

# Harmônicas em Instalações Industriais: Um Guia Prático para Eletricistas

**Eng° Walterney Luis Pinto**

# Harmônicas em Instalações Industriais: Um Guia Prático para Eletricistas

1. Introdução: Desmistificando as Harmônicas – O que são e por que importam na Indústria?.....	2
2. De Onde Vêm as Harmônicas? Identificando as Fontes na Planta Industrial.....	3
3. Os Efeitos Negativos das Harmônicas no Chão de Fábrica.....	5
4. Medindo e Entendendo as Harmônicas: Ferramentas e Conceitos Básicos.....	9
5. Soluções para Controlar Harmônicas: O que o Eletricista Pode Encontrar.....	11
6. Conclusão: O Papel do Eletricista na Gestão das Harmônicas e Recomendações Finais...	15
Referências citadas.....	16

# 1. Introdução: Desmistificando as Harmônicas – O que são e por que importam na Indústria?

No ambiente industrial, a energia elétrica é a força vital que alimenta máquinas, processos e sistemas de controle. Idealmente, essa energia chega até nós como uma onda de tensão e corrente perfeitamente senoidal, oscilando suavemente na frequência fundamental de 60 Hertz (Hz) no Brasil. No entanto, a realidade das instalações modernas é frequentemente diferente. Muitos equipamentos, especialmente os baseados em eletrônica de potência, introduzem "ruídos" ou "poluição" na rede elétrica na forma de **harmônicas**.

Mas o que exatamente são essas harmônicas? De forma didática, imagine a onda elétrica fundamental de 60 Hz como a batida principal e clara de uma música. As harmônicas seriam como outras notas ou batidas indesejadas, com frequências que são múltiplos inteiros dessa batida principal (por exemplo, 120 Hz, 180 Hz, 300 Hz, 420 Hz, e assim por diante), que se sobrepõem à música original, distorcendo-a. Tecnicamente, uma tensão ou corrente harmônica é um sinal senoidal cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental. Quando essas harmônicas se somam à onda fundamental, o resultado é uma forma de onda deformada, não mais puramente senoidal. É crucial entender que essas harmônicas não são um defeito na energia fornecida pela concessionária, mas sim um subproduto da maneira como certos equipamentos modernos consomem energia elétrica dentro da própria instalação industrial.

Para o eletricitista industrial, compreender o fenômeno das harmônicas deixou de ser um conhecimento especializado para se tornar uma necessidade prática. Por quê? Porque as harmônicas são frequentemente a causa raiz de problemas aparentemente inexplicáveis no chão de fábrica: motores que superaquecem mesmo sem sobrecarga aparente, transformadores que zumbem alto e falham prematuramente, disjuntores que disparam sem motivo claro, sistemas eletrônicos que travam e bancos de capacitores que queimam repetidamente. Com a crescente automação e o uso intensivo de inversores de frequência, fontes chaveadas e outros dispositivos eletrônicos, a presença e os efeitos das harmônicas tornaram-se mais prevalentes e impactantes.

Além dos problemas operacionais e de manutenção, as harmônicas representam riscos de segurança e ineficiência energética. O superaquecimento de cabos, especialmente o condutor neutro em certas condições, pode levar a falhas de isolamento e até mesmo a incêndios. As perdas adicionais de energia causadas pelas harmônicas em cabos, transformadores e motores significam desperdício de eletricidade e aumento dos custos operacionais.

Portanto, entender as harmônicas capacita o eletricitista a ir além da simples correção de falhas. Permite diagnosticar problemas complexos, identificar riscos de segurança latentes e contribuir para a manutenção preditiva e a eficiência energética da planta. Por exemplo, o superaquecimento detectado em um painel ou transformador durante uma inspeção termográfica pode ser um indicativo de problemas harmônicos. Agir sobre essa informação *antes* que ocorra uma falha catastrófica demonstra a importância prática desse conhecimento. Este guia visa fornecer ao eletricitista industrial as informações fundamentais para entender, identificar e lidar com os desafios das harmônicas no seu dia a dia.

## 2. De Onde Vêm as Harmônicas? Identificando as Fontes na Planta Industrial

Para combater um problema, primeiro precisamos entender sua origem. As harmônicas não surgem do nada; elas são geradas por equipamentos específicos dentro da instalação industrial. A chave para entender a geração de harmônicas está na diferença entre cargas **lineares e não lineares**.

Uma **carga linear** é aquela que, quando alimentada por uma tensão senoidal, consome uma corrente também senoidal. A corrente pode estar defasada da tensão (como em um motor de indução), mas sua forma de onda segue a da tensão. Pense em resistências puras (aquecedores) ou motores de indução conectados diretamente à rede.

Já uma **carga não linear** é o "vilão" da história das harmônicas. Esses equipamentos não consomem corrente de forma suave e proporcional à tensão aplicada. Em vez disso, eles "puxam" a corrente da rede em pulsos ou de forma distorcida, não senoidal. Essa corrente distorcida, rica em componentes harmônicas, é injetada de volta no sistema elétrico pela própria carga. É importante notar que é a *corrente* harmônica gerada pela carga não linear que, ao circular pelas impedâncias dos cabos, barramentos e transformadores do sistema, causa quedas de tensão harmônicas. A soma dessas quedas de tensão com a tensão fundamental resulta na *distorção da forma de onda da tensão* (THD<sub>v</sub>), que então afeta todos os outros equipamentos conectados ao mesmo ponto da rede.

Quais são as fontes mais comuns de harmônicas (cargas não lineares) encontradas em uma planta industrial?

- **Inversores de Frequência (VFDs - Variable Frequency Drives):** Talvez a fonte mais significativa em muitas indústrias. Usados extensivamente para controlar a velocidade de motores AC em bombas, ventiladores, esteiras transportadoras, etc.. A seção de entrada desses VFDs, chamada de retificador (que converte AC em DC para alimentar o barramento interno), é a principal responsável pela geração de harmônicas, pois consome corrente da rede em pulsos.
- **Fontes Chaveadas (SMPS - Switch-Mode Power Supplies):** Onipresentes em equipamentos eletrônicos modernos. Elas alimentam computadores, Controladores Lógico Programáveis (CLPs), instrumentação, sistemas de controle, fontes DC industriais e carregadores de bateria. Essas fontes retificam a tensão AC e carregam um capacitor interno, puxando corrente da rede em pulsos estreitos e de alta amplitude, muito ricos em harmônicas.
- **Iluminação Eletrônica:** Reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes e drivers para iluminação LED, embora mais eficientes que tecnologias antigas, são cargas não lineares e contribuem para a distorção harmônica, especialmente quando presentes em grande número.
- **Retificadores de Potência:** Utilizados em processos industriais que exigem grandes quantidades de energia DC, como eletrólise, galvanoplastia, carregadores de grandes bancos de baterias e sistemas de alimentação ininterrupta (UPS ou No-breaks) de grande porte.
- **Fornos a Arco e Equipamentos de Solda:** Operam com alta potência e de forma inerentemente não linear, gerando níveis significativos de distorção harmônica.

Cada tipo de carga não linear gera um "espectro" característico de harmônicas, ou seja, um conjunto específico de ordens harmônicas com amplitudes típicas. A **ordem** de uma harmônica indica quantas vezes sua frequência é maior que a fundamental (60 Hz). Assim, a 3ª harmônica tem frequência de  $3 \times 60 = 180$  Hz, a 5ª harmônica tem  $5 \times 60 = 300$  Hz, a 7ª tem  $7 \times 60 = 420$  Hz, e assim por diante. Conhecer as ordens típicas geradas por cada equipamento ajuda no diagnóstico:

- **VFDs de 6 Pulsos:** São os mais comuns. Seu retificador de entrada utiliza seis diodos. Eles geram predominantemente harmônicas de ordem  $k = 6n \pm 1$  (onde  $n = 1, 2, 3, \dots$ ), ou seja, 5ª, 7ª, 11ª, 13ª, 17ª, 19ª, etc.. As harmônicas de 5ª e 7ª ordens são geralmente as de maior amplitude e causam mais problemas.
- **VFDs de 12 Pulsos (e Multipulsos):** Utilizam dois retificadores de 6 pulsos alimentados por tensões defasadas em  $30^\circ$ , geralmente através de transformadores especiais com secundários em estrela (Y) e delta ( $\Delta$ ). Essa defasagem causa o cancelamento (em condições ideais) das harmônicas de 5ª e 7ª ordens. Assim, um VFD de 12 pulsos gera principalmente harmônicas de ordem  $k = 12n \pm 1$  (11ª, 13ª, 23ª, 25ª...). VFDs de 18 ou mais pulsos, usando transformadores ainda mais complexos (como zig-zag), reduzem ainda mais as harmônicas de ordem baixa. É importante notar que qualquer desequilíbrio nas tensões de alimentação ou nas impedâncias dos transformadores pode comprometer o cancelamento e fazer com que harmônicas de 5ª e 7ª (e outras) apareçam na entrada.
- **Cargas Monofásicas (Fontes Chaveadas, Iluminação Eletrônica):** Conectadas entre fase e neutro, essas cargas são grandes geradoras de harmônicas de 3ª ordem (180 Hz) e seus múltiplos ímpares (9ª, 15ª, 21ª...). Essas são chamadas de **harmônicas triplas** ou de **sequência zero** e têm um comportamento particular e problemático no condutor neutro de sistemas trifásicos a quatro fios, como veremos adiante.

A tabela abaixo resume as fontes comuns e suas harmônicas características:

**Tabela 1: Fontes Comuns de Harmônicas na Indústria e Ordens Típicas**

Equipamento / Carga Não Linear	Tipo de Carga (Típico)	Ordens Harmônicas de Corrente Predominantes ( $k = n * f1$ )	Observações
Inversor de Frequência (VFD) - 6 Pulsos	Trifásica	5ª, 7ª, 11ª, 13ª, 17ª, 19ª... ( $6n \pm 1$ )	Mais comum; 5ª e 7ª geralmente dominantes.
Inversor de Frequência (VFD) - 12 Pulsos	Trifásica	11ª, 13ª, 23ª, 25ª... ( $12n \pm 1$ )	Cancela 5ª e 7ª (idealmente); requer trafo defasador.
Inversor de Frequência (VFD) - 18+ Pulsos	Trifásica	17ª, 19ª, 35ª, 37ª... ( $18n \pm 1$ )	Cancela 5ª, 7ª, 11ª, 13ª (idealmente); requer trafo complexo.
Fontes Chaveadas (SMPS) - Monofásicas	Monofásica	3ª, 5ª, 7ª, 9ª, 11ª, 13ª, 15ª... (Ímpares)	Forte presença de 3ª harmônica (triplen).
Iluminação Eletrônica (LED, Fluorescente)	Monofásica / Trifásica	Predominantemente 3ª, 5ª, 7ª, 9ª... (Ímpares)	Significativo quando em grande quantidade; 3ª harmônica relevante.
Retificadores Trifásicos (6 Pulsos)	Trifásica	5ª, 7ª, 11ª, 13ª... ( $6n \pm 1$ )	Similar a VFDs 6 pulsos; usado em UPS,

Equipamento / Carga Não Linear	Tipo de Carga (Típico)	Ordens Harmônicas de Corrente Predominantes ( $k = n * f_1$ )	Observações
			carregadores grandes.
Fornos a Arco / Soldadores Industriais	Trifásica / Monofásica	Espectro amplo e variável, incluindo harmônicas pares	Operação não linear intrínseca; alta potência.

É fundamental compreender que a simples presença dessas cargas não garante um problema grave de harmônicas. O impacto real depende de fatores como a **concentração** dessas cargas (quantos VFDs estão ligados no mesmo transformador?) e a **impedância do sistema elétrico** no ponto de conexão. Uma rede elétrica "forte" (baixa impedância, perto da subestação principal) pode absorver as correntes harmônicas com menor distorção de tensão. Por outro lado, uma rede "fraca" (alta impedância, como no final de uma linha de distribuição longa ou alimentada por um transformador de alta impedância) sofrerá uma distorção de tensão (THD<sub>v</sub>) muito maior para a mesma quantidade de corrente harmônica injetada ( $I_h$ ), devido à relação  $V_h = I_h \times Z_{\text{sistema}}$ . Um estudo de caso real demonstrou problemas severos em uma indústria localizada a 18 km da subestação, onde a longa distância certamente contribuiu para uma maior impedância do sistema e maior sensibilidade às harmônicas geradas internamente. Assim, ao investigar problemas, o electricista deve considerar não apenas *quais* cargas não lineares existem, mas também *onde* elas estão instaladas e *quantas* estão agrupadas.

### 3. Os Efeitos Negativos das Harmônicas no Chão de Fábrica

As correntes e tensões harmônicas não são apenas uma curiosidade teórica; elas causam uma série de efeitos prejudiciais e tangíveis nos equipamentos e na operação da planta industrial. Esses efeitos se manifestam principalmente como aquecimento excessivo, falhas em equipamentos, disparos indesejados de proteções e desperdício de energia.

**Aquecimento Excessivo:** Este é talvez o efeito mais comum e perigoso das harmônicas.

- **Cabos e Condutores:** A corrente total que circula em um condutor na presença de harmônicas é a soma vetorial da corrente fundamental e de todas as correntes harmônicas. Isso resulta em um valor de corrente eficaz (RMS) maior do que seria apenas com a fundamental. Como as perdas por aquecimento (perdas Joule) são proporcionais ao quadrado da corrente ( $P = I_{\text{RMS}}^2 \times R$ ), esse aumento na corrente RMS leva a um aquecimento adicional nos cabos. Além disso, as correntes harmônicas de frequência mais alta tendem a circular mais pela superfície do condutor (efeito pelicular ou *skin effect*), reduzindo a área efetiva de condução e aumentando a resistência aparente do cabo para essas frequências, o que intensifica ainda mais o aquecimento.
- **Condutor Neutro:** Este é um ponto de atenção crítica em sistemas trifásicos a 4 fios (estrela com neutro) que alimentam muitas cargas monofásicas não lineares (computadores, iluminação eletrônica, etc.). As harmônicas de 3ª ordem (e seus múltiplos ímpares: 9ª, 15ª, etc.), conhecidas como harmônicas triplas ou de sequência zero, geradas por essas cargas, não se cancelam no neutro como as correntes fundamentais

equilibradas. Em vez disso, elas se **somam aritmeticamente** no condutor neutro. Em situações comuns em escritórios ou áreas com muita eletrônica, a corrente no neutro pode facilmente atingir 1.5 a 2 vezes a corrente de fase. Se o condutor neutro não for dimensionado adequadamente para essa carga adicional (a NBR 5410 já prevê isso em certas situações), ele pode superaquecer perigosamente, derreter o isolamento e criar um sério risco de incêndio, mesmo que os condutores de fase não apresentem sinais de sobrecarga.

- **Transformadores:** As harmônicas causam dois tipos principais de perdas adicionais nos transformadores:
  1. **Perdas no Cobre ( $I^2R$ ):** O aumento da corrente RMS total nos enrolamentos primário e secundário eleva as perdas Joule.
  2. **Perdas no Núcleo:** Estas são particularmente afetadas pelas harmônicas. As perdas por histerese aumentam com a frequência, mas as perdas por correntes de Foucault (correntes parasitas induzidas no núcleo de ferro) aumentam com o **quadrado da frequência** e também com o quadrado da densidade de fluxo. Isso significa que harmônicas de ordem mais elevada, mesmo com amplitude menor, podem causar um aumento desproporcional nas perdas do núcleo e no aquecimento do transformador. Em transformadores alimentando cargas de informática, as perdas totais podem facilmente dobrar devido às harmônicas. Além disso, as harmônicas de sequência zero (triphas) que circulam em enrolamentos conectados em delta também geram calor adicional. O resultado combinado é um superaquecimento significativo, que reduz a capacidade útil do transformador (exigindo um "fator K" de desclassificação) e diminui drasticamente sua vida útil.
- **Motores de Indução:** Os motores sofrem efeitos semelhantes aos transformadores. As tensões e correntes harmônicas aumentam as perdas no cobre do estator e induzem correntes de alta frequência no rotor, elevando as perdas por correntes de Foucault no núcleo e no próprio rotor. Além disso, as harmônicas criam campos magnéticos girantes no entreferro com diferentes velocidades e direções:
  - Harmônicas de **sequência positiva** (7<sup>a</sup>, 13<sup>a</sup>, etc.) giram no mesmo sentido do campo fundamental, causando leve aceleração.
  - Harmônicas de **sequência negativa** (5<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup>, etc.) giram no sentido oposto, criando um torque de frenagem.
  - Harmônicas de **sequência zero** (3<sup>a</sup>, 9<sup>a</sup>, etc.) não produzem campo girante, mas podem aumentar as perdas. O resultado líquido desses campos harmônicos é: superaquecimento, vibrações mecânicas, ruído acústico aumentado, perda de torque útil, redução da eficiência e desgaste acelerado de rolamentos e acoplamentos.

#### **Falhas e Vida Útil Reduzida:**

- **Equipamentos Eletrônicos Sensíveis:** CLPs, drives, fontes de alimentação, computadores industriais e sistemas de controle são particularmente vulneráveis à distorção da *tensão* (THD<sub>v</sub>). Formas de onda de tensão distorcidas podem causar:
  - Erros de processamento e operação errática.
  - Travamentos e reinicializações inesperadas.
  - Falha na sincronização de dispositivos que dependem da passagem por zero da onda de tensão.
  - Estresse e falha prematura de componentes internos, como os capacitores do barramento DC em fontes chaveadas e VFDs.
  - Queima de placas de circuito impresso.

- **Isolamento:** O valor RMS mais elevado da tensão e, em alguns casos, picos de tensão mais altos devido à distorção harmônica, podem estressar o sistema de isolamento de cabos, barramentos, motores e transformadores. Esse estresse contínuo acelera o envelhecimento do material isolante, tornando-o mais suscetível a falhas (curtos-circuitos) e reduzindo a vida útil geral do equipamento.

#### Disparos Intempestivos de Proteções:

- **Disjuntores (Proteção Térmica):** A unidade térmica de um disjuntor responde ao aquecimento causado pela corrente RMS total. Se a corrente RMS for significativamente aumentada pelas harmônicas, o disjuntor pode disparar por sobrecarga térmica, mesmo que a corrente fundamental (aquela que realiza o trabalho útil) esteja dentro dos limites nominais do circuito.
- **Disjuntores (Proteção Magnética):** Algumas cargas não lineares, como fontes chaveadas monofásicas, consomem corrente em pulsos muito estreitos e de alta amplitude. Essa forma de onda tem um "fator de crista" (relação entre o valor de pico e o valor RMS) muito elevado. Picos de corrente excessivamente altos podem acionar a proteção magnética instantânea do disjuntor, destinada a proteger contra curtos-circuitos, causando disparos indesejados.
- **Dispositivos DR (Diferencial Residual):** Os DRs funcionam detectando diferenças entre as correntes que entram e saem de um circuito (fuga para a terra). As correntes harmônicas de alta frequência podem encontrar caminhos alternativos para a terra através das capacitâncias parasitas existentes na fiação e nos equipamentos. Isso pode criar uma corrente de fuga "virtual" em alta frequência que é detectada pelo DR, levando a disparos intempestivos, mesmo na ausência de uma falta real à terra perigosa na frequência fundamental.

**Problemas em Bancos de Capacitores:** Bancos de capacitores são frequentemente instalados em indústrias para corrigir o fator de potência e evitar multas da concessionária. No entanto, em presença de harmônicas, eles podem se tornar fontes de problemas graves:

- **Sobrecarga:** A reatância de um capacitor ( $X_C = 1 / (2 \pi f C)$ ) diminui com o aumento da frequência. Isso significa que os capacitores oferecem um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas presentes na rede. Essas correntes harmônicas se somam à corrente fundamental (reativa) que o capacitor deveria drenar, aumentando a corrente RMS total que passa pelo capacitor. Isso pode levar à sobrecarga térmica, estufamento, vazamento de dielétrico e queima prematura dos capacitores e seus fusíveis.
- **Ressonância:** Este é o maior perigo associado a capacitores em redes com harmônicas. A capacitância do banco (C) pode interagir com a indutância do sistema (L), proveniente principalmente do transformador de alimentação e dos cabos, formando um circuito ressonante LC. A frequência de ressonância é dada por  $f_r = 1 / (2 \pi \sqrt{LC})$ . Se essa frequência de ressonância coincidir ou estiver próxima de uma frequência harmônica gerada pelas cargas não lineares (por exemplo, a 5ª ou 7ª harmônica de VFDs), podem ocorrer dois fenômenos perigosos:
  - **Ressonância Paralelo:** Ocorre entre o banco de capacitores e a indutância da fonte vista do barramento. Na frequência de ressonância, a impedância do circuito paralelo se torna muito alta, levando a **sobretensões** elevadas naquela frequência harmônica, que podem danificar o isolamento de todos os equipamentos conectados ao barramento.
  - **Ressonância Série:** Ocorre entre o capacitor e a indutância do transformador (ou reatores em série). Na frequência de ressonância, a impedância do circuito série se

torna muito baixa, resultando em **sobrecorrentes** harmônicas muito altas circulando entre a fonte e o capacitor, que podem destruir rapidamente os capacitores, fusíveis e, em alguns casos, até danificar o transformador. Muitos casos de queima recorrente de capacitores em indústrias com VFDs são causados por esses fenômenos de ressonância, que ocorrem quando bancos de capacitores "comuns" são adicionados sem considerar o ambiente harmônico.

### Desperdício de Energia:

Todas as perdas adicionais causadas pelas harmônicas –  $I^2R$  nos cabos, neutro, enrolamentos de transformadores e motores, e perdas aumentadas no núcleo de ferro de transformadores e motores – representam energia que é consumida da rede, mas não é convertida em trabalho útil. É energia desperdiçada na forma de calor. Isso resulta em menor eficiência energética geral da instalação e, conseqüentemente, em contas de eletricidade mais altas.

A tabela abaixo resume os principais impactos e os sintomas que o eletricista pode observar:

**Tabela 2: Resumo dos Impactos das Harmônicas em Equipamentos Industriais**

Equipamento Afetado	Efeitos Técnicos Principais das Harmônicas	Sintomas Práticos Observáveis pelo Eletricista
Cabos (Fases e Neutro)	Superaquecimento ( $\uparrow$ RMS, Efeito Pelicular); Sobrecarga do Neutro (Triplens).	Aquecimento excessivo ao toque ou detectado por termografia; Cheiro de isolamento queimado; Descoloração do isolamento; Neutro mais quente que fases.
Transformadores	Superaquecimento ( $\uparrow$ Perdas Cobre e Núcleo); Redução da capacidade (Fator K); Redução vida útil.	Zumbido alto; Temperatura elevada da carcaça (termografia); Vazamento de óleo; Falha prematura.
Motores de Indução	Superaquecimento ( $\uparrow$ Perdas Cobre e Rotor); Vibração; Ruído; Perda de torque; Menor eficiência.	Aquecimento excessivo; Vibração anormal; Ruído agudo; Perda de força aparente; Falha de rolamentos.
Equipamentos Eletrônicos	Operação errática; Travamentos; Erros de dados; Falha de componentes; Queima de placas.	Falhas intermitentes; Necessidade de reinicializações frequentes; Alarmes de falha; Queima de fontes ou placas de controle.
Disjuntores / Proteções DR	Disparos térmicos por $\uparrow$ RMS; Disparos magnéticos por alto fator de crista; Disparos DR por fuga HF.	Desarmes frequentes sem sobrecarga aparente ou curto-circuito; Disparos de DR sem falta à terra identificada.
Bancos de Capacitores	Sobrecarga; Aquecimento; Estufamento; Queima; Ressonância (sobretensão/sobrecorrente).	Capacitores estufados ou com vazamento; Queima frequente de fusíveis do banco; Falha catastrófica do banco; Disparos gerais na instalação.

É importante perceber que os problemas causados por capacitores (como queima ou ressonância) são muitas vezes um **sintoma secundário**. A causa primária são as harmônicas

geradas por outras cargas não lineares (como VFDs) na mesma rede. Quando um banco de capacitores é instalado apenas com o objetivo de corrigir o fator de potência, sem uma análise prévia do conteúdo harmônico da instalação, ele pode se tornar a "vítima" dessas harmônicas preexistentes, resultando em falhas recorrentes. Portanto, a falha repetida de capacitores deve sempre levantar a suspeita sobre a qualidade da energia na instalação e a presença de fontes de harmônicas.

Além disso, os efeitos das harmônicas são frequentemente **interconectados**. A corrente harmônica gerada por uma carga não linear causa distorção na tensão daquele barramento. Essa tensão distorcida, por sua vez, afeta o desempenho e aumenta as perdas em *todas* as outras cargas conectadas ali, sejam elas lineares (como motores) ou não lineares. Em alguns casos, alimentar uma carga não linear com tensão já distorcida pode até fazer com que ela gere ainda mais harmônicas de corrente. Isso cria um ciclo vicioso potencial, onde a "poluição" harmônica se espalha e se intensifica dentro da planta, reforçando a necessidade de identificar e mitigar as fontes principais.

## 4. Medindo e Entendendo as Harmônicas: Ferramentas e Conceitos Básicos

Diagnosticar problemas relacionados a harmônicas exige mais do que apenas a intuição ou as ferramentas de medição básicas. Como as harmônicas distorcem as formas de onda de tensão e corrente, instrumentos convencionais podem fornecer leituras enganosas. É crucial usar as ferramentas certas e entender alguns conceitos básicos para quantificar o problema.

### **Medição de Corrente e Tensão: A Importância do True RMS**

O valor **RMS (Root Mean Square)**, ou valor eficaz, de uma corrente ou tensão alternada representa o valor de uma corrente ou tensão contínua (DC) que produziria o mesmo efeito térmico (aquecimento) em uma resistência. É o valor RMS que determina o aquecimento em cabos, motores e transformadores.

Muitos multímetros e alicates amperímetros mais simples e antigos são do tipo "**resposta média**". Eles medem o valor médio retificado da forma de onda e o multiplicam por um fator de forma (geralmente 1.11) que só é válido para uma onda senoidal pura, para *estimar* o valor RMS. Quando a forma de onda é distorcida por harmônicas (não senoidal), essa estimativa falha completamente. Medir a corrente de um VFD ou de uma fonte chaveada com um medidor de resposta média pode resultar em erros significativos, com leituras que podem ser até 40% mais baixas ou 10% mais altas que o valor RMS real. Usar uma leitura incorreta pode levar a subestimar seriamente o aquecimento real nos condutores e equipamentos, mascarando um problema de sobrecarga ou superaquecimento.

Por isso, para medir corretamente correntes e tensões em circuitos com cargas não lineares, é **essencial** utilizar um multímetro ou alicate amperímetro com a função **True RMS**. Esses instrumentos utilizam circuitos eletrônicos ou algoritmos que calculam o valor RMS verdadeiro diretamente da forma de onda amostrada, independentemente de ela ser senoidal ou distorcida. Investir em uma ferramenta True RMS é fundamental para qualquer electricista que trabalhe em ambientes industriais modernos.

### **Analisadores de Qualidade de Energia (PQA - Power Quality Analyzers)**

Embora um multímetro True RMS forneça o valor eficaz correto, ele não informa *quais* harmônicas estão presentes nem o nível de distorção geral. Para isso, são necessários instrumentos mais sofisticados: os **Analisadores de Qualidade de Energia (PQA)**.

Esses equipamentos são projetados especificamente para capturar e analisar as formas de

onda de tensão e corrente em detalhes. Eles utilizam uma técnica matemática chamada **Transformada Rápida de Fourier (FFT - Fast Fourier Transform)** para decompor a forma de onda distorcida em suas componentes individuais: a fundamental e as diversas ordens harmônicas. O resultado é geralmente apresentado como um **espectro harmônico**, um gráfico de barras que mostra a magnitude (amplitude) de cada ordem harmônica presente. Para o electricista que pode ser solicitado a auxiliar em uma medição ou a interpretar resultados básicos, o processo geral de uso de um PQA envolve os seguintes passos (a operação específica varia conforme o modelo):

1. **Segurança:** SEMPRE seguir rigorosamente os procedimentos de segurança para trabalho em painéis energizados (NR-10), utilizando EPIs adequados.
2. **Conexão:** Conectar as garras de corrente (geralmente TCs flexíveis ou tipo alicate) ao redor dos condutores de fase (e neutro, se aplicável) e as pontas de prova de tensão aos terminais de fase e neutro/terra no ponto de interesse (ex: entrada de um VFD, secundário de um transformador, barramento geral do painel). Garantir que as conexões estejam firmes e corretas (sequência de fase, polaridade dos TCs).
3. **Configuração:** No menu do analisador, selecionar o tipo de ligação do sistema (ex: trifásico estrela 4 fios, delta 3 fios), a frequência nominal (60 Hz) e as configurações de medição desejadas (ex: harmônicas, tensão, corrente, potência, THD).
4. **Medição e Leitura:** Iniciar a medição. O analisador registrará os dados por um período definido ou continuamente. Os resultados podem ser visualizados na tela, incluindo as formas de onda, o espectro harmônico e valores numéricos como tensão, corrente, fator de potência e THD.

#### **THD - Distorção Harmônica Total: O que significa?**

Um dos principais indicadores fornecidos pelos analisadores de qualidade de energia é a **Distorção Harmônica Total (THD)**, também chamada de Taxa de Distorção Harmônica (DHT). O THD é uma medida percentual que quantifica o nível geral de distorção de uma forma de onda, comparando a energia contida em todas as componentes harmônicas com a energia da componente fundamental.

Existem dois tipos principais de THD:

- **THDi (ou DHTi):** Distorção Harmônica Total de **Corrente**. Mede o quanto a forma de onda da *corrente* consumida por uma carga ou circuito se desvia de uma senoide pura. É calculada pela fórmula:  $THD_i (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\max} I_h^2}}{I_1} \times 100$  Onde  $I_1$  é o valor RMS da corrente fundamental e  $I_h$  é o valor RMS da corrente harmônica de ordem  $h$ . Um THDi alto indica que a carga está injetando uma quantidade significativa de correntes harmônicas na rede.
- **THDv (ou DHTv):** Distorção Harmônica Total de **Tensão**. Mede o quanto a forma de onda da *tensão* em um ponto do sistema se desvia de uma senoide pura. É calculada de forma análoga:  $THD_v (\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\max} V_h^2}}{V_1} \times 100$  Onde  $V_1$  é o valor RMS da tensão fundamental e  $V_h$  é o valor RMS da tensão harmônica de ordem  $h$ . Um THDv alto indica que a qualidade da tensão fornecida naquele ponto está comprometida, o que pode afetar todos os equipamentos ali conectados.

**Significado Prático do THD:** Quanto maior o valor do THD (seja de corrente ou tensão), maior a "poluição" harmônica e mais distorcida está a forma de onda.

**Interpretação Cautelosa:** É preciso ter cuidado ao interpretar o THDi. Um valor percentual alto de THDi medido quando a carga está operando com corrente muito baixa pode não representar um problema significativo em termos absolutos, pois a *magnitude* da corrente harmônica injetada pode ser pequena. Algumas normas utilizam um indicador chamado TDD (Total Demand Distortion), que relaciona as harmônicas com a corrente máxima de demanda da

carga, oferecendo uma perspectiva diferente. No entanto, para o electricista, entender o THD como um indicador geral de distorção é o ponto principal.

**Limites Aceitáveis:** Normas internacionais e nacionais, como a IEEE 519 e os Procedimentos de Distribuição (PRODIST) da ANEEL no Brasil, estabelecem limites máximos para os níveis de distorção harmônica que podem ser injetados na rede pela instalação (limites de THDi e harmônicas individuais no Ponto de Conexão Comum - PCC) e também limites para a distorção de tensão que a concessionária deve fornecer e que os equipamentos devem suportar (limites de THDv). Por exemplo, para cargas sensíveis, recomenda-se que o THDv seja mantido abaixo de 5% , enquanto outras normas podem permitir até 8% em sistemas de baixa tensão. Embora o electricista geralmente não seja responsável por definir ou garantir esses limites, ele pode ser chamado para realizar medições que ajudem a verificar a conformidade ou a diagnosticar problemas relacionados a níveis excessivos de THD.

A necessidade de usar ferramentas específicas como multímetros True RMS e Analisadores de Qualidade de Energia, juntamente com métricas como o THD, evidencia um ponto crucial: os problemas causados pelas harmônicas muitas vezes **não são visíveis nem mensuráveis com instrumentos elétricos básicos**. Uma medição de corrente com um multímetro comum pode indicar que um circuito está operando normalmente, enquanto, na realidade, a corrente True RMS é muito maior, causando superaquecimento. Da mesma forma, a tensão pode parecer normal em um voltímetro comum, mas um analisador pode revelar uma distorção significativa (THDv alto) que está estressando equipamentos eletrônicos. Sem as ferramentas adequadas, o problema harmônico pode permanecer "invisível", levando a diagnósticos incorretos, substituição desnecessária de peças e falha em resolver a causa raiz de falhas e ineficiências.

## 5. Soluções para Controlar Harmônicas: O que o Electricista Pode Encontrar

Uma vez identificadas as fontes e compreendidos os efeitos das harmônicas, a próxima etapa é saber como elas podem ser controladas ou mitigadas. Existem diversas tecnologias e estratégias para reduzir a geração de harmônicas ou filtrar aquelas que já circulam na rede. O electricista industrial pode encontrar esses equipamentos instalados na planta e precisa ter uma compreensão básica de sua função e identificação.

### Reatores de Linha (Indutores de Entrada)

- **Descrição e Identificação:** São essencialmente bobinas (indutores) robustas, instaladas em série com os cabos de alimentação de energia na entrada de VFDs ou outros equipamentos com retificadores não controlados. Visualmente, parecem pequenos transformadores ou indutores encapsulados, localizados geralmente dentro do painel do VFD ou próximos a ele.
- **Função:** O reator adiciona indutância ao circuito de entrada. Essa indutância se opõe a variações rápidas na corrente, "suavizando" os picos de corrente que o retificador do VFD puxaria da rede. Isso resulta em uma redução significativa das correntes harmônicas geradas (o THDi pode cair de >80% para cerca de 35-45% com um reator de 3-5% de impedância). Além de mitigar harmônicas, os reatores de linha também oferecem proteção adicional ao VFD contra surtos e afundamentos de tensão (transientes) provenientes da rede elétrica. São uma solução de mitigação relativamente simples e de custo eficaz para VFDs individuais.

### Transformadores Especiais

- **Transformadores Defasadores (Multipulsos):** Como mencionado anteriormente, VFDs

de 12, 18, 24 ou mais pulsos utilizam transformadores especiais para alimentar múltiplos retificadores de 6 pulsos com tensões defasadas entre si. Esses transformadores podem ter múltiplos enrolamentos secundários com diferentes conexões (Estrela, Delta, Zig-Zag) para criar as defasagens necessárias (ex: 30° para 12 pulsos, 20° para 18 pulsos). O objetivo é cancelar harmônicas de ordem mais baixa (5ª, 7ª, 11ª, 13ª...) na corrente total vista pela rede primária. São geralmente grandes e mais caros, usados para VFDs de maior potência ou em aplicações críticas onde baixo THDi é exigido. A identificação pode ser feita pela placa do transformador mencionando múltiplas saídas, conexões como Zig-Zag, ou a aplicação "para acionamento multipulso".

- **Transformadores Fator K:** Não são projetados para *reduzir* harmônicas, mas sim para *suportar* o aquecimento adicional que elas causam, especialmente as harmônicas triplas (3ª, 9ª, 15ª...) geradas por cargas monofásicas de informática. Possuem construção reforçada, especialmente no condutor neutro e no projeto do núcleo, para operar sem superaquecer sob forte conteúdo harmônico. São identificados pela classificação "Fator K" (K-4, K-13, K-20, etc.) na placa, indicando o nível de harmônicas que podem suportar.
- **Transformadores de Isolação:** Um transformador comum com enrolamentos primário e secundário eletricamente separados pode ajudar a isolar um circuito com cargas não lineares de outro, limitando a propagação das harmônicas (especialmente as de sequência zero se o primário for Delta). No entanto, ele não elimina as harmônicas geradas pela carga no lado secundário.

### Filtros de Harmônicas

Quando a redução proporcionada por reatores ou transformadores multipulsos não é suficiente, ou quando se deseja tratar as harmônicas de múltiplas cargas em um barramento comum, utilizam-se filtros específicos. Existem dois tipos principais:

- **Filtros Passivos:**
  - **Descrição e Identificação:** São conjuntos de componentes passivos – capacitores e indutores (reatores) – geralmente conectados em paralelo (shunt) com a rede, próximos às cargas não lineares ou no barramento principal. Frequentemente, estão alojados em gabinetes semelhantes aos de bancos de capacitores, mas contêm também os reatores.
  - **Funcionamento:** Baseiam-se no princípio da ressonância LC. Um filtro passivo é tipicamente um circuito LC série sintonizado para uma frequência harmônica específica (ex: 5ª harmônica = 300 Hz). Nessa frequência, a impedância do filtro torna-se muito baixa, oferecendo um caminho preferencial para a corrente harmônica daquela ordem, desviando-a da fonte e "absorvendo-a" no filtro. Podem existir múltiplos "braços" sintonizados para diferentes harmônicas (ex: 5ª, 7ª, 11ª). Uma variação comum são os filtros "dessintonizados", onde o reator é dimensionado não para ressonar exatamente em uma harmônica, mas ligeiramente abaixo (ex: 270 Hz em vez de 300 Hz), com o objetivo principal de evitar a ressonância perigosa com a rede e ainda permitir que o capacitor forneça correção de fator de potência na frequência fundamental.
  - **Vantagens:** Custo geralmente mais baixo que filtros ativos, tecnologia madura e robusta, eficazes para harmônicas dominantes e cargas constantes.
  - **Desvantagens:** São sintonizados para frequências fixas e sua eficácia depende da impedância da rede (que pode variar); podem ser sobrecarregados se as harmônicas da rede forem maiores que o esperado; risco de ressonância com a rede ou com outros filtros se não forem projetados corretamente; podem ser volumosos e apresentar perdas internas.

- **Filtros Ativos (APF - Active Power Filters ou AHF - Active Harmonic Filters):**
  - **Descrição e Identificação:** São equipamentos baseados em eletrônica de potência (semelhantes a um VFD, mas com função diferente), conectados em paralelo com a rede. Possuem TCs para medir a corrente da carga (ou da rede) e um inversor controlado por um processador digital (DSP). Visualmente, são gabinetes eletrônicos, muitas vezes com um display ou interface digital.
  - **Funcionamento:** O filtro ativo mede continuamente a corrente distorcida da carga, identifica as componentes harmônicas e, em tempo real, utiliza seu inversor para injetar na rede correntes harmônicas de mesma amplitude, mas em **oposição de fase** às harmônicas da carga. O resultado é que as harmônicas injetadas pelo filtro cancelam as harmônicas geradas pela carga, fazendo com que a corrente vista pela fonte (rede elétrica) seja quase senoidal.
  - **Vantagens:** Compensação dinâmica e adaptativa (respondem a variações rápidas na carga e no espectro harmônico); capacidade de filtrar múltiplas ordens harmônicas simultaneamente; não causam ressonância com a rede; podem também compensar potência reativa (corrigir fator de potência) e até desequilíbrio de corrente entre fases; desempenho superior na redução de THD.
  - **Desvantagens:** Custo inicial significativamente mais alto que filtros passivos; mais complexos eletronicamente; requerem instalação e comissionamento especializados.

#### Outras Técnicas (Menos Comuns ou Integradas)

- **Retificadores AFE (Active Front End):** Alguns VFDs modernos utilizam um retificador de entrada "ativo" com transistores (IGBTs) em vez de diodos. Esse retificador é controlado para consumir corrente da rede de forma quase senoidal e em fase com a tensão, resultando em THDi extremamente baixo (tipicamente < 5%) e fator de potência próximo a 1. São mais caros que VFDs padrão, mas eliminam a necessidade de filtros adicionais para harmônicas de baixa ordem. Podem, no entanto, gerar harmônicas de alta frequência (associadas à frequência de chaveamento dos IGBTs), que podem exigir filtros LCL ou EMI/RFI específicos na entrada.
- **Reconfiguração da Rede:** Em alguns casos, pode ser benéfico rearranjar os circuitos da planta para isolar as cargas que mais geram harmônicas em transformadores ou alimentadores dedicados, evitando que elas "poluam" barramentos que alimentam cargas mais sensíveis.

A tabela a seguir oferece uma visão comparativa das principais técnicas de mitigação:

**Tabela 3: Visão Geral das Técnicas de Mitigação de Harmônicas Encontradas na Indústria**

Técnica de Mitigação	Princípio de Funcionamento Breve	Vantagens Principais	Desvantagens Principais	Identificação Visual / Localização Típica
Reator de Linha	Adiciona indutância em série com a carga não linear	Custo baixo; Simples; Reduz THDi (ex: 35-45%); Protege VFD contra transientes.	Mitigação limitada; Não elimina harmônicas; Adiciona queda de tensão.	Indutor/Bobina na entrada do VFD ou painel de acionamento.
Transformador Defasador	Cria múltiplas fases defasadas	Cancela harmônicas de	Custo elevado; Grande e pesado;	Grande transformador com

Técnica de Mitigação	Princípio de Funcionamento Breve	Vantagens Principais	Desvantagens Principais	Identificação Visual / Localização Típica
(Multipulso)	para alimentar retificadores múltiplos	ordem baixa (5ª, 7ª, etc.); Reduz THDi significativamente.	Requer VFD multipulso específico; Sensível a desequilíbrios.	múltiplas saídas secundárias ou placa indicando "multipulso" / "zig-zag".
Transformador Fator K	Projetado para suportar aquecimento harmônico	Tolera harmônicas sem superaquecer; Protege o transformador.	Não reduz harmônicas; Custo maior que trafo padrão.	Transformador com classificação "K-Factor" (K-4, K-13, etc.) na placa.
Filtro Passivo (Sintonizado/Dessintonizado)	Circuito LC paralelo sintonizado para desviar harmônicas específicas	Custo moderado; Robusto; Eficaz para harmônicas dominantes e cargas constantes.	Sintonização fixa; Sensível à rede/carga; Risco de ressonância; Volumoso; Perdas.	Gabinete(s) com bancos de capacitores e reatores em paralelo com a rede.
Filtro Ativo (APF / AHF)	Injeta corrente harmônica oposta para cancelar a da carga	Adaptativo (dinâmico); Filtra múltiplas harmônicas; Não ressona; Corrige FP.	Custo inicial alto; Complexo eletronicamente; Requer especialização.	Gabinete eletrônico (semelhante a VFD) conectado em paralelo à rede, com display.
VFD com Retificador AFE	Retificador de entrada controlado consome corrente quase senoidal	THDi muito baixo (<5%); FP unitário; Regeneração de energia possível.	Custo mais alto do VFD; Gera harmônicas HF (requer filtro LCL).	VFD específico com menção a "Active Front End", "Low Harmonic" ou "Regenerative".

A presença de uma determinada solução de mitigação em uma planta industrial geralmente reflete uma decisão de engenharia baseada em uma análise específica daquele sistema. Fatores como o nível de distorção harmônica existente, a variabilidade das cargas, a sensibilidade dos equipamentos afetados, os requisitos de normas e, claro, o orçamento disponível, influenciam a escolha da tecnologia. Por exemplo, a instalação de um filtro ativo, que representa um investimento maior, geralmente indica que os problemas harmônicos eram severos, variáveis ou afetavam equipamentos críticos, justificando uma solução mais avançada e flexível. Reconhecer o tipo de equipamento de mitigação instalado pode dar ao electricista pistas sobre a natureza e a gravidade dos problemas de qualidade de energia que a planta enfrentou ou busca prevenir.

## 6. Conclusão: O Papel do Eletricista na Gestão das Harmônicas e Recomendações Finais

As harmônicas são uma realidade inescapável nas instalações industriais modernas, geradas pela crescente presença de cargas não lineares como inversores de frequência, fontes

chaveadas e iluminação eletrônica. Como vimos, elas não são apenas uma questão teórica de "qualidade da energia", mas sim um fenômeno com consequências práticas e muitas vezes severas: superaquecimento de cabos, transformadores e motores, redução da vida útil de equipamentos, falhas inexplicáveis em sistemas eletrônicos, disparos intempestivos de proteções, problemas com bancos de capacitores e desperdício de energia.

Compreender os fundamentos das harmônicas – o que são, de onde vêm e quais seus efeitos – é crucial para o eletricista industrial. Esse conhecimento permite diagnosticar problemas que antes poderiam parecer misteriosos e contribui diretamente para a segurança, a confiabilidade e a eficiência da planta.

O papel do eletricista na gestão das harmônicas é fundamental, atuando como a primeira linha de defesa e observação no chão de fábrica:

- **Observação e Identificação:** Estar atento aos sinais de alerta. Superaquecimento detectado visualmente, ao toque (com segurança!) ou através de termografia em painéis, cabos (especialmente o neutro), transformadores e motores, sem uma sobrecarga óbvia na corrente fundamental, é um forte indicativo de problemas harmônicos. Vibração excessiva ou ruído agudo em motores, falhas recorrentes em equipamentos eletrônicos, disparos frequentes de disjuntores ou DRs, e problemas repetitivos em bancos de capacitores (estufamento, queima de fusíveis) também devem levantar suspeitas.
- **Medição Básica Confiável:** Utilizar **sempre** um multímetro ou alicate amperímetro **True RMS** para medir corrente e tensão em circuitos que alimentam cargas não lineares. Confiar em medições de instrumentos de resposta média pode levar a conclusões perigosamente equivocadas.
- **Reporte e Comunicação:** Documentar e comunicar observações suspeitas (sintomas, leituras de temperatura, etc.) e resultados de medições (valores True RMS, por exemplo) à equipe de engenharia elétrica ou de manutenção responsável pela qualidade de energia na planta. A informação coletada pelo eletricista é valiosa para iniciar uma investigação mais aprofundada.
- **Manutenção Preventiva:** Incorporar a verificação de pontos quentes (com termografia, se disponível) em painéis, conexões, transformadores e motores nas rotinas de manutenção preventiva. Harmônicas podem exacerbar problemas causados por conexões frouxas ou inadequadas. Inspecionar visualmente o estado de bancos de capacitores e filtros de harmônicas existentes.

#### **Recomendações Finais para o Eletricista:**

1. **Segurança em Primeiro Lugar:** Harmônicas podem causar condições inesperadas. Sempre siga rigorosamente os procedimentos de segurança (NR-10) ao realizar medições ou intervenções em sistemas elétricos energizados.
2. **Invista na Ferramenta Certa:** Um multímetro True RMS de boa qualidade não é um luxo, mas uma necessidade para trabalhar com precisão e segurança em instalações industriais modernas.
3. **Busque Conhecimento Contínuo:** Se a sua planta possui muitas cargas não lineares ou enfrenta problemas recorrentes de qualidade de energia, considere buscar treinamento adicional específico sobre harmônicas e operação de analisadores de qualidade de energia.
4. **Colabore com a Engenharia:** Lembre-se que a análise detalhada e o projeto de soluções para problemas harmônicos complexos (como dimensionamento de filtros ou análise de ressonância) geralmente requerem ferramentas de simulação e conhecimento de engenharia especializado. O papel do eletricista é crucial na identificação inicial do problema e na implementação e manutenção das soluções definidas.

Ao entender e saber identificar os problemas relacionados às harmônicas, o eletricitista industrial se torna um profissional ainda mais valioso, contribuindo ativamente para a operação segura, confiável e eficiente da planta.

## Referências citadas

1. O que são Harmônicas em Instalações Elétricas, <https://www.pabloguimaraes-professor.com.br/post/o-que-sao-harmonicas-em-instalacoes-eletricas>
2. Uma Proposta De Experimento De Laboratório Para O Ensino Didático De Distorção Harmônica - Repositório Digital - IFG, <https://repositorio.ifg.edu.br/handle/prefix/1906>
3. Harmônicas Nas Instalações Elétricas - Causas, Efeitos E Soluções | PDF - Scribd, <https://www.scribd.com/doc/144903618/Harmonic-Nas-Instalacoes-Eletricas-Causas-Efeitos-E-Solucoes>
4. [abccobre.org.br](http://abccobre.org.br), <http://abccobre.org.br/wp-content/uploads/2021/12/qe11-guia-3-3-1-filtros-passivos-harmonicas.pdf>
5. ESTUDO E MODELAGEM DE CARGAS NÃO LINEARES EM CONDIÇÕES NÃO SENOIDAIS - UFSJ, <https://ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppgel/2017-03-30-DissertacaoDanielBraga.pdf>
6. Harmônicos: origem, efeitos e soluções - CIRCUTOR, <https://circutor.com/pt-pt/artigos/harmonicos-origem-efeitos-e-solucoes/>
7. Problemas causados pelas harmônicas, <https://www.engeletrica.ind.br/problemas-causados-harmonicas>
8. O que é Harmônica e como pode prejudicar sua empresa? - EMS ..., <https://eletroms.com.br/o-que-e-harmonica-e-como-pode-prejudicar-sua-empresa/>
9. ANÁLISE DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM PLANTA INDUSTRIAL MODELADA POR FONTES DE CORRENTE, [https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10021/2/CT\\_COELE\\_2016\\_2\\_08.pdf](https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10021/2/CT_COELE_2016_2_08.pdf)
10. Desenvolvimento e Implementação de um Filtro Ativo de Potência - CGTI, <https://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/03/Desenvolvimento-e-Implementacao%CC%A7a%CC%83o-de-um-Filtro-Ativo-de-Potencia.pdf>
11. HARMÔNICAS E DESEQUILÍBRIOS PROVOCADOS PELOS SISTEMAS ELÉTRICOS CONSTITUINTES DE UMA INSTALAÇÃO EÓLICA - RECIPP, [https://recipp.ipp.pt/bitstream/10400.22/14854/1/DM\\_BrunoMenezes\\_2019\\_MEESE.pdf](https://recipp.ipp.pt/bitstream/10400.22/14854/1/DM_BrunoMenezes_2019_MEESE.pdf)
12. Trabalho de Conclusão de Curso Estudo da identificação não invasiva de cargas elétricas residenciais usando redes neurais a, [https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/3430/6/MONOGRAFIA\\_Estudoidentificacao%CC%A7a%CC%83o-de-um-Filtro-Ativo-de-Potencia.pdf](https://monografias.ufop.br/bitstream/35400000/3430/6/MONOGRAFIA_Estudoidentificacao%CC%A7a%CC%83o-de-um-Filtro-Ativo-de-Potencia.pdf)
13. “Análise de Modelos para Cargas Não Lineares no Estudo Trifásico de Penetração Harmônica” Alfredo Arcanjo Cruz Figueiredo Orientador, [https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/158-dissertacao\\_alfredo\\_arcarnjo\\_cruz\\_figueirero.pdf](https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/pos-graduacao/158-dissertacao_alfredo_arcarnjo_cruz_figueirero.pdf)
14. Compreendendo a qualidade da energia elétrica e questões harmônicas - Intone Power, <https://www.intonepower.com/pt/news/understanding-electrical-power-quality-and-harmonic-concerns/>
15. Transformador Defasador - Tamura Brasil, <https://tamurabrasil.com/conteudo/2023/02/24/transformador-defasador/>
16. Medição de Harmônicas em Inversores de Frequência com tecnologia Active Front End (AFE) e Inversores com Retificação a Diodo - ResearchGate, [https://www.researchgate.net/publication/372159384\\_Medicao\\_de\\_Harmonicas\\_em\\_Inversores\\_de\\_Frequencia\\_com\\_tecnologia\\_Active\\_Front\\_End\\_AFE\\_e\\_Inversores\\_com\\_Retificacao\\_a\\_Diodo](https://www.researchgate.net/publication/372159384_Medicao_de_Harmonicas_em_Inversores_de_Frequencia_com_tecnologia_Active_Front_End_AFE_e_Inversores_com_Retificacao_a_Diodo)
17. [peteetricaufu.com.br](https://peteetricaufu.com.br), [https://peteetricaufu.com.br/static/ceel/artigos/artigo\\_291.pdf](https://peteetricaufu.com.br/static/ceel/artigos/artigo_291.pdf)
18. ESTUDO DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS/BIFÁSICOS APLICADOS AOS

RETIFICADORES MULTIPULSOS, ISOLADOS E COM ALTO FATOR DE POTÊNCIA, [https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/9924/2/CT\\_COELE\\_2011\\_2\\_27.pdf](https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/9924/2/CT_COELE_2011_2_27.pdf) 19. [www.cgti.org.br](http://www.cgti.org.br), <https://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/01/A-Soluc%CC%A7a%CC%83o-de-Problemas-com-Harmo%CC%82nicos-em-um-Cliente-Industrial-Uma-Cooperac%CC%A7a%CC%83o-entre-Concessiona%CC%81ria-e-Consumidor.pdf> 20. Guia de reforma de capacitores VFD - KWOCO, <https://kwoco-plc.com/pt/vfd-capacitor-reforming/> 21. Significado e aplicação do multímetro True RMS - Conhecimento - GVDA, <https://pt.gvda-instrument.com/info/multimeter-true-rms-meaning-and-application-96203817.html> 22. O que é true-RMS? | Fluke, <https://www.fluke.com/pt-pt/saber-mais/blog/aplicacoes-eletricas/o-que-e-true-rms> 23. True RMS – A única medição verdadeira - ABCobre, <https://abcobre.org.br/wp-content/uploads/2021/12/qe10-guia-3-2-2-true-rms-nica-medio-verdadeira.pdf> 24. Comparação de Medidores de Qualidade da Energia Elétrica Quanto à Distorção Harmônica - CGTI, <https://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/01/Comparac%CC%A7a%CC%83o-de-Medidores-de-Qualidade-da-Energia-Ele%CC%81trica-Quanto-a%CC%80-Distorc%CC%A7a%CC%83o-Harmo%CC%82nica.pdf> 25. O que é qualidade de energia elétrica? - Amperi, <https://amperi.com.br/canais/instalacao-eletrica/qualidade-de-energia-eletrica/> 26. Correção de distorções harmônicas em sistemas elétricos através de interferência destrutiva - Semantic Scholar, <https://pdfs.semanticscholar.org/83bf/0fc05e0e976d84ac50c49f45318683df165d.pdf> 27. A-74 AVALIAÇÃO DAS HARMÔNICAS NA REDE ELÉTRICA: AULA 02 - YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=S1J5UGwvCBE> 28. UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, [https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10007/2/CT\\_COELE\\_2014\\_1\\_03.pdf](https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10007/2/CT_COELE_2014_1_03.pdf) 29. ANÁLISE DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA: DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM UMA USINA SIDERÚRGICA - Lume UFRGS, <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/251735/001153649.pdf?sequence=1> 30. UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, [https://repositorio.ufpa.br/bitstream/2011/10012/1/Tese\\_AvaliacaoDistorcaoHarmonica.pdf](https://repositorio.ufpa.br/bitstream/2011/10012/1/Tese_AvaliacaoDistorcaoHarmonica.pdf) 31. Compreendendo a distorção harmônica total (THD) e o fator de ..., <https://www.intonepower.com/pt/news/understanding-total-harmonic-distortion-thd-and-power-factor-a-simplified-guide/> 32. Reatores de linha para VFD, inversores de frequência, BESS e ..., <https://www.te.com/pt/products/emi-and-emc-solutions/line-reactors.html> 33. O VFD introduz um deslocamento entre tensão e corrente? : r/PLC - Reddit, [https://www.reddit.com/r/PLC/comments/1cgvfad/does\\_vfd\\_introduce\\_shift\\_between\\_voltage\\_and/?tl=pt-br](https://www.reddit.com/r/PLC/comments/1cgvfad/does_vfd_introduce_shift_between_voltage_and/?tl=pt-br) 34. Novidades - Diferentes formas de mitigar a harmônica - Noker - Electric, <http://pt.noker-inverter.com/news/different-ways-to-mitigate-the-harmonic/> 35. Untitled - INVT Electric, [https://www.invt.com/uploads/file1/20250401/GD27%20Inversor%20de%20Frequencia%20Inteligente%20Manual%20do%20Usuario\\_V1.1.pdf](https://www.invt.com/uploads/file1/20250401/GD27%20Inversor%20de%20Frequencia%20Inteligente%20Manual%20do%20Usuario_V1.1.pdf) 36. Desenvolvimento de Protótipo Funcional de Novo Conjunto Transformador Atenuador de Harmônicos - CGTI, <https://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2017/09/Desenvolvimento-de-Prot%3%B3tipo-Funcional-de-Novo-Conjunto-Transformador-Atenuador-de-Harm%3%B4nicos.pdf> 37. Transformadores A39 - Conexão em ZIG-ZAG para aterramentos - YouTube, <https://www.youtube.com/watch?v=fmK9IZPqDYM> 38. Filtros para harmônicos - cosmo - transformadores, <https://www.cosmoelétrica.ind.br/filtros-harmonicos> 39. Filtros Ativos Trifásicos de Potência em Instalações de Baixas Tensões | UFPel,

<https://institucional.ufpel.edu.br/projetos/id/u2556> 40. UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ ENGENHARIA ELÉTRICA FELIPE REGONATTO AVALIAÇÃO DA DISTORÇÃO HAR,

[https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/28739/1/CP\\_COELT\\_2020\\_1\\_11.pdf](https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/28739/1/CP_COELT_2020_1_11.pdf) 41. ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO DE FILTROS DE POTÊNCIA PASSIVO E ATIVO PARA MITIGAÇÃO DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM UM PR - TEDE,

[https://tede.unioeste.br/bitstream/tede/6011/5/Poliana\\_Rockenbach\\_Mendes\\_2022.pdf](https://tede.unioeste.br/bitstream/tede/6011/5/Poliana_Rockenbach_Mendes_2022.pdf) 42. Diferença entre Filtro Harmônico Passivo e Ativo (APF) - Intone Power,

<https://www.intonepower.com/pt/news/difference-between-passive-and-active-harmonic-filter-apf/> 43. Filtros Ativos e SVG na Compensação de Reativos - RTA • Rede de Tecnologia Avançada,

<https://rta.com.br/filtros-ativos-e-svg-na-compensacao-de-reativos> 44. Vantagens e desvantagens dos filtros ativos - Conhecimento - KISHO Corporation Co., Ltd,

<https://pt.kisho-nano-coating.com/info/advantages-and-disadvantages-of-active-filters-44304029.html> 45. 6 Técnicas para Controlar a Distorção Harmônica - Intone Power,

<https://www.intonepower.com/pt/news/6-techniques-for-controlling-harmonic-distortion/> 46. A importância de uma especificação técnica detalhada para aquisição de filtros harmônicos,

<https://www.osetoreletrico.com.br/a-importancia-de-uma-especificacao-tecnica-detalhada-para-aquisicao-de-filtros-harmonicos/>