circuito trifásico alimentando uma carga puramente resistiva trifásica. Assim, calculando-se as componentes de potência apresentadas em (23), tem-se que  $p$  é 1400 W e  $q$  é 0 var, uma vez que a carga é puramente resistiva.



**Figura 2.** Circuito Trifásico com Carga Puramente Resistiva

Tais formas de onda se assemelham às componentes de potência ativa e reativa da teoria clássica (Figura 3), uma vez que estas estão sendo avaliadas em condições de tensão e corrente livres de distúrbios.



**Figura 3.** Potência total instantânea calculada pela Teoria Clássica de Potência.

Entretanto, uma vez que algumas das grandezas elétricas apresentam algum distúrbio, isto é, distorções harmônicas ou desequilíbrios, o comportamento das componentes de potência instantânea se altera. Este fenômeno é determinado como componentes de potência média e oscilante.

### 2.2.1 TEORIA PQ PARA CONDIÇÕES NÃO IDEAIS

Considerando as correntes como mostram (24), (25) e (26), isto é, em condições não-senoidais, a Teoria PQ determina uma abordagem diferente para as potências calculadas [2].

$$i_a(t) = \sqrt{2}I_a \sin(\omega t + \phi_{I_a}) + \sum_{h=2}^N \sqrt{2}I_{h_a} \sin(h\omega t + \phi_{I_{h_a}}) \quad (24)$$

$$i_b(t) = \sqrt{2}I_b \sin(\omega t + \phi_{I_b}) + \sum_{h=2}^N \sqrt{2}I_{h_b} \sin(h\omega t + \phi_{I_{h_b}}) \quad (25)$$



$$i_c(t) = \sqrt{2}I_c \sin(\omega t + \phi_{I_c}) + \sum_{h=2}^N \sqrt{2}I_{h_c} \sin(h\omega t + \phi_{I_{h_c}}) \quad (26)$$

Em que:

$V_h$  – magnitude da tensão harmônica de ordem  $h$  em [V]

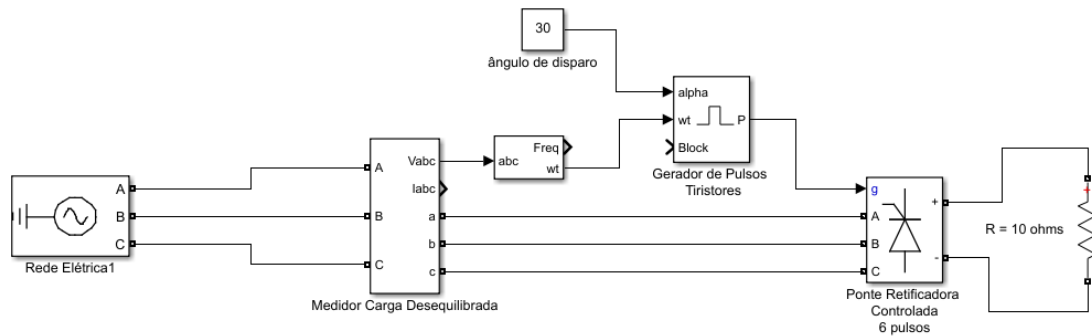
$I_h$  – magnitude da corrente harmônica de ordem  $h$  em [A]

$h$  – ordem harmônica

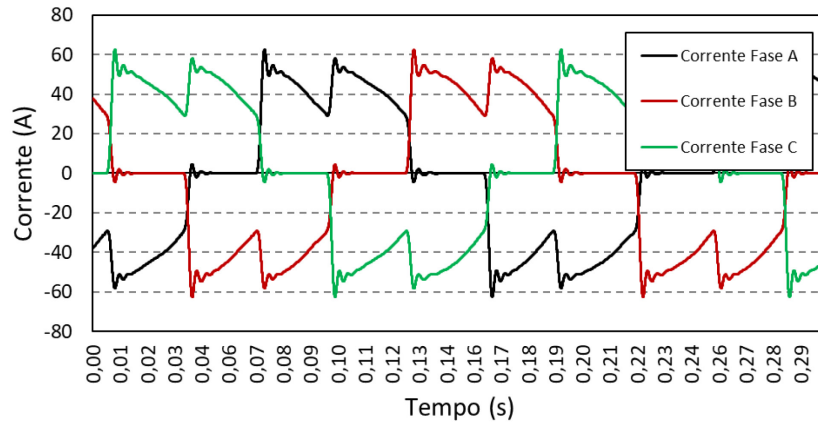
$\phi_{V_h}$  – ângulo de fase da tensão de ordem harmônica  $h$  [°]

$\phi_{I_h}$  – ângulo de fase da corrente de ordem harmônica  $h$  [°]

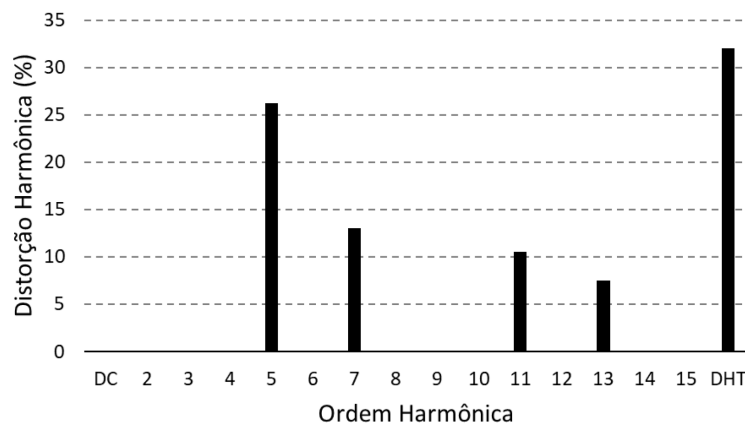
Assim, utilizando-se das tensões em (1), (2) e (3), juntamente com (24), (25) e (26), realizando a transformada como mostra (8) e aplicando tais valores em (23), tem-se, novamente os valores de  $p$  e  $q$  como determina a Teoria PQ. A fim de especificar as características da forma de onda da potência para esta condição não ideal foi realizado o teste com um retificador controlado com ângulo de disparo em  $\alpha = 30^\circ$ . Desta forma a Figura 4 mostra o circuito simulado, com fonte trifásica senoidal equilibrada e  $V_{an} = 127$  V e carga  $R = 10 \Omega$ , enquanto a Figura 5 esboça a forma de onda de corrente na carga. Por fim, a Figura 6 determina o espectro harmônico da mesma.



**Figura 4.** Circuito para simulação de condição não-senoidal da carga.

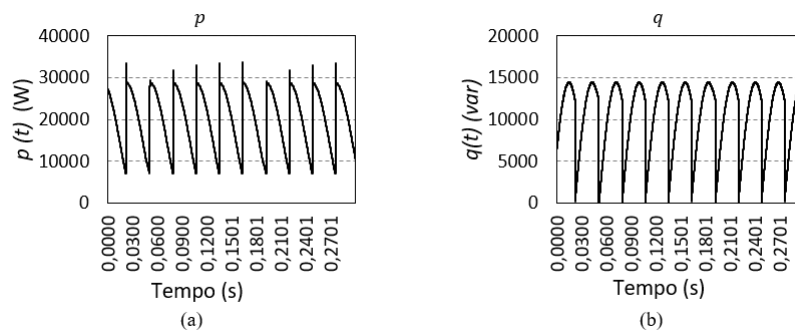


**Figura 5.** Formas de onda de corrente para um retificador controlado.



**Figura 6.** Espectro harmônico da corrente de carga.

Por fim, a Figura 7 mostra as componentes de potência real ( $p$ ) e imaginária ( $q$ ), calculadas de acordo com (23) nas condições discutidas.



**Figura 7.** Forma de onda instantânea da potência (a) real e (b) imaginária calculada por (24).

Sabendo que as componentes de potência real em um sistema trifásico equilibrado são representadas por apenas um valor médio, é observado na Figura 7, por outro lado,

que em um sistema trifásico com carga não linear, a potência instantânea real e imaginária possuem componentes oscilatórias nas formas de onda e, ainda, uma componente de valor médio. Deste modo, as expressões em (23) podem ser segregadas em valores médios e oscilatórios. Assim, reescrevendo (23) em (27), tem-se a abordagem característica da Teoria PQ.

$$\begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (27)$$

Em que:

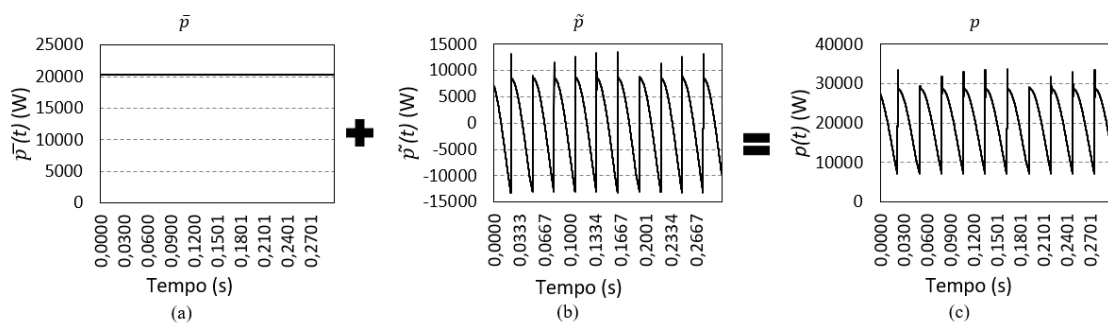
$\bar{p}$  - potência real instantânea média [W]

$\tilde{p}$  - potência real instantânea oscilante [W]

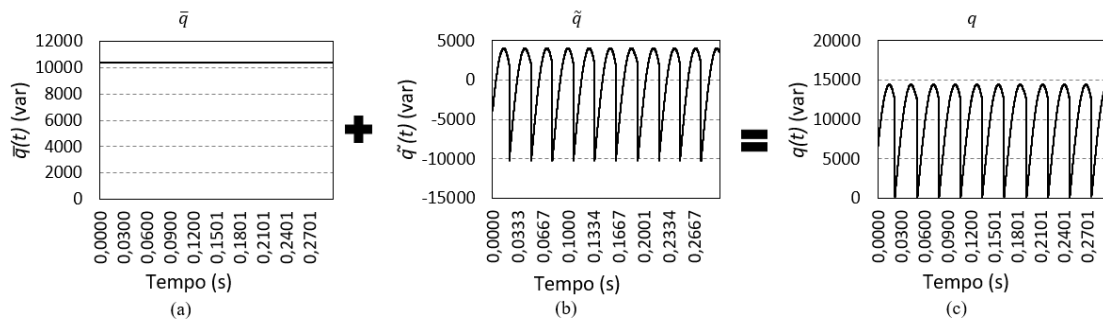
$\bar{q}$  - potência imaginária média [var]

$\tilde{q}$  - potência imaginária oscilante [var]

Estas componentes de valores médios e oscilatórios representam, fisicamente, características que possibilitam a determinação de alguns fenômenos que podem estar presentes no sistema em análise. Em vista disso, as formas de onda esboçadas na Figura 7 foram discriminadas em componentes de potência média e oscilante, tanto para a parte real como para imaginária, as Figura 8 e 9 mostram as respectivas formas de onda.



**Figura 8.** Componentes de (a) valor médio e (b) oscilante para (c) potência instantânea real



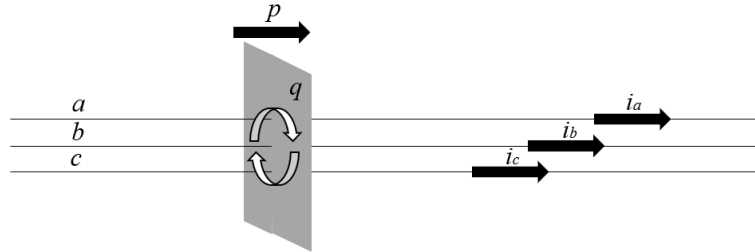
**Figura 9.** Componentes de (a) valor médio e (b) oscilante para (c) potência instantânea imaginária.

Conforme a teoria de potência clássica, as componentes de potência que apresentam apenas valor médio, isto é, a potência real média é equivalente à potência ativa trifásica  $\bar{p}$ , enquanto a potência imaginária média  $\bar{q}$  é equivalente à potência reativa trifásica. Ou seja, qualquer demanda de grandezas elétricas compostas de elementos senoidais e equilibrados são representados por componentes de potência em valor médio, uma vez que potência real  $\bar{p}$  e imaginária  $\bar{q}$  média possuem as mesmas propriedades físicas e matemáticas das componentes de potência ativa e reativa trifásica. Em outras palavras, a potência instantânea real média  $\bar{p}$  reflete o trabalho útil das componentes elétricas senoidais e equilibradas para o processo de conversão de energia na carga elétrica. Enquanto, a potência instantânea imaginária média  $\bar{q}$  reproduz a quantidade de energia para manutenção dos campos elétricos e magnéticos necessária para realização do processo de conversão de energia em trabalho pela carga elétrica.

Os termos oscilantes das componentes de potência simbolizam o gasto energético proveniente de distúrbios na rede elétrica, isto é, em condições não-ideais, ou seja, distorções harmônicas ou desequilíbrios em redes trifásicas a três fios. A potência instantânea real oscilante  $\tilde{p}$  tem como significado físico e matemático a contabilização da quantidade de energia despendida para suprir as demandas provenientes de distúrbios elétricos. Enquanto a potência instantânea imaginária oscilante  $\tilde{q}$  significa o gasto em energia eletromagnética para suprir as demandas dos campos elétricos e magnéticos provenientes dos distúrbios elétricos.

Desta forma, como é observado nas Figuras 8 e 9, as componentes  $\tilde{p}$  e  $\tilde{q}$  apenas surgem quando há distúrbios nas grandezas elétricas, distorções harmônicas ou desequilíbrios nas formas de onda de tensão e/ou corrente trifásicas, onde a determinação de análise é sempre trifásica, visto que a Transformada de Clarke possibilita uma análise trifásica em unidade. Outro aspecto relevante é o significado físico das potências instantâneas real e imaginária. A potência instantânea real  $p$  significa toda a energia que

flui nas fases do sistema elétrico entre fonte e carga, enquanto a potência instantânea imaginária  $q$  significa toda a energia instantânea trocada entre fases sem transferência energética, como aponta [4]. A Figura 10 ilustra o significado físico das potências instantâneas.



**Figura 10.** Significado físico das potências instantâneas real e imaginária

### 2.2.2 CORRENTES DE COMPENSAÇÃO DE ACORDO COM TEORIA PQ

Para a realização da filtragem ativa de distúrbios elétricos presentes no sistema é necessário o entendimento da Teoria PQ, como está sendo apresentado neste item. Entretanto, não apenas a compreensão acerca da abordagem teórica, mas também a aplicabilidade da mesma para solução de problemas reais do sistema elétrico se faz necessário. Tendo em vista tal contexto, este subitem visa determinar a aplicação da Teoria PQ para o desenvolvimento do cálculo das correntes de compensação a serem sintetizadas pelo filtro ativo, possibilitando redução no impacto das distorções harmônicas e desequilíbrios nas tensões e correntes.

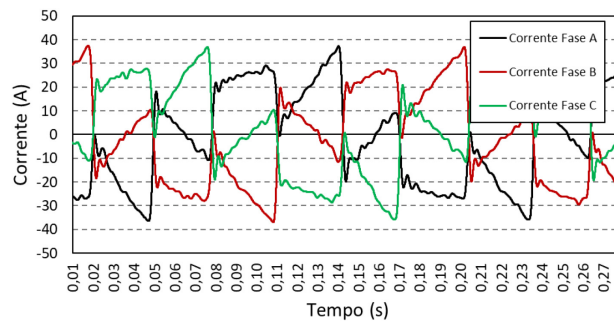
Assim, para determinar correntes de compensação, ou seja, correntes elétricas capazes de atenuar perturbações elétricas, utiliza-se de um rearranjo matemático de (27) apresentado em (28) [2].

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_{\alpha_{compensação}} \\ i_{\beta_{compensação}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} i_{\alpha_{compensação}} \\ i_{\beta_{compensação}} \end{bmatrix} &= \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (28)$$

Como as componentes de potência da Teoria PQ que contemplam os distúrbios da rede são as oscilantes, utiliza-se destas para calcular as correntes  $i_{\alpha}^*$  e  $i_{\beta}^*$  de compensação. Estas correntes serão sintetizadas por um filtro ativo, por meio de comando do controle

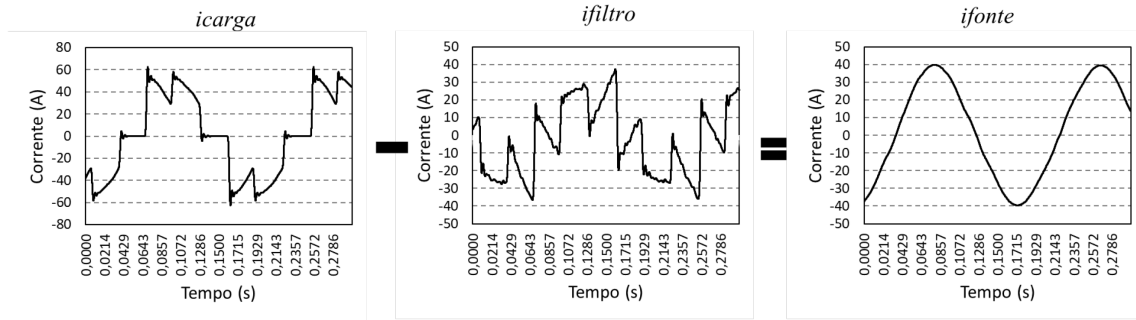
no acionamento das chaves da ponte inversora trifásica de IGBTs. Assim, além das componentes oscilantes  $\tilde{p}$  e  $\tilde{q}$ , também é realizada a compensação de componentes reativas por meio de  $\bar{q}$ , pois esta componente representa a demanda de energia reativa na componente fundamental, proporcionando, portanto, correção no fator de potência, quando necessário.

A fim de exemplificar tal explanação, utiliza-se do caso já discutido do retificador controlado com ângulo de disparo  $\alpha = 30^\circ$ , como mostrado nas Figuras 4, 5 e 6. Neste caso, foi constatado que as componentes harmônicas presentes no espectro da corrente de carga promovem o surgimento de componentes oscilantes no cálculo de potência pela Teoria PQ, de acordo com (27) e (28). Desta forma, calculando as correntes de compensação como mostra (28) e aplicando a Transformada Inversa de Clarke, como em (9), tem-se as correntes de compensação em componentes  $abc$ . A Figura 11 mostra a forma de onda das correntes de compensação.



**Figura 11.** Forma de onda das correntes de compensação calculadas conforme (28), com sequência abc.

Neste contexto, a soma algébrica entre as correntes de compensação com as correntes demandadas pela carga deve determinar uma forma de onda senoidal e equilibrada na corrente da fonte, acarretando na atenuação de distúrbios harmônicos no sistema elétrico de potência, devido à aplicação da metodologia sugerida. Adicionalmente, a Figura 12 explicita a soma algébrica das correntes, com o intuito de determinar que, de fato, o cálculo proposto por [4] e expresso em (28) caracteriza a teoria necessária para uma das metodologias de filtragem ativa de distúrbios elétricos.



**Figura 12.** Soma algébrica das correntes (a) da carga e (b) de compensação resultando na (c) corrente da fonte

Deste modo, a aplicabilidade da Teoria PQ para a metodologia de corrente senoidal a ser implementada no filtro ativo se torna mais clara, permitindo a melhor compreensão do leitor acerca do tema, assim, no subitem seguinte, é abordado também o conceito teórico essencial para o entendimento do procedimento de cálculo das correntes de compensação pela metodologia de minimização das correntes de carga.

### 2.3 MINIMIZAÇÃO DAS CORRENTES DA CARGA

A teoria de minimização das correntes de carga é o alicerce da metodologia de atenuação de distúrbios elétricos que prioriza o fator de potência unitário [3]. Deste modo, diminuir a magnitude da corrente não ativa, até sua contribuição ser aproximadamente nula, é um dos objetivos desta abordagem, promovendo um uso mais eficiente da rede elétrica. Assim, assumindo que toda corrente elétrica é composta por duas parcelas, uma ativa ( $i_{ativo}$ ) e outra não ativa ( $i_{não-ativo}$ ), podem-se determinar algumas considerações. De princípio, determina-se (29), [2], [3] e [28].

$$i_k = i_{ativo_k} + i_{não-ativo_k} \quad (29)$$

A partir de (29) são utilizados os Multiplicadores de Lagrange [28] para o cálculo das componentes de corrente não-ativas minimizadas. Para isto, o método de minimização requer duas condições, a primeira consiste em uma função com as variáveis a serem minimizadas, enquanto a segunda determina uma função de restrição para o método. Neste caso, a função a ser minimizada é representada por  $L(i_{qa}, i_{qb}, i_{qc})$  e a função de restrição é dada por  $g(i_{qa}, i_{qb}, i_{qc})$ , lembrando que  $i_{não-ativo}$  é representado por  $i_q$  nas equações (30) e (31).

$$L(i_{qa}, i_{qb}, i_{qc}) = (i_a - i_{qa})^2 + (i_b - i_{qb})^2 + (i_c - i_{qc})^2 \quad (30)$$

$$g(i_{qa}, i_{qb}, i_{qc}) = v_a i_{qa} + v_b i_{qb} + v_c i_{qc} = 0 \quad (31)$$

Ainda, o método de Lagrange determina a lei apresentada em (32) para a minimização da função  $L(i_{qa}, i_{qb}, i_{qc})$  nas correntes não-ativas da carga.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial L(x_1, \dots, x_m)}{\partial x_1} = \lambda \frac{\partial g(x_1, \dots, x_m)}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial L(x_1, \dots, x_m)}{\partial x_m} = \lambda \frac{\partial g(x_1, \dots, x_m)}{\partial x_m} \\ g(x_1, \dots, x_m) = 0 \end{array} \right. \quad (32)$$

Em outras palavras, a derivada parcial da função a ser minimizada deve sempre ser proporcional à derivada parcial da função restrição e a função restrição igualada a zero compõe a última equação para criar um sistema linear solucionável. Deste modo, para as condições desejadas à aplicação deste artifício matemático para o sistema elétrico, tem-se que as derivadas parciais de (30) e (31) são apresentadas em (33), (34), (35), (36), (37) e (38).

$$\frac{\partial L(i_{qa}, i_{qb}, i_{qc})}{\partial i_{qa}} = 2i_{qa} - 2i_a \quad (33)$$

$$\frac{\partial L(i_{qa}, i_{qb}, i_{qc})}{\partial i_{qb}} = 2i_{qb} - 2i_b \quad (34)$$

$$\frac{\partial L(i_{qa}, i_{qb}, i_{qc})}{\partial i_{qc}} = 2i_{qc} - 2i_c \quad (35)$$

$$\frac{\partial g(i_{qa}, i_{qb}, i_{qc})}{\partial i_{qa}} = \lambda v_a \quad (36)$$



$$\frac{\partial g(i_{qa}, i_{qb}, i_{qc})}{\partial i_{qb}} = \lambda v_b \quad (37)$$

$$\frac{\partial g(i_{qa}, i_{qb}, i_{qc})}{\partial i_{qc}} = \lambda v_c \quad (38)$$

Assim, tem-se o sistema linear em.

$$\begin{bmatrix} 2i_a \\ 2i_b \\ 2i_c \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & v_a \\ 0 & 2 & 0 & v_b \\ 0 & 0 & 2 & v_c \\ v_a & v_b & v_c & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qa} \\ i_{qb} \\ i_{qc} \\ \lambda \end{bmatrix} \quad (39)$$

Sabendo que  $\lambda$  é um escalar e, portanto, pode agregar o sinal negativo ao seu valor, enquanto permanecer como uma incógnita, (39) é determinada com valores positivos em todos os itens do sistema linear. Solucionando o sistema para  $\lambda$ , tem-se (40).

$$\lambda = \frac{2(v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c)}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} = \frac{2p_{3\phi}}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \quad (40)$$

Substituindo (40) em (39) as correntes não-ativas são encontradas, como mostra (41).

$$\begin{bmatrix} i_{qa} \\ i_{qb} \\ i_{qc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \frac{p_{3\phi}}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (41)$$

Por fim, sabendo que  $i_k - i_{qk} = i_{pk}$ , sendo  $k = a, b, c$  tem-se (42).

$$\begin{bmatrix} i_{pa} \\ i_{pb} \\ i_{pc} \end{bmatrix} = \frac{p_{3\phi}}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (42)$$

Assim como já discutido, a  $p_{3\phi}$  assume valor constante e  $v_a^2 + v_b^2 + v_c^2$  são tensões agregadas que também admitem valor constante, então a divisão  $\frac{p_{3\phi}}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2}$  é um valor constante e possibilita afirmar que as correntes ativas  $i_{pa}$ ,  $i_{pb}$  e  $i_{pc}$  são proporcionais às tensões de fase na fonte. Por consequência, com corrente e tensão proporcional é correto

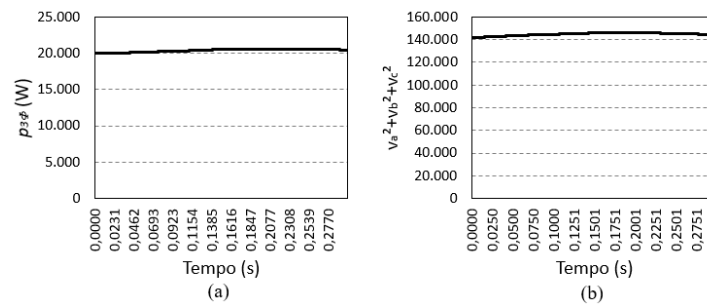
afirmar que a relação entre essas grandezas elétricas é linear e a constante que determina proporcionalidade entre tensão e corrente, como aponta (40) pode ser denominada condutância equivalente  $G_e$ . Reescrevendo (42), tem-se a expressão em grandezas elétricas em (43).

$$\begin{bmatrix} i_{pa} \\ i_{pb} \\ i_{pc} \end{bmatrix} = G_e \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (43)$$

Sendo coerente afirmar que, portanto, a expressão matemática regente de  $G_e$  é mostrada em (44).

$$G_e = \frac{p_{3\phi}}{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \quad (44)$$

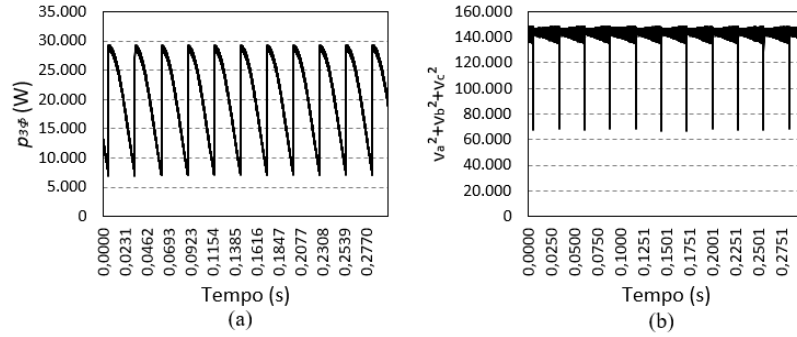
Analisando o comportamento de  $G_e$  para diferentes condições de operação, isto é, condição ideal, com tensões e correntes senoidais e equilibradas, e condições não ideais, com tensões e correntes não-senoidais e/ou desequilibradas tem-se que a condutância equivalente é constante, garantindo a linearidade entre tensão e corrente de fase, como indica a Figura 13. Comportamento de (a)  $p_{3\phi}$  e (b) tensões agregadas para condições ideais, especificando constância para os parâmetros de cálculo de  $G_e$ .



**Figura 13.** Comportamento de (a)  $p_{3\phi}$  e (b) tensões agregadas para condições ideais

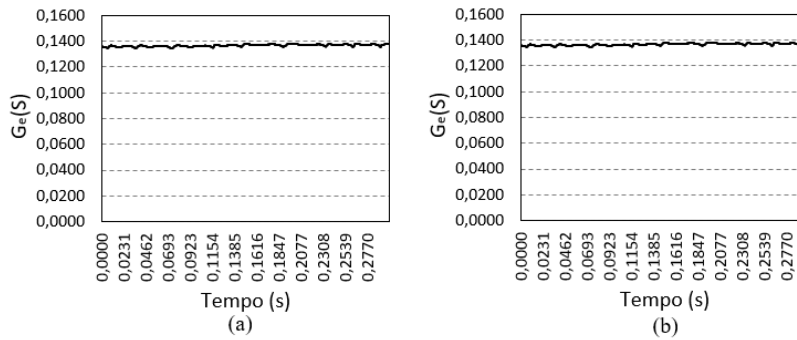
Para condições não ideais de correntes, isto é, com o sistema elétrico alimentando a mesma carga não-linear apresentada nas Figuras 4, 5 e 6, tem-se a potência instantânea trifásica e tensões agregadas como mostra a Figura 14. Analisando o comportamento ao longo do tempo de cada termo, é observado que em casos de distúrbios, tanto  $p_{3\phi}$  quanto  $v_a^2 + v_b^2 + v_c^2$ , apresentaram sintomas dos fenômenos elétricos inseridos, uma vez que não

permanecem mais como variáveis com valores constantes, como é visto na Figura 13. Com a inserção de uma carga que determina conteúdo harmônico na corrente do sistema elétrico, as grandezas elétricas utilizadas para calcular  $G_e$  deixam de ser constantes e se tornam oscilantes.



**Figura 14.** Comportamento de (a)  $p_{3\phi}$  e (b) tensões agregadas para condições não ideais

No entanto, a Figura 15 mostra o comportamento de  $G_e$  para as duas condições de operação e, como é observado, ambas situações promovem condutância constante, acarretando assim na corrente como uma réplica proporcional da forma de onda da tensão do sistema elétrico.

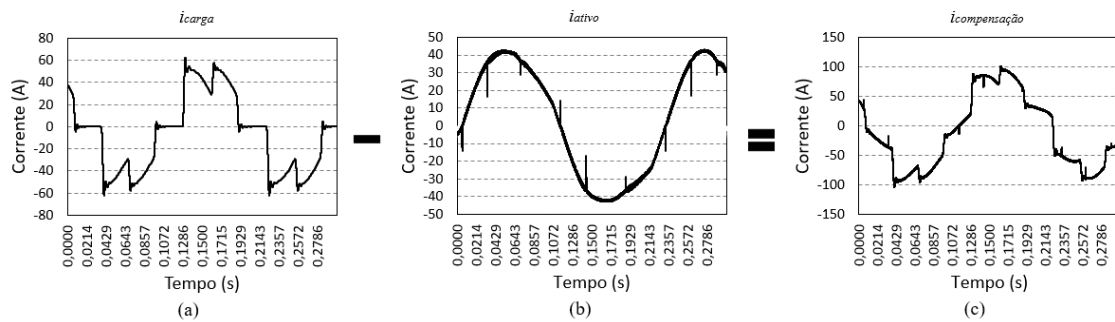


**Figura 15.** Comportamento de  $G_e$  para (a) condições ideais e (b) condições não ideais

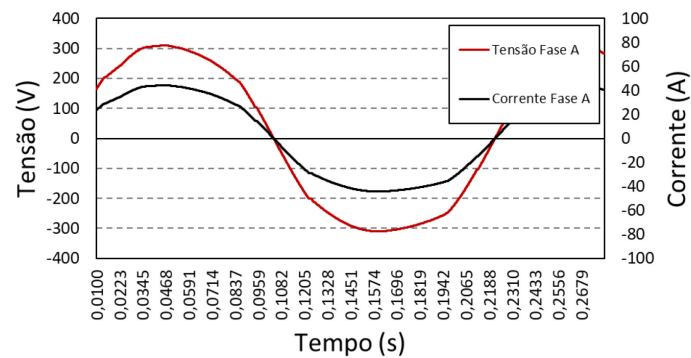
Assim, com a análise do comportamento da condutância em ambas situações, é possível calcular as correntes ativas da carga, isto é, as correntes apresentadas em (42). Das correntes ativas, calculam-se as formas de onda de corrente que devem ser injetadas no ponto de acoplamento da carga, para que, por meio da Lei de Kirchhoff das Correntes (LKC) no nó, ocorra a compensação. Em termos matemáticos, (45) determina quais as correntes de compensação desta metodologia de atuação para o filtro ativo. A ideia é determinar todas as componentes não ativas da corrente da carga na corrente de

compensação, uma vez que, quando aplicada a LKC, no ponto de acoplamento da carga com a corrente sintetizada pelo filtro, restará apenas a componente ativa da corrente, sendo esta a réplica perfeita da forma de onda da tensão. A Figura 16 mostra, no caso de carga não-linear, como (45) calcula a forma de onda da corrente de compensação. Com a corrente de compensação calculada ( $i_{compensação}$ ), é observado que a corrente de linha ( $i_{fonte}$ ) é senoidal e em fase com a tensão, como esperado. A Figura 17 esboça a forma de onda da corrente da fonte livre de distúrbios elétricos e em fase com a tensão, corroborando o fato de, para o sistema elétrico, após a atuação da corrente de compensação, a carga se comportar como linear, visto que a condutância equivalente é um valor constante.

$$i_{compensação_k} = i_{carga_k} - i_{ativo_k} \quad (45)$$



**Figura 16.** Representação gráfica de (45), em que (a) corrente de carga, (b) corrente ativa e (c) corrente de compensação são esboçadas



**Figura 17.** Formas de onda da tensão e corrente na Fase A

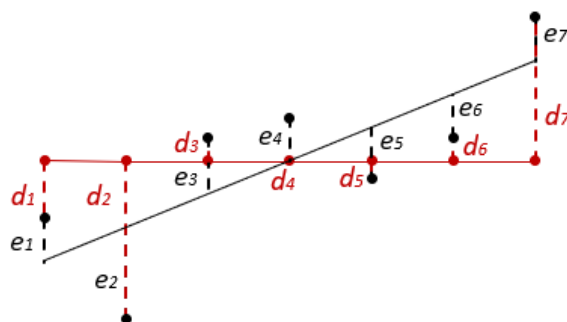
Portanto, a explanação da teoria de minimização das correntes de carga possibilita a compreensão dos aspectos matemáticos acerca do cálculo das correntes de compensação a serem sintetizadas pelo filtro ativo, assim como o impacto que a inserção desta corrente tem no sistema de distribuição, uma vez que essa metodologia determina fator de potência unitário no terminal de conexão da carga na rede elétrica. Tendo isto em vista, é importante abordar também o coeficiente de correlação de Pearson, o qual quantifica a

correspondência da curva de tensão vs corrente com uma reta, determinando, portanto, a metodologia que especifica melhor linearidade para a carga após a atuação do filtro. Esta ferramenta matemática é explicada no subitem seguinte.

## 2.4 COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE PEARSON

Como indicado anteriormente, o Coeficiente de Correlação de Pearson compreende uma ferramenta de grande utilidade para a quantificação matemática da linearidade existente entre a tensão e a corrente instantânea durante a operação do filtro ativo. Este coeficiente expressa a quantidade de amostras que está em conformidade com uma reta linear por meio do cálculo dos erros quadráticos entre as amostras e a regressão linear calculada e o valor médio da regressão. Em outras palavras, o coeficiente busca determinar como o modelo de regressão linear se adequa ao representar as amostras disponíveis.

A fim de caracterizar a quantidade de amostras descritas pela regressão linear, isto é, determinar como o modelo de regressão é representativo das amostras, são calculadas os erros quadráticos entre o valor da amostra até o valor apontado pela reta da regressão linear e o valor médio da regressão, como ilustra a Figura 18. Os pontos em preto demonstram as amostras a serem representadas pela reta de regressão, esboçada pela reta preta. Ainda, as distâncias das amostras até a reta de regressão são pontilhadas e especificadas como  $e_1, \dots, e_7$ . Por outro lado, a reta de valor médio das amostras é representada pela reta vermelha, assim como os pontos vermelhos são representações do local em que é determinada a distância das amostras até seu valor médio, especificadas como  $d_1, \dots, d_7$ .



**Figura 18.** Cálculo dos erros quadráticos para determinação do Coeficiente de Pearson

Para o caso especificado na Figura 18, a determinação da variação dos valores das amostras descrita pela regressão é calculada por meio da razão entre o erro quadrático das

amostras entre a regressão e o erro quadrático das amostras entre o valor médio, assim mostra (46). O cálculo dos erros determina o quanto as amostras não estão em conformidade com a regressão, uma vez que quanto maior os erros quadráticos, mais distantes estão as amostras da reta, entretanto, para erros quadráticos irrisórios o indicativo de que as amostras estão próximas o suficiente da função de regressão é legítimo.

$$R^2 = 1 - \frac{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + e_4^2 + e_5^2 + e_6^2 + e_7^2}{d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + d_4^2 + d_5^2 + d_6^2 + d_7^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^7 e_i^2}{\sum_{i=1}^7 d_i^2} \quad (46)$$

Assim, considerando um caso com  $n$  amostras, ou seja, generalizando o caso indicado pela Figura 18 e (46) e reescrevendo os erros  $e_i$  e  $d_i$ , como indica (47) e (48), pode-se determinar o coeficiente em (49). Lembrando que a função de regressão linear é  $y(x) = ax+b$ , onde  $x$  representa a variável independente.

$$e_i = [y(x_i) - y_i]^2 \quad (47)$$

$$d_i = (\bar{y} - y_i)^2 \quad (48)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [y(x_i) - y_i]^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_i)^2} \quad (49)$$

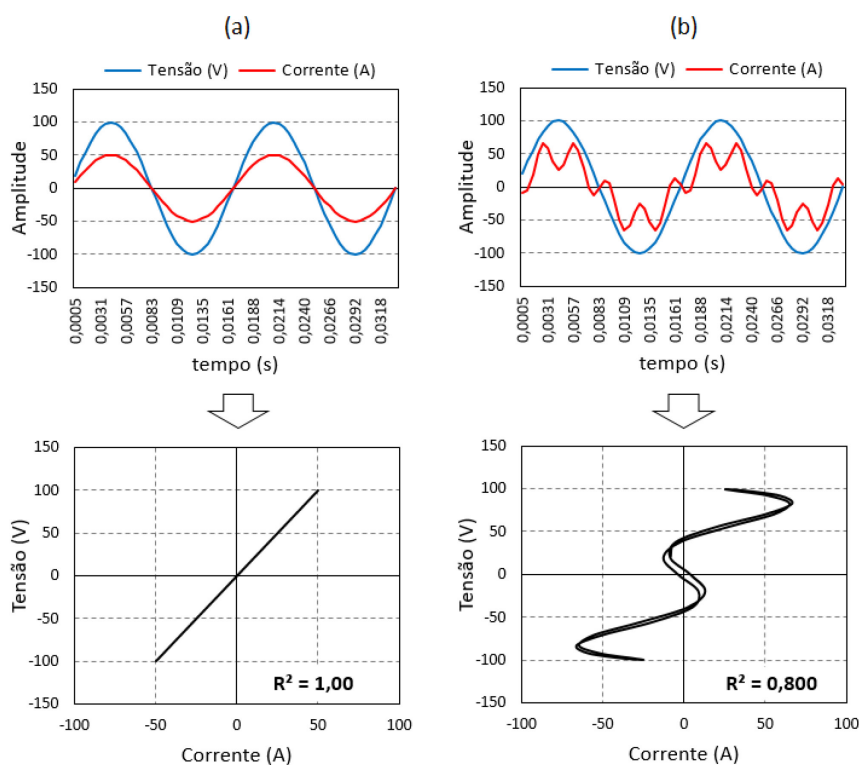
Em que:

$y(x_i)$  – valor da amostra na reta de regressão linear

$y_i$  – valor da amostra

$\bar{y}$  – valor médio das amostras

Para interpretar este coeficiente tem-se que para  $R^2$  próximo de 1, o modelo de regressão utilizado está em bastante conformidade com as amostras, enquanto para  $R^2$  próximo de 0, o modelo de regressão utilizado não está em conformidade com as amostras determinando não representatividade destas na função. Portanto, esta ferramenta matemática permite quantificar a linearidade existente entre a tensão e a corrente de linha associada a uma determinada carga. A Figura 19 ilustra a aplicação do Coeficiente de Correção de Pearson ( $R^2$ ) na quantificação da linearidade existente entre dois conjuntos distintos de formas de onda de tensão e corrente.



**Figura 19.** Exemplo da aplicação do Coeficiente de Correlação de Pearson para quantificação da linearidade entre sinais instantâneos de tensão e corrente.

Não apenas o coeficiente de correlação de Pearson, mas também as definições de potência elétrica discutidas em [26] são de grande valia para especificar a característica de uso da rede de distribuição de energia elétrica. Tendo isto em vista, no subitem seguinte serão abordados alguns conceitos importantes acerca do significado físico-matemático de cada uma das componentes da potência elétrica.

## 2.5 DEFINIÇÕES DE POTÊNCIA ELÉTRICA SOB CONDIÇÕES SENOIDAIS, NÃO SENOIDAIS, EQUILBRADAS E DESEQUILBRADAS.

Como mencionado previamente, as definições de potência, para análise da medição de potência monofásica em condições ideais e não ideais de operação do sistema elétrico, apresentadas no procedimento da IEEE 1459 [26], especificam componentes de potência que expressam como cada distúrbio presente na rede elétrica impacta o uso do sistema de distribuição de energia. Deste modo, para o estudo a ser realizado acerca de como cada metodologia abordada neste trabalho desempenha uso eficiente do sistema elétrico, neste item serão discutidas as definições de [26] com o intuito de compreender suas particularidades, pois posteriormente estas serão utilizadas.

Assim, partindo do entendimento que correntes e tensões trifásicas são determinadas por (24), (25) e (26) e (50), (51) e (52) respectivamente, pode-se calcular a potência instantânea monofásica  $p_{1\phi}(t)$ , como mostra (53), sendo  $k = a, b, c$ .

$$v_a(t) = \sqrt{2}V_a \sin(\omega t + \phi_{V_a}) + \sum_{h=2}^N \sqrt{2}V_{h_a} \sin(h\omega t + \phi_{V_{h_a}}) \quad (50)$$

$$v_b(t) = \sqrt{2}V_b \sin(\omega t + \phi_{V_b}) + \sum_{h=2}^N \sqrt{2}V_{h_b} \sin(h\omega t + \phi_{V_{h_b}}) \quad (51)$$

$$v_c(t) = \sqrt{2}V_c \sin(\omega t + \phi_{V_c}) + \sum_{h=2}^N \sqrt{2}V_{h_c} \sin(h\omega t + \phi_{V_{h_c}}) \quad (52)$$

$$p_{1\phi_k}(t) = v_k(t) \times i_k(t) \quad (53)$$

Com o intuito de facilitar o desenvolvimento matemático das definições de potência, serão calculados tais componentes sem determinação de qual fase está sendo calculada, visto que os procedimentos matemáticos são exatamente os mesmos, alterando apenas quais os valores de fase sendo utilizados. Assim, reescrevendo (53), tem-se (54).

$$p_{1\phi}(t) = \left( \sqrt{2}V \sin(\omega t + \phi_V) + \sum_{h=2}^N \sqrt{2}V_h \sin(h\omega t + \phi_{V_h}) \right) \times \left( \sqrt{2}I \sin(\omega t + \phi_I) + \sum_{h=2}^N \sqrt{2}I_h \sin(h\omega t + \phi_{I_h}) \right) \quad (54)$$

Realizando a propriedade distributiva em (54), tem-se (55).

$$\begin{aligned} p_{1\phi}(t) = & \sqrt{2}V \sin(\omega t + \phi_V) \times \sqrt{2}I \sin(\omega t + \phi_I) + \\ & + \sqrt{2}V \sin(\omega t + \phi_V) \times \sum_{h=2}^N \sqrt{2}I_h \sin(h\omega t + \phi_{I_h}) + \\ & + \sum_{h=2}^N \sqrt{2}V_h \sin(h\omega t + \phi_{V_h}) \times \sqrt{2}I \sin(\omega t + \phi_I) + \\ & + \sum_{h=2}^N \sqrt{2}V_h \sin(h\omega t + \phi_{V_h}) \times \sum_{h=2}^N \sqrt{2}I_h \sin(h\omega t + \phi_{I_h}) \end{aligned} \quad (55)$$

Calculando-se o valor médio de (55) e segregando componentes de mesma ordem harmônica em potências ativas e reativas, isto é, para todos os produtos entre tensões e



correntes de mesma ordem harmônica distinguir as componentes em ativa e reativa, como mostra (56).

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{T} \int_0^T p_{1\phi}(t) dt = & \underbrace{VI \cos(\phi_V - \phi_I)}_{P_1} + \underbrace{VI \sin(\phi_V - \phi_I)}_{Q_1} + \\
 & + \underbrace{V \left( \sum_{h=2}^N I_h \right)}_{D_i} + \underbrace{\left( \sum_{h=2}^N V_h \right) I}_{D_v} + \\
 & + \underbrace{V_h I_h \cos(\phi_{V_h} - \phi_{I_h})}_{P_h} + \\
 & + \underbrace{V_h I_h \sin(\phi_{V_h} - \phi_{I_h})}_{Q_h}
 \end{aligned} \tag{56}$$

De (56), tem-se:

$P_1$  – potência ativa fundamental (W);

$Q_1$  – potência reativa fundamental (var);

$S_1$  – potência aparente fundamental,  $\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}$  (VA);

$D_i$  – potência de distorção harmônica de corrente (var);

$D_v$  – potência de distorção harmônica de tensão (var);

$P_h$  – potência ativa harmônica (W);

$Q_h$  – potência reativa harmônica (var);

$S_h$  – potência aparente harmônica,  $\sqrt{P_h^2 + Q_h^2}$  (VA);

$S_n$  – potência aparente de distorção,  $\sqrt{D_i^2 + D_v^2 + S_h^2}$  (VA);

$P$  – potência ativa total,  $P_1 + P_h$  (W);

$Q$  – potência reativa total,  $Q_1 + Q_h$  (var);

$S$  – potência aparente total,  $\sqrt{D_i^2 + D_v^2 + S_h^2 + S_1^2}$  (VA).

Assim, componentes de potência como  $P_1$  e  $P_h$ , promovem uso da energia para realização de trabalho útil na carga, no processo de conversão de energia elétrica no tipo de energia utilizada na carga elétrica. Componentes como  $Q_1$  e  $Q_h$ , estabelecem demanda de energia do sistema para suprir os campos elétricos e magnéticos na carga, assim como, caso a carga tenha forma de onda de corrente distorcida, ou ainda, a tensão de alimentação

---

da fonte no ponto de acoplamento esteja distorcida, tem-se  $D_i$  e  $D_v$ , respectivamente. Estas grandezas elétricas não realizam trabalho útil, entretanto, expressam como a interação entre distúrbios harmônicos em tensão e corrente designam componentes de potência não-ativa. As demais componentes de potência, como  $S_n$  e  $S_h$  são grandezas que agregam outras componentes, facilitando a análise das componentes de potência e segregando as grandezas quantitativamente.

Finalmente, considerando-se todos os conceitos físicos e matemáticos necessários para a plena compreensão do estudo realizado neste trabalho, é possível prosseguir à implementação computacional do filtro ativo para cada método de cálculo das correntes de compensação a serem sintetizadas pelo equipamento, assim como às análises realizadas com o objetivo de alcançar as metas especificadas no início desta dissertação. Deste modo, a seguir é apresentada a modelagem computacional realizada na plataforma *Simulink* do Matlab no Capítulo 3.

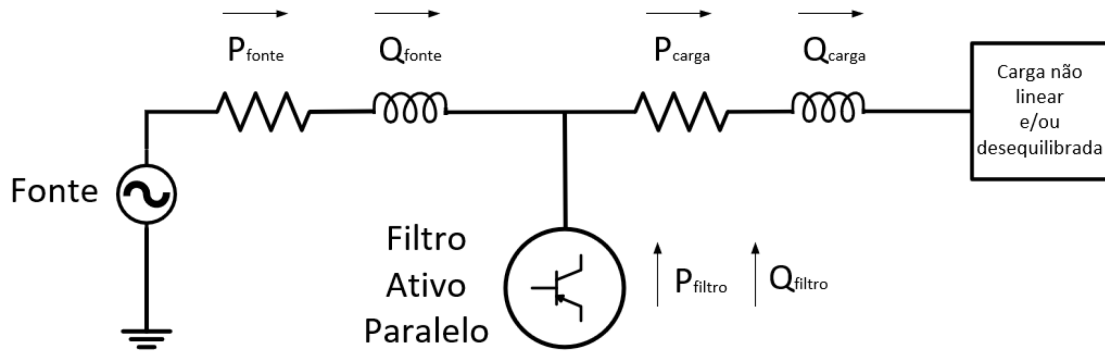
### 3 MODELAGEM COMPUTACIONAL DO FILTRO ATIVO

A simulação computacional do filtro ativo paralelo foi realizada por meio de etapas, isto é, primeiramente foi compreendido o funcionamento deste em um sistema elétrico de potência e como deve ser feita a conexão deste equipamento na rede para operação. Em seguida, foram estudadas as estratégias de controle a serem implementadas para a sintetização adequada das correntes de compensação pelo filtro ativo. Por fim, determinou-se a forma como o cálculo das correntes de compensação é realizada dentro do *software*, além de determinar o procedimento de comando do acionamento das chaves estáticas que compõem o filtro ativo paralelo.

Neste contexto, a seguir será discutida a estrutura do filtro ativo, ou seja, os elementos passivos pertencentes à construção do equipamento, assim como sua forma de conexão no sistema de distribuição de energia elétrica. Ainda, os aspectos da modelagem computacional do *hardware* do filtro ativo e, em seguida, os parâmetros do *Simulink* para a simulação de cada metodologia estudada neste trabalho.

#### 3.1 ESTRUTURA DO FILTRO ATIVO

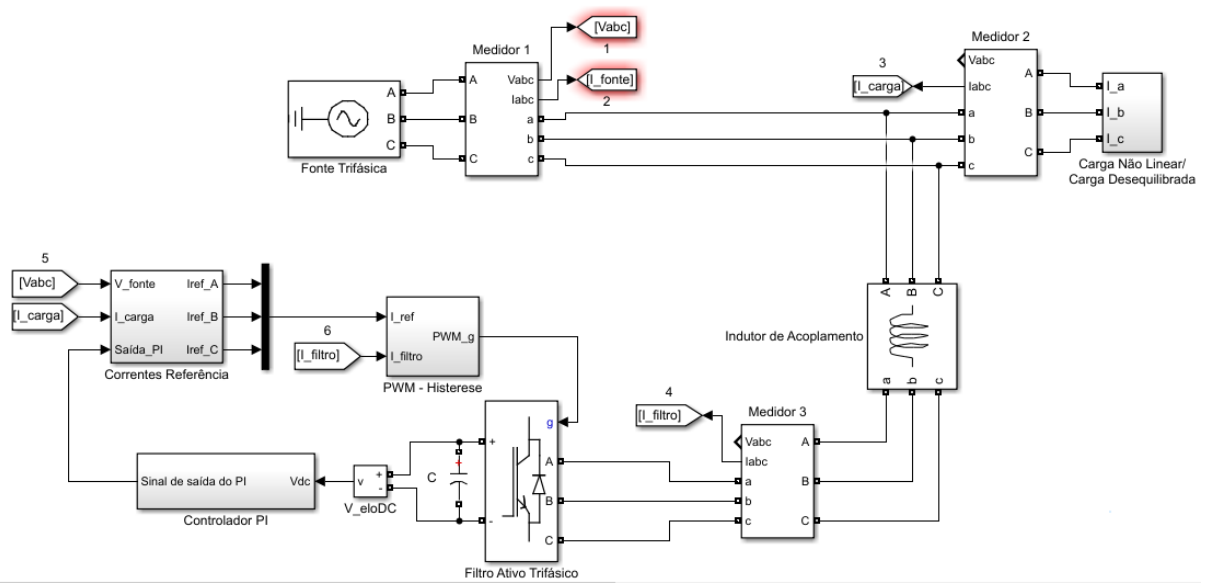
A estrutura do filtro ativo paralelo é esboçada na Figura 20, onde é determinado o sentido do fluxo de potência a ser utilizado nos cálculos de compensação. Em outras palavras, a fonte supre as demandas da carga e do filtro ativo paralelo, contudo a carga exerce a demanda de potência e absorve a energia transferida pela fonte, enquanto o filtro ativo injeta uma potência capaz de atenuar as componentes com distúrbios elétricos absorvidos pela carga, de forma a determinar uma demanda de potência sem distúrbios da fonte. Com o intuito de exemplificar tal fenômeno, utiliza-se da LKC no ponto de conexão e assim, tem-se (57). De (57), observa-se que as componentes inseridas pelo filtro são subtraídas das componentes da carga, caracterizando a atuação do filtro ativo em atenuar os distúrbios elétricos e especificando as componentes da fonte como ideais, ou seja, senoidais e equilibradas.



**Figura 20.** Diagrama esquemático básico para conexão de filtro ativo paralelo.

$$\mathbf{i}_{fonte} = \mathbf{i}_{carga} - \mathbf{i}_{filtro} \quad (57)$$

Além da conexão do equipamento no sistema elétrico de potência, é importante compreender a composição do filtro ativo paralelo para tornar as correntes calculadas, que são apenas dados computacionais, em grandeza elétrica capaz de atuar em sistemas de energia. Assim sendo, a Figura 21 mostra os equipamentos que constituem o filtro ativo paralelo.



**Figura 21.** Diagrama elétrico do filtro ativo conectado ao sistema de potência.

A Figura 21 mostra um indutor de acoplamento na entrada do filtro, este indutor está presente para garantir a estabilidade da corrente de compensação a ser inserida no sistema, sem variações bruscas de corrente, uma vez que o indutor se opõe a altos valores de  $di/dt$ . De acordo com [29], (58) determina o cálculo do indutor de acoplamento.

$$L = \frac{V_{RMS}}{2\sqrt{6}f_{comutação}I_{ripple}} \quad (58)$$

Sendo:

$V_{RMS}$  – tensão eficaz de fase de saída da ponte inversora (V);

$f_{comutação}$  – frequência de chaveamento (Hz);

$I_{ripple}$  – corrente de *ripple* admissível (%).

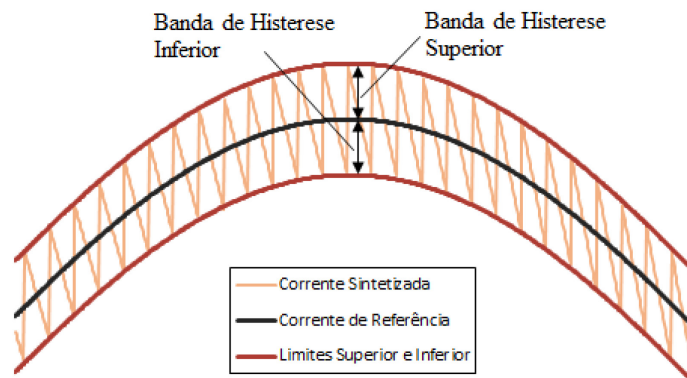
Os valores utilizados para calcular a indutância são  $V_{rms} = 220V$ ,  $f_{comutação} = 100$  kHz e  $I_{ripple} = 69\%$ .

O valor calculado para a indutância de acoplamento é de 0,65 mH. O valor percentual de  $I_{ripple}$  é elevado, pois o indutor deve possibilitar a corrente variar de acordo com o percentual de magnitude da corrente fundamental. Deste modo, é permitido *ripple* de aproximadamente 70% na corrente sintetizada pelo filtro ativo, assim é possível garantir velocidade na atuação do filtro sem comprometer a largura de banda das ordens harmônicas a serem atenuadas.

Também é apresentada na Figura 21 uma ponte inversora trifásica de IGBT controlada por pulsos em *Pulse Width Modulation* (PWM). Este tipo de controle possibilita determinar os instantes, os quais as chaves estarão abertas ou fechadas, de acordo com o nível de tensão presente no *gate* de cada elemento, isto é, caso seja tensão em nível alto a chave se fecha, conduzindo corrente elétrica no ramo, e tensão em nível baixo a chave se abre, interrompendo a condução de corrente no ramo. O método adotado para determinação do PWM foi a banda de histerese.

O controle PWM por banda de histerese estabelece o monitoramento da corrente elétrica na saída do filtro ativo, de forma a garantir que  $i_{filtro}$  seja igual à corrente de compensação calculada, determinando um intervalo, do qual,  $i_{filtro}$  possa oscilar. De acordo com a Figura 22, a corrente calculada ou corrente de referência designa a forma de onda, a qual,  $i_{filtro}$  deve se tornar. Assim sendo, limites superior e inferior são estipulados para especificar uma faixa de operação para o chaveamento no filtro ativo. O processo de chaveamento dos IGBT consiste em identificar quando a corrente sintetizada atinge o limite superior, pois deste modo, será determinado uma tensão nível baixo no *gate* do IGBT, caracterizando interrupção na condução de corrente e atenuando sua magnitude. Sendo que, uma vez a corrente sintetizada atinja o limite inferior da banda de histerese, será determinada uma tensão nível alto no *gate* do IGBT/Diodo, permitindo a condução de corrente e elevando sua magnitude, impondo à corrente sintetizada

permanência dentro da faixa de histerese e criando a forma de onda de referência para atenuação de distúrbios.



**Figura 22.** Ilustração do funcionamento da Banda de Histerese.

Neste caso, apenas os pulsos de comando para o IGBT  $Q1$  foram gerados, considerando que a fase A está sob análise. Assim, para os demais elementos de chaveamento estático, como  $Q3$  e  $Q5$ , correspondente às fases B e C, respectivamente, o processo se repete. Para os elementos  $Q2$ ,  $Q4$  e  $Q6$ , é designada a geração de pulsos complementar aos gerados para  $Q1$ ,  $Q3$  e  $Q5$ , respectivamente. Deste modo, os pulsos para todos os elementos de chaveamento estático de cada ramo do filtro ativo foram especificados.

Com o controle das chaves realizado é relevante destacar que o filtro ativo é formado por uma ponte inversora trifásica controlada por IGBT/Diodo e, durante a sintetização da corrente de compensação, ocorre a retificação do sinal de tensão. Em outros termos, o filtro possibilita o uso de tensão contínua após a ponte inversora trifásica controlada, sendo, neste caso, o ramo que se encontra o capacitor  $C$  na Figura 21. Este capacitor possui a função de suprir as demandas de potência reativa da corrente sintetizada, além de estabilizar a tensão no elo CC, por meio da atuação da malha de controle.

Primeiramente, como a corrente a ser sintetizada admite qualquer forma de onda, ocasionalmente, a corrente de referência pode conter componentes elétricas que sejam capazes de realizar correção do fator de potência ou, até mesmo, atenuação de desequilíbrio entre fases e, para isso, é necessário um elemento armazenador de energia em forma de campo elétrico, a fim de suprir tais demandas. Além disso, o capacitor também auxilia no controle da tensão no elo CC, por meio da atuação do sistema de

controle para cada metodologia, visto que devido à comutação das chaves, perdas *joule* nos cabos e indutor de acoplamento, a variação da tensão no elo CC pode se tornar problemática, pois altera a estabilidade do sistema, podendo caracterizar instabilidade e queimar o filtro. Assim, o controle da tensão no capacitor, ou tensão no elo CC, possibilita a operação adequada do equipamento.

O cálculo da capacitância para o elo CC é realizado como sugere [18] e está representado por (59).

$$C = \frac{P_{\text{não ativo}}}{f_{\text{rede}} (V_{CC\text{MAX}}^2 - V_{CC\text{MIN}}^2)} \quad (59)$$

Neste caso, considerando  $P_{\text{não ativo}}$  como 18 kvar, isto é, toda a potência reativa e não ativa que o filtro ativo deve ser capaz de compensar, lembrando que este parâmetro foi especificado visando os tipos de carga que serão simuladas no estudo de caso (Capítulo 4),  $f_{\text{rede}}$  igual à 60 Hz e *ripple* de tensão no elo CC de 3,5%, sendo  $V_{CC} = 850$  V,  $V_{CC\text{max}} = 879,75$  V e  $V_{CC\text{min}} = 820,25$  V, tem-se a capacitância como 3 mF. Ainda, acerca do elo CC, tem-se a escolha da tensão de estabilidade, este parâmetro é determinado por (60), como indicado por [25].

$$V_{CC} \geq \frac{3}{2} V_{an} \sqrt{2} \sqrt{3} \quad (60)$$

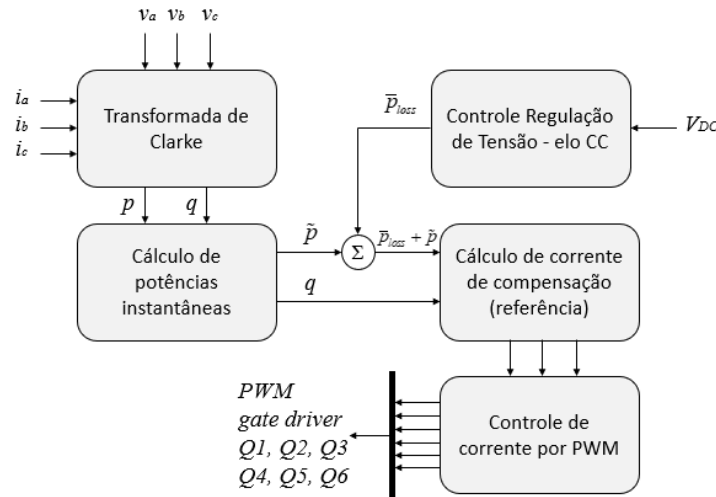
Considerando que  $V_{an}$  é 220 V, é calculado que a tensão no elo CC deve ser maior que 808,33 V, portanto adotou-se  $V_{CC} = 850$  V.

### 3.2 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

Para implementar o filtro ativo foi indispensável o uso de um controlador proporcional integral para estabilizar a tensão no elo CC, assim como o sinal de saída do controlador no cálculo das correntes de compensação e seu significado em cada metodologia a ser discutida. Além disso, determinou-se as características únicas de cada metodologia para a implementação computacional.

### 3.2.1 METODOLOGIA DA CORRENTE SENOIDAL EQUILIBRADA (MÉTODO I)

A metodologia da corrente senoidal equilibrada é determinada por meio do cálculo das correntes de compensação pela Teoria PQ Instantânea. O fluxograma mostrado na Figura 23 especifica o processo utilizado para a simulação do filtro ativo paralelo [2].

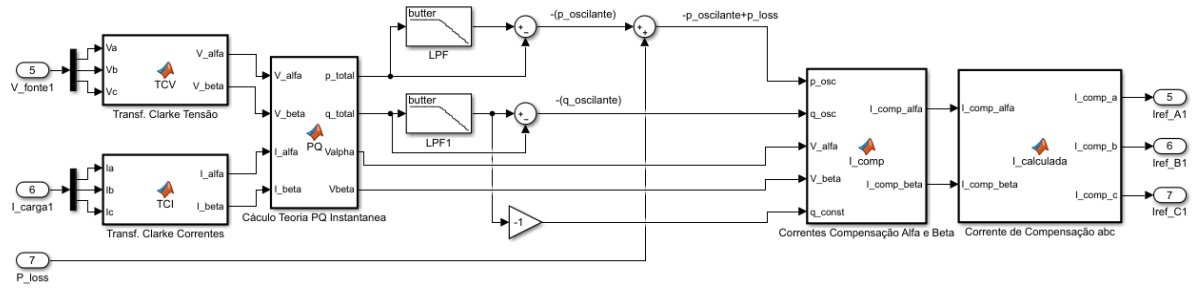


**Figura 23.** Fluxograma de controle do filtro ativo usando a metodologia da corrente senoidal equilibrada.

Com o intuito de especificar o conteúdo do bloco de cálculo das correntes de compensação ilustrado na Figura 21, tem-se a Figura 24 que designa o processo de implementação da metodologia da corrente senoidal equilibrada. Deste modo, é necessário realizar a Transformada de Clarke, como mostra (8). Além disso, há a determinação do cálculo das componentes de potência instantânea de acordo com a Teoria PQ, como aponta (27). Assim, na saída do bloco de cálculo da Teoria PQ tem-se dois filtros passa baixa, os quais possuem a função de extratificar a componente média da potência instantânea total, segregando-a da oscilante. Esse filtro está sintonizado para  $2\pi 15$  rad/s. Em seguida, há a soma algébrica entre  $\tilde{p}$  e  $\bar{P}_{loss}$ . A potência média de perdas ( $\bar{P}_{loss}$ ) sendo considerada no cálculo das correntes de compensação atribui à simulação um estudo de caso real do filtro ativo, pois torna-se necessário controle de tensão no elo CC, por meio de um controlador proporcional integral (PI), o qual monitora o nível de tensão e, com a atuação dos ganhos do controlador PI, determina uma tensão fixa. Entretanto a atuação do controlador gera um sinal de erro na saída do PI, o qual deve ser adicionado ao valor de  $\tilde{p}$ . Esta potência de perdas,  $\bar{P}_{loss}$  é adicionada algebricamente à  $\tilde{p}$



, pois  $\bar{p}_{loss}$  representa as perdas *joule* nos cabos do filtro ativo, assim como no indutor de acoplamento, além das perdas devido a comutação das chaves no inversor, [2] e [5].



**Figura 24.** Implementação do controle da metodologia da corrente senoidal equilibrada.

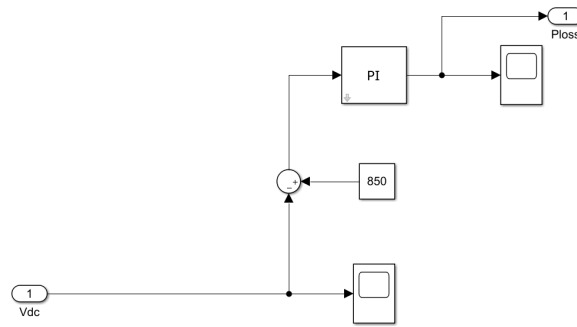
Sem a compensação das perdas intrínsecas,  $\bar{p}_{loss}$ , do filtro ativo, a tensão no elo CC oscila bastante, podendo atingir instabilidade e elevar-se ao nível de destruir o capacitor conectado neste ramo. Após a adição de  $\bar{p}_{loss}$  em  $\tilde{p}$ , calculam-se as correntes de compensação, como indica (28), com as correntes de referência calculadas. Estes sinais se destinam para a geração do PWM, por meio do controle por banda de histerese, já abordado anteriormente, na seção 3.1, para o comando dos IGBT/Diodo do inversor do filtro ativo.

A Figura 23 foi implementada no Matlab/Simulink como mostra a Figura 24. Neste caso, o uso de funções de programação possibilitou o processamento das operações matemáticas necessárias. Deste modo, a transformada de Clarke das grandezas elétricas é realizada no bloco de entrada. Em seguida, foram calculadas as componentes de potência de acordo com a Teoria PQ, como aponta (27). Ainda, para determinar qual é a componente oscilante na potência real instantânea, foi feita a operação mostrada em (61) por meio de um filtro passivo, a fim de segregar a componente média, que é constante, da oscilante.

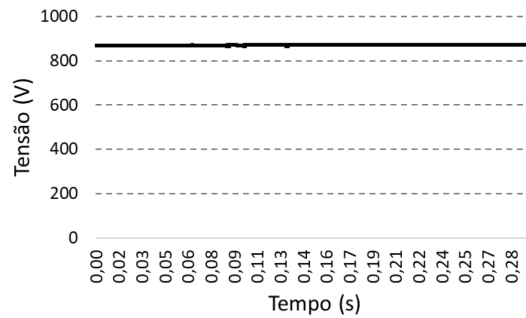
$$\tilde{p} = p - \bar{p} \quad (61)$$

Após a distinção entre potências média e oscilante, verificou-se a soma das componentes ativa oscilante com a de perdas, advinda da saída do controlador PI, de controle de  $V_{CC}$ . A Figura 25 esboça como foi realizado o controle da tensão no elo CC, com  $V_{CC\text{referência}} = 850 \text{ V}$ , como indica (60), é importante salientar que esta figura expressa

o conteúdo do bloco do controlador PI mostrado na Figura 21. O controlador PI tem sintonia almejada, de acordo com o método de tentativa e erro, descrito em [25]. O método consiste em manter o ganho integral  $K_i = 0$  e aumentar o ganho proporcional  $K_p$  de forma a alcançar a resposta ao degrau desejada. Assim que a resposta do sistema for satisfatória em regime permanente, fixa-se o valor de  $K_p$  e aumenta-se o valor de  $K_i$ , a fim de melhorar a resposta em regime transitório. Neste caso, a sintonia ocorreu em  $K_p = 100$  e  $K_i = 10$ . Imediatamente na saída do PI, encontra-se o sinal de  $\bar{p}_{loss}$ . A Figura 26 mostra a tensão no elo CC.



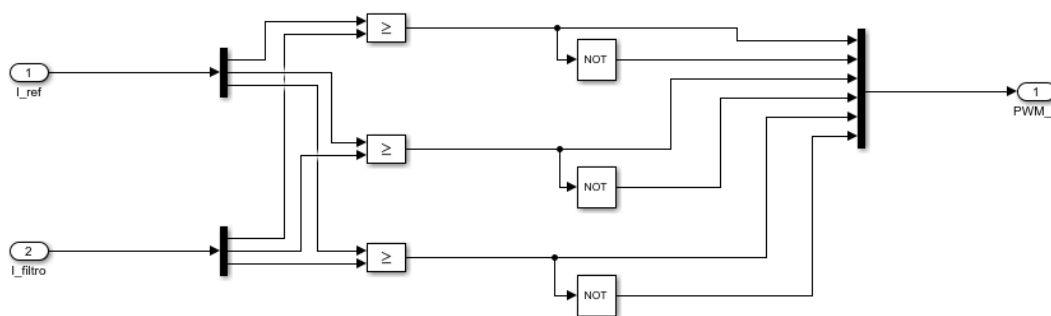
**Figura 25.** Controlador PI para estabilidade da tensão no elo CC, para metodologia da corrente senoidal equilibrada.



**Figura 26.** Sinal de tensão no elo CC para metodologia da corrente senoidal equilibrada.

Em seguida, com as componentes de potência calculadas são inseridas como entrada para o bloco de cálculo das correntes de compensação, sendo importante salientar que todas as potências inseridas no bloco são com sinal negativo, uma vez que deseja-se que haja injeção de corrente no sistema, sendo este sinal determinante para a imposição do sentido da corrente elétrica. Este bloco constrói a forma de onda de corrente de referência, por meio de (28) e realiza a transformada inversa de Clarke, como indica (9), permitindo as saídas serem a forma de onda de corrente em coordenadas  $abc$ . Consequentemente, estes sinais de corrente são enviados para o bloco de geração do

PWM para controle das chaves, como descrito anteriormente, seção 3.1. O controle por banda de histerese realiza este procedimento monitorando a corrente de saída do filtro ativo, sempre comparando a saída com a forma de onda de referência para cada fase. A Figura 27 mostra como este controle foi implementado dentro da plataforma de simulação, sendo importante salientar que esta ilustração representa o conteúdo contido no bloco de PWM – Histerese ilustrado na Figura 21.

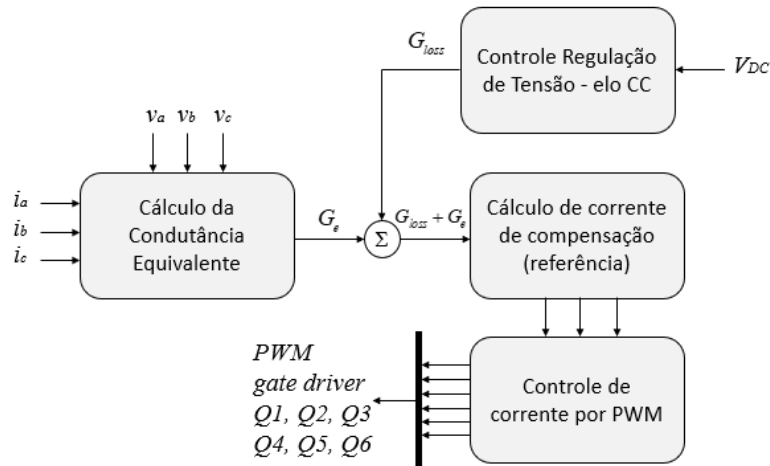


**Figura 27.** Banda de Histerese implementada no Matlab Simulink.

Para um ambiente de simulação, o controle de histerese implementado por comparação lógica, isto é, comparação entre dois sinais oferecendo sinal de saída booleana, é a forma mais rápida e fidedigna de sintetização das correntes de compensação, uma vez que caso  $i_{ref}$  ultrapassa o valor de  $i_{filtro}$ , o sinal de saída do comparador é nível alto, enquanto que para o oposto, isto é, para  $i_{ref}$  inferior ao valor de  $i_{filtro}$ , tem-se a saída do comparador como nível baixo. Esta comparação ocorre na frequência de simulação determinada pelo passo de integração no *Simulink*. Neste caso, o passo de integração utilizado foi de  $t = 1e-5$  segundos, ou seja, a frequência de chaveamento máxima foi de 100 kHz. É importante salientar que para controle em banda de histerese a frequência de comutação é variável, proporcionalmente à derivada da corrente, ou seja, quanto maior a variação instantânea da corrente, maior será o valor da frequência de chaveamento, que pode atingir a frequência máxima de 100 kHz. Ainda, é relevante destacar que esta frequência de comutação foi especificada neste valor devido ao fato de restringir qualquer característica de compensação apenas às metodologias estudadas.

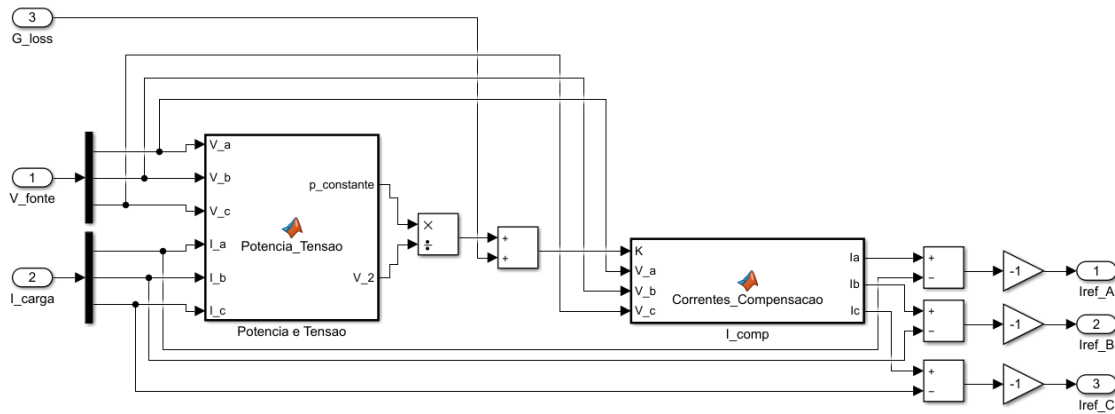
### 3.2.2 METODOLOGIA DO FATOR DE POTÊNCIA UNITÁRIO (MÉTODO II)

A metodologia do fator de potência unitário é determinada por meio do cálculo da minimização das correntes da carga. O fluxograma mostrado na Figura 28 especifica o processo utilizado para a simulação do filtro ativo paralelo.

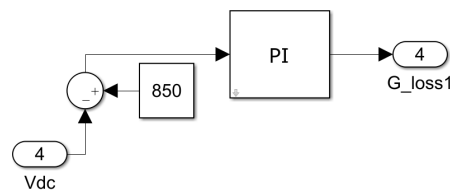


**Figura 28.** Fluxograma de controle do filtro ativo metodologia do fator de potência unitário.

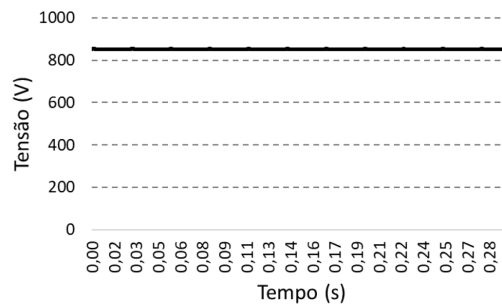
Inicialmente, deve-se adquirir os sinais de tensão e corrente para calcular a condutância trifásica equivalente do sistema elétrico. Isto é possível implementando (44) na função de programação do *Simulink*, como mostra a Figura 29. Desta forma, deve-se calcular a potência trifásica e as tensões agregadas, para então determinar o valor da condutância equivalente  $G_e$ . Em seguida, por meio do controle da tensão no elo CC tem-se o valor de  $G_{loss}$ , o qual representa a condutância associada às condutâncias de comutação das chaves, assim como às intrínsecas dos elementos elétricos do filtro ativo. A Figura 30 esboça a simulação do controlador PI para monitoramento e estabilização da tensão no elo CC, o processo de sintonia dos ganhos do controlador é semelhante ao discutido para a metodologia de corrente senoidal, obtendo, portanto, ganho integral  $K_i = 0,001$  e ganho proporcional  $K_p = 5$ . Deste modo, a Figura 31 expressa a tensão no elo CC.



**Figura 29.** Implementação do controle da metodologia do fator de potência unitário.



**Figura 30.** Controlador PI para estabilidade da tensão no elo CC, para metodologia do fator de potência unitário.



**Figura 31.** Sinal de tensão no elo CC para metodologia do fator de potência unitário.

Assim, realizando a adição de  $G_{loss}$  e  $G_e$ , é efetuado o cálculo das correntes ativas, como indica (43) e posteriormente são determinadas as correntes de compensação, por meio de (45). Por fim, as correntes de compensação recebem ganho de -1, pois estas devem ter sentido filtro-rede, ou seja, o filtro ativo deve injetar a corrente de compensação na rede. Esta imposição no sentido inicial da corrente é relevante, uma vez que, caso não seja realizada caracteriza compensação inadequada e pode, por consequência, inserir mais conteúdo harmônico e distúrbios, ao invés de atenuar os fenômenos já existentes.

Com os parâmetros de simulação e lógica de controle compreendidos e incorporados à implementação do filtro ativo paralelo, é possível obter resultados da

atuação deste equipamento para cada tipo de carga ou condição de fornecimento da rede, como será discutido no Capítulo 4.

#### 4 ESTUDOS DE CASOS

Com o intuito de analisar o comportamento do filtro ativo, Figura 21, perante a implementação de cada metodologia de atenuação de distúrbios elétricos foram realizados alguns testes considerando diversas situações de carregamento do sistema elétrico, além de condições de fornecimento de tensão no sistema. Deste modo, para a compreensão de como as duas metodologias realizam a atenuação de distorções harmônicas e desequilíbrios foram desenvolvidos os casos conforme mostra a Tabela I.

**Tabela I.** Descrição dos Casos Analisados

<b>Caso</b>	<b>Tensão</b>	<b>Carga</b>
<b>1</b>	Senoidal e Equilibrada	Distorcida, Equilibrada e Carga Resistiva
<b>2</b>	Senoidal e Equilibrada	Distorcida, Equilibrada e Carga Indutiva
<b>3</b>	Senoidal e Equilibrada	Distorcida, Equilibrada e Carga Capacitiva
<b>4</b>	Distorcida e Equilibrada	Distorcida, Equilibrada e Carga Indutiva
<b>5</b>	Distorcida e Desequilibrada	Distorcida, Desequilibrada e Carga Indutiva
<b>6</b>	Senoidal e Equilibrada	Distorcida em ordens harmônicas mais elevadas e carga resistiva

Ainda, acerca das configurações utilizadas para determinar tais condições no ambiente de simulação, tem-se as disposições apresentadas na Tabela II, a qual mostra o resumo das condições e configurações utilizadas para simulação. Assim, definidas as condições simuladas e quais as configurações a serem aplicadas no *software* para cada situação foram realizadas as simulações e obtidos os resultados para cada caso mostrado na Tabela II.

**Tabela II.** Configurações Para Simulação

Condição	Tensão	Corrente
Carga Distorcida Resistiva	-	Retificador Trifásico Controlado 6 pulsos $\alpha = 0^\circ$
Carga Distorcida Indutiva	-	Retificador Trifásico Controlado 6 pulsos $\alpha = 45^\circ$
Carga Distorcida Capacitiva	-	Capacitor em série Retificador Trifásico Controlado 6 pulsos
Carga Distorcida em Ordens Harmônicas mais elevadas e Carga Resistiva	-	Retificador Trifásico Não Controlado 12 pulsos com $R = 10 \Omega$ , em conjunto com Fonte de Corrente Harmônica em $h = 28, 31$ e $34$ $I_h = \frac{5}{\sqrt{2}} \angle 0^\circ \text{ A}$
Carga Desequilibrada	-	$Z_{AN} = 10 \Omega$ $Z_{BN} = 15 + j10 \Omega$ $Z_{CN} = 15 - j10 \Omega$ FD = 92,08%
Fonte Desequilibrada	$V_{AN} = 380 \angle 0^\circ \text{ V}$ $V_{BN} = 127 \angle -70^\circ \text{ V}$ $V_{CN} = 220 \angle 150^\circ \text{ V}$ FD = 47,18%	-
Fonte Distorcida	$V_h = 88 \times \sqrt{2} \text{ V}$ $f = 300 \text{ Hz}$	-
Fonte Senoidal Equilibrada	$V_{AN} = 220 \angle 0^\circ \text{ V}$ $V_{BN} = 220 \angle -120^\circ \text{ V}$ $V_{CN} = 220 \angle 120^\circ \text{ V}$	-

A seguir serão mostrados os resultados obtidos com a simulação, com o objetivo de interpretar os dados adquiridos e vislumbrar como cada metodologia pode ser mais bem aplicada, ou ainda, em quais situações cada método atenua com mais eficiência os distúrbios elétricos ou realiza uso mais adequado da rede elétrica. Assim, para alcançar tais conclusões, a análise a ser realizada demanda a característica *vi* percebida pelo sistema elétrico com e sem a atuação do filtro para cada metodologia, com o intuito de determinar como o desempenho do filtro especifica a carga, originalmente, não linear,



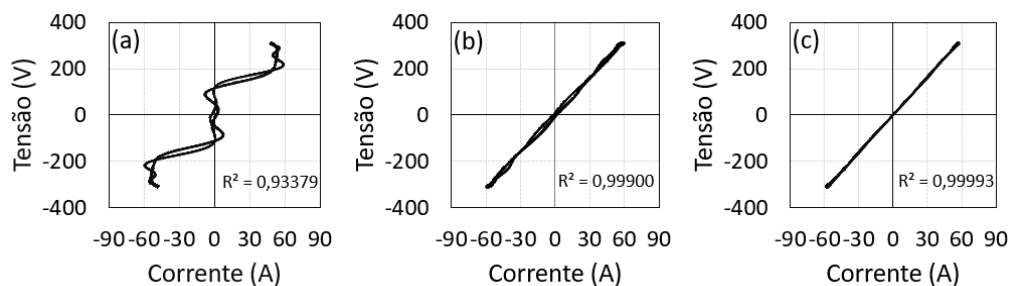
como uma carga linear perante o sistema elétrico. Ainda, o perfil harmônico da carga sem e com a atuação do filtro para cada metodologia, a fim de estabelecer qual metodologia proporcionou melhor atenuação dos distúrbios harmônicos, visto as condições da carga e o fornecimento de tensão da rede elétrica. Por fim, também foram instaurados os cálculos das componentes de potência perante [26], tornando possível a análise acerca do uso do sistema elétrico e como tais distúrbios impactam a rede de distribuição de energia.

Ainda, para facilitar a discussão e características de cada método, é especificado que a metodologia das correntes senoidais e equilibradas é denominada de Método I, enquanto a metodologia de minimização das correntes da carga é denominada de Método II.

Os casos serão analisados nas seções subsequentes.

#### 4.1 CASO 1

Como aponta a Figura 32, a característica  $v-i$  da carga não linear é incompatível com uma reta, como indica o coeficiente de determinação  $R^2$ , mostrado na ilustração. Entretanto, após a atuação do filtro para Método I, tem-se característica  $v-i$  similar à reta, onde  $R^2 = 0,999$ , ou seja, alta correlação das amostras com a reta de regressão, todavia, o Método II provém  $R^2 = 0,99993$ , especificando maior correlação das amostras com a reta de regressão, corroborando o fato de que o Método II fornece maior linearidade para a carga perante o sistema elétrico.



**Figura 32.** Característica  $v-i$  da (a) carga não linear, (b) Característica  $v-i$  do conjunto filtro + carga pela metodologia da corrente senoidal e (c) Característica  $v-i$  do conjunto filtro + carga pela metodologia do fator de potência unitário, para o Caso 1.

Acerca da análise harmônica diante da performance do filtro ativo, é observado como o Método II apresenta melhor performance, uma vez que o conteúdo harmônico proveniente desta metodologia é ligeiramente menor do que a apresentada pelo Método I, visto que esta possui Distorção Harmônica Total (DHT) de cerca de 1,60%, enquanto

o Método II apresenta uma DHT de 0,7%, aproximadamente, como indica Figura 33. Assim, a aplicação do Método II confere uma melhor atenuação do conteúdo harmônico na carga.

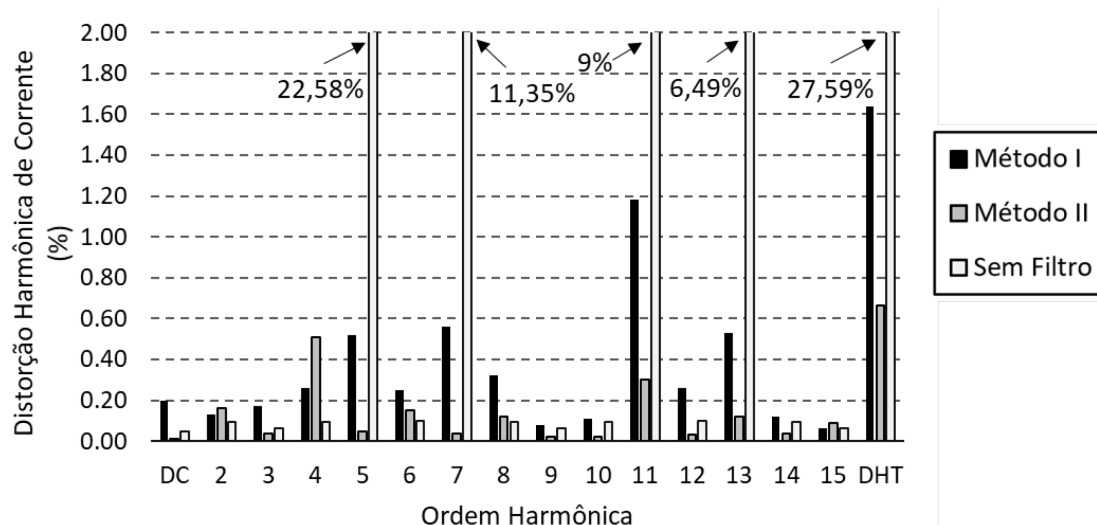


Figura 33. Perfil harmônico da carga para Caso 1.

#### 4.2 CASO 2

Neste caso é constatado como a não linearidade da carga é mais severa, se comparada com a apresentada no Caso 1. Entretanto, apesar da correspondência entre as amostras das curvas de característica  $v-i$  para o Método I,  $R^2 = 0,98877$ , e o Método II,  $R^2 = 0,99066$ , ser menor, devido aos valores apresentados no coeficiente de correlação, como aponta a Figura 34, se for realizada a comparação com o Caso 1. Ainda, o Método II ostenta maior correspondência e especifica a carga com maior linearidade do que o Método I perante o sistema elétrico.

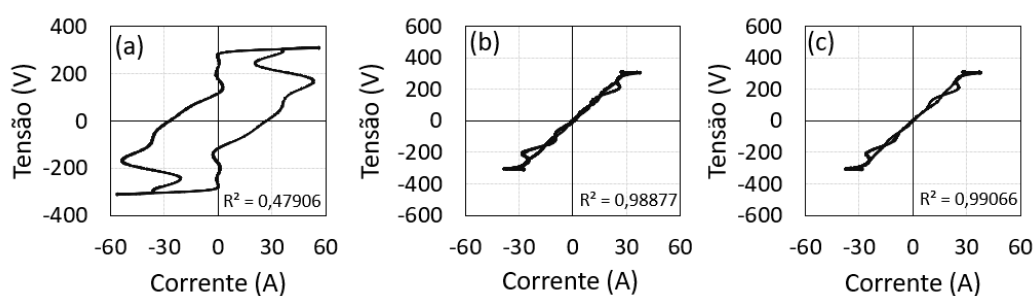
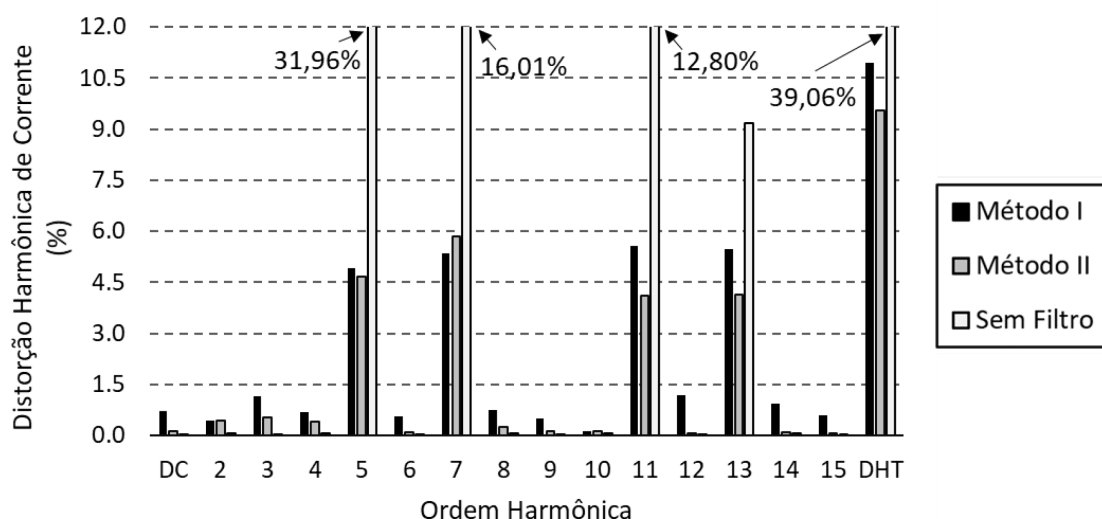


Figura 34. Característica  $v-i$  da (a) carga não linear, (b) Característica  $v-i$  do conjunto filtro + carga pela metodologia da corrente senoidal e (c) Característica  $v-i$  do conjunto filtro + carga pela metodologia do fator de potência unitário, para o Caso 2.

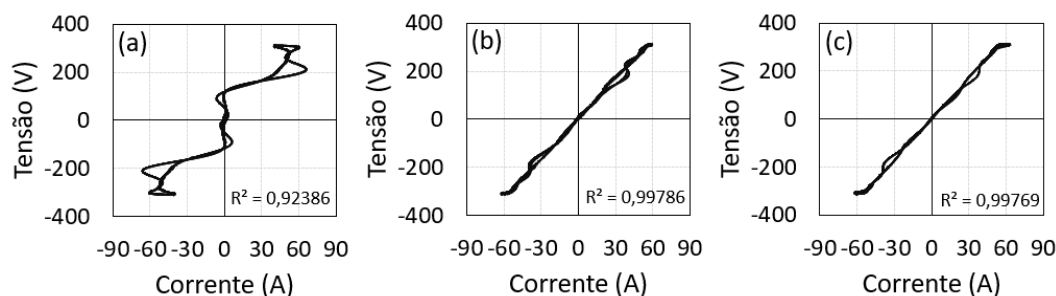
Do mesmo modo, a análise do perfil harmônico após a aplicação de cada metodologia segue o mesmo padrão discutido para o Caso 1, como mostra a Figura 35. Em outros termos, pode-se afirmar que a aplicação do Método II promove um menor conteúdo harmônico,  $DHT \cong 9,5\%$ , se comparado com a distorção harmônica fornecida pelo Método I,  $DHT \cong 11\%$ , caracterizando, mais uma vez, a melhor performance apresentada pelo Método II no que tange à atenuação de conteúdo harmônico na corrente da carga não linear.



**Figura 35.** Perfil harmônico da carga para Caso 2.

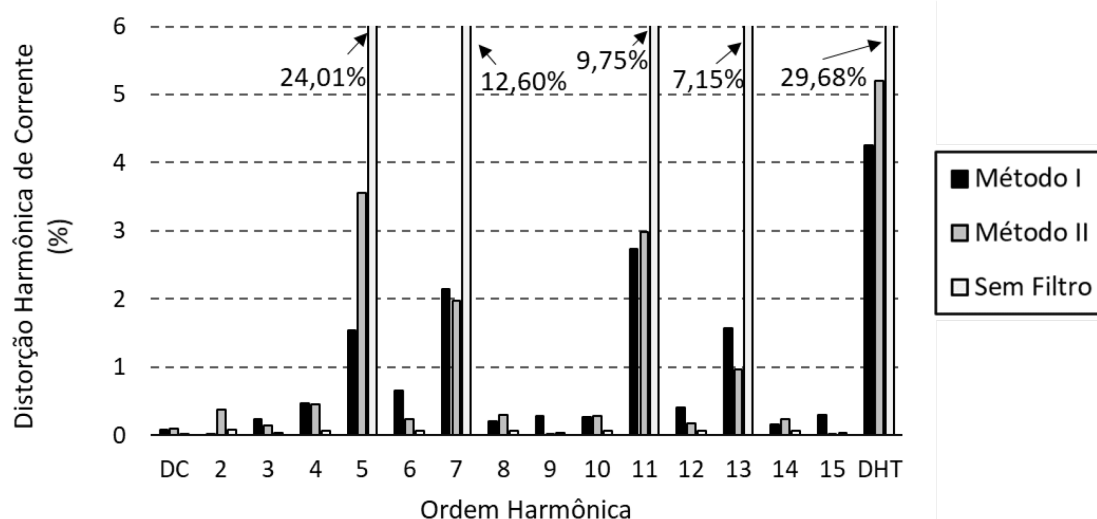
### 4.3 CASO 3

Para este caso, a carga possui característica  $v-i$ , vide Figura 36 (a), similar à apresentada no Caso 1, como indica Figura 32, entretanto os resultados referente à correlação entre as amostras com a regressão foram bastante similares, apresentando distinção apenas na quarta casa decimal, isto é, para Método I o coeficiente foi de  $R^2 = 0,99786$ , enquanto que para Método II o coeficiente tem valor de  $R^2 = 0,99769$ . Desta forma, pode-se afirmar que o Método I fornece resultado praticamente igual ao Método II, uma vez que a diferença é encontrada apenas na quarta casa decimal.



**Figura 36.** Característica  $v-i$  da (a) carga não linear, (b) Característica  $v-i$  do conjunto filtro + carga pela metodologia da corrente senoidal e (c) Característica  $v-i$  do conjunto filtro + carga pela metodologia do fator de potência unitário, para o Caso 3.

Embora, nos Casos 1 e 2, o Método II tenha apresentado melhor performance, no que tange à atenuação do conteúdo harmônico, neste caso, conforme pode ser observado na Figura 37, ocorreu o oposto, o Método I teve maior capacidade de atenuação de distorções harmônicas (notadamente para a 5ª harmônica), resultando um DHT  $\cong 4\%$ , enquanto o Método II apresenta DHT  $\cong 5\%$ . Deste modo, apesar de apresentarem praticamente a mesma linearidade entre a tensão e a corrente, a atenuação de conteúdo harmônico foi mais expressiva quando da aplicação do Método I.

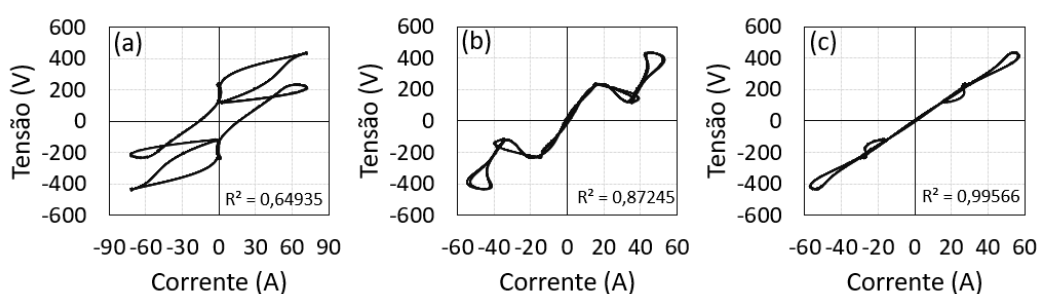


**Figura 37.** Perfil harmônico da carga para Caso 3.

#### 4.4 CASO 4

Para este caso tem-se a tensão fornecida pela rede com distorção harmônica, ou seja, para a característica  $v-i$  há não linearidade mais severa, uma vez que ambas as grandezas estão sob efeitos de distorção, sendo importante salientar que a DHT de tensão

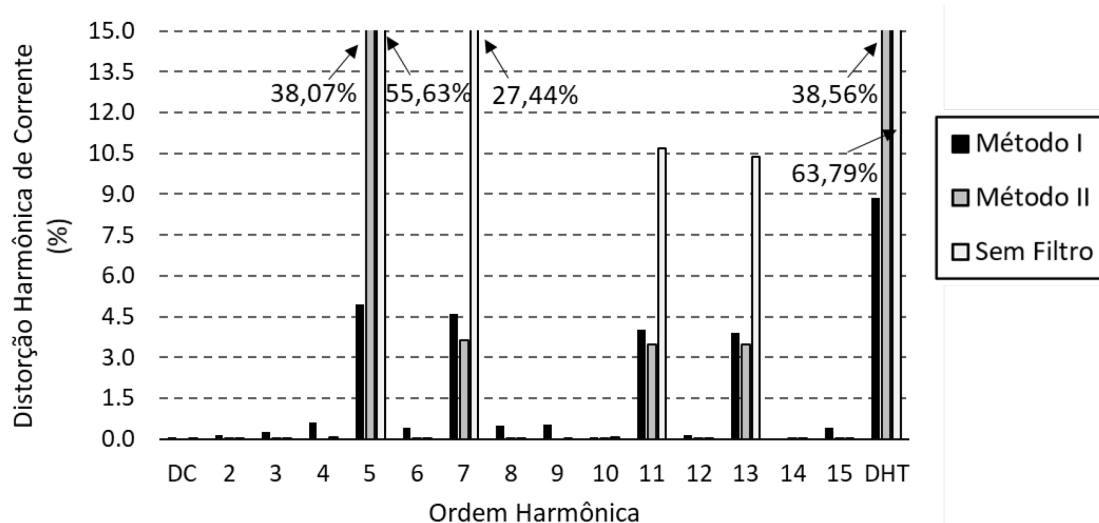
para este caso é irreal nos sistemas de distribuição de energia. Entretanto, este valor foi utilizado justamente para compreender o comportamento de cada metodologia perante uma situação crítica. Deste modo, a correspondência das amostras da característica  $v-i$  sem atuação do filtro com a regressão linear correspondente é menor, e, analisando o comportamento da característica  $vi$  do Método I, tem-se que, devido a forma de correção da corrente da carga, em condições de tensão de fornecimento distorcida, esta metodologia, jamais fornecerá característica linear, uma vez que a compensação é feita tomando como referência a tensão de componente fundamental em sequência positiva, e a característica  $vi$  é realizada com a tensão disponível nos terminais da carga. Assim  $R^2 = 0,87245$  para o Método I, vide Figura 38, é coerente com a forma de compensação empregada. Por outro lado, espera-se que a correlação do Método II seja alta, devido à forma de compensação desta metodologia. O Método II apresenta compensação das correntes de cargas não lineares de acordo com a forma de onda da tensão, ou seja, esta técnica determina uma carga linear, em outras palavras, a corrente da carga após a atuação do filtro terá forma de onda similar à da tensão, portanto, mesmo a tensão contendo distorções harmônicas, a corrente após compensação também apresentará distorções proporcionais às constatadas na tensão, visto que esta metodologia calcula uma corrente de compensação diante de uma condutância equivalente do sistema trifásico, a qual é invariável. Assim, como após a atuação do filtro com Método II espera-se que a forma de onda da corrente seja uma réplica da forma de onda da tensão, e que o coeficiente de correlação entre tensão e corrente, constatado na característica  $v-i$  seja alto ou extremamente próximo de 1, sendo  $R^2 = 0,99566$ , como indica Figura 38.



**Figura 38.** Característica  $v-i$  da (a) carga não linear, (b) do filtro pela metodologia da corrente senoidal e (c) da metodologia da minimização das correntes de carga, para o Caso 4.

Apesar do Método II fornecer alta linearidade para a carga, ainda que a tensão de fornecimento do sistema para a carga contenha distúrbios harmônicos, esta metodologia

não é capaz de proporcionar uma forma de onda de corrente livre de conteúdo harmônico. Dessa forma, a DHT fornecida pelo Método II é de 38,56%, como mostra Figura 39, enquanto o Método I especifica DHT de aproximadamente 9%.

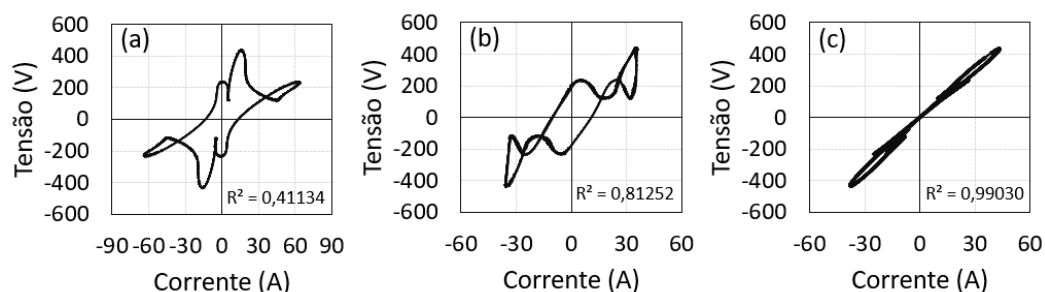


**Figura 39.** Perfil harmônico da carga para Caso 4.

#### 4.5 CASO 5

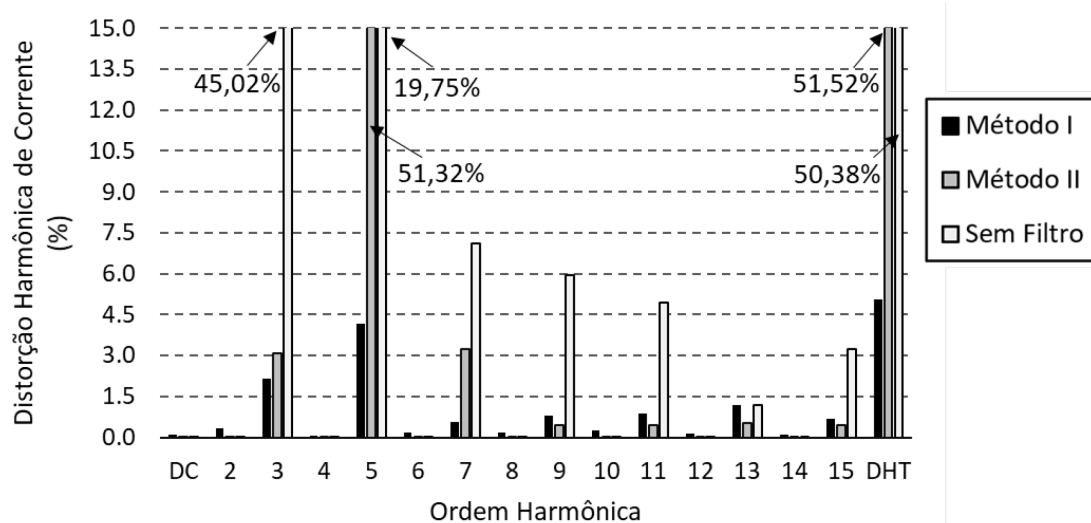
Para o Caso 5, a Figura 40 aponta que a característica  $v_i$  sem a atuação do filtro é a menos correspondente a uma reta de regressão linear das amostras, pois a tensão de fornecimento está distorcida e desequilibrada, sendo importante salientar que a DHT de tensão e desequilíbrio para este caso é irreal nos sistemas de distribuição de energia. Entretanto, este valor foi utilizado justamente para compreender o comportamento de cada metodologia perante uma situação crítica. Desta forma, isto expressa como os distúrbios na forma de onda da tensão de fornecimento interfere na linearidade da carga diante da rede de distribuição. Ainda, no que tange às metodologias analisadas, tem-se que o Método I é incapaz de promover características lineares à carga, originando  $R^2 = 0,81252$ , com tensão distorcida e desequilibrada, devido ao fato de, como mencionado na análise do Caso 4, esta metodologia compensa a corrente da carga com referência à tensão fundamental de sequência positiva, sendo que, em contrapartida, a característica  $v-i$  é estabelecida com a forma de onda da tensão disponível nos terminais da carga. No entanto, o Método II, devido a sua metodologia de compensação, a qual é realizada determinando-se uma condutância equivalente e invariável para o sistema trifásico, sintetiza uma forma de onda de corrente, após a atuação do filtro, como sendo uma réplica

da forma de onda da tensão de fornecimento nos terminais da carga. Deste modo, mesmo que a tensão de fornecimento esteja distorcida e desequilibrada, tanto em magnitude quanto em fase, esta metodologia é capaz de fornecer linearidade para a carga,  $R^2 = 0,99030$ .



**Figura 40.** Característica  $v-i$  da (a) carga não linear, (b) do filtro pela metodologia da corrente senoidal e (c) da metodologia da minimização das correntes de carga, para o Caso 5.

Em contrapartida, o Método II apresenta conteúdo harmônico maior do que o fornecido pelo Método I, como mostra Figura 41. Isto também se deve ao fato de como cada metodologia aborda o cálculo das correntes de compensação. Nesta análise, o Método I apresentou DHT de, aproximadamente, 5%, enquanto o Método II constata DHT = 51,52%. Do ponto de vista de atenuação harmônica o Método I possui melhor desempenho.



**Figura 41.** Perfil harmônico da carga para Caso 5.

Um aspecto importante a ser abordado é como cada metodologia se comportou perante o desequilíbrio encontrado na tensão de fornecimento da rede de distribuição e, com mostra Tabela III. Neste aspecto, o Método I se mostrou mais eficiente que o Método II, uma vez que o Fator de Desequilíbrio (FD), calculado de acordo com [26], diminuiu drasticamente. Assim sendo, para tamanha discrepância entre valores para cada metodologia é explicada pela abordagem no cálculo das correntes de compensação, fato já discutido anteriormente.

**Tabela III.** Comportamento de cada metodologia perante desequilíbrio na tensão de fornecimento, FD (%)

Método I	Método II	Sem Filtro
2,19%	44,87%	47,18%

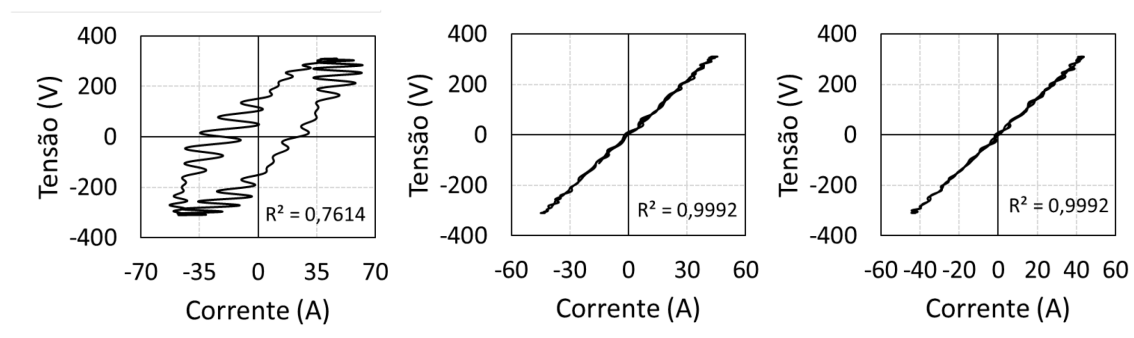
#### 4.6 CASO 6

Nos casos estudados até o presente momento, verificou-se claramente uma melhor performance do Método II nas frequências harmônicas de ordens mais elevadas, sobretudo a partir da 11<sup>a</sup> harmônica. Dessa forma, o presente estudo de caso tem como objetivo verificar o desempenho dos Métodos I e II na atenuação das componentes harmônicas geradas por um conversor não-controlado de 12 pulsos, para o qual se espera, em condições ideais, a geração de correntes harmônicas de ordens 11, 13, 23, 24, etc. Ainda, é analisado o desempenho de cada metodologia para as harmônicas inseridas como fonte de corrente na carga, às quais são  $h = 28, 31$  e  $34$ , como especifica as Tabela I e Tabela II.

Para este estudo de caso, a tensão fornecida pela rede de distribuição de energia elétrica encontra-se equilibrada e livre de qualquer distorção harmônica, deste modo pode-se avaliar o comportamento de ambas metodologias a respeito da atenuação e linearidade na corrente da fonte após atuação da filtragem ativa. Além disso, permite a análise da atenuação de componentes harmônicas em frequências mais elevadas, lembrando que a  $f_{comutação}$  máxima, independente de metodologia, é de 100 kHz, como mencionado anteriormente na seção 3.1. Assim sendo, a única diferença é a metodologia de cálculo e o controlador PI para estabilizar a tensão no elo CC. Continuando a análise de linearidade empregada nos casos anteriores, a Figura 42 mostra que a metodologia da corrente senoidal apresentou  $R^2 = 0,9992$ , enquanto o método de minimização das correntes de carga apresentou linearidade igual a  $R^2 = 1,0000$ . Desse modo, isto indica

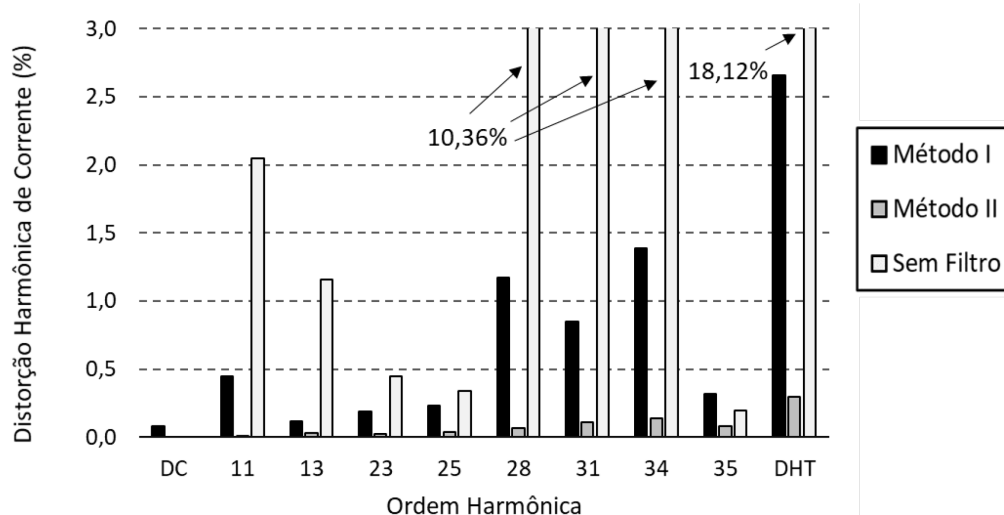


novamente, como o Método II desempenha melhor linearidade para a carga na filtragem ativa, quando comparado com o Método I, tanto para frequência menores, como apresentado neste caso, para frequências mais elevadas, como mostra a Figura 422.



**Figura 42.** Característica  $v-i$  da (a) carga não linear, (b) do filtro pela metodologia da corrente senoidal e (c) da metodologia da minimização das correntes de carga, para o Caso 6.

Como é observado, na questão da linearidade, ambas metodologias apresentam resultados semelhantes. Além disso, também é constatado que para a análise harmônica a metodologia do fator de potência unitário atenua nitidamente com mais eficiência as componentes harmônicas de ordens elevadas, conforme indicado na Figura 433.



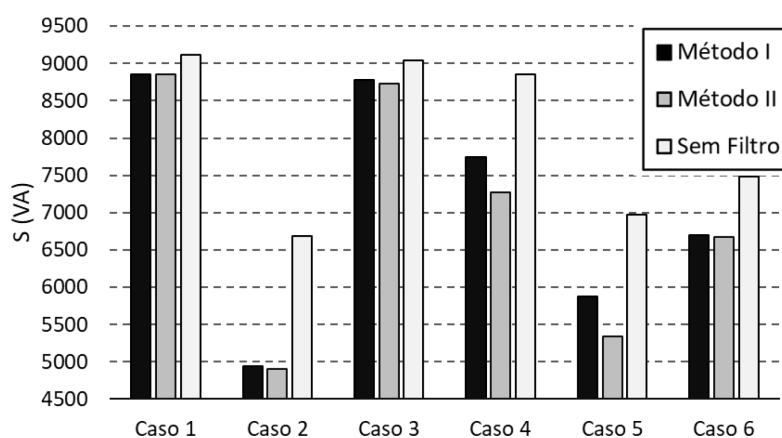
**Figura 43.** Perfil harmônico da carga para o Caso 6.

Esta constatação permite afirmar que para cargas ou sistemas que caracterizam uma corrente de carga com distorção harmônica em frequências elevadas, o Método II é mais eficiente na atenuação destes distúrbios inseridos na rede elétrica, se comparado com o Método I para filtragem ativa. Ainda, é importante salientar como o Método II mostra-se

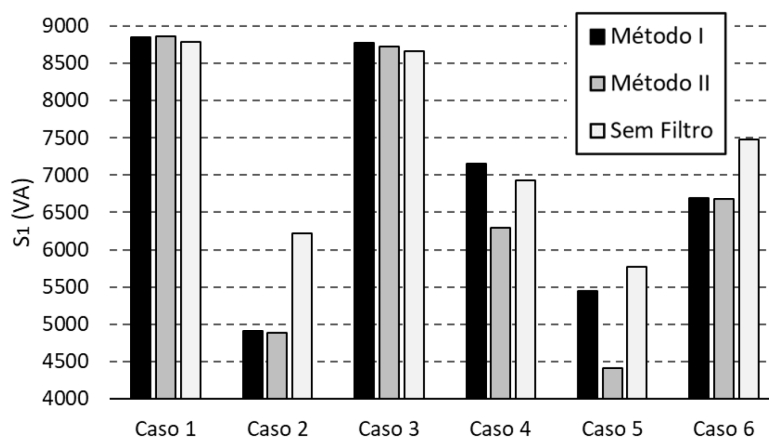
mais adequado para ser utilizado em sistemas com geração distribuída, uma vez que esses sistemas elétricos apresentam chaveamento estático em frequências mais elevadas, inserindo tal distúrbio na rede elétrica, e portanto, a metodologia do fator de potência unitário apresenta-se como uma solução pertinente para atenuação deste distúrbio. Assim, com o intuito de especificar como cada metodologia promove a utilização do sistema elétrico de distribuição de energia, é realizada a seguir uma análise do comportamento da atuação do filtro ativo no que se refere às demandas de potência diante da rede elétrica.

#### 4.7 ANÁLISE DE POTÊNCIA PARA OS CASOS ESTUDADOS

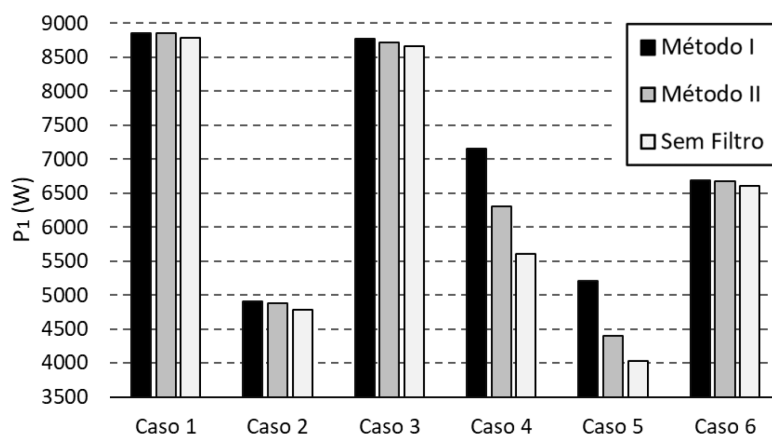
Deste modo, para compreender como a atuação do filtro em cada metodologia impacta a demanda de potência do sistema perante à fonte, foi realizada a análise de potência de acordo com a formulação proposta por [26], discutida na subseção 2.5 desta Dissertação. Os dados resultantes desta abordagem são expostos pelas Figura 444 até Figura 55.



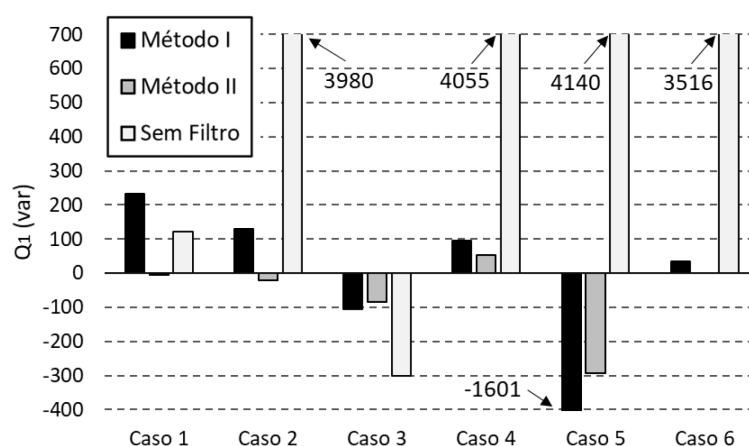
**Figura 44.** Potência aparente ( $S$ ).



**Figura 45.** Potência aparente fundamental ( $S_1$ ).



**Figura 46.** Potência ativa fundamental ( $P_1$ ).



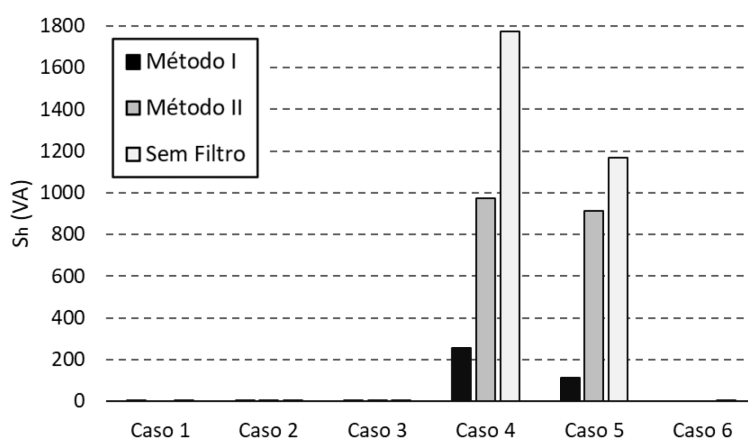
**Figura 47.** Potência reativa fundamental ( $Q_1$ ).

De acordo com Figura 44 a potência aparente fornecida pela rede é ligeiramente menor, assim como esboçam as Figura 45, Figura 46 e Figura 47 para as potências aparente, ativa e reativa fundamentais, para os Casos 2, 3 e 6, e consideravelmente menor para os Casos 4 e 5, embora demonstre igualdade para o Caso 1. Esta observação constata como o Método II proporciona uso mais eficiente que o Método I. No entanto, em condições de tensão com alta incidência de distúrbios o Método II se mostrou nitidamente mais eficiente que o Método I. Neste contexto, pode-se considerar o Método II como mais adequado à utilização se o aspecto a ser considerado é eficiência energética, pois o Método II determina menor quantidade de potência necessária para atender à carga.

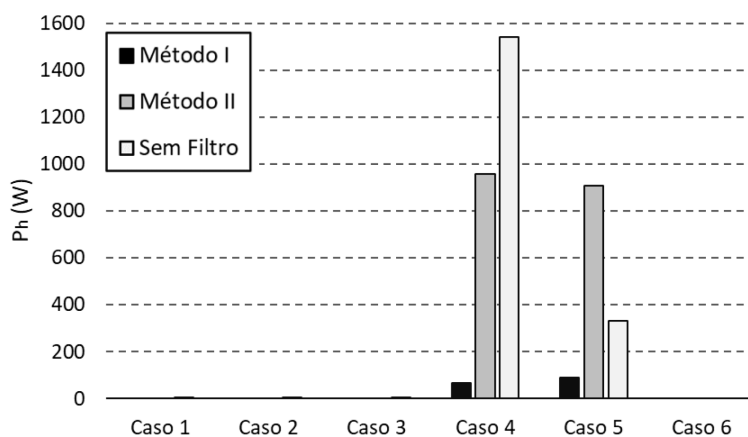
Esta afirmação pode ser comprovada, também, pela Figura 47, a qual mostra a potência reativa fundamental fornecida pela rede para cada metodologia. Esta ilustração expõe a aplicabilidade do Método II em realizar compensação reativa da carga, se comparado com o Método I. Isto se deve ao fato do Método II promover fator de

potência unitário, uma vez que é calculada a condutância equivalente do sistema elétrico trifásico minimizando as correntes responsáveis pela parcela reativa da carga. Logo, espera-se que exista potência reativa próxima de nula em qualquer situação de carregamento ou tensão de fornecimento da rede elétrica. Além disso, esta ilustração mostra também, como o Método I apresenta dificuldade em realizar a compensação de reativo em condições de tensão distorcida e desequilibrada, tendo em vista que a compensação do Método I é realizada com a tensão fundamental de sequência positiva como referência.

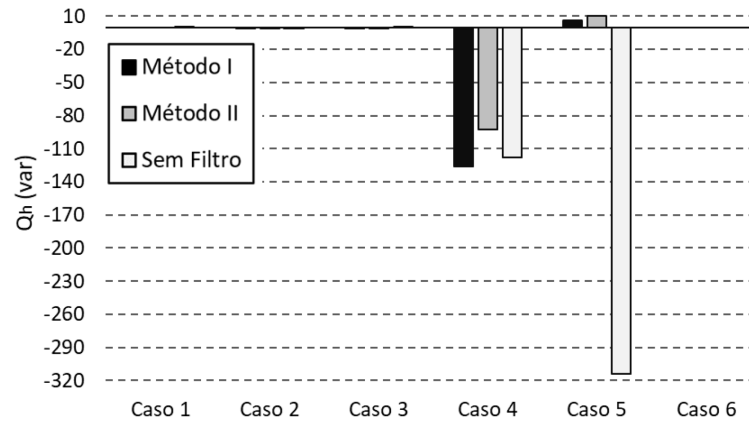
É importante especificar também o comportamento das componentes de potência de distorção após a atuação do filtro ativo para cada metodologia especificada. A seguir são mostrados os gráficos com os valores de potência sem filtro e com a filtragem ativa para Método I e Método II.



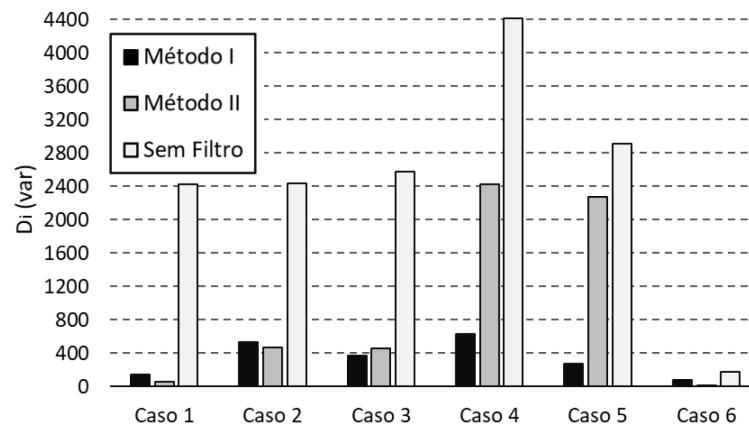
**Figura 48.** Potência aparente harmônica ( $S_h$ ).



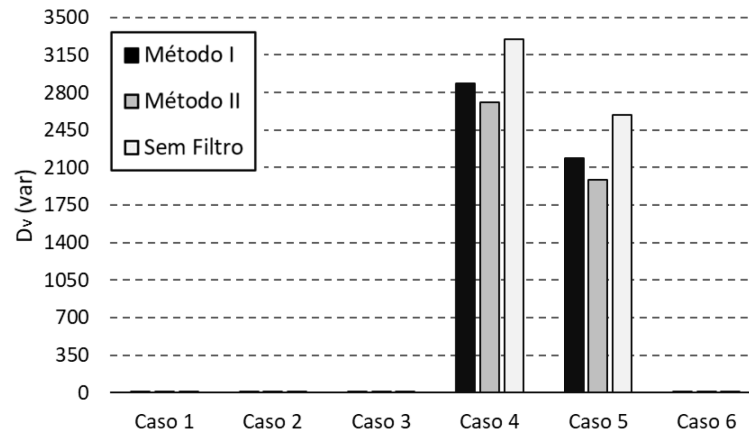
**Figura 49.** Potência ativa harmônica ( $P_h$ ).



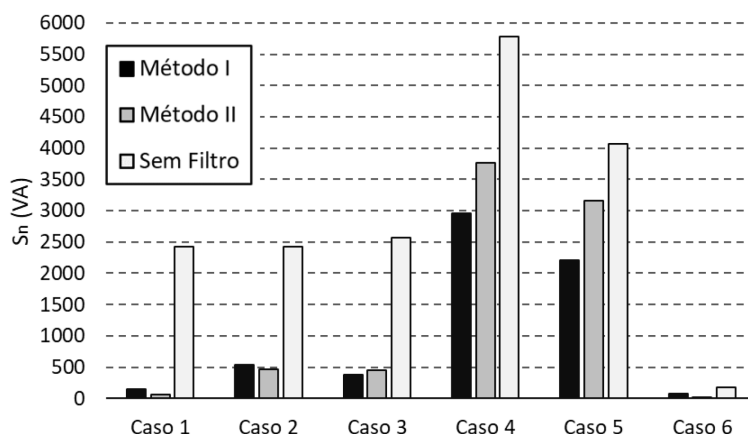
**Figura 50.** Potência reativa harmônica ( $Q_h$ ).



**Figura 51.** Potência de distorção de corrente ( $D_i$ ).



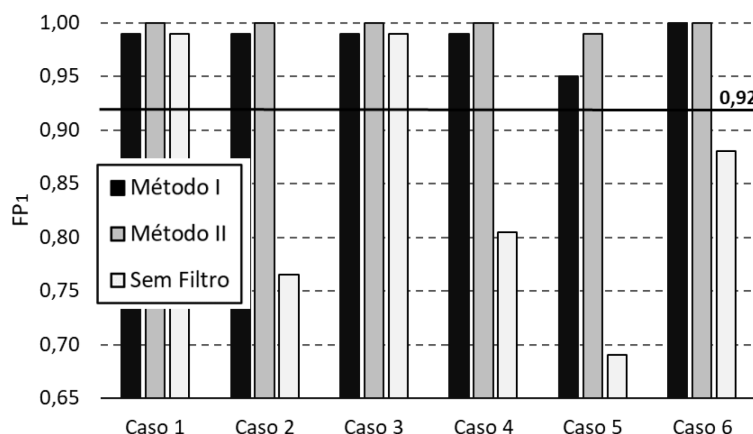
**Figura 52.** Potência de distorção de tensão ( $D_v$ ).



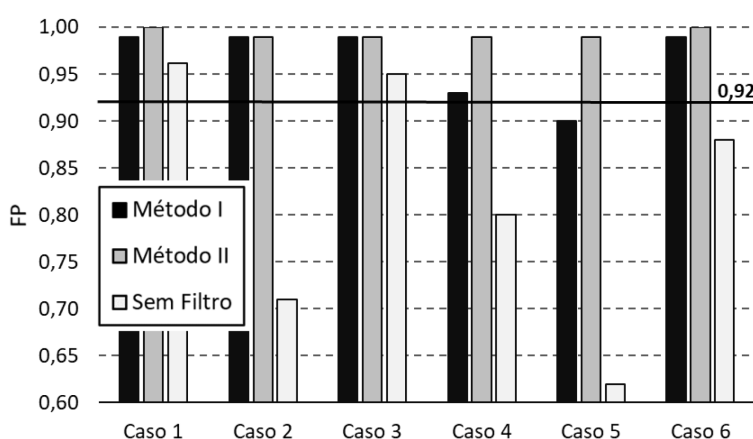
**Figura 53.** Potência aparente harmônica ( $S_h$ ).

Apesar das Figura 48, Figura 49 e Figura 50 especificarem que o Método II permite maiores quantidades de componentes harmônicas de potência serem demandadas da rede, isto não interfere na sua eficiência, enquanto metodologia que busca a melhor utilização do sistema de distribuição de energia, uma vez que mesmo mantendo componentes harmônicas de potência, esta metodologia não insere mais distúrbios na rede, apenas replica na proporção já existente. Assim, as potências de distorção de corrente e tensão e, também, a potência aparente de distorção, identificadas nas Figura 51, Figura 52 e Figura 53, respectivamente, promovem componentes de potência originárias de distúrbios harmônicos, entretanto, mais uma vez, não se torna um uso inadequado da rede, devido ao fato de não prejudicar a eficiência no uso do sistema e de não inserir mais componentes harmônicas além das já existentes.

Nas Figura 54 e Figura 55 são observados o  $FP_1$  e o  $FP$  no ponto de entrega para cada caso analisado. Deste modo, é observado que, para condições de tensão livre de desequilíbrio e distorções, as duas metodologias atendem às necessidades determinadas por [30], ainda que o Método I forneça  $FP$  menor do que o fornecido pelo Método II (Casos 1, 2 e 3).



**Figura 54.** Fator de potência fundamental (FP<sub>1</sub>) ou fator de deslocamento.



**Figura 55.** Fator de potência (FP).

É importante salientar como o Método II tem melhor desempenho em condições críticas de distorção de tensão. Desta forma, é evidenciado como o Método II se sobrepõe ao Método I (casos 4 e 5) no uso eficiente da rede de distribuição de energia elétrica e compensação do fator de potência, sendo que para o Caso 5 o Método I não atingiu o FP requisitado por [30], como mostra a Figura 55.

#### 4.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em suma, designando a metodologia que apresenta melhores resultados para cada caso analisado, tem-se a Tabela IV.

Tabela IV. Resumo - Casos e Metodologias

Condições		Método I	Método II
Caso 1	Linearidade	-	X
	DHT (%)	-	X
Caso 2	Linearidade	-	X
	DHT (%)	-	X
Caso 3	Linearidade	X	-
	DHT (%)	X	-
Caso 4	Linearidade	-	X
	DHT (%)	X	-
Caso 5	Linearidade	-	X
	DHT (%)	X	-
	FD (%)	X	-
Caso 6	Linearidade	X	X
	DHT (%)	-	X
Uso eficiente do Sistema Elétrico		-	X



## 5 CONCLUSÕES

No Capítulo 1 desta Dissertação foi apresentado o contexto do trabalho desenvolvido, com foco em estabelecer a relevância do assunto nos estudos de qualidade da energia elétrica e, concomitantemente, destacar a forma como os tipos de carga, que devido ao avanço tecnológico, alteraram-se ao longo do tempo, proporcionando novos questionamentos e o surgimento de novos fenômenos no sistema de distribuição de energia elétrica, sendo um destes os distúrbios harmônicos e desequilíbrios de cargas. Em outras palavras, este capítulo buscou delinear o ponto de contribuição dos estudos realizados, além de contextualizar a problemática no cenário atual da qualidade de energia elétrica, propondo a análise comparativa de duas metodologias de cálculo das correntes de compensação em filtros ativo paralelo, equipamento capaz de atenuar os distúrbios inseridos pelas cargas elétricas no sistema elétrico.

A abordagem realizada no Capítulo 2 possibilitou a compreensão teórica a respeito dos termos a serem discutidos e analisados nesta Dissertação. A discussão no tocante às teorias que compõem cada metodologia de compensação permitiu assimilar quais os parâmetros prioritários no cálculo das correntes de compensação do filtro ativo, de forma a estabelecer distinções claras acerca do objetivo de cada método em atenuar distúrbios elétricos. Entretanto, não foram abordados apenas fundamentos teóricos com relação às teorias de compensação em filtros ativos, mas também, houve a discussão de temas relevantes para a análise dos dados, com o coeficiente de correlação de Pearson e as definições de potência elétrica sob condições senoidais, não senoidais, equilibradas e desequilibradas. O coeficiente de correlação de Pearson foi abordado, pois se fez indispensável para a análise do comportamento das características  $v_i$  de cada situação estudada, a respeito da linearidade ou não linearidade da carga após a atuação do filtro ativo em cada metodologia. Ainda, as definições de potência elétrica sob condições senoidais, não senoidais, equilibradas e desequilibradas teve vital importância na análise da performance de cada metodologia perante o uso eficiente da rede de distribuição de energia elétrica, de forma a especificar quais componentes advinham de distúrbios elétricos e quais componentes eram oriundas do trabalho útil realizado pela carga e como cada uma destas parcelas impactam a potência aparente  $S$  demandada da rede.

Em seguida, o entendimento diante da simulação computacional do filtro ativo paralelo para cada metodologia abordada no Capítulo 3, permitiu a compreensão de como foram realizadas as simulações computacionais, assim como a especificação dos

parâmetros do circuito de potência do filtro ativo. Além disso, a descrição do processo de sintonização dos controladores PI para cada metodologia também foi abordada. Não apenas a estrutura de potência e circuito de controle foram discutidos, mas também as estratégias de controle e cálculo realizados para a implementação computacional de cada metodologia do filtro foram discutidas e descritas, de forma a possibilitar a compreensão completa da modelagem do filtro ativo e especificar como é realizado seu funcionamento. Outro aspecto relevante a ser apontado neste capítulo foi a possibilidade de mostrar como as teorias abordadas no Capítulo 2 são aplicadas em casos reais de simulação.

Os estudos apresentados no Capítulo 4 demonstram que em condições de tensão senoidal e equilibrada (Casos 1, 2 e 3), ambos os métodos fornecem desempenho satisfatório, uma vez que apresentam valores similares para distorção de corrente absorvida da rede. Entretanto, o Método II apresentou distorções harmônicas ligeiramente menores, como aponta os resultados dos Casos 1 e 2, além de caracterizar a carga com maior linearidade do que os resultados obtidos pelo Método I em todos os Casos.

Os Casos 4 e 5 promovem condições de tensões distorcidas, além de distorcidas e desequilibradas, respectivamente, neste cenário de análise o Método II apresenta valores de distorção maiores dos fornecidos pelo Método I, isto se deve ao fato da forma de atenuação decorrente de cada metodologia, uma vez que o Método I promove uma corrente senoidal e equilibrada, assim a forma de onda da corrente da fonte após atuação do filtro possui distorções harmônicas e desequilíbrios com amplitudes pouco significativas. Por outro lado, o Método II mantém os distúrbios contidos na tensão e, devido a isso, apresenta conteúdos harmônicos e de desequilíbrios proporcionais na corrente de linha a fim de manter a linearidade entre tensão e corrente. Deste modo, o Método II apesar de manter a distorção da corrente de linha após a atuação do filtro, este não insere mais distúrbios na rede, onde, do ponto de vista de qualidade da energia elétrica, não piora as condições de funcionamento da rede, visto que replica os distúrbios já identificados na forma de onda da tensão.

Ainda, considerando o Caso 6 para a análise harmônica é constatado como o Método II também apresenta melhor desempenho para componentes harmônicas de ordem elevada, uma vez que proporciona tanto DHT% como linearidade melhores, se comparado estes dados com os obtidos para o Método I. Deste modo, a metodologia de minimização das correntes de carga, neste trabalho também denominada de método do fator de potência unitário, ou ainda, Método II apresenta-se mais adequado para condições de rede em que a presença de geração distribuída é considerável, tendo em vista os níveis

elevados de distorção harmônica individual em componentes de alta ordem, já que esta metodologia atenua tais distúrbios com maior eficiência, em comparação ao desempenho do Método I.

Realizando a análise de potência foi constatado que o Método I possibilita um uso adequado da rede. Entretanto, o Método II possibilita um uso mais eficiente e uma melhor correção do fator de potência para todos os casos analisados, em contrapartida do Método I, que falhou ao corrigir o FP para o Caso 5. Assim, é coerente sugerir que o Método II em condições de tensão senoidal e equilibrada, assim como distorcida e desequilibrada, proporciona uso mais eficiente da rede de distribuição e, ainda, que em casos de tensão com distúrbios drásticos, não promove mais distúrbios além dos previamente existentes. Adicionalmente, é importante salientar que o Método II apresenta maior facilidade em processamento, pois o cálculo das correntes de compensação não utiliza de transformadas  $\alpha\beta$  ou de componentes simétricas, possibilitando, assim, uma atuação mais rápida e precisa do filtro ativo.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

- Realizar o desenvolvimento do *hardware* do filtro ativo e desempenhar experimentos buscando validar os resultados encontrados nesta Dissertação.
- Desenvolver simulação computacional e experimento para verificar o comportamento do filtro ativo para um sistema com várias barras

## REFERÊNCIAS

- [1] J. A. Pomilio e S. M. Deckmann, “Caracterização e compensação de harmônicos e reativos de cargas não lineares residenciais e comerciais” *Eletrônica de Potência*, vol. 11, nº 1, pp. 9-16, 2006. <http://dx.doi.org/10.18618/REP.2006.1.009016>
- [2] H. Akagi, Y. Kanazawa e A. Nabae, “Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components” *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vols. 1A-20, pp. 625-630, 1984. <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.1984.4504460>
- [3] F. S., “Wirk-, Blind-und Scheinleistung in Elektrischen Stromkreisen mit nichtsinusoidalen, Verlauf von Strom und Spannung” *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 7, p. 193–203, 1931.
- [4] E. H. Watanabe, M. Aredes e H. Akagi, “The P-Q for active filter control: some problems and solutions” *Revista Controle & Automação*, vol. 2004, pp. 78-84, 2004. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-17592004000100010>
- [5] H. Akagi, E. H. Watanabe e M. Aredes, *Instantaneous Power: Theory and Applications to Power Conditioning*, New Jersey: IEEE PRESS, 2007. ISBN: 9780470118931. <http://dx.doi.org/10.1002/0470118938>
- [6] L. Wang, C.-S. Lam e M.-C. Wong, “Minimizing Inverter Capacity Design and Comparative Performance Evaluation of SVS-Coupling Hybrid Active Power Filters” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 34, nº 2, pp. 1227 - 1242, 2019. <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2018.2828159>
- [7] M. Cirrincione, M. Pucci, G. Vitale e A. Miraoui, “Current Harmonic Compensation by a Single-Phase Shunt Active Power Filter Controlled by Adaptive Neural Filtering” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, nº 8, pp. 3128 - 3143, 2009. <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2009.2022070>
- [8] R. R. Pereira, C. H. Silva, L. E. B. Silva, G. Lambert-Torres e J. O. P. Pinto, “New Strategies for Application of Adaptive Filters in Active Power Filters” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, nº 3, pp. 1136 - 1141, 2000. <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2011.2125931>

- 
- [9] A. M., J. Hafner e K. Heumann, "Three-Phase Four-Wire Shunt Active Filter Control Strategies," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 12, nº 2, pp. 311 - 318, 1997. <http://dx.doi.org/10.1109/63.558748>
- [10] S. Valiviita e S. J. Ovaska, "Delayless Method to Generate Current Reference for Active Filters" IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 45, nº 4, pp. 559 - 567, 1998. <http://dx.doi.org/10.1109/41.704882>
- [11] J.-C. Wu, H.-L. Jou, Y.-T. Feng, W.-P. Hsu, M.-S. Huang e W.-J. Hou, "Novel Circuit Topology for Three-Phase Active Power Filter" IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, nº 1, pp. 444 - 449, 2007. <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2006.881416>
- [12] A. Medina-Rios e H. A. Ramos-Carranza, "An Active Power Filter in Phase Coordinates for Harmonic Mitigation" IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, nº 3, pp. 1991 - 1993, 2007. <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2007.899985>
- [13] W. Longhui, Z. Fang, Z. Pengbo, L. Hongyu e W. Zhaoan, "Study on the Influence of Supply-Voltage Fluctuation on Shunt Active Power Filter" IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, nº 3, pp. 1743 - 1749, 2007. <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRD.2007.899786>
- [14] T.-L. Lee, P.-T. Cheng, H. Akagi e H. Fujita, "A Dynamic Tuning Method for Distributed Active Filter Systems" IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 44, nº 2, pp. 612 - 623, 2008. <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2008.916596>
- [15] C. Leszek S., "Orthogonal decomposition of the currents in a 3-phase nonlinear asymmetrical circuit with a nonsinusoidal voltage source", 1 ed., vol. 37, pp. 30 - 34, 1988. <http://dx.doi.org/10.1109/19.2658>
- [16] M. Aredes e L. F. C. Monteiro, "A control strategy for shunt active filter" 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power. (ICHQP), 6-9 Outubro 2002. <http://dx.doi.org/10.1109/ICHQP.2002.1221481>
- [17] K. R. Uyyuru, M. K. Mishra e A. Ghosh, "An optimization-based algorithm for shunt active filter under distorted supply voltages" IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, pp. 1223 - 1232, 2009. <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2008.2011908>

- 
- [18] P. P. Melo, "Projeto e implementação de um filtro ativo universal trifásico controlado digitalmente." Dissertação de Mestrado. Curitiba, 2010. Disponível em Repositório UTFPR.
- [19] H. Yi, F. Zhuo, Y. Zhang, Y. Li, W. Zhan, W. Chen e J. Liu, "A source-current-detected shunt active power filter control scheme based on vector resonant controller", 3 ed., vol. 50, pp. 1953 - 1965, 2014. <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.2013.2289956>
- [20] P. Kanjiya, V. Khadkikar e H. H. Zeineldin, "Optimal control of shunt active power filter to meet IEEE Std. 519 current harmonic constraints under nonideal supply condition" IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, pp. 724 - 734, 2015. <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2014.2341559>
- [21] "IEEE 519-2014 - IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," ISBN: 978-0-7381-9005-1, 2014. <http://dx.doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6826459>
- [22] R. L. A. Ribeiro, T. O. A. Rocha, R. M. Souza, E. C. Santos e A. M. Lima, "A robust DC-link voltage control strategy to enhance the performance of shunt active power filters without harmonic detection schemes", 2 ed., vol. 62, pp. 803 - 813 2015. <http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2014.2345329>
- [23] R. Panigrahi e B. Subudhi, "Performance enhancement of shunt active power filter using Kalman Filter-Based Control Strategy", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 32, ed. 4, pp. 2622 - 2630, Abril 2017. <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2016.2572142>
- [24] Y. Hoon, M. A. M. Radzi, M. H. Hassan e N. F. Mailah, "Control Algorithms of Shunt Active Power Filter for Harmonics Mitigation: A Review", pp. 1 - 30, Energies 2017. <http://dx.doi.org/10.3390/en10122038>
- [25] C. G. Bianchi e R. O. J. S. Demonti, "Filtro Ativo Trifásico para Qualidade da Energia Elétrica: Compensação e Balanceamento", Trabalho de Conclusão de Curso, 2007. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/biblioteca/citenel2007/pdf/it03.pdf>
- [26] IEEE 1459: Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. ISBN: 978-0-7381-6058-0, 2010. <http://dx.doi.org/10.1109/IEEESTD.2010.5439063>

- 
- [27] “COE UFRJ,” [Online]. Available: <http://www.coe.ufrj.br/~kleber/Transformadas.pdf>. [Acesso em 26 Junho 2019].
- [28] S. S. Rao, *Engineering Optimization: Theory and Practice*, John Wiley and Sons, ISBN: 9781119454793, 2009.
- [29] M. D. C. Silva, "Projeto e Simulação de um Filtro Ativo Paralelo", Trabalho de Conclusão de Curso. UNIPAMPA, Alegrete, Rio Grande do Sul, 2016.
- [30] ANEEL, "Resolução Normativa nº414: Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica", Disponível: <http://www.aneel.gov.br/ren-414>. [Acessado em 26 Junho 2019]. Brasília, Distrito Federal, 2010.
- [31] J. R. M. Jr, A. E. Emanuel e J. A. Orr, “An Evaluation of Shunt Active Filtering Techniques in the Era of Smart Grids,” *International Conference of Harmonics and Quality of Power - ICHQP*, 2016. <http://dx.doi.org/10.1109/ICHQP.2016.7783314>