

**ANÁLISE E MITIGAÇÃO DE HARMÔNICAS EM SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA****ANALYSIS AND MITIGATION OF HARMONICS IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS****ANÁLISIS Y MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS EN SISTEMAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA**Edenilson Henrique Salvador<sup>1</sup>, Ronaldo Gomes Figueira<sup>1</sup>, Fabiana Florian<sup>1</sup>

e5115924

<https://doi.org/10.47820/recima21.v5i11.5924>

PUBLICADO: 11/2024

**RESUMO**

O uso de componentes semicondutores tem impulsionado significativamente o desenvolvimento industrial, comercial e o conforto residencial, porém, também tem causado distorções harmônicas nas instalações elétricas desses setores e no sistema elétrico de forma geral. O objetivo deste trabalho é analisar as harmônicas em sistemas de energia elétrica, explorando suas origens, impactos e estratégias de mitigação. Foi realizada uma pesquisa bibliográfica abordando a deformação da onda senoidal, os tipos de cargas, suas causas e consequências, além dos métodos disponíveis para mitigar essas perturbações. Conclui-se que as distorções harmônicas no sistema elétrico são inevitáveis, principalmente devido ao uso crescente de dispositivos eletroeletrônicos, no entanto, as variáveis como: tipos de cargas, origem das distorções, técnicas de mitigação, condicionamento da qualidade de energia, e estrutura das redes elétricas podem ser acolhidas para solucionar os problemas dessa natureza.

**PALAVRAS-CHAVE:** Distorções. Harmônicas. Frequência. Filtros. Transformadores**ABSTRACT**

*The use of semiconductor components has significantly driven industrial and commercial development as well as residential comfort; however, it has also led to harmonic distortions in the electrical installations of these sectors and in the power system as a whole. The objective of this work is to analyze harmonics in electrical power systems, exploring their origins, impacts, and mitigation strategies. A literature review was conducted, covering sine wave deformation, load types, their causes and consequences, and the available methods to mitigate these disturbances. It is concluded that harmonic distortions in the electrical system are inevitable, mainly due to the increasing use of electronic devices; however, variables such as load types, distortion sources, mitigation techniques, power quality conditioning, and the structure of electrical networks can be managed to address these issues.*

**KEYWORDS:** Distortions. Harmonics. Frequency. Filters. Transformers.**RESUMEN**

*El uso de componentes semicondutores ha impulsado significativamente el desarrollo industrial, comercial y el confort residencial; sin embargo, también ha provocado distorsiones armónicas en las instalaciones eléctricas de estos sectores y en el sistema eléctrico en general. El objetivo de este trabajo es analizar los armónicos en los sistemas de energía eléctrica, explorando sus orígenes, impactos y estrategias de mitigación. Se realizó una revisión bibliográfica que aborda la deformación de la onda senoidal, los tipos de cargas, sus causas y consecuencias, así como los métodos disponibles para mitigar estas perturbaciones. Se concluye que las distorsiones armónicas en el sistema eléctrico son inevitables, principalmente debido al creciente uso de dispositivos electrónicos; sin embargo, se pueden gestionar variables como los tipos de cargas, el origen de las distorsiones, las técnicas de mitigación, el acondicionamiento de la calidad de energía y la estructura de las redes eléctricas para abordar estos problemas.*

**PALABRAS CLAVE:** Distorsiones. Armónicos. Frecuencia. Filtros. Transformadores.<sup>1</sup> Universidade de Araraquara – UNIARA.



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE E MITIGAÇÃO DE HARMÔNICAS EM SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA  
Edenilson Henrique Salvador, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

### INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o aumento da complexidade e da demanda por energia elétrica tem levado a um crescente interesse na análise e mitigação de harmônicas em sistemas de energia elétrica. As harmônicas são distorções nas formas de onda da corrente e da tensão, que podem ser geradas por uma variedade de dispositivos não lineares presentes nos sistemas elétricos, tais como inversores, retificadores, equipamentos eletrônicos de potência, entre outros.

De acordo com Neves (2014), aproximadamente 44% da energia fornecida pelas concessionárias é consumida pelo setor industrial. Nesse setor, mais de dois terços da demanda está vinculada ao uso de motores. Considerando essas informações, é crucial realizar pesquisas que analisem o desempenho e o torque dessas máquinas. Um dos fatores que contribui para a diminuição dessas variáveis é a presença de distúrbios na qualidade da energia elétrica (QEE) na tensão de alimentação dos motores.

Embora as harmônicas em si não representem uma ameaça direta à integridade do sistema elétrico, elas podem causar uma série de problemas indesejados, tais como sobreaquecimento de equipamentos, redução da vida útil de componentes, ressonâncias, mau funcionamento de dispositivos eletrônicos sensíveis e até mesmo interrupções no fornecimento de energia. Portanto, a compreensão desses fenômenos e a implementação de medidas adequadas de mitigação são essenciais para garantir a operação confiável e eficiente dos sistemas elétricos modernos. Conforme indicado por Neves (2014), esses fenômenos têm o potencial de modificar o funcionamento dos dispositivos conectados à rede elétrica, resultando em efeitos que podem variar de mínimos a significativos. Em razão disso, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) desenvolveu um manual intitulado Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), que define e estabelece limites para esses fenômenos (ANEEL, 2018).

Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise das harmônicas em sistemas de energia elétrica, explorando suas fontes, efeitos e técnicas de mitigação. Como objetivos específicos busca identificar e caracterizar as principais fontes de harmônicas em sistemas de energia elétrica e as técnicas mais eficazes de mitigação. Foi realizada pesquisa bibliográfica, descritiva e qualitativa, buscando apresentar mitigação de harmônicas.

Este trabalho busca contribuir para o avanço do conhecimento nesta área e para o desenvolvimento de soluções mais eficazes e sustentáveis para os desafios enfrentados pelos sistemas de energia elétrica modernos. A compreensão das harmônicas e das estratégias de mitigação associadas é fundamental para promover uma operação mais segura, confiável e eficiente dos sistemas elétricos, impulsionando assim o progresso rumo a uma infraestrutura energética mais resiliente e sustentável.



## **DISTORÇÕES HARMÔNICAS: CONCEITO, TIPOS E CONSEQUÊNCIAS**

Distorções harmônicas são variações na forma de onda da corrente ou tensão elétrica que ocorrem devido à presença de componentes de frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental do sistema elétrico, como 50 ou 60 Hz. Em um sistema ideal, a corrente e a tensão teriam formas de onda perfeitamente senoidais, mas na presença de equipamentos não lineares (como inversores, retificadores, e fontes chaveadas), surgem essas componentes adicionais, chamadas harmônicas, que alteram a forma de onda original (Arrillaga; Watson, 2003).

Essas distorções podem causar vários problemas, como superaquecimento de máquinas, aumento do consumo de energia, mau funcionamento de equipamentos eletrônicos sensíveis e desgaste de componentes elétricos. A Taxa de Distorção Harmônica Total (THD) é usada para quantificar o nível dessas distorções em um sistema.

As distorções de forma de onda em sistemas de distribuição podem ser corrigidas por diferentes métodos, como regulamentações, desenvolvimento de dispositivos com baixo índice de distorção de corrente, reconfiguração da estrutura do sistema e instalação de equipamentos de supressão harmônica, especialmente em casos em que os requisitos normativos de harmônicos não são atendidos.

Para mitigar distorções harmônicas, é comum adotar medidas operacionais que se concentram na adequação individual das cargas geradoras de harmônicos, como aumentar o número de pulsos em conversores, ou modificar a topologia das redes elétricas. Contudo, essas ações frequentemente não são suficientes para assegurar o desempenho adequado do sistema ou garantir o cumprimento dos limites normativos estabelecidos.

Nessas situações, é fundamental empregar equipamentos especializados que reduzam a distorção harmônica ou preservem as condições operacionais da alimentação elétrica. Exemplos incluem a redução da potência especificada para o transformador em caso de cargas não lineares, a separação do condutor neutro dessas cargas, e o uso de sensores de corrente no condutor neutro para interromper a fase.

A utilização de filtros e dispositivos de compensação harmônica é uma prática amplamente empregada para reduzir os efeitos dos harmônicos. Essas soluções são classificadas em dois grandes grupos: filtros passivos e ativos, dependendo dos harmônicos em sistemas elétricos. Essas técnicas podem ser classificadas em dois principais grupos: filtros passivos e ativos, conforme seu modo de operação. Ambos os tipos de filtros são amplamente conhecidos e utilizados em diversas áreas da engenharia elétrica, oferecendo soluções eficazes para a redução de distorções harmônicas e garantindo o funcionamento eficiente e seguro dos sistemas de distribuição.

- Filtros Passivos: Os filtros passivos são uma das abordagens mais comuns para mitigar harmônicas. Eles consistem em circuitos LC sintonizados para atenuar as harmônicas em frequências específicas. Os filtros passivos são eficazes para reduzir as harmônicas de baixa e média ordem, mas podem ser volumosos e caros para frequências mais altas.



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE E MITIGAÇÃO DE HARMÔNICAS EM SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA  
Edenilson Henrique Salvador, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

- Filtros Ativos: Os filtros ativos são baseados em dispositivos eletrônicos de potência, como inversores, para gerar correntes harmônicas de magnitude e fase opostas às harmônicas presentes na rede. Essa técnica permite uma mitigação mais flexível e eficaz de harmônicas em uma ampla faixa de frequências, sendo especialmente útil para harmônicas de alta ordem.

- Compensadores Estáticos de Potência Reativa (STATCOM): Embora projetados principalmente para fornecer compensação de potência reativa, os STATCOMs também podem ser usados para mitigar harmônicas. Eles operam injetando correntes harmônicas controladas na rede para cancelar as harmônicas indesejadas.

- Transformadores Especiais: Alguns tipos de transformadores, como transformadores com enrolamentos *zigzag* ou com enrolamentos desacoplados, podem ser projetados para mitigar harmônicas. Eles funcionam distribuindo a corrente harmônica entre os enrolamentos de maneira mais uniforme, reduzindo assim as harmônicas na rede.

As distorções harmônicas podem ser causadas por diferentes dispositivos ou por perturbações ressonantes. Embora as cargas não lineares sejam as principais responsáveis por essas distorções, cargas lineares também podem gerar distorções dependendo das condições impostas no sistema elétrico. Quando uma carga linear é alimentada por uma fonte de energia com uma forma de onda já distorcida, a resposta dessa carga também apresentará distorções (Antunes; Sampaio, Leão, 2014).

A própria geração de energia elétrica, como em usinas hidrelétricas (UHEs), contribui com uma pequena fração de conteúdo harmônico, geralmente inferior a 1%. Dessa forma, é praticamente impossível alcançar um Sistema Elétrico de Potência (SEP) totalmente isento de distúrbios, mesmo que sejam mínimos (Sankaran, 2002).

Antunes, Sampaio e Leão (2014) e Sankaran (2002) classificam as fontes geradoras de harmônicas em várias categorias, como conversores estáticos, transformadores, máquinas rotativas, fornos a arco e reatores eletrônicos para iluminação.

Para Antunes, Sampaio e Leão (2014) A qualidade da energia elétrica pode ser entendida de duas maneiras: a qualidade da tensão na fonte de geração afeta o comportamento da corrente elétrica que alimenta as cargas; e, por sua vez, o tipo de carga pode impactar o comportamento da tensão e da corrente que retornam à fonte. Nesse cenário, as cargas não lineares causam distorções na tensão quando correntes distorcidas surgem devido à impedância do circuito.

O que mais preocupa, entretanto, é perceber que várias dessas remessas são cruciais para a indústria, o comércio, os hospitais e o bem-estar em casa. Não é um exagero dizer que essa carga se torna um mal inevitável nesse contexto.

É válido afirmar que as distorções harmônicas podem provocar diversos problemas. Nesse sentido, torna-se claro a importância de monitorar as cargas não lineares. O que mais preocupa, entretanto, é a ausência de uma regulamentação em nível nacional. Não é exagerado afirmar que as perturbações na rede elétrica podem resultar em perdas financeiras. Conforme mencionado por Kagan, Oliveira e Robba (2010, p. 282) "Correntes harmônicas circulando no sistema de distribuição aumentam as perdas elétricas no sistema, e limitam a capacidade de transporte de demanda."



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE E MITIGAÇÃO DE HARMÔNICAS EM SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA  
Edenilson Henrique Salvador, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

A redução das distorções harmônicas é essencial. Do contrário, os problemas nas instalações elétricas se tornarão inevitáveis. Essa não é uma anomalia que pode ser facilmente identificada, uma vez que requer dispositivos sofisticados (como analisadores de qualidade de energia) para monitorar esse fenômeno. A Figura 1 apresenta os diversos tipos de distúrbios que podem surgir na rede.

Observa-se que as frequências das harmônicas não coincidem com a frequência fundamental. Como ilustrado na Figura 1, as harmônicas correspondem a múltiplos inteiros da fundamental, e os valores da fundamental se agregam à sua amplitude. Os sinais analógicos ou contínuos ao longo do tempo são utilizados em áreas como eletrônica, telecomunicações, controle de processos e instrumentação, entre outras. Segundo Costa (2017, p. 18), "A designação tempo contínuo deve-se ao fato de variável tempo ser continua, definida para qualquer instante de tempo sobre um domínio ou intervalo contínuo."

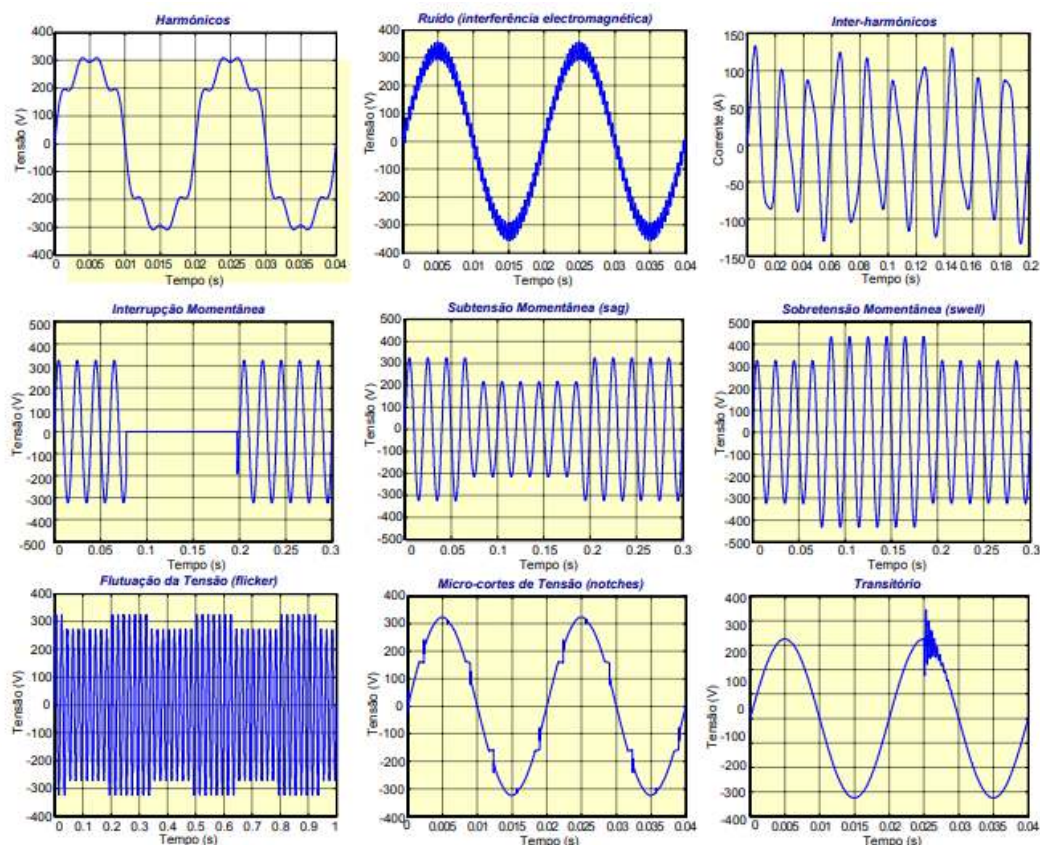


Figura 1- Problemas de qualidade de energia elétrica  
Fonte: Afonso e Martins (2004, p. 68).

Os distúrbios que comprometem a Qualidade da Energia Elétrica (QEE) fornecida aos consumidores podem se manifestar de diversas maneiras, como interrupções, harmônicos, flutuações de tensão (*flicker*), sub ou sobretensões, ruídos e microcortes de tensão (*notches*).

Esses distúrbios podem impactar negativamente o desempenho dos equipamentos conectados às redes de distribuição, causando até danos irreversíveis.



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE E MITIGAÇÃO DE HARMÔNICAS EM SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA  
Edenilson Henrique Salvador, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

No Brasil, o Módulo 8 do PRODIST estabelece normas sobre QEE, definindo limites para diversos distúrbios. Essas regulamentações permitem que as concessionárias avaliem a qualidade dos serviços em relação às perturbações, quantifiquem o impacto da inserção de cargas perturbadoras no planejamento futuro e controlem os distúrbios causados pelas cargas em operação, identificando a necessidade de medidas corretivas. Além disso, as normas orientam consumidores e fabricantes de dispositivos eletrônicos para evitar a produção ou uso de equipamentos que sejam excessivamente causadores ou sensíveis a essas perturbações.

### ALTERNATIVAS PARA REDUÇÃO DAS HARMÔNICAS

A distorção harmônica, em maior ou menor grau, é uma característica presente em todos os sistemas de energia elétrica. Normalmente, a mitigação desses harmônicos de tensão e corrente torna-se necessária apenas quando os níveis excedem os limites regulamentados, ocasionando problemas no desempenho do sistema. A implementação de estratégias de mitigação é especialmente recomendada durante o planejamento de novas instalações ou na aquisição de novos equipamentos, pois esses momentos são propícios para incorporar soluções preventivas de forma mais eficiente.

De acordo com o Prodist (2018), existem limites estabelecidos para as distorções harmônicas totais, conforme apresentado na Tabela 1, que estão relacionados à tensão fundamental e definidos em função do nível de tensão. Esses limites representam os valores máximos aceitáveis a serem considerados no sistema de distribuição de energia elétrica. É importante destacar que, quanto mais baixo for o nível da tensão fundamental, maior será o valor da distorção que é considerado aceitável.

Tabela 1 – Indicadores de distorções harmônicas

Indicador	Tensão nominal		
	Vn ≤ 1,0 kV	1,0 kV < Vn < 69 kV	69 kV ≤ Vn < 230kV
DTT	10,0%	8,0%	5,0%
DTTP	2,5%	2,0%	1,0%
DTTI	7,5%	6,0%	4,0%
DTT3	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: Prodist, (2018, p. 15)

As fórmulas a seguir são utilizadas para calcular as grandezas harmônicas DIT<sub>h</sub>%, DTT%, DTTP%, DTTI%, DTT3% (Prodist, 2018, p. 15).

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100$$

Equação 1

Distorção harmônica individual de tensão de ordem h  
sendo:

V<sub>h</sub> = tensão harmônica de ordem h;



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR

ISSN 2675-6218

ANÁLISE E MITIGAÇÃO DE HARMÔNICAS EM SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA  
Edenilson Henrique Salvador, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

$h$  = ordem harmônica individual;  
 $V_1$  = tensão fundamental medida.

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} V_h^2}}{V_1} \times 100$$

Equação 2

### Distorção harmônica total de tensão

sendo:

$h$  = todas as ordens harmônicas de 2 até  $h_{max}$ .

$h_{max}$  = ordem harmônica máxima, conforme classe do equipamento de medição utilizado (classe A ou S);

$V_h$  = tensão harmônica de ordem  $h$ ;

$V_1$  = tensão fundamental medida

$$DTT_p\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_p} V_h^2}}{V_1} \times 100$$

Equação 3

Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3

sendo:

$h$  = todas as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3 ( $h = 2, 4, 8, 10, 14, 16, 20, 22, 26, 28, 32, 34, 38, \dots$ );

$h_p$  = máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3;

$V_h$  = tensão harmônica de ordem  $h$ ; e  $V_1$  = tensão fundamental medida.

$$DTT_i\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_i} V_h^2}}{V_1} \times 100$$

Equação 4

Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3

sendo:

$h$  = todas as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3 ( $h = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35, 37, \dots$ );

$h_i$  = máxima ordem harmônica ímpar, não múltipla de 3.

$$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} V_h^2}}{V_1} \times 100$$

Equação 5

Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3

sendo:

$h$  = todas as ordens harmônicas múltiplas de 3 ( $h = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39, \dots$ );

$h_3$  = máxima ordem harmônica múltipla de 3;

$V_h$  = tensão harmônica de ordem  $h$ ;

e  $V_1$  = tensão fundamental medida.

Tabela 2 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)

Indicador	Tensão Nominal ( $V_n$ )	$V_n \leq 2,3$ kV	$2,3 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT95%		10,0%	8,0%	5,0%
DTTp95 %		2,5%	2,0%	1,0%
DTTi95%		7,5%	6,0%	4,0%



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR

ISSN 2675-6218

ANÁLISE E MITIGAÇÃO DE HARMÔNICAS EM SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA  
Edenilson Henrique Salvador, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

DTT3%		6,5%	5,0%	3,0%
-------	--	------	------	------

Fonte: Prodist, (2018, p. 15)

Conforme afirma Capelli (2013), uma das soluções para minimizar as harmônicas é por meio de filtros, que podem ser classificados como passivos ou ativos. Esses filtros se organizam em configurações em paralelo ou em série, dependendo de como se conectam à carga. Sua principal finalidade é reduzir a interferência gerada pela carga problemática, impedindo que o distúrbio se propague na rede elétrica. As ilustrações 2 e 3 a seguir mostram como se dá a conexão entre esses filtros, a carga e a rede elétrica.

O filtro ativo em série funciona ao bloquear uma frequência específica ou um intervalo determinado. Na figura 2, observa-se que a tensão de entrada do sistema que alimenta a carga sensível à tensão  $V_S$  apresenta uma forma de onda distorcida ou complexa. No entanto, o filtro série opera como uma fonte de tensão controlada, fornecendo uma tensão  $V_C$  para a carga; portanto, a tensão  $V_L$  que alimenta a carga sensível é a soma de  $V_S + V_C$ . Em comparação com os filtros passivos, o filtro ativo se mostra mais eficaz, pois é capaz de corrigir as distorções harmônicas que ocorrem nas tensões e correntes, além de possibilitar a regulação da componente reativa da corrente da carga (Antunes; Leão; Sampaio, 2014).

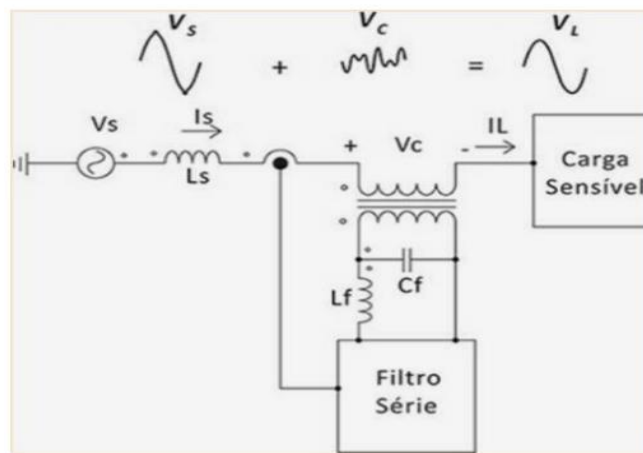


Figura 2 - Filtro ativo série  
Fonte: Antunes, Leão e Sampaio (2014, p. 124).

A figura 3 mostra um filtro passivo conectado em paralelo à carga. Existem três filtros do tipo LC destinados a eliminar as harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordens, em conjunto com um capacitor para frequências elevadas.

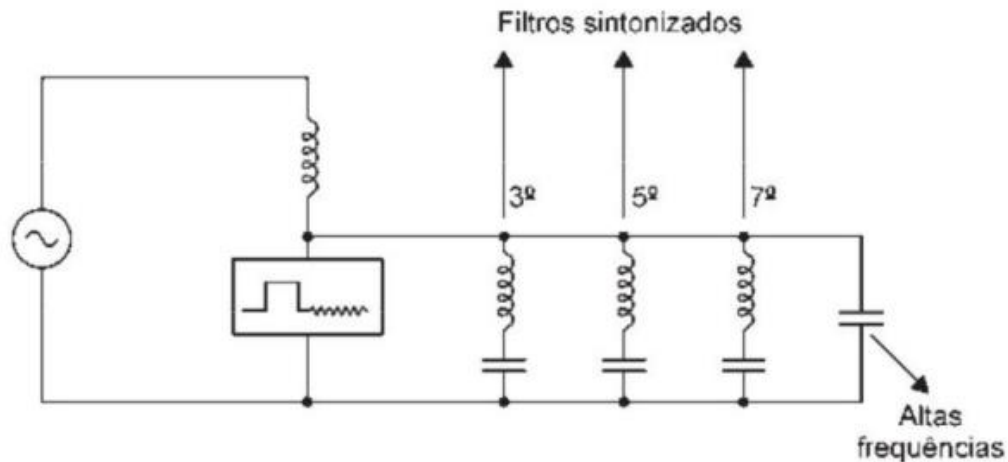


Figura 3 - Filtro passivo paralelo  
 Fonte: Capelli (2013, p. 136).

A Figura 4 mostra, no gráfico superior, a onda senoidal antes da filtragem e, no inferior, após a aplicação do filtro. Embora a distorção tenha sido reduzida com a filtragem, uma leve distorção ainda persiste. "Eliminá-las por completo na instalação é algo inviável; a solução é reduzi-las" (Capelli, 2013, p. 134).

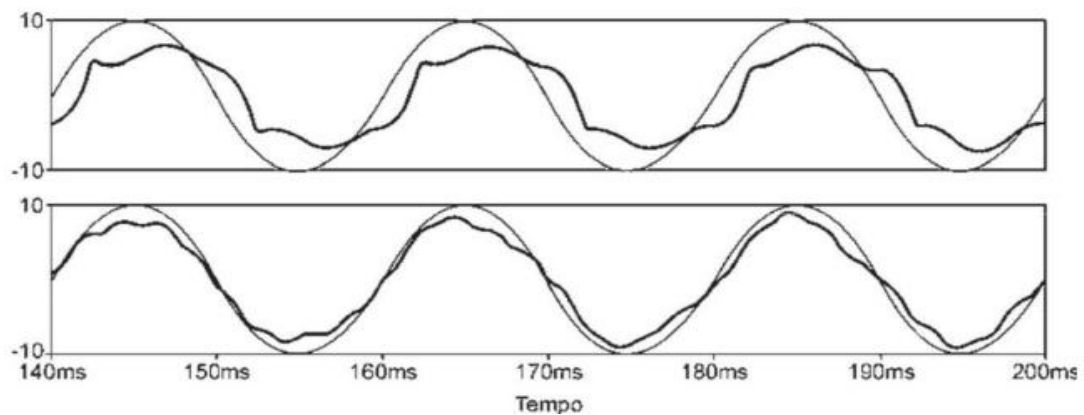


Figura 4 - Ondas senoidais distorcida e filtrada  
 Fonte Capelli (2013, p. 136).

A Figura 5 apresenta um filtro ativo paralelo de corrente, que possui características diferentes em comparação ao filtro ativo em série. Esse dispositivo reduz o impacto das harmônicas na corrente proveniente da fonte IS, permitindo que IS mantenha uma forma senoidal, mesmo ao alimentar uma carga não linear. Assim, o filtro produz uma corrente de compensação IC, que se combina com a corrente de carga IL, resultando em um sinal de forma complexa com frequência e amplitude distintas em relação ao sinal gerado pela fonte.

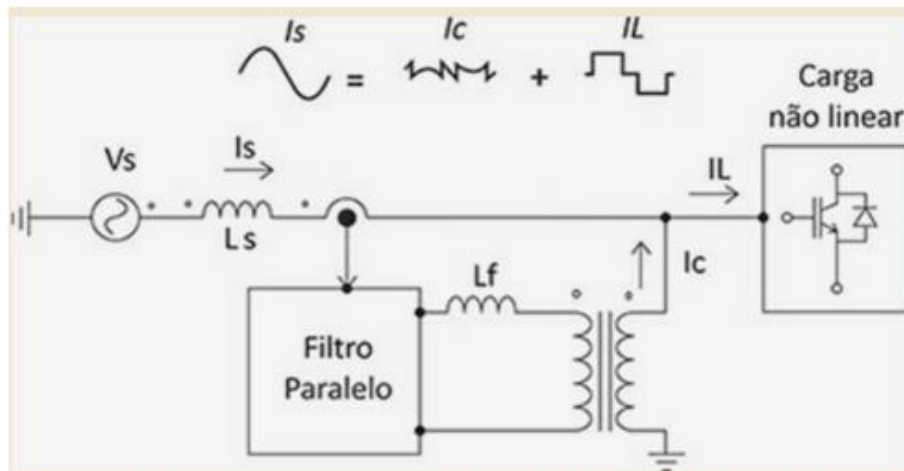


Figura 5 - Filtro ativo paralelo de corrente  
Fonte: Antunes, Leão e Sampaio (2014, p. 124).

Uma alternativa identificada para lidar com distorções harmônicas de tensão e corrente em um circuito é a implementação de um filtro ativo em configuração série e paralela. Consoante Antunes, Leão e Sampaio (2014, p. 124), “A combinação de filtros ativos série e paralelo é usada para compensação simultânea da tensão e da corrente.”

A figura 6 demonstra a capacidade do filtro em suprir uma carga que apresenta características tanto sensíveis quanto perturbadoras (não lineares). É importante destacar que essa disposição permite o ajuste simultâneo de ambas as variáveis, a tensão de saída e a corrente da carga, garantindo que ambas se mantenham equilibradas e compensadas (Antunes; Leão; Sampaio, 2014).

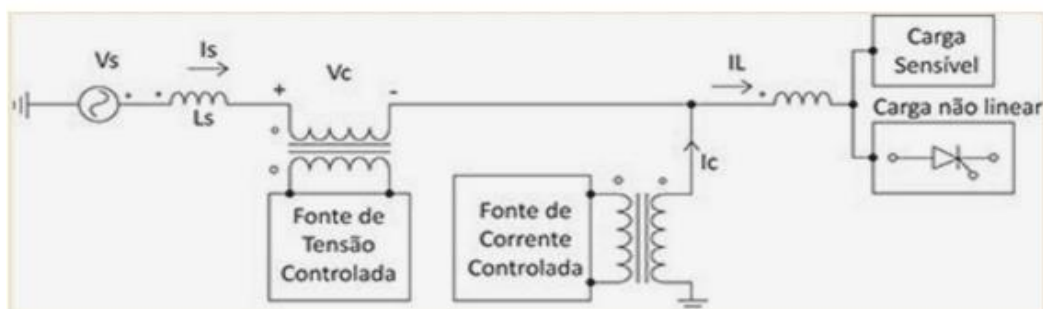


Figura 6 - Filtro ativo série e paralelo UPQC.  
Fonte: Antunes, Leão e Sampaio (2014, p. 124).

Os filtros conhecidos como Condicionadores Unificados de Qualidade de Energia (UPQC) são empregados em situações em que é necessário garantir uma tensão de qualidade para cargas sensíveis que não são lineares e que geram correntes harmônicas na rede elétrica. O componente em série do UPQC tem a função de injetar a tensão, assegurando que ela se mantenha estável e livre de distorções no ponto de conexão comum (PCC). Simultaneamente, o componente em derivação (paralelo ou shunt) do UPQC fornece corrente ao sistema de corrente alternada, permitindo que correntes senoidais equilibradas ingressem no barramento onde o UPQC está instalado.

De acordo com a Figura 7, os elementos responsáveis pela tensão e pela corrente atuam como fontes emissoras de sinais para a correção das deformações. O filtro de corrente fornece sinais de corrente modificados para atender à carga, enquanto o filtro de tensão preserva o sinal senoidal da tensão.

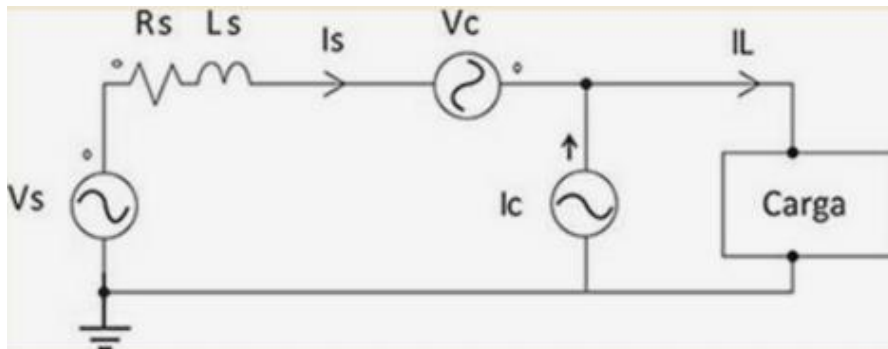


Figura 7 - Circuito equivalente de um UPQC  
 Fonte: Antunes, Leão e Sampaio (2014, p. 124).

Os filtros ativos híbridos, ilustrados na Figura 8, são formados por elementos ativos e passivos, sendo projetados nas configurações de ativo em paralelo com passivo em paralelo, e ativo em série com passivo em paralelo. Essa combinação resulta na melhoria do desempenho do filtro passivo devido à influência do filtro ativo, além de tornar esse tipo de filtro mais economicamente viável, uma vez que permite a diminuição da capacidade do filtro ativo (Antunes; Leão; Sampaio, 2014).

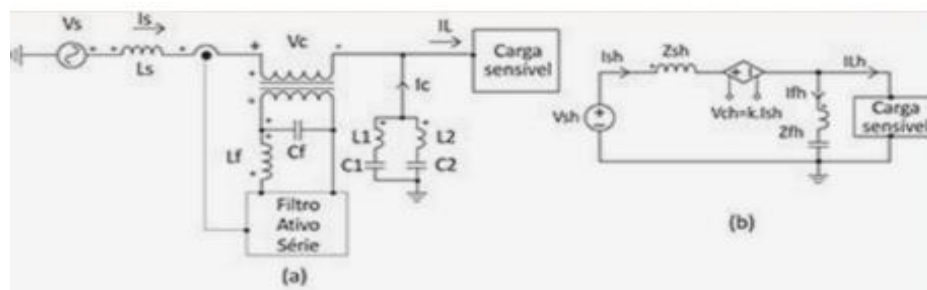


Figura 8 - Filtro híbrido ativo série-passivo paralelo: (a) diagrama unifilar; (b) circuito equivalente monofásico

Fonte: Antunes, Leão e Sampaio (2014, p. 125).

Uma maneira de diminuir as distorções harmônicas é através do uso de transformadores. De acordo com Antunes, Leão e Sampaio (2014, p. 112), "Os harmônicos podem ser diminuídos apenas pelo tipo de conexão dos transformadores". Quando esses dispositivos são conectados na configuração delta-delta, eles bloqueiam o fluxo de harmônicos de sequência 0 (zero). As correntes de sequência zero ficam restritas na conexão em delta, evitando que circulem tanto na linha primária quanto na secundária.

Os autores concordam que a utilização de transformadores representa uma alternativa eficaz para a mitigação de harmônicas. De acordo com Capelli (2013, p. 137), "uma outra alternativa é a utilização de um transformador isolador, que possui uma relação de tensão 1:1, ou seja, não altera a



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE E MITIGAÇÃO DE HARMÔNICAS EM SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA  
Edenilson Henrique Salvador, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

tensão de entrada em comparação com a tensão de saída, mas apenas fornece isolamento galvânico entre elas”. Portanto, a configuração da conexão do transformador será determinada pelas características da carga não linear que se deseja isolar, bem como pela ordem da harmônica.

Esse método é aplicado nas subestações de limite, utilizando transformadores na configuração estrela (aterrada) e delta. Seu objetivo é favorecer o isolamento das componentes de sequência zero que surgem no sistema de distribuição, uma vez que a configuração delta impede a transmissão de distorções para o lado primário. No sistema de distribuição, um transformador adicional (atenuador) com enrolamento em D-zigue-zague é instalado no lado secundário dos transformadores de fornecimento tipo delta/estrela (aterrada) (Antunes; Leão; Sampaio, 2014).

Na Figura 9, é apresentado o transformador em configuração D-zigue-zague. Esse tipo de transformador tem a função de atenuar as correntes harmônicas tanto na linha quanto no neutro, cumprindo assim o objetivo de minimizar as correntes harmônicas e a Distorção Harmônica Total de Corrente (DHTI). Ele proporciona um caminho de baixa impedância para as correntes de sequência zero, permitindo que a corrente no neutro seja distribuída entre ele e o transformador de fornecimento da subestação (Antunes; Leão; Sampaio, 2014).

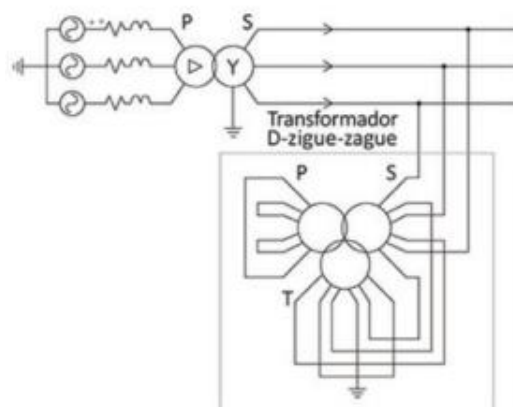


Figura 9 - Transformador com enrolamento em D-zigue-zague para redução de correntes harmônicas  
Fonte: Antunes, Leão e Sampaio (2014, p. 112).

De acordo com Moreno (2019), ao considerar circuitos de consumidores que possuem cargas monofásicas geradoras de harmônicas, é possível afirmar que o uso de transformadores com enrolamento do tipo delta/estrela (com aterramento) do mesmo nível de tensão, ou seja, na proporção de 1:1, visa isolar a carga que causa poluição das demais. Esta abordagem resulta no confinamento da terceira harmônica e de suas múltiplas inteiras, impedindo que as componentes de terceira ordem cheguem ao circuito primário, onde estão conectadas as cargas que não geram poluição. O modelo é apresentado a seguir na Figura 10.

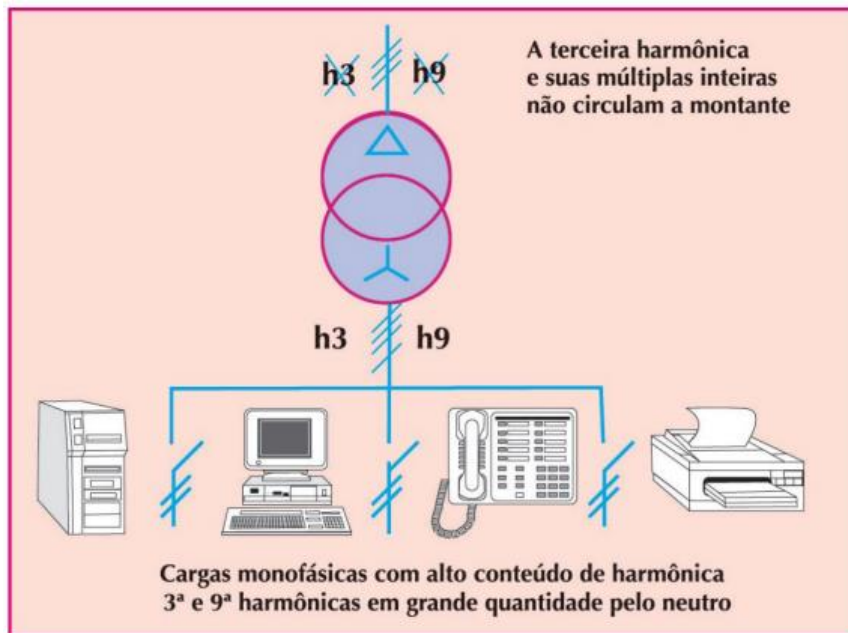


Figura 10 - Transformador para confinamento de 3ª harmônica e suas múltiplas  
 Fonte: Moreno (2019, p. 42).

A configuração mostrada é voltada apenas para o controle das harmônicas de terceira ordem geradas por dispositivos monofásicos, incluindo computadores, máquinas de fax, copiadoras, eletrodomésticos, entre outros. “Dessa forma, os diferentes elementos da instalação localizados antes do transformador podem ser projetados sem preocupações extras em relação às harmônicas, especialmente o condutor neutro.” (Moreno, 2019, p. 42).

Uma técnica alternativa sugerida para a separação das harmônicas geradas por equipamentos trifásicos, como retificadores e variadores de velocidade, consiste em empregar um transformador que possua dois enrolamentos secundários, permitindo assim uma defasagem angular de  $30^\circ$  entre as tensões de cada enrolamento. Outra abordagem para conseguir essa defasagem de  $30^\circ$  é a instalação de dois transformadores com diferentes tipos de enrolamento, conforme ilustrado na Figura 11. Um deles deve ser configurado como delta/estrela para as harmônicas de quinta ordem, enquanto o outro deve ser estrela/estrela para as harmônicas de sétima ordem.

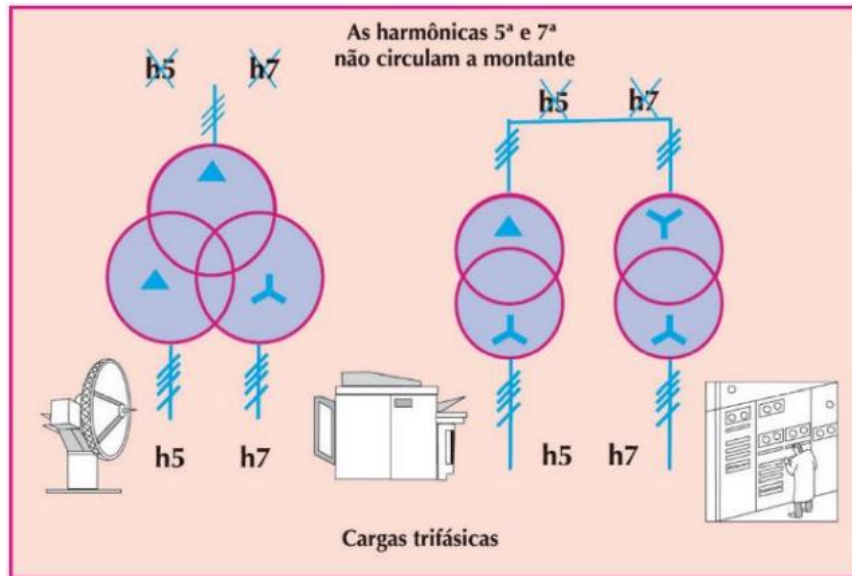


Figura 11- Transformador para confinamento de 5ª e 7ª  
Fonte: Moreno (2019, p. 42).

De acordo com Moreno (2019, p. 42), “Para que esta aplicação possa oferecer resultados satisfatórios, os transformadores devem alimentar apenas cargas trifásicas nos dois secundários”. Assim, a abordagem a ser utilizada varia conforme os elementos descritos pelos autores, considerando o tipo de fornecimento, a localização da carga não linear, a presença de cargas lineares no mesmo barramento e o grau da harmônica emitida pela carga que causa poluição. Portanto, é aconselhável que os atenuadores sejam instalados o mais próximo possível da carga não linear.

## MÉTODO

Foi realizada pesquisa bibliográfica, descritiva e qualitativa. Foram pesquisadas as palavras-chaves: Distorções. Harmônicas. Frequência. Filtros. Transformadores, na base de dados Google Acadêmico e a norma regulatória da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANELL), PRODIST. Anexo VIII da Resolução Normativa nº 956, de 7 de dezembro de 2021 - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 8 – Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica, Revisão 10, 2021 que permitiu um aprofundamento em diversos aspectos relacionados às distorções harmônicas e a qualidade de energia (Prodlist, 2021).

A pesquisa iniciou com uma investigação das características da deformação da onda senoidal, buscando identificar as diferentes formas de distorção e suas implicações nos sistemas elétricos pesquisa abordou os diferentes tipos de cargas que podem gerar distorções harmônicas, como cargas não lineares (por exemplo, motores, inversores e fontes chaveadas) e suas respectivas contribuições para a degradação da qualidade da energia. As causas dessas distorções foram analisadas, considerando fatores como a presença de componentes semicondutores e a configuração das instalações elétricas.



## RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR ISSN 2675-6218

ANÁLISE E MITIGAÇÃO DE HARMÔNICAS EM SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA  
Edenilson Henrique Salvador, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

Foram examinadas as consequências das distorções harmônicas sobre os equipamentos e a eficiência dos sistemas elétricos. Também foi estudado a análise de métodos disponíveis para mitigar essas perturbações, destacando técnicas como filtros harmônicos, reconfiguração de sistemas e normatizações que visam controlar os efeitos negativos das distorções.

### CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir do objetivo proposto, foi possível identificar as cargas causadoras das distorções harmônicas, os efeitos resultantes nos equipamentos afetados, assim como os prejuízos causados por essa anomalia que está presente em todo o sistema elétrico. Entretanto, existem medidas para minimizar as tensões e as correntes harmônicas. Primeiramente, a natureza das cargas conectadas ao sistema elétrico desempenha um papel crucial, especialmente no que diz respeito às cargas não lineares, como motores, inversores e fontes chaveadas, que tendem a gerar distorções. Além disso, é importante monitorar a origem dessas distorções, que muitas vezes está associada ao uso de componentes semicondutores e outros dispositivos eletrônicos que afetam a qualidade da energia.

A adoção de técnicas de mitigação, como filtros harmônicos (sejam eles passivos ou ativos), reconfigurações de sistemas e adequações normativas, é essencial para limitar os efeitos adversos das distorções. Ademais, o condicionamento da qualidade da energia, por meio da implementação de dispositivos que melhorem a qualidade da energia e diminuam a sensibilidade dos equipamentos às distorções, como transformadores e reguladores de tensão, também é uma variável importante a ser considerada.

Por fim, a estrutura das redes elétricas deve ser otimizada, ajustando sua configuração e topologia para reduzir os impactos das distorções harmônicas. Isso pode ser alcançado com o uso de equipamentos de compensação e pela adaptação da rede a cargas mais sensíveis. Ao abordar essas variáveis de forma integrada, é possível atenuar os efeitos das distorções harmônicas e, conseqüentemente, melhorar a estabilidade e a eficiência do sistema elétrico.

Não é possível extinguir as harmônicas do sistema elétrico, tampouco deixar de utilizar os dispositivos eletroeletrônicos.

### REFERÊNCIAS

AFONSO, J. L.; MARTINS, J. S. A qualidade da energia eléctrica. **Revista o Electricista**, Minho, PT, v. 3, n. 9, p. 66-71, 2004. Disponível em: [https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/1920/1/Electricista\\_04.pdf](https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/1920/1/Electricista_04.pdf) Acesso em: 15 ago. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST**. Módulo 8: Qualidade de Energia Elétrica. Brasília, DF: ANEEL, 2018. Disponível em: [https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956\\_2\\_7.pdf](https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf) Acesso em: 10 jun. 2024.

ANTUNES, F.; SAMPAIO, R.; LEÃO, R. **Harmônicos em sistemas elétricos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.



**RECIMA21 - REVISTA CIENTÍFICA MULTIDISCIPLINAR**  
**ISSN 2675-6218**

ANÁLISE E MITIGAÇÃO DE HARMONICAS EM SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA  
 Edenilson Henrique Salvador, Ronaldo Gomes Figueira, Fabiana Florian

ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R. **Power system harmonic analysis**. Nova Jerzey: John Wiley & Sons, 2003.

CAPELLI, A. **Energia elétrica: qualidade e eficiência para aplicações industriais**. São Paulo: Editora Saraiva, 2013.

COSTA, C. **Processamento de sinais para engenheiros: teoria e prática**. Rio de Janeiro: Bonecker Editora, 2017.

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C.; ROBBA, E. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. 2 ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher, 2010.

MORENO, H. **Harmônicas nas instalações elétricas: causas, efeitos e soluções**. São Paulo: Procobre Brasil, 2019.

NEVES, A. B. F. **Análise dos efeitos do desequilíbrio e da distorção harmônica de tensão no conjugado e no rendimento de um motor de indução trifásico**. 2014. 174f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília (UnB), Brasília, 2014. Disponível em: <http://www.realp.unb.br/jspui/handle/10482/17461> Acesso em: 9 jun. 2024.

PRODIST. **Anexo VIII da resolução normativa nº 956, de 7 de dezembro 2021** - procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – **Prodíst**. módulo 8 – qualidade do fornecimento de energia elétrica, Revisão 10. [S. l.]: Prodíst, 2021. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2021956.html> Acesso em: 9 jun. 2024.

SANKARAN, C. **Power quality**. Boca Raton: CRC Press, 2002.