

**GABRIEL SILVA SANTOS**

**UMA ABORDAGEM DIDÁTICA COM HARMZS PARA ANÁLISE DE  
FILTROS HARMÔNICOS PASSIVOS**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 402 - Projeto de Engenharia II e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

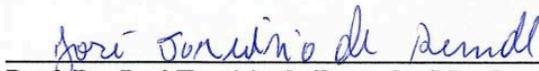
Aprovada em 30 de junho de 2025.

**COMISSÃO EXAMINADORA**



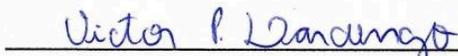
---

**Prof. Dr. Mauro de Oliveira Prates - Orientador**  
**Universidade Federal de Viçosa**



---

**Prof. Dr. José Tarcísio de Resende- Membro**  
**Universidade Federal de Viçosa**



---

**Prof. Dr. Victor Pellanda Dardengo- Membro**  
**Universidade Federal de Viçosa**

# Uma Abordagem Didática com HarmZs para Análise de Filtros Harmônicos Passivos

Gabriel Silva Santos  
Departamento de Engenharia Elétrica (DEL)  
UFV – Universidade Federal de Viçosa  
Viçosa, Minas Gerais  
gabriel.s.santos@ufv.br

**Resumo**— A análise e o projeto de filtros harmônicos passivos representam uma estratégia relevante no enfrentamento dos desafios relacionados à qualidade de energia em sistemas elétricos modernos. Este estudo, com o apoio do software HarmZs, analisa as distorções harmônicas na rede elétrica causadas principalmente por cargas não lineares, como equipamentos eletrônicos e industriais. Também são considerados os efeitos da inserção de fontes alternativas de energia, que, mesmo contando com filtros internos, podem impactar a rede elétrica em determinadas condições de operação. São abordados os fundamentos teóricos da geração de harmônicas, os métodos de análise no domínio da frequência e os princípios de funcionamento dos filtros passivos, com foco nas estruturas sintonizadas. A metodologia consiste no dimensionamento dos parâmetros dos filtros, na modelagem de um sistema elétrico de teste com dez barras, que representa um sistema de alta tensão com a inserção de uma nova fonte de geração, modelada como uma fonte de harmônicas, e na realização de simulações no software HarmZs. As análises permitem avaliar como o sistema se comporta nas condições sem e com a aplicação do filtro, destacando, sobretudo, a influência da frequência de sintonia na mitigação das distorções harmônicas.

**Palavras chaves** — harmônicos, filtros, qualidade, energia, projeto, rede.

## I. INTRODUÇÃO

Garantir o fornecimento de energia elétrica com qualidade adequada em residências e edificações é fundamental tanto para o funcionamento correto dos equipamentos dos consumidores quanto para a estabilidade do sistema elétrico. Apesar da interligação do sistema elétrico brasileiro, que permite o uso de linhas alternativas para suprir falhas em determinados pontos, problemas de qualidade podem, dependendo da gravidade, extensão e topologia da rede, se propagar entre os barramentos [1]. Por isso, é necessário supervisionar e manter os parâmetros de qualidade dentro de limites aceitáveis, definidos pelo PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica) e complementados pelo PROREDE (Procedimentos de Rede).

O PRODIST, regulamentado pela ANEEL, estabelece padrões técnicos para o setor de distribuição, com destaque para o Módulo 8, que detalha parâmetros de qualidade da energia, incluindo limites para distorções harmônicas (THD - Total Harmonic Distortion), interrupções e conformidade de

tensão. Por exemplo, o Módulo 8 determina que o THD de tensão não deve exceder 10% para sistemas de baixa tensão e 5% para média tensão [2]. Já o PROREDE padroniza procedimentos operacionais da rede, assegurando a integração segura de novas fontes renováveis e a mitigação de distúrbios elétricos, definindo protocolos específicos para correção de falhas que afetam esses parâmetros de qualidade. [3]

Geradores que utilizam eletrônica de potência, ao serem conectados à rede sem o controle ou supervisão adequada, podem introduzir distúrbios como harmônicas, que são variações na forma de onda da corrente alternada causadas por sinais com frequências maiores que a fundamental somados a ela [4].

As harmônicas são geradas principalmente por dispositivos que empregam eletrônica de potência, como conversores, incluindo retificadores e inversores, que realizam a conversão entre corrente contínua e alternada por meio de comutação em alta frequência. Esses equipamentos utilizam semicondutores, como SCRs (Silicon Controlled Rectifier), para controlar a corrente, o que altera a forma senoidal natural da tensão e corrente, causando distorções [5] [6]. Além disso, acionamentos de velocidade variável (ASD), retificadores trifásicos, cargas eletrônicas comuns (computadores, carregadores, iluminação LED com dimmers), fornos a arco elétrico e carregadores de veículos elétricos também contribuem para a geração dessas distorções [6] [7] [8]. A forma final do sinal distorcido depende da quantidade de harmônicas presentes, bem como de sua magnitude e relação de fase, o que contribui para uma maior complexidade do sinal [9].

Além disso, as harmônicas podem impactar a estabilidade dos sistemas elétricos, induzindo vibrações mecânicas em máquinas. Essas oscilações, muitas vezes atribuídas a problemas mecânicos, como desbalanceamento ou desalinhamento, na verdade podem ter origem elétrica. A interação entre harmônicas e campos eletromagnéticos gera forças pulsantes no entreferro, causando vibrações cuja frequência está diretamente associada à ordem das harmônicas presentes [10].

A qualidade da energia elétrica pode ser comprometida por diversos distúrbios; as harmônicas são apenas um deles. Também são observados fenômenos como afundamentos e

elevações momentâneas de tensão, flicker e flutuações de frequência [11]. No estudo das harmônicas, a análise visual é feita por meio de espectros de amplitude [14] e curvas de impedância em função da frequência, aplicáveis à tensão e à corrente [15].

Dessa forma, a utilização de ferramentas computacionais tem se consolidado como uma estratégia indispensável para a simulação e o estudo de fenômenos associados à qualidade de energia elétrica. Softwares como Simulink, ANAFAS, ANAREDE, ANATEM e HarmZs, desenvolvidos pelo CEPEL, permitem modelar e analisar diversos tipos de distúrbios elétricos. Entre essas ferramentas, merece destaque o HarmZs, cuja interface gráfica apresenta estrutura intuitiva e de fácil manuseio, permitindo a simulação de sistemas elétricos que variam desde configurações simples até representações altamente complexas. Ressalta-se, ainda, a robustez dessa ferramenta, que possibilita o carregamento de grandes malhas elétricas, incluindo, quando necessário, a representação completa do Sistema Interligado Nacional (SIN), o que a torna especialmente útil para estudos em larga escala voltados à avaliação da qualidade de energia [12], [13].

Este trabalho tem como foco o estudo e o projeto de filtros passivos sintonizados, utilizando o software HarmZs como ferramenta principal. Os parâmetros dos componentes, como resistência, indutância e capacitância, são calculados por meio de equações analíticas e aplicados no programa, que permite simular o comportamento do filtro no sistema. A proposta também busca oferecer uma alternativa prática e didática para o estudo de harmônicas, aproveitando a interface simples do HarmZs para facilitar a interpretação dos resultados e contribuir com a formação de engenheiros eletricitistas.

## II. REFERENCIAL TEÓRICO

### Definição e Representação de Sinais Harmônicos

O sistema elétrico brasileiro opera, de forma padronizada, com tensões alternadas cuja forma de onda é senoidal periódica e possui frequência nominal de 60 hertz (Hz), ou seja, 60 ciclos por segundo, essa frequência é necessária para que os equipamentos funcionem corretamente.

As harmônicas são sinais com componentes de frequência superior, geralmente múltiplas inteiras da frequência fundamental, que se somam à onda senoidal original, provocando distorções em sua forma de onda[16], conforme mostrado na Figura 1:

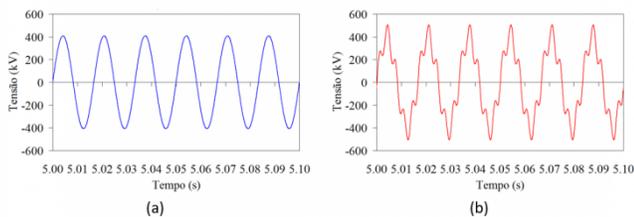


Figura 1- Sinal Senoidal sem e com harmônicas[17]

A análise de Fourier é uma ferramenta matemática amplamente utilizada para avaliar formas de onda distorcidas em sistemas elétricos. Ela permite decompor sinais periódicos

em uma soma de funções senoidais, cada uma com frequência, amplitude e fase específicas, facilitando a identificação da contribuição de cada componente harmônica na composição do sinal [18].

Além da série de Fourier que decompõe sinais complexos como somas de senos mais simples no domínio do tempo, a Transformada de Fourier permite analisar o sinal no domínio da frequência, o que é especialmente útil na avaliação de harmônicas. A visualização do espectro de frequência torna a análise mais clara e prática do que no tempo, principalmente em sistemas com distorções harmônicas.

Seja um sinal periódico  $x(t)$ , que pode representar tensão ou corrente na rede elétrica, sua representação em série de Fourier pode ser expressa de forma simplificada como:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t)] \quad (1)$$

Onde:

- $\omega_0 = 2\pi f_0$  é a frequência angular fundamental
- $a_0, a_n$  e  $b_n$  são os coeficientes da série, obtidos por integração no intervalo de um período

A correspondente transformada de Fourier do sinal  $x(t)$  é dada por:

$$X(j\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2)$$

Nesse contexto:

- $j\omega$  representa a frequência complexa, onde  $j$  é a unidade imaginária ( $j^2 = -1$ ) e  $\omega$  é frequência angular, expressa por  $\omega = 2\pi f$ , sendo  $f$  a frequência em hertz (Hz) [18]

Na Figura 2(a), é apresentado um sinal periódico  $f(x)$ , com amplitude igual a 1 e frequência  $f_0$ . Na Figura 3(a), observa-se o mesmo sinal somado a outro sinal senoidal, com amplitude de 0,3 e frequência igual a três vezes  $f_0$ . Essas representações permitem a análise do comportamento do sinal tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência.

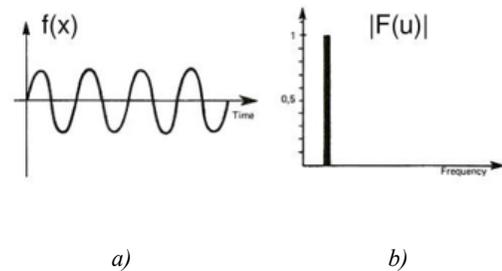


Figura 2[19]

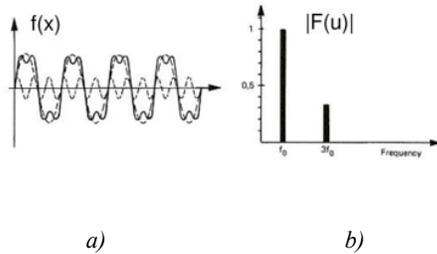


Figura 3[19]

As ferramentas computacionais utilizadas para análise harmônica realizam, basicamente, a aplicação das equações mencionadas anteriormente (série e transformada de Fourier), de modo a decompor o sinal original em suas componentes senoidais. O resultado dessa análise é uma visualização semelhante à das figuras 2(b) e 3(b) nas quais é possível identificar, de forma clara, a contribuição de cada componente de frequência para a forma final do sinal.

Como consequência, a corrente consumida por cargas não lineares deixa de ser linearmente proporcional à tensão aplicada, Isso gera formas de onda de corrente distorcidas, compostas pela soma da frequência fundamental e de múltiplas componentes harmônicas. A forma final desse sinal depende da quantidade, magnitude e relação de fase entre as harmônicas, tornando-o mais complexo [9].

### Estratégias para Mitigação de Harmônicas

Devido aos impactos negativos das harmônicas, torna-se necessário mitigá-las por meio de técnicas de filtragem das componentes de alta frequência, preservando apenas a fundamental. Essa mitigação pode ser feita com filtros passivos ou ativos, cada um com características, vantagens e limitações próprias.

Filtros ativos operam de forma semelhante aos dispositivos eletrônicos ativos. Seu funcionamento baseia-se na injeção de correntes harmônicas de mesma magnitude e fase oposta às geradas pelas cargas não lineares, promovendo o cancelamento das distorções. Apesar da eficiência, apresentam desvantagens como custo elevado, geração de ruído de alta frequência, possíveis interferências eletromagnéticas (EMI) e maior complexidade de controle, especialmente em acionamentos PWM [20].

Filtros passivos, por sua vez, são compostos por elementos resistivos (R), indutivos (L) e capacitivos (C), que, combinados, formam um circuito ressonante. Essa configuração proporciona um caminho de baixa impedância para correntes harmônicas em determinadas frequências, favorecendo sua dissipação e contribuindo para a melhoria da qualidade da energia [21]. Quando projetados para uma frequência específica, são chamados de filtros passivos sintonizados; quando dimensionados para atuar sobre uma faixa mais ampla, são chamados filtros passivos amortecidos.

É importante salientar que, na prática, os filtros passivos podem não permanecer sintonizados na frequência desejada,

uma vez que essa condição pode se alterar ao longo do tempo. O filtro, portanto, deve ser capaz de acompanhar essas variações sem se desviar da frequência de projeto. Tal instabilidade pode ser atribuída a diversos fatores, como o envelhecimento dos componentes, as variações de temperatura e de tolerâncias, que afetam os valores de resistência, indutância e capacitância, resultando em alterações na frequência de sintonia [22].

### Projeto de Filtros Passivos

Para a os cálculos dos parâmetros do filtro passivo, é necessário, primeiramente, definir o local de instalação do equipamento no sistema elétrico, bem como a quantidade de energia que este deverá suportar [23]. Em projetos voltados para sistemas de baixa tensão, o filtro deve ser instalado no secundário do transformador, em paralelo à fonte. Essa configuração permite identificar a barra correspondente ao ponto de acoplamento comum (PAC), que separa a rede interna da instalação da rede externa de distribuição.

Em relação à topologia do filtro, a Figura 4 apresenta duas configurações: a trifásica com três capacitores em delta (Figura 4a), mais comum na prática por ser mais econômica, pois nessa configuração a capacitância equivale a um terço da configuração em estrela, reduzindo a quantidade de material necessário para fornecer a mesma potência reativa; e a monofásica equivalente (Figura 4b), que será adotada nos cálculos por simplificar a análise. Como o sistema trifásico em questão é considerado equilibrado, cada fase se comporta de forma idêntica, o que permite representar o filtro por uma única fase sem perda de precisão do dimensionamento. Além da mitigação de harmônicas, estabilizar a potência reativa também pode ser uma das funções dos filtros passivos [23].

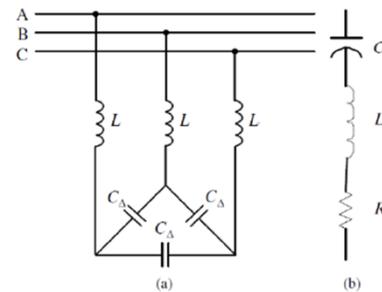


Figura 4 Modelos do filtro passivo: (a) trifásico; (b) por fase com resistência do filtro [23]

Para o dimensionamento do filtro, considera-se que cada transformador opera com 100% de sua potência nominal, ou seja, em plena carga, e que o fator de potência será corrigido de 0,85 para 0,95. O primeiro parâmetro a ser determinado é a potência reativa necessária para a compensação do fator de potência, também denominada potência efetiva do filtro  $Q_{eff}$ , conforme a equação (3) apresentada por:

$$Q_{eff} = \gamma |S| f p_0 \left[ \tan \left( \arccos \left( f p_0 \right) \right) - \frac{\sqrt{1 - f p^2}}{f p} \right] \quad (3) [23]$$

Na equação (3),  $\gamma$  representa o carregamento do transformador, isto é, a fração da potência nominal em que ele está operando, sendo neste caso igual a 1, ou seja, 100% de carga.  $|S|$  corresponde à potência aparente do transformador,  $fp_0$  ao fator de potência inicial e  $fp$  ao fator de potência corrigido desejado.

Com o valor de  $Q_{eff}$  definido e conhecendo-se a tensão na barra, representada por  $V_{ff}$ , torna-se possível calcular a reatância efetiva  $X_{eff}$  por meio da equação (4):

$$Q_{eff} = \frac{V_{ff}^2}{X_{eff}} \quad (4)$$

É igualmente necessário definir, com antecedência, a frequência de ressonância a ser atenuada, bem como sua correspondente ordem harmônica em relação à frequência fundamental. Essas informações são essenciais para o dimensionamento adequado dos parâmetros dos elementos passivos do filtro, a saber: resistência (R), indutância (L) e capacitância (C). A seleção da frequência alvo de atenuação deve considerar a ordem harmônica que mais contribui para a distorção das formas de onda de corrente ou tensão no ponto de acoplamento comum (PAC), o que torna recomendável a realização de uma análise espectral prévia do sistema.

Com os valores da potência reativa efetiva ( $Q_{eff}$ ) e da reatância efetiva ( $X_{eff}$ ) previamente definidos, torna-se possível determinar as reatâncias individuais do capacitor ( $X_c$ ) e do indutor ( $X_L$ ). Considerando a relação entre essas grandezas em filtros passivos sintonizados, adota-se a equação:

$$X_{eff} = X_c - X_L \quad (5)$$

$$X_c = hr^2 X_L \quad (6)$$

$$X_c = \left( \frac{X_{eff} hr^2}{hr^2 - 1} \right) \quad (7)$$

Da equação 7, podemos definir  $\frac{hr^2}{hr^2 - 1} = a$

$$\text{assim, } X_c = a X_{eff} \quad (8)$$

$$\text{além disso, } X_L = \frac{X_c}{hr^2} \quad (9)$$

Essa relação expressa que a reatância total do circuito em ressonância resulta da diferença entre a reatância capacitiva e a indutiva, como mostrado na equação (5), sendo que ambas devem ser calculadas em função da frequência harmônica de interesse. A partir dessas reatâncias, os valores de capacitância (C) e indutância (L) podem ser obtidos por meio das equações usuais da impedância reativa em regime senoidal.

Para calcular C e L, temos que:

$$C = \frac{1}{\omega X_c}, \text{ sendo } \omega = 2\pi f \quad (10)$$

$$C_{fase} = \frac{c}{3} \quad (11)$$

$$fr = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (12)$$

$$L = \frac{1}{4\pi r^2 fr^2 C} \quad (13)$$

A seletividade do filtro é definida pelo seu fator de qualidade (Q), que, em filtros passivos sintonizados, costuma variar entre 30 e 80 [24]. Com base na equação do fator de qualidade (14), é calculada a resistência R do circuito equivalente por fase, conforme ilustrado na Figura 4(b). A expressão utilizada é a seguinte:

$$Q = \frac{\left(\sqrt{\frac{L}{C}}\right)}{R} \quad (14)$$

É importante ressaltar que o *software* HarmZs requer, para a simulação dos filtros passivos, apenas os parâmetros R, XL e C. Esses parâmetros correspondem, respectivamente, à resistência, à reatância indutiva e à capacitância do filtro. Destaca-se que o valor da capacitância deve ser fornecido em microfarads ( $\mu F$ ), conforme exigência do programa.

### Descrição do Software Utilizado

O HarmZS é utilizado para a análise modal de redes elétricas. Esse tipo de análise tem como objetivo estudar o comportamento dinâmico do sistema, especialmente em relação às ressonâncias provocadas por harmônicos. Ele realiza cálculos e gera gráficos intuitivos, que podem ser completamente personalizados de acordo com as necessidades do usuário [10].

Para isso, o programa conta com uma interface simples de utilizar, além de ferramentas específicas de cálculo. A criação de um novo projeto se dá por meio da inserção de dados organizados em códigos de execução, popularmente conhecidos como *cartões*, onde cada cartão representa um tipo específico de informação da rede [25].

Esses cartões compõem o arquivo de programação do projeto, que pode ser editado tanto pelo software EditCepel, que é uma ferramenta de edição de códigos otimizada para as linguagens dos programas do CEPEL [25] quanto por editores de texto simples, como o Bloco de Notas do *Windows*. Cada um possui uma formatação específica, conforme o tipo de dado inserido. A Tabela 1 apresenta os nomes, os conjuntos de dados correspondentes e uma breve descrição de sua função.

Tabela 1: Códigos de execução do HarmZs [25].

Código	Descrição simples
DGERAIS	Dados gerais do caso: frequência, potência base, unidades, interface e método.
DBAR	Dados das barras: número, nome, tensão, ângulo, base e área.
DGBT	Grupos base de tensão: associa o número do grupo à tensão em kV.

DARE	Dados das áreas do sistema: nomes das áreas.
DMAQ	Dados das máquinas (fontes de tensão): resistência, reatância, potência e estado.
DLIN	Dados das linhas de transmissão/cabos: resistência, reatância, capacitância, comprimento, circuitos $\pi$ e estado.
DTR2	Dados dos transformadores de 2 enrolamentos: taps, resistência, reatância, potência e estado.
DTR3	Dados dos transformadores de 3 enrolamentos: resistências, reatâncias, taps, potência e estado.
DEQP	Dados dos equipamentos modelados por RLC: barras de conexão e parâmetros RLC.
DCRG	Dados das cargas: potência ativa, reativa, estado e identificador opcional.
DMOT	Dados dos grupos de motores.
DSRC	Dados das fontes harmônicas: tipo corrente ou tensão, frequência, módulo e ângulo.
DCOF	Dados das correntes fundamentais da rede: corrente nominal por tipo.
DLTF	Dados das linhas com correção por frequência: parâmetros geométricos e correção.
DRAM	Dados dos ramais de carga: modelagem como subsistemas com linhas e transformadores.

É importante destacar que, no código DGERAIS, é possível configurar tanto a forma de inserção dos dados na interface gráfica quanto a sua representação no arquivo de entrada. O usuário pode optar por fornecer os dados em valores pu (por unidade), ou em unidades elétricas convencionais, de acordo com a forma como as informações foram disponibilizadas, a fim de evitar inconsistências de interpretação ou cálculo. Caso haja divergência entre os formatos utilizados nas interfaces gráfica e textual, o HarmZs realiza automaticamente a conversão entre unidades, tendo como referência a potência base e as tensões base definidas para cada barra do sistema.

Além disso, o HarmZs permite a importação de sistemas previamente modelados em outros softwares do CEPEL, como o ANAREDE, convertendo-os automaticamente para o formato .hzs. Esse recurso oferece uma alternativa para a construção de arquivos a partir de dados já estruturados. Para isso, utiliza-se a opção "Abrir SaveCase", na qual o usuário seleciona o caso desejado. Ao exibir a mensagem "Rede Montada", o programa permite que o sistema seja salvo diretamente no formato compatível.

Com o sistema devidamente carregado, é possível realizar as análises de distorção harmônica e resposta em frequência por meio da aba "Cálculos". Na análise de distorções, o HarmZs exibe o espectro harmônico das barras selecionadas. Já na análise de resposta em frequência, apresenta a variação das impedâncias em função da frequência. Para isso, o usuário

deve selecionar as barras e componentes a serem avaliados, definir o intervalo e o passo da varredura, e acionar a função Cálculo, sendo os resultados apresentados diretamente na interface gráfica.

O programa também inclui a ferramenta avançada Batch, que automatiza cálculos e análises, sendo útil principalmente para sistemas grandes, como o Sistema Interligado Nacional (SIN), mas também aplicável a sistemas menores. Essa função gera um arquivo com o lugar geométrico das impedâncias, importante para aplicações que exigem essa simplificação, conforme mostrado na Figura 6.

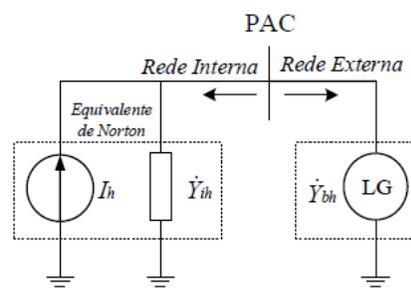


Figura 6 Representação Simplificada do Sistema Elétrico pelo Lugar Geométrico das Impedâncias[27]

Onde:  $I_h$  é a fonte de corrente harmônica equivalente de Norton, de ordem  $h$ , associada à rede interna;  $Y_{ih}$  é a admitância harmônica equivalente de ordem  $h$  da rede interna, que representa a fonte de harmônicas; e  $Y_{bh}$  é a admitância harmônica equivalente de ordem  $h$  da Rede Básica.

Para usar essa função, deve-se ir ao menu Ferramentas Avançadas > Batch, selecionar a barra PAC, que liga a fonte a rede externa, e criar um novo arquivo .mbt, que conterá uma sequência de comandos organizados por tipos de códigos. Cada código representa uma instrução específica que o programa executará automaticamente, como cálculos de espectro, resposta em frequência ou geração de gráficos em sequência.

### III. MATERIAIS E MÉTODOS

#### Modelagem e Simulação do Sistema

Para a realização deste estudo, foi utilizado, de forma predominante, o software HarmZs, por meio de licença educacional. Complementarmente, foram empregados os programas EditCepel e Bloco de Notas do Windows para edição dos arquivos de entrada, além de arquivos previamente modelados no software ANAREDE, que serviram como base para a extração do sistema elétrico analisado. Adicionalmente, utilizou-se o MATLAB como ferramenta auxiliar para automatizar os cálculos relacionados ao dimensionamento dos filtros passivos, agilizando o processo de obtenção dos parâmetros elétricos.

Inicialmente, foi realizada a simulação de um sistema de teste contendo uma fonte de harmônicas, mostrado na Figura 7 sem a presença de filtros harmônicos, com o objetivo de observar o comportamento da rede em sua condição original. Em seguida, os filtros, cujos parâmetros foram previamente

calculados, foram inseridos na memória do programa, possibilitando a análise da resposta do sistema com a sua inclusão. Os resultados obtidos foram visualizados por meio de gráficos gerados pelo próprio *software*.

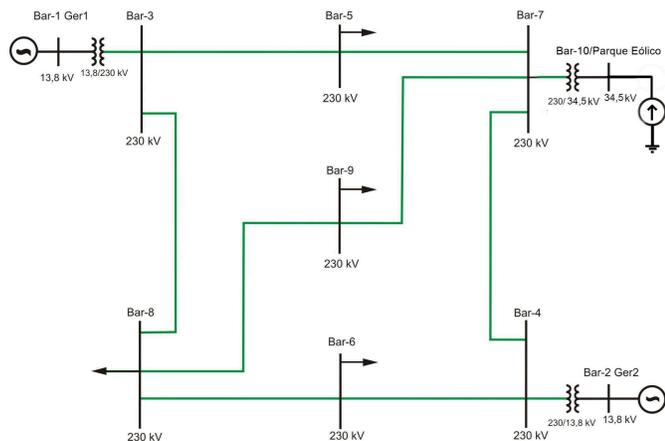


Figura 7 Sistema Elétrico Proposto. Adaptado de [28]

O sistema é composto por 10 barras, 4 cargas conectadas em 230 kV, 3 unidades geradoras, sendo duas modeladas como fontes de tensão e uma como fonte de harmônicas, além de 8 linhas de transmissão, dois transformadores de 100 MVA e um transformador de 250 MVA. Este último está associado a um parque eólico com 100 unidades geradoras, que será integrado à rede elétrica na barra 7.

Posteriormente, foi proposto uma análise adicional, na qual o sistema modelado foi utilizado como base para o dimensionamento de filtros sintonizados em diferentes frequências específicas. Tal procedimento tem por finalidade observar as impedâncias resultantes na resposta em frequência, contribuindo para uma melhor compreensão do comportamento dos filtros ao longo do espectro harmônico.

Diante da dificuldade em obter um modelo real de sistema elétrico, adotou-se um sistema teste desenvolvido por (ALVES, 2007) [27], composto por dez barras, originalmente modelado no ANAREDE e importado para o HarmZs. Foi adicionada uma barra para representar a fonte de harmônicas. A modificação foi realizada utilizando arquivos no formato *.sav*, que contém três cenários de carregamento, sendo selecionado o caso base para as simulações.

A fonte de harmônicas foi modelada como uma fonte de corrente, conectada à barra 10, conforme a exigência do software HarmZs, que utiliza o modelo de equivalente de Norton para representação de fontes harmônicas, como ilustrado na Figura 5. Embora, fisicamente, o complexo eólico estudado por (LIMA, 2019) [27] se comporte como uma fonte de tensão, sua modelagem foi ajustada para fonte de corrente, atendendo à estrutura adotada pelo programa. Os dados utilizados foram obtidos a partir de informações do fabricante, e estão listados na tabela 2:

Tabela 2 – Dados Técnicos da Fonte de Harmônicas [27].

Frequência (hz)	Módulo (pu)	Ângulo (Graus)
-----------------	-------------	----------------

120	0.001822	0
180	0.00092	0
240	0.000683	0
300	0.00098	0
420	0.001286	0
780	9.15e-005	0
1620	6.87e-005	0
1920	6.87e-005	0
2700	6.87e-005	0
2940	9.15e-005	0

### Ajustes e Configuração do Ambiente de Simulação

Os parâmetros de configuração do sistema foram definidos conforme apresentado no código a seguir.

#### DGERAIS

```

FREQUENCIA 60
SBASE 100
DADOS PU
INTERFACE Unidades
METODOLOGIA YS
TITULO Sistema-Teste_de_9_Barras_-_Caso_Base
IDBARRA NUMERO
    
```

A frequência foi fixada em 60 Hz, em conformidade com a frequência padrão adotada no sistema elétrico brasileiro. A potência base (SBase) foi estabelecida em 100 MVA, o que permite a normalização dos parâmetros em por unidade (pu), facilitando a análise e comparação dos resultados. A opção "interface em unidades" indica que, na interface gráfica do software, os dados são inseridos diretamente em valores elétricos convencionais, como ohms, volts e amperes. A metodologia de cálculo adotada, indicada por "YS", corresponde ao método aplicado pelo programa para resolução das equações de rede.

Do arquivo modelado no *software* ANAREDE, foram extraídos os dados das barras, apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 Dados das Tensões nas Barras em pu (Autor).

Núm.	Nome da Barra	Tensão (pu)	Ângulo (graus)	Base	Área
1	BAR-1 GER1	1.030	0.000	1	1
2	BAR-2 GER2	1.035	-0.504	1	1
3	BAR-3	1.029	-5.168	2	1
4	BAR-4	1.027	-6.727	2	1
5	BAR-5 CAR1	1.012	-8.906	2	1
6	BAR-6 CAR2	1.022	-9.008	2	1

7	BAR-7 CAR3	1.007	-10.660	2	1
8	BAR-8 CAR4	1.019	-9.962	2	1
9	BAR-9 CAR5	1.003	-13.079	2	1
10	BAR-10 GER3	1.000	0.000	3	1

No código DGBT, as tensões de base foram designadas da seguinte forma: base 1 corresponde a 13,8 kV, base 2 a 230 kV, e base 3 a 34,5 kV. No sistema modelado no software ANAREDE, considerou-se apenas uma área representando o nível de alta tensão. Contudo, em sistemas mais complexos, a presença de múltiplos níveis de tensão pode demandar a divisão em diferentes áreas, de forma a organizar melhor a representação das diversas regiões do sistema elétrico. Os dados das linhas de transmissão estão listados na Tabela 4

Tabela 4 Dados das linhas de transmissão(Autor)

Barra De	Barra Para	R(pu)	XL(pu)	C(pu)	l(km)
3	5	0.017	0.092	0.158	1
3	8	0.010	0.085	0.176	1
4	7	0.009	0.079	0.162	1
5	7	0.032	0.161	0.306	1
6	4	0.008	0.072	0.149	1
6	8	0.011	0.084	0.256	1
7	9	0.012	0.101	0.209	1
8	9	0.039	0.170	0.358	1

Na Tabela 4, observa-se que o *software* exige que os parâmetros das linhas sejam inseridos em ohm por quilômetro. Porém, nesse caso os dados foram disponibilizados somente com impedância total (Z), sem a indicação dos respectivos comprimentos. Como o programa utiliza o comprimento apenas como fator de normalização, nesse caso em que as distâncias não foram informadas, adotar 1 km não altera os resultados, pois os valores já representam a impedância total da linha. Dessa forma, ainda que os comprimentos reais sejam maiores ou menores que 1 km, essa configuração mantém a coerência dos dados e permite a correta simulação do sistema.

Considerando que os dados disponíveis estão em pu e que o arquivo de simulação também está configurado nesse mesmo sistema de unidades, os valores das harmônicas foram inseridos no código-fonte do arquivo, especificamente no campo correspondente ao cartão DSRC A partir dessas configurações, o arquivo foi salvo com o nome de *STB9BARRAS\_SEMFILTRO.hzs*.

A partir da ferramenta distorções do HarmZs, foi possível visualizar o espectro de tensão na barra 10, que está conectada à carga não linear como mostrado na Figura 7. A Figura 8 apresenta este espectro, que serve de base para a definição da frequência de sintonia do filtro.

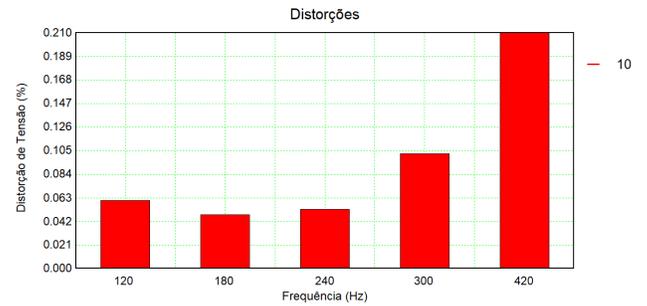


Figura 8 - Distorções de Tensão Na Barra 10(Autor)

Do mesmo modo, foram calculadas as correntes de penetração no secundário do transformador, apresentadas na Figura 9.

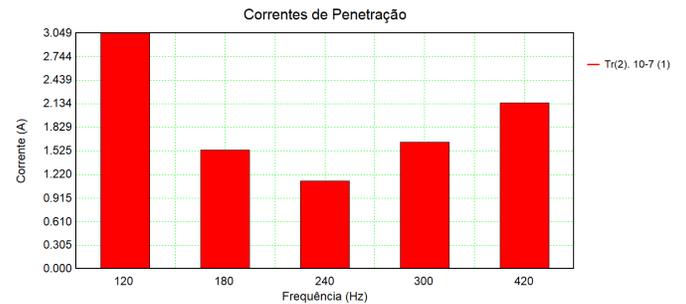


Figura 9 - Correntes de Penetração no secundário do Transformador(Autor)

Nas Figuras 8 e 9, destaca-se a forte contribuição das frequências de 180 Hz e 420 Hz. O perfil das distorções de corrente é semelhante ao que se observa na Tabela 2; no entanto, o mesmo não ocorre com as distorções de tensão, o que pode ter sido causado pela baixa impedância do sistema e pelo alto nível de tensão do transformador. Opta-se pela atenuação da componente de 420 Hz, 7ª ordem, por ser a maior harmônica não múltipla de 3 de maior relevância no espectro.

### Projeto do Filtro Passivo

Para iniciar os cálculos por  $Q_{eff}$ , segue-se a mesma abordagem adotada por (ALVES 2010) na avaliação dos transformadores, considerando a correção do fator de potência de  $fp_0 = 0,85$  para  $fp = 0,95$ . Assim, utilizando a potência aparente do transformador,  $S = 250$  MVA, e aplicando os valores na equação (3), obtém-se o valor da potência reativa de compensação  $Q_{eff}$ , como mostrado na Tabela 5

Tabela 5 – Parâmetros utilizados no dimensionamento do filtro passivo(Autor)

Parâmetro	Valor
$Q_{eff}$ (MVAR)	61.8
$f_r$ (Hz)	420
$h_r$	7
$V_{ff}$ (kV)	34.5

$Q$	55
-----	----

Para o dimensionamento dos parâmetros do filtro, foram aplicadas as equações de 5 a 14, no cálculo da resistência, um fator de qualidade igual a 55, valor médio entre os limites geralmente adotados [24]. Os parâmetros da modelagem do sistema, organizados na Tabela 5, servem de base para a substituição nas equações e para a obtenção das características elétricas do filtro. Com a aplicação desses dados nas expressões, obtêm-se os parâmetros necessários para sua implementação e simulação, apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 Parâmetros do Filtro sintonizado em 420 Hz

<b>R(<math>\Omega</math>)</b>	0.051026
<b>XL(<math>\Omega</math>)</b>	0.401
<b>C(<math>\mu</math>F)</b>	135.03

Após o cálculo, os parâmetros do filtro são inseridos no campo DEQP do arquivo de simulação e o arquivo salvo. Esse procedimento se aplica a qualquer filtro projetado, independentemente da frequência de sintonização ou topologia. A partir disso, é possível avaliar as distorções harmônicas e a resposta em frequência do sistema com o filtro implementado.

#### Análise Proposta: Comparação de Filtros

Como alternativa de validação, propõe-se uma análise baseada na resposta em frequência, no qual os valores de frequência e ordem harmônica são modificados diretamente nas equações, gerando diferentes configurações. As respostas obtidas são sobrepostas em um mesmo gráfico, permitindo uma comparação direta entre os resultados.

Para agilizar o processo, foi utilizado um script no *software* MATLAB, com as equações previamente implementadas. O código retornou os parâmetros no formato compatível com o arquivo de entrada do HarmZs. Com isso, bastou substituir os valores no campo DEQP, e executar as simulações. Os resultados para filtros sintonizados entre 150 e 1300 Hz estão listados na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores dos parâmetros R, L e C do filtro para diferentes frequências no mesmo sistema. (Autor)

fr (Hz)	R ( $\Omega$ )	xL ( $\Omega$ )	C ( $\mu$ F)
150	0.16662	3.666	2417.70
300	0.07289	0.802	2763.10
420	0.05103	0.401	135.03
540	0.03936	0.241	136.14
600	0.03534	0.194	136.46
720	0.02936	0.135	136.88
840	0.02512	0.099	137.14

950	0.02219	0.077	137.29
1200	0.01754	0.048	137.49
1300	0.01618	0.041	137.55

Para realizar essa análise, o arquivo original *STB9BARRAS\_SEMFILTRO.hzs* foi carregado. No menu Editar > Dados da Rede > Equipamentos, foram inseridos os parâmetros do primeiro filtro de 150 Hz, conforme apresentado na Tabela 7. Em seguida, foi traçada a resposta em frequência no menu de gráficos, utilizando a opção “Mesmo Traçado”, que permite sobrepor as curvas no mesmo gráfico para comparação.

Em seguida, no menu Editar > Dados da Rede, o filtro de 150 Hz foi substituído pelo filtro de 300 Hz, e novamente foi plotada a resposta no mesmo traçado. Esse procedimento foi repetido sucessivamente, substituindo o filtro por outros valores de frequência e plotando cada resposta no mesmo traçado, até obter o comparativo final.

#### IV. RESULTADOS

Após a finalização do levantamento de todas as cargas, linhas de transmissão, transformadores e unidades geradoras, procedeu-se à análise das distorções harmônicas. Inicialmente, na opção “Distorções” do *software* HarmZs, selecionou-se o tipo de elemento “Barra” e indicou-se o número 10, a fim de calcular as distorções de tensão nesse ponto. Para o cálculo das correntes de penetração, foi selecionado o tipo de elemento “Transformador (2)”, indicando o transformador “10 - 7 (1)”, que interliga as barras 10 e 7, e selecionado o terminal número 1, que corresponde ao seu lado secundário. A partir dessas configurações, as distorções de corrente foram calculadas. Este procedimento foi repetido para todos os cenários analisados.

Com a barra 10 selecionada para a análise, a resposta em frequência apresentada na Figura 10 revela um perfil de impedância crescente conforme a frequência aumenta. Isso indica que, sem a presença do filtro, as impedâncias são menores em frequências baixas, dificultando o desvio das harmônicas para o aterramento e reduzindo a eficácia da filtragem.

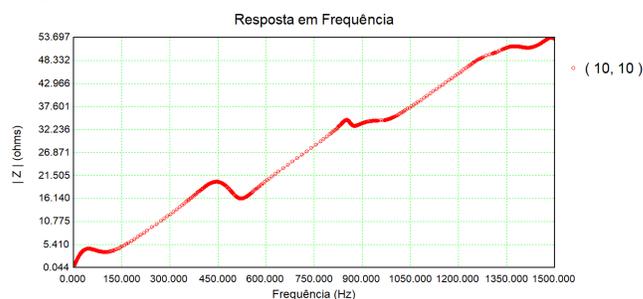


Figura 10 – Variação da impedância em função da frequência na barra 10, sem a aplicação do filtro. (Autor)

Nas Figuras 11 e 12, são exibidos comparativos das distorções de tensão na barra 10 com e sem o filtro. É

perceptível que a componente harmônica de 420 Hz foi significativamente atenuada, enquanto houve aumento nas componentes de 120 e 180 Hz, correspondentes a 2ª e 3ª ordem, conforme padrão apresentado na Figura 13.

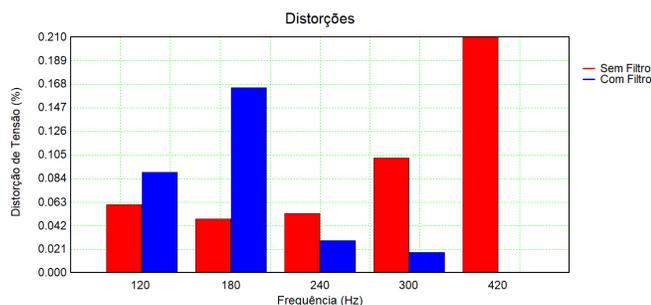


Figura 11- Distorções de Tensão Na Barra 10(Autor)

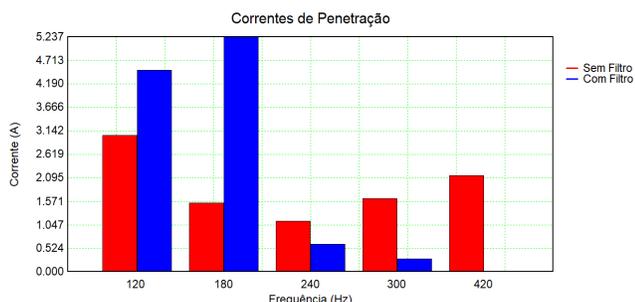


Figura 12- Correntes de Penetração no Secundário do Transformador(Autor)

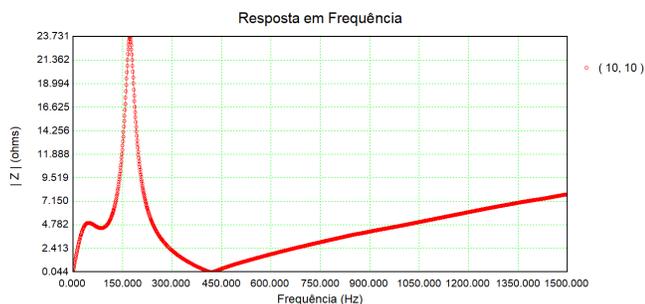


Figura 13- Variação da impedância em função da frequência na barra 10 com a aplicação do filtro (Autor)

O aumento das harmônicas de 3ª ordem não compromete a qualidade do sistema, pois, em sistemas equilibrados com transformadores de conexão delta-estrela, as correntes tendem a circular internamente no enrolamento delta, sem atingir o lado da carga. Por isso, seu impacto é mínimo e a prioridade pode ser dada à mitigação da 7ª ordem (420 Hz).

A Figura 14 apresenta uma comparação entre filtros sintonizados em diferentes frequências, revelando comportamentos semelhantes. Observa-se um pico de impedância em torno de 180 Hz e vales nas respectivas frequências de sintonia, seguidos por uma leve tendência de aumento. Isso mostra que, mesmo com ajustes nos parâmetros RLC, os filtros mantêm desempenhos semelhantes de forma visual, adaptando-se ao sistema sem alterar seu perfil de resposta. Nota-se também que, quanto menor a frequência de

sintonia, há um crescimento mais acentuado da impedância em harmônicas de ordem superior, o que pode impactar na filtragem dessas componentes caso estejam presentes no espectro.

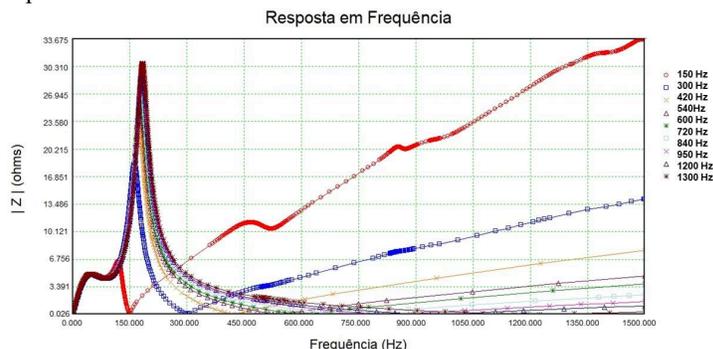


Figura 14 Comparação das respostas de filtros passivos sintonizados em diferentes ordens harmônicas, conectados à barra 10 (Autor)

Este cenário considera uma situação idealizada, pois na prática as distorções harmônicas já presentes no sistema, originadas por outras fontes, podem influenciar com a inserção do parque eólico [27]. Além disso, o envelhecimento dos componentes altera suas características de impedância, consequentemente a frequência de ressonância do filtro ao longo do tempo. Por isso, o filtro deve ser ajustado para uma frequência ligeiramente inferior à frequência de sintonia desejada, garantindo a eficácia da atenuação mesmo com essas variações e evitando a amplificação das harmônicas caso a frequência ressoe em valores maiores [22].

## V. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo validar, por meio de simulações no software HarmZs, os cálculos dos parâmetros de filtros passivos sintonizados em frequências específicas. A partir da aplicação das equações teóricas no dimensionamento dos elementos RLC e da análise da resposta em frequência diretamente na interface do programa, foi possível comprovar a efetividade da metodologia adotada. Mesmo considerando diferentes frequências de sintonização, observou-se que os perfis de resposta mantêm comportamento consistente, desde que as relações matemáticas sejam corretamente aplicadas.

A análise gráfica fornecida pelo HarmZs mostrou-se eficaz para avaliar os efeitos da sintonia na impedância do sistema, possibilitando uma interpretação clara do desempenho dos filtros em diversas condições. Por contar com uma interface simples, o programa também apresenta grande utilidade para fins de aprendizado acadêmico. A simulação computacional, portanto, atua como um complemento importante aos cálculos analíticos no desenvolvimento de soluções para o controle das distorções harmônicas. Também mostrou, que é necessário considerar o perfil de resposta em frequência da barra com o filtro antes de aplicá-lo, para evitar a elevação de outras componentes, bem como a existência de distorções vindas de outras fontes.

Como proposta para trabalhos futuros, recomenda-se aprofundar os estudos sobre a aplicação de filtros passivos

sintonizados em sistemas elétricos mais complexos, com topologias diversificadas e múltiplos pontos de distorção harmônica, bem como o projeto e análise de filtros passivos amortecidos. Além disso, destaca-se o potencial da ferramenta avançada Batch do HarmZs para automatizar a execução de análises em larga escala, incluindo a avaliação de gráficos de lugar geométrico das impedâncias, em cenários com maior número de fontes e linhas, permitindo simular situações reais como desligamentos parciais ou falhas no sistema.

#### REFERÊNCIAS

- [1] 1. ARRUDA, Elcio Franklin de. Análise de distúrbios relacionados com a qualidade da energia elétrica utilizando a transformada Wavelet. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2003.
- [2] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 956, de 7 de dezembro de 2021. Anexo VIII – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica. Brasília, DF: ANEEL, 2021. Disponível em: [https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956\\_2\\_7.pdf](https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_2_7.pdf). Acesso em: 04/07/2025.
- [3] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). Resolução Normativa ANEEL nº 903, de 8 de dezembro de 2020. Aprova a reestruturação e a revisão dos Procedimentos de Rede e estabelece procedimentos e critérios para alterações. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2020903.pdf>. Acesso em: 04/07/2025.
- [4] MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P. Power Electronics: Converters, Applications, and Design. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 2003.
- [5] DAOUDA, Abdourahimoun. Impact of Harmonics on the Electrical Network Distribution. In: RAWA, Muhyaddin; ALI, Ziad M.; ABDEL ALEEM, Shady H. E. (Ed.). Power Quality and Harmonics Management in Modern Power Systems. [S. l.]: IntechOpen, 2024. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/1155841>. Acesso em: 12/06/2025. DOI: 10.5772/intechopen.1003772
- [6] TAGHVAIE, A. et al. A comprehensive review of harmonic issues and estimation techniques in power system networks based on traditional and artificial intelligence/machine learning. IEEE, s.d. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/12345678>. Acesso em: 12/06/2025.
- [7] ISUNSTEEL. Quality-37863846-15t-hot-rolled-coil-electric-arc-furnace-steelmaking-production. Disponível em: <https://portuguese.isunsteel.com/quality-37863846-15t-hot-rolled-coil-electric-arc-furnace-steelmaking-production>. Acesso em: 12/06/2025.
- [8] KUMAR, S. J.; SANGEETHA, P.; MANOGNA, E. Reduction of Harmonics in On-Board Battery Chargers of Electric Vehicles with Flexible Voltage Using ANN. Journal of Electrical Systems, v. 20, n. 10s, p. 5438–5449, jul. 2024.
- [9] INGLE, Nikita. Triplen Harmonics in Electrical Distribution Systems. International Journal of Engineering and Advanced Technology, v. 5, n. 2, dez. 2015. Disponível em: <https://www.ijeat.org/portfolio-item/B4372125215/>. Acesso em: 12/06/2025.
- [10] YACAMINI, R.; CHANG, S. C. Noise and vibration from induction machines fed from harmonic sources. IEEE Transactions on Energy Conversion, v. 10, n. 2, jun. 1995.
- [11] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Std 1159-2019 – IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. New York: IEEE, 2019.
- [12] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Produtos. Disponível em: <https://www.cepel.br/produtos/>. Acesso em: 12/06/2024.
- [13] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Relatório anual 2021/2022. Disponível em: <https://relatorioanual2022.cepel.br/pt/index.html>. Acesso em: 12/06/2025.
- [14] ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R.; CHEN, S. Power system quality assessment. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 15, n. 1, p. 254–260, 2000.
- [15] BOLLEN, M. H. J. Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. New York: Standard Publishers Distributors, 2001. p. 145–162.
- [16] INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Std 519-1992 – Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. IEEE, 1992. Atualizado em 2014.
- [17] HarmZs CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Produtos. Disponível em: <https://www.cepel.br/produtos/harmzs>. Acesso em: 12/06/2025.
- [18] 10. OPPENHEIM, Alan V.; WILLSKY, Alan S.; NAWAB, Syed H. Signals and Systems. 2. ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall Signal Processing Series, 1996. ISBN 0-13-814757-4
- [19] FOURIER TRANSFORM. Imagem adaptada de: <https://image.slideserve.com/929168/fourier-transform12-l.jpg>. Acesso em: 12/06/2025.
- [20] SALAM, Z.; CHENG, T. P.; JUSOH, A. Review of active power filter technologies. Universiti Teknologi Malaysia, s.d.
- [21] EFE, S. B. Analysis and elimination of harmonics by using passive filters. Research Article, dez. 2015.
- [22] PORTELA, K. T.; ROSA, J. Estudo dos efeitos dos harmônicos gerados por residências na rede de distribuição secundária. 2016. 93 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.
- [23] ALVES, A. C. B. et al. Dimensionamento e especificação de filtro sintonizado para instalação na rede secundária. In: Congresso Brasileiro de Automática – CBA, 18., 2010.
- [24] PIRES, Igor Amariz. Caracterização de harmônicos causados por equipamentos eletro-eletrônicos residenciais e comerciais no sistema de distribuição de energia elétrica. Belo Horizonte, 2006. Monografia.
- [25] CEPEL - CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELÉTRICA. Manual de Utilização do Programa HarmZs: versão 3.0. Rio de Janeiro: CEPEL, 2016. 120 p.
- [26] CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. EditCepel. Disponível em: <https://cepel.br/produtos/editcepel/>. Acesso em: 12/06/2025.
- [27] LIMA, Michelly da Silva. Uma análise crítica das distorções harmônicas de correntes associadas a aerogeradores DFIG. Uberlândia, 2019. Monografia.
- [28] ALVES, Waschington Fernandes. Proposição de sistemas-teste para análise computacional de sistemas de potência. Dissertação (Mestrado em Computação em Potência) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2007.