

AVALIAÇÃO DA DISTORÇÃO HARMÔNICA EM SISTEMAS DE GERAÇÃO INDUSTRIAL UTILIZANDO MATLAB/SIMULINK

Gustavo Lima Marques

Instituto Federal São Paulo (IFSP), Cubatão, São Paulo, Brasil

Gustavo Ramos Magnabosco

Instituto Federal São Paulo (IFSP), Cubatão, São Paulo, Brasil

João Victor Alves Ferreira

Instituto Federal São Paulo (IFSP), Cubatão, São Paulo, Brasil

José Augusto Cevidanes Pedro

Instituto Federal São Paulo (IFSP), Cubatão, São Paulo, Brasil

Me. Ulisses Galvão Romão

Instituto Federal São Paulo (IFSP), Cubatão, São Paulo, Brasil

D.O.I.:

Resumo: A modernização industrial, caracterizada pelo uso extensivo de conversores estáticos e inversores de frequência, introduziu desafios significativos para a qualidade da energia elétrica devido à injeção de correntes não senoidais. Este trabalho avalia os impactos da distorção harmônica em uma usina de geração industrial e propõe uma estratégia de mitigação utilizando modelagem computacional no software MATLAB/Simulink. O sistema foi modelado considerando uma rede de 13,8 kV rebaixada para 380 V, alimentando cargas lineares e não lineares, sendo a fonte poluidora representada por uma ponte retificadora de 6 pulsos. As simulações comprovaram que a operação da carga não linear elevou a Distorção Harmônica Total de Corrente para 9,45%, violando o limite de 8% estabelecido pelo Módulo 8 do PRODIST e expondo os ativos, como transformadores, a riscos de sobreaquecimento prematuro. Para solucionar o problema, projetou-se e alocou-se em paralelo um filtro passivo harmônico do tipo Single-Tuned, sintonizado em 300 Hz para atenuar a componente de 5ª ordem. A análise via Transformada Rápida de Fourier (FFT) demonstrou que a inserção do filtro restaurou o perfil senoidal das formas de onda e reduziu drasticamente o nível de distorção para 0,52%, readequando a planta aos padrões normativos e garantindo a segurança e eficiência do sistema elétrico.

Palavras-chave: Distorção Harmônica. Qualidade de Energia. Filtros Passivos. MATLAB/Simulink. PRODIST.

Abstract: Industrial modernization, characterized by the extensive use of static converters and frequency inverters, has introduced significant challenges to power

quality due to the injection of non-sinusoidal currents. This paper evaluates the impacts of harmonic distortion in an industrial generation plant and proposes a mitigation strategy using computational modeling in MATLAB/Simulink software. The system was modeled considering a 13.8 kV network stepped down to 380 V, supplying linear and non-linear loads, with the polluting source represented by a 6-pulse rectifier bridge. Simulations proved that the operation of the non-linear load raised the Total Harmonic Distortion of current to 9.45%, violating the 8% limit established by PRODIST Module 8 and exposing assets, such as transformers, to risks of premature overheating. To solve the problem, a single-tuned passive harmonic filter was designed and connected in parallel, tuned at 300 Hz to attenuate the 5th order component. The Fast Fourier Transform (FFT) analysis demonstrated that the insertion of the filter restored the sinusoidal profile of the waveforms and drastically reduced the distortion level to 0.52%, readapting the plant to normative standards and ensuring the safety and efficiency of the electrical system.

Keywords: Harmonic Distortion. Power Quality. Passive Filters. MATLAB/Simulink. PRODIST.

INTRODUÇÃO

A modernização dos processos industriais, impulsionada pela busca por eficiência energética e controle preciso de velocidade e torque em motores elétricos, levou à disseminação em larga escala de dispositivos baseados em eletrônica de potência. Equipamentos como inversores de frequência, retificadores e fontes chaveadas, embora fundamentais para a automação contemporânea, são classificados como cargas não lineares, cujo comportamento e injeção de correntes distorcidas na rede costumam ser modelados matematicamente por meio de séries de potência. (GALHARDO; PINHO, 2003).

Este fenômeno resulta na introdução de distorções harmônicas no sistema, que podem ser definidas como componentes de frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental de 60 Hz. A presença dessas harmônicas em sistemas de geração industrial é particularmente crítica, pois pode levar a problemas operacionais severos, destacando-se o superaquecimento de condutores e transformadores provocado pelo aumento das perdas por efeito Joule (BACH; PINTO, 2014). Os

principais impactos técnicos observados em ativos industriais estão sintetizados na Tabela 1.

Tabela 1 – Efeitos da distorção harmônica em ativos industriais

Equipamento Elétrico	Principal Efeito da Harmônica	Consequência Operacional
Motores Elétricos	Torques pulsantes e correntes de sequência negativa	Superaquecimento e vibração mecânica
Transformadores	Aumento das perdas no ferro e no cobre (efeito Joule)	Redução da vida útil do isolamento
Bancos de Capacitores	Ressonância paralela com a indutância do sistema	Explosão ou queima de fusíveis
CLPs e Sensores	Ruído eletromagnético e erros de leitura	Falhas de lógica e paradas de emergência
Condutores	Redução da seção eficaz (Efeito <i>Skin</i>)	Queda de tensão e risco de incêndio

Fonte: Adaptado de Garcia (2024) e Bach e Pinto (2014).

A severidade desses impactos é uma realidade técnica documentada em diversos setores produtivos, como evidenciado por Bach e Pinto (2014) ao analisarem a degradação da energia em plantas industriais. No contexto do polo de Cubatão, onde a continuidade operacional é vital e muitas plantas utilizam sistemas de geração própria para garantir a confiabilidade energética, a interação entre geradores síncronos e cargas não lineares torna-se um desafio de engenharia complexo. A conformidade com os limites de Distorção Harmônica Total (THD), estabelecidos por órgãos reguladores como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) através do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica) e por normas internacionais como a IEEE 519, é essencial para garantir a qualidade da energia e a

longevidade dos ativos elétricos. Os limites globais de distorção de tensão para diferentes níveis de barramento são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Limites globais de distorção harmônica total de tensão (THDV)

Tensão Nominal do Barramento (kV)	Limite de THDV (%)
$V \leq 1,0$	10,0
$1,0 < V \leq 13,8$	8,0
$13,8 < V \leq 69,0$	6,0
$69,0 < V < 230,0$	5,0
$V \geq 230,0$	2,0

Fonte: Adaptado de ANEEL (2024).

Diante da complexidade de análise desses fenômenos em instalações físicas, o uso de ferramentas de modelagem e simulação computacional torna-se imprescindível para o engenheiro de controle e automação, viabilizando a análise preditiva e a representação fiel do comportamento de sistemas elétricos sob condições distorcidas (GALHARDO; PINHO, 2003). O *software* MATLAB, através da plataforma Simulink e do *toolset Simscape Electrical*, permite a modelagem dinâmica de sistemas de potência, possibilitando a predição de distorções e a validação de estratégias de mitigação, como o uso de filtros passivos, de forma segura e eficiente.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento das distorções harmônicas em um sistema de geração industrial simulado, comparando diferentes cenários de carga e propondo soluções para a manutenção da qualidade da energia elétrica dentro dos parâmetros normativos vigentes.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A. Análise Matemática Via Séries de Fourier

A compreensão das distorções harmônicas baseia-se no Teorema de Fourier, que afirma que qualquer função periódica, por mais complexa que seja sua forma de onda, pode ser representada por uma soma infinita de senoides e cossenos cujas frequências são múltiplos inteiros da frequência fundamental (GARCIA, 2024). No sistema elétrico brasileiro, a frequência fundamental é regulamentada e estabelecida no valor nominal de 60 Hz (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2024). A decomposição de uma forma de onda distorcida $f(t)$ é expressa matematicamente pela Equação 1:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_1 t) + b_n \sin(n\omega_1 t)] \quad (1)$$

Onde a_0 representa o nível médio (componente CC), e os coeficientes a_n e b_n definem a magnitude das harmônicas de ordem n . Em sistemas trifásicos equilibrados, as harmônicas de ordens pares tendem a se anular devido à simetria de meia-onda, tornando as harmônicas ímpares (3ª, 5ª, 7ª, 11ª e 13ª) as principais responsáveis pela degradação da qualidade da energia.

B. Indicadores De Qualidade E Distorção Harmônica Total

O principal indicador utilizado para mensurar a poluição harmônica é a Distorção Harmônica Total (THD - *Total Harmonic Distortion*). A THD quantifica a degradação da forma de onda senoidal, representando a relação percentual entre o valor eficaz (RMS) das componentes harmônicas e o valor eficaz da componente de frequência fundamental (OLIVEIRA, 2019). Para a distorção de tensão (THD_V), o cálculo é definido matematicamente pela Equação 2:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \cdot 100\% \quad (2)$$

Em que V_h corresponde à amplitude eficaz da componente harmônica de ordem h , e V_1 representa a magnitude da componente fundamental de 60 Hz. Complementarmente, para a análise das correntes distorcidas, a norma internacional IEEE 519 introduz o conceito de Distorção de Demanda Total (TDD – *Total Demand*

Distortion), que relaciona as correntes harmônicas com a corrente de demanda máxima da instalação, fornecendo uma perspectiva mais precisa do impacto da carga sobre o sistema de distribuição (OLIVEIRA, 2019). A monitorização e a manutenção desses índices dentro dos limites estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST são fundamentais para mitigar problemas operativos na usina industrial e evitar penalidades tarifárias por parte da concessionária.

C. Modelagem De Conversores E Cargas Não Lineares

As cargas não lineares industriais, como os inversores de frequência e retificadores de 6 pulsos (Ponte de Graetz), constituem as principais fontes de poluição harmônica em sistemas elétricos de potência (GALHARDO; PINHO, 2003). Esses conversores estáticos operam chaveando a corrente da rede de forma intermitente, o que resulta na produção de componentes harmônicas características cujas ordens (h) seguem uma relação matemática dependente do número de pulsos do circuito, expressa pela Equação 3:

$$h = np \pm 1 \quad (3)$$

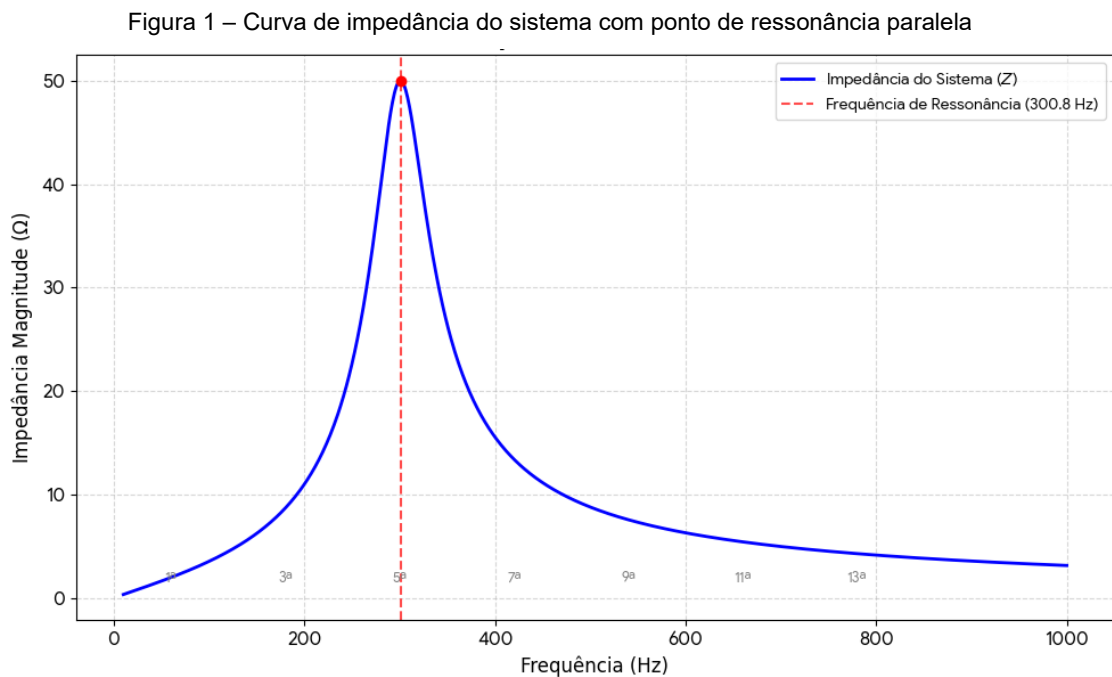
Onde n é um número inteiro e p é o número de pulsos do retificador. No caso de um retificador trifásico convencional de 6 pulsos, as harmônicas de menor ordem e maior amplitude introduzidas no sistema são as de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordens (GALHARDO; PINHO, 2003). Tais componentes circulantes interagem diretamente com a impedância equivalente da rede de distribuição, convertendo a distorção de corrente em quedas de tensão harmônicas que degradam a qualidade da energia em todos os barramentos adjacentes da instalação.

D. Fenômenos De Ressonância E Impacto Nos Ativos

A interação entre a indutância (L) de transformadores e geradores com a capacitância (C) de bancos de correção de fator de potência pode resultar em ressonância harmônica paralela. Neste estado, a impedância vista pela fonte de harmônicas torna-se extremamente elevada em uma frequência específica, amplificando as tensões e correntes a níveis perigosos (GARCIA, 2024). A frequência de ressonância (f_{res}) pode ser estimada por meio da Equação 4:

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L.C}} \quad (4)$$

A Figura 1 ilustra o comportamento da impedância em função da frequência, evidenciando o risco de amplificação próximo às harmônicas características.



Fonte: Os Autores (2026).

Além da ressonância, os transformadores sofrem com o aumento das perdas suplementares e por correntes parasitas. Para quantificar a capacidade de um transformador de suportar correntes harmônicas sem exceder sua temperatura de projeto, utiliza-se o Fator K, definido pela norma IEEE C57.110. Conforme apresentado na Tabela 3, o aumento da THD exige o *derating* (redução de carga) imediato do equipamento.

Tabela 3 – Comparativo de perdas em transformadores sob diferentes níveis de distorção harmônica (THD_1)

Nível de Distorção	THD_1(%)	Perdas Por Correntes Parasitas (P_{EC})	Outras Perdas Suplementares (P_{OSL})	Perdas Totais Na Carga (P_{LL})
Carga Linear (Ideal)	0	1,00 p.u.	1,00 p.u.	1,00 p.u.
Distorção Moderada	10	1,12 p.u.	1,05 p.u.	1,08 p.u.
Distorção Elevada	25	1,48 p.u.	1,18 p.u.	1,32 p.u.
Distorção Severa	50	2,85 p.u.	1,62 p.u.	1,94 p.u.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

E. Métodos De Mitigação: Filtros Passivos E Ativos

Para assegurar que a usina industrial opere dentro dos limites regulatórios, aplicam-se técnicas de filtragem. Os filtros passivos de sintonia única consistem em circuitos $L - C$ em série, projetados para apresentar uma impedância nula em uma frequência harmônica específica, desviando a corrente distorcida para o terra (GARCIA, 2024).

Já os filtros ativos utilizam eletrônica de potência de alta velocidade para monitorar a corrente de carga e injetar correntes harmônicas de mesma amplitude, porém com fase oposta (180°), anulando a distorção no ponto de conexão comum (PCC) (ABDEL-RAHMAN et al., 2021). A escolha entre estas tecnologias depende da variabilidade da carga e do custo de implementação. Conforme apontado por Santos et al. (2024), embora os filtros ativos e dinâmicos ofereçam alto desempenho frente a cargas altamente mutáveis, as topologias de filtros passivos em paralelo continuam sendo amplamente aplicadas no setor industrial devido à sua alta confiabilidade e custo reduzido de implementação.

MATERIAL E MÉTODOS

A. Modelo Computacional e Método Numérico

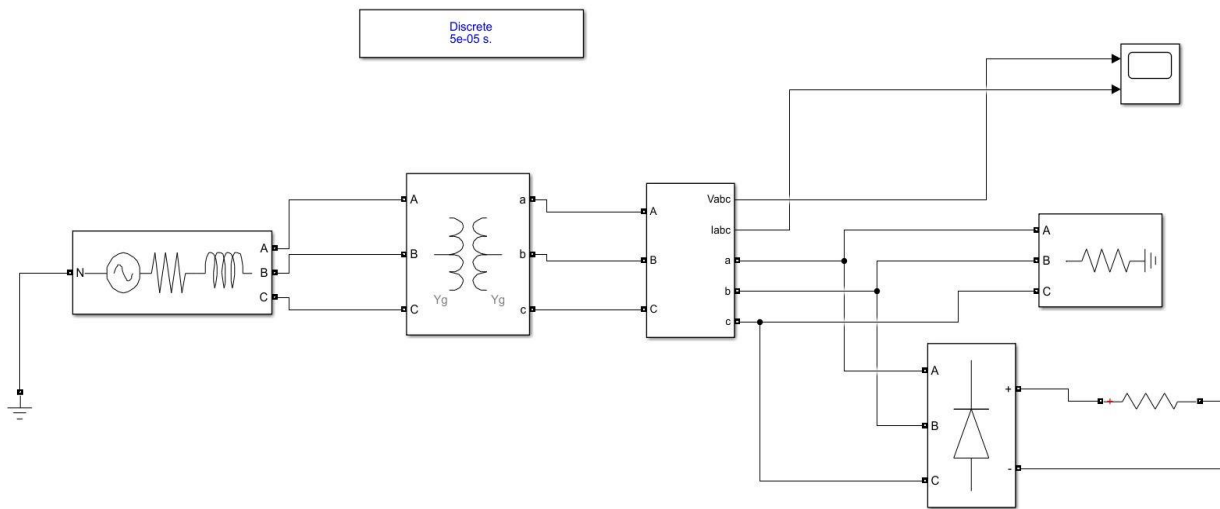
Diante da inviabilidade técnica e dos riscos de segurança associados à inserção deliberada de distúrbios harmônicos em uma planta industrial real para fins de estudo, optou-se pela utilização da modelagem computacional. O sistema foi desenvolvido no ambiente de simulação MATLAB, utilizando as ferramentas da biblioteca *Simscape Electrical / Specialized Power Systems*. Esta plataforma permite a modelagem física de sistemas elétricos de potência, viabilizando a análise dinâmica de circuitos em regime permanente e transitório, sendo amplamente validada na literatura para o diagnóstico de qualidade de energia elétrica.

Para garantir a precisão na captura das componentes harmônicas de alta frequência durante a Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT), o método de integração do modelo foi configurado para operar no domínio discreto. Utilizou-se um passo de simulação (*Sample Time*) de 50 ms. A escolha deste intervalo respeita o Teorema de Nyquist-Shannon, garantindo uma taxa de amostragem suficientemente elevada para reconstruir componentes harmônicas até a 50ª ordem (3.000 Hz) sem a ocorrência de erros de recobrimento (*aliasing*), o que é vital para a precisão do indicador de Distorção Harmônica Total (THD).

B. Sistema de Geração, Rede e Transformação

A arquitetura simulada representa o diagrama unifilar típico de uma usina de geração conectada ao ponto de acoplamento comum (PCC) de uma planta industrial, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2: Diagrama elétrico do sistema original modelado no Simulink.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A fonte primária foi modelada como um barramento infinito (fonte de tensão ideal com impedância interna em série), representando a rede de distribuição da concessionária, operando com tensão de linha de 13,8 kV e frequência fundamental de 60 Hz.

A interface entre a rede de média tensão e os barramentos de distribuição interna da indústria foi realizada por meio de um transformador de potência trifásico de dois enrolamentos. As configurações nominais deste equipamento foram projetadas com uma potência aparente de 1 MVA. Um aspecto crucial desta modelagem é a adoção do grupo vetorial Delta-Estrela aterrado (Dyn11). O enrolamento primário em Delta (triângulo) atua como um confinador físico para correntes de sequência zero (harmônicas triplas: 3ª, 9ª, 15ª), impedindo que essas distorções migrem do barramento industrial para a rede da concessionária. O secundário em Estrela aterrada fornece a tensão de trabalho de 380 V (fase-fase) e estabelece a referência de neutro para a instalação.

Tabela 3 – Parâmetros nominais do sistema elétrico modelado

Componente	Parâmetro	Valor Configurado
Rede de Distribuição	Tensão Nominal (Fase-Fase)	13,8 kV
	Frequência Fundamental	60 Hz
	Nível de Curto-Circuito Trifásico	500 MVA
Transformador (Dyn11)	Potência Nominal	1 MVA
	Tensão no Primário (Delta)	13,8 kV
	Tensão no Secundário (Estrela)	380 V
	Frequência de Operação	60 Hz

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

C. Configuração das Cargas e Projeto de filtragem

No barramento de 380 V, a planta industrial foi dividida em dois blocos de consumo distintos para possibilitar a análise comparativa de degradação da energia:

1. **Carga Linear Base:** Representada por um bloco paralelo resistivo-indutivo (RL), consumindo uma potência ativa de 400 kW. Este bloco simula o comportamento macroscópico de motores de indução com partida direta, iluminação incandescente e sistemas de aquecimento resistivo convencionais, que drenam correntes perfeitamente senoidais.
2. **Carga Não Linear (Geradora de Harmônicas):** Modelada através de uma ponte retificadora trifásica de onda completa (Ponte de Graetz) a diodos, operando com uma carga de 200 kW. Esta topologia de 6 pulsos reproduz com extrema fidelidade a assinatura harmônica de Inversores de Frequência (VFDs)

modernos. Devido ao processo de comutação dos semicondutores, esta carga drena correntes em blocos de 120 graus, resultando em uma forte injeção de correntes de 5ª (300 Hz) e 7ª (420 Hz) ordens no sistema.

Para a etapa de mitigação e adequação aos limites do PRODIST, dimensionou-se um filtro passivo harmônico do tipo *Single-Tuned* (sintonia única). O filtro foi projetado no formato de um ramo RLC série conectado em derivação (paralelo) ao barramento de 380 V. A frequência de sintonia (f_n) foi calculada para oferecer impedância nula exatamente na 5ª harmônica, conforme a Equação 5:

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{L} \times C} \quad (5)$$

Além de drenar a componente distorcida para o terra, o banco capacitivo do filtro foi dimensionado para fornecer potência reativa capacitiva à rede, auxiliando simultaneamente na correção do fator de potência da instalação industrial.

D. Cenários de Simulação e Procedimentos de Análise

Para validar os impactos da distorção harmônica e a eficácia das técnicas de mitigação na usina industrial modelada, a simulação foi estruturada em três cenários de operação distintos e progressivos. A análise de cada cenário baseia-se na extração das formas de onda de tensão e corrente no Ponto de Acoplamento Comum (PCC) e no processamento desses sinais através da Transformada Rápida de Fourier (FFT) no ambiente MATLAB.

1. Operação Ideal com Carga Linear

Este cenário estabelece a "linha de base" (*baseline*) do sistema. A simulação é executada conectando-se apenas o bloco de carga linear paralela (400 kW) ao barramento de 380 V. O objetivo desta etapa é comprovar a estabilidade do modelo do gerador e do transformador sob condições ideais de projeto. Espera-se que, neste regime, a corrente drenada da fonte seja perfeitamente senoidal, resultando em índices de Distorção Harmônica Total de Tensão (*Total Harmonic Distortion of Voltage* - THDV) e de Corrente (THDI) próximos a 0%,

evidenciando a ausência de poluição na rede antes da inserção dos conversores estáticos.

2. Injeção de Harmônicas por Carga Não Linear

Nesta etapa, introduz-se a fonte de distúrbio na planta industrial. A ponte retificadora trifásica de 6 pulsos (200 kW), simulando a operação de múltiplos inversores de frequência simultâneos, é conectada em paralelo à carga linear base. O foco deste cenário é diagnosticar a degradação severa da qualidade da energia. A análise da FFT deverá evidenciar a deformação acentuada da forma de onda da corrente, com o surgimento de picos espectrais significativos nas frequências características da Ponte de Graetz, especificamente na 5ª ordem (300 Hz) e na 7ª ordem (420 Hz). Avalia-se, neste ponto, o quanto a THDV ultrapassa os limites globais de 8% estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST para barramentos de baixa tensão, justificando a necessidade de intervenção de engenharia.

3. Mitigação com Filtro Passivo Sintonizado

O último cenário simula a aplicação da solução corretiva proposta pelo estudo. Mantendo-se a carga linear e a carga não linear ativas e em pleno funcionamento, o filtro passivo do tipo *Single-Tuned*, previamente dimensionado e sintonizado em 300 Hz, é acoplado ao barramento principal. O procedimento de análise consiste em verificar a capacidade do banco RLC em oferecer um caminho de escoamento de baixa impedância para a corrente de 5ª harmônica, desviando-a do transformador e da rede da concessionária. O critério de sucesso deste cenário é a restauração visual da forma de onda senoidal no osciloscópio (*Scope*) do Simulink e a readequação quantitativa da THDV e THDI para valores operacionais seguros e normatizados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

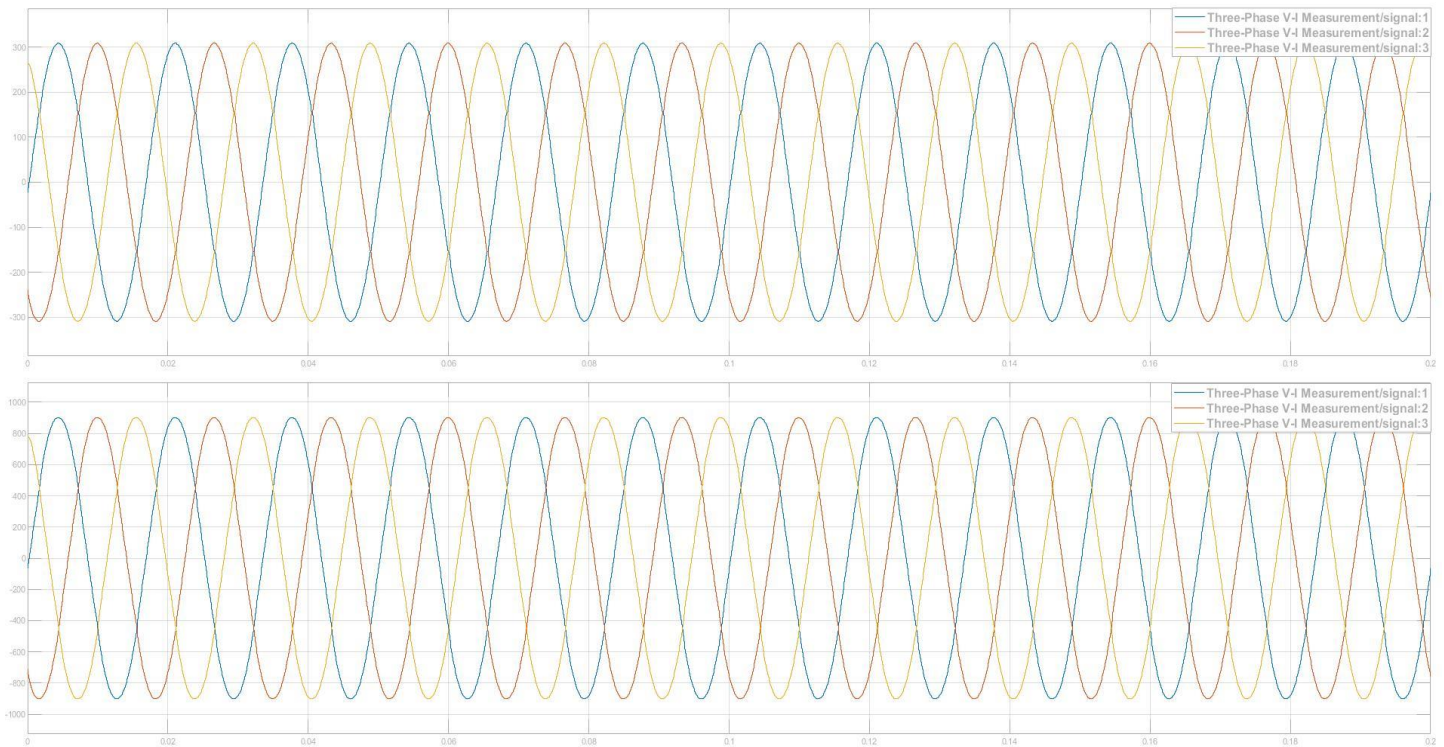
As simulações computacionais foram conduzidas no domínio do tempo com uma duração total de 0,2 segundos, tempo suficiente para que o sistema elétrico ultrapassasse a fase transitória inicial e atingisse o regime permanente, garantindo a

confiabilidade da janela de amostragem para a aplicação da Transformada Rápida de Fourier.

A. ANÁLISE DO CENÁRIO 1: OPERAÇÃO LINEAR IDEAL

No primeiro cenário, correspondente à operação exclusiva da carga linear base de 400 kW, o sistema apresentou o comportamento clássico esperado de uma rede elétrica não poluída. Conforme ilustrado na Figura 3, a análise oscilográfica no barramento de 380 V demonstrou que as formas de onda de tensão e corrente mantiveram um perfil perfeitamente senoidal, sem defasagens anômalas ou achatamentos de pico.

Figura 3 – Oscilograma de tensão e corrente no Ponto de Acoplamento Comum (Cenário A)



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

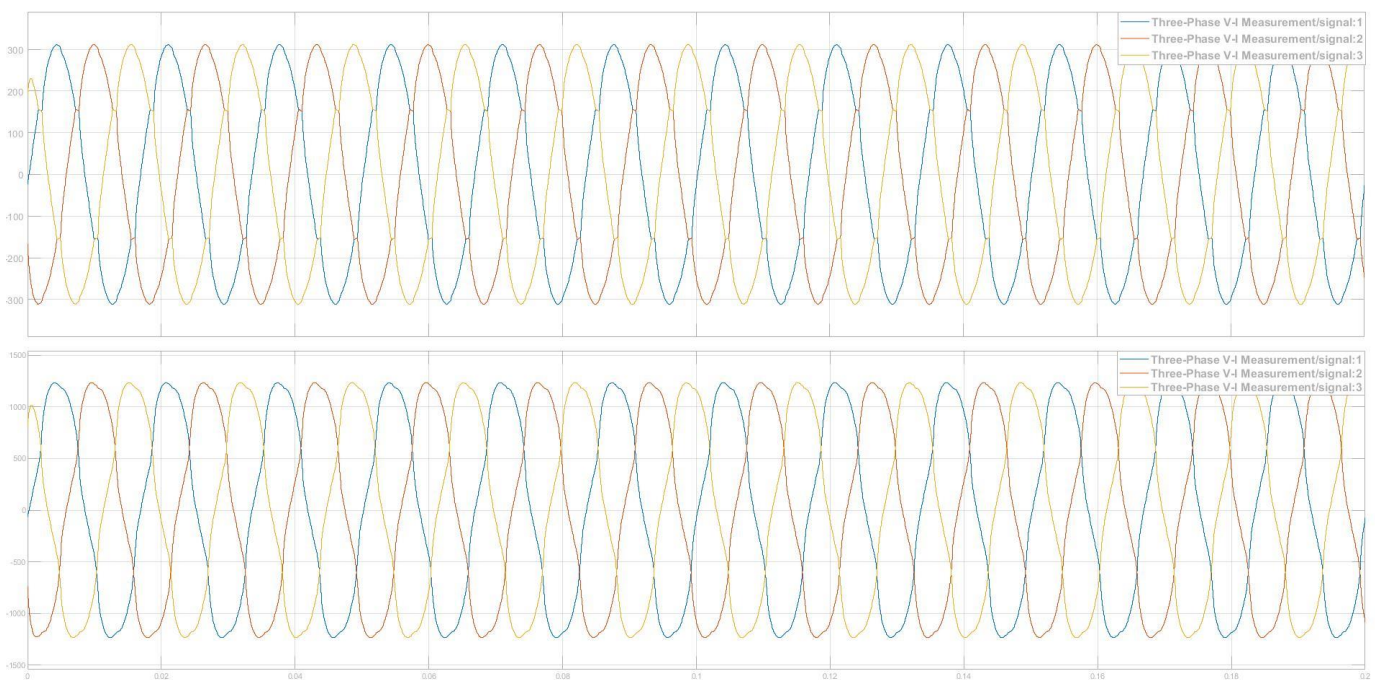
A ferramenta de análise FFT do bloco *Powergui* confirmou a integridade da energia fornecida. O espectro de frequências indicou a predominância absoluta da componente fundamental (60 Hz). Os índices de distorção harmônica registraram valores de 0,00% para a tensão e 0,00% para a corrente. Estes valores virtualmente

nulos estabelecem a linha de base do gerador e comprovam que as impedâncias do cabo e do transformador, por si só, não introduzem não linearidades no sistema.

B. ANÁLISE DO CENÁRIO 2: IMPACTO DA CARGA NÃO LINEAR

A inserção da ponte retificadora de 6 pulsos, operando em paralelo com a carga linear, provocou uma degradação imediata e severa na qualidade da energia da instalação. O oscilograma extraído neste cenário, apresentado na Figura 4, revela a clássica deformação da corrente drenada pela ponte de diodos, assumindo o formato pulsante característico de conversores estáticos, com o achatamento da crista da onda de tensão (flat-top) devido à queda de tensão harmônica nas impedâncias da fonte.

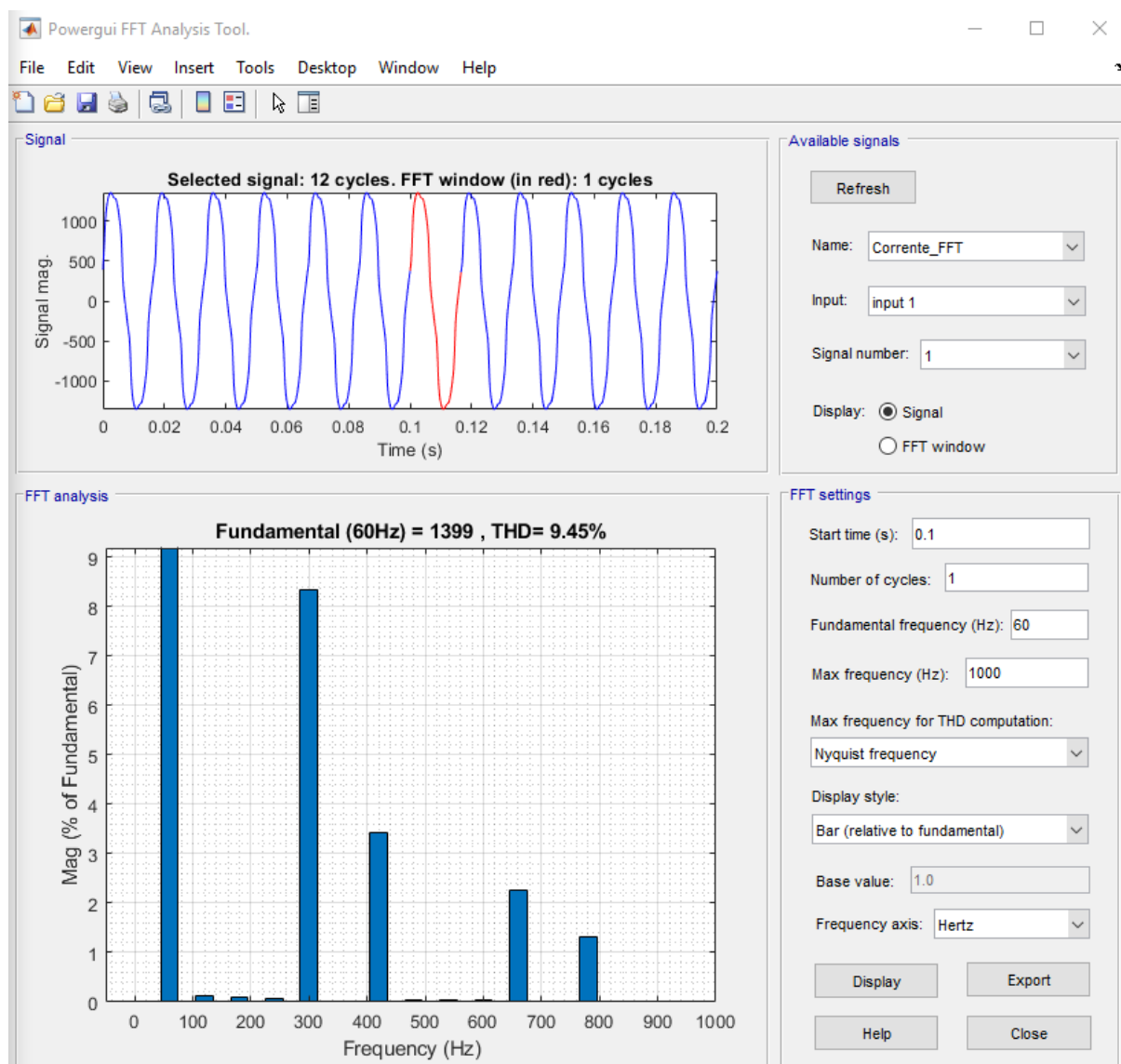
Figura 4 – Forma de onda de corrente distorcida pela Ponte de Graetz (Cenário 2)



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A análise espectral da FFT detalha a composição matemática desta distorção. Conforme previsto pela fundamentação teórica de retificadores hexafásicos, o gráfico de barras na figura 5 evidencia o surgimento de picos de alta magnitude nas frequências características.

Figura 5 – Espectro harmônico (FFT) mostrando a amplitude das componentes no Cenário 2



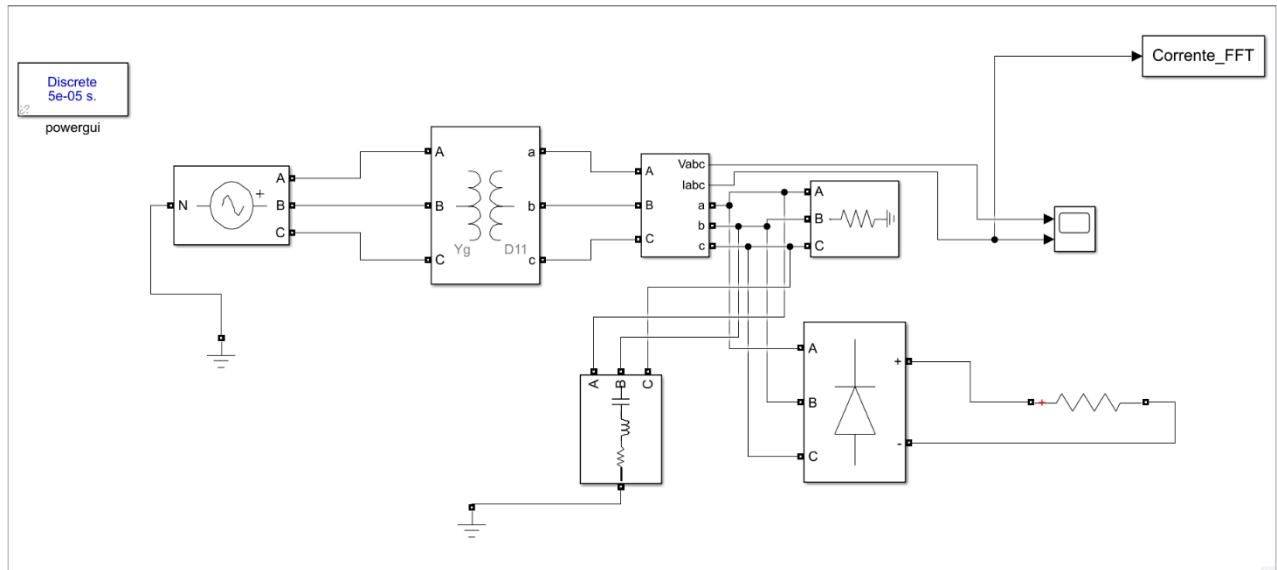
Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A componente de 5ª ordem (300 Hz) atingiu uma magnitude de 8,4% em relação à fundamental, seguida pela componente de 7ª ordem (420 Hz) com 3,4%. O impacto global dessa injeção resultou em uma Distorção Harmônica Total de Corrente (THDI) de 9,45%, valor que ultrapassa substancialmente o limite regulatório de 8% estabelecido pelo PRODIST para barramentos de baixa tensão. Essa condição comprova o risco de sobreaquecimento no transformador e a necessidade iminente de correção.

C. ANÁLISE DO CENÁRIO 3: EFICÁCIA DA MITIGAÇÃO

O cenário final avaliou a resposta dinâmica do sistema após o acoplamento do filtro passivo *Single-Tuned*, sintonizado em 300 Hz. A reestruturação do diagrama elétrico, contemplando a alocação deste filtro em paralelo ao barramento principal, está ilustrada na Figura 6.

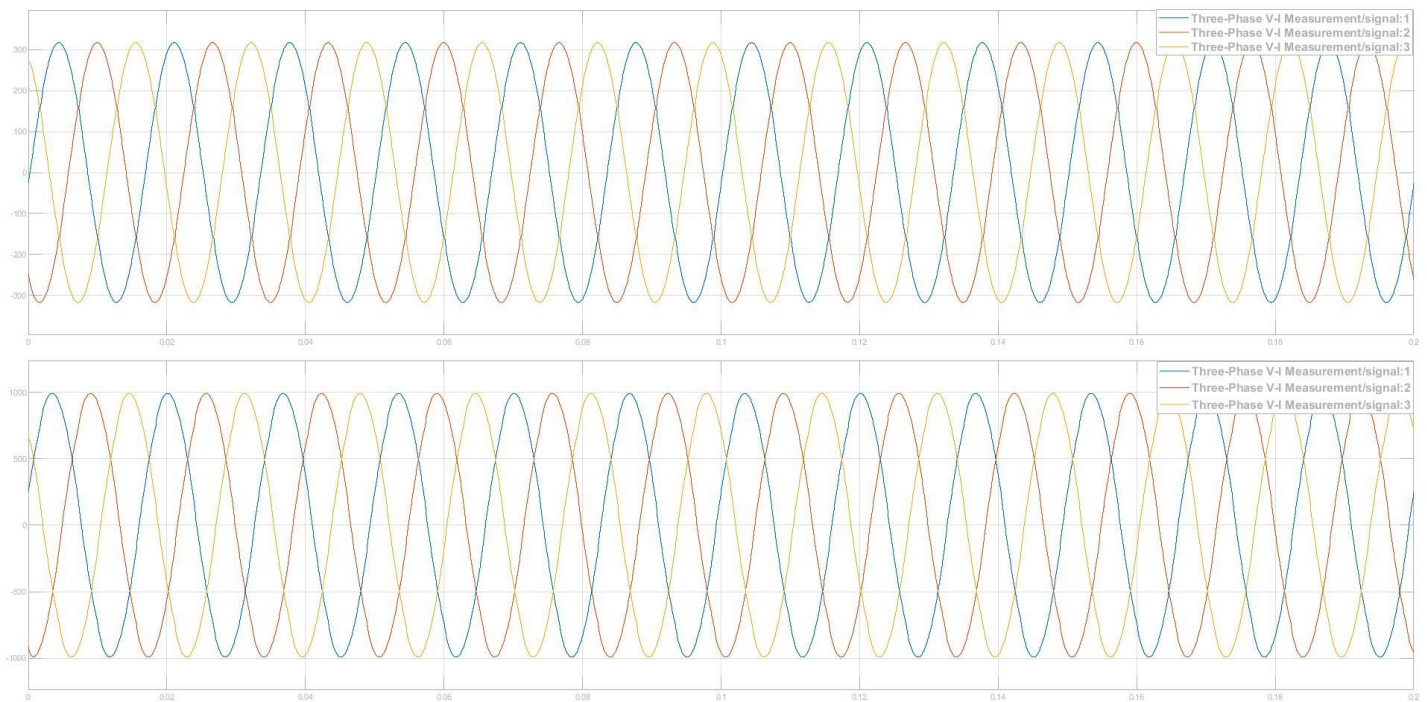
Figura 6: Diagrama elétrico modificado com a inserção do filtro passivo.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

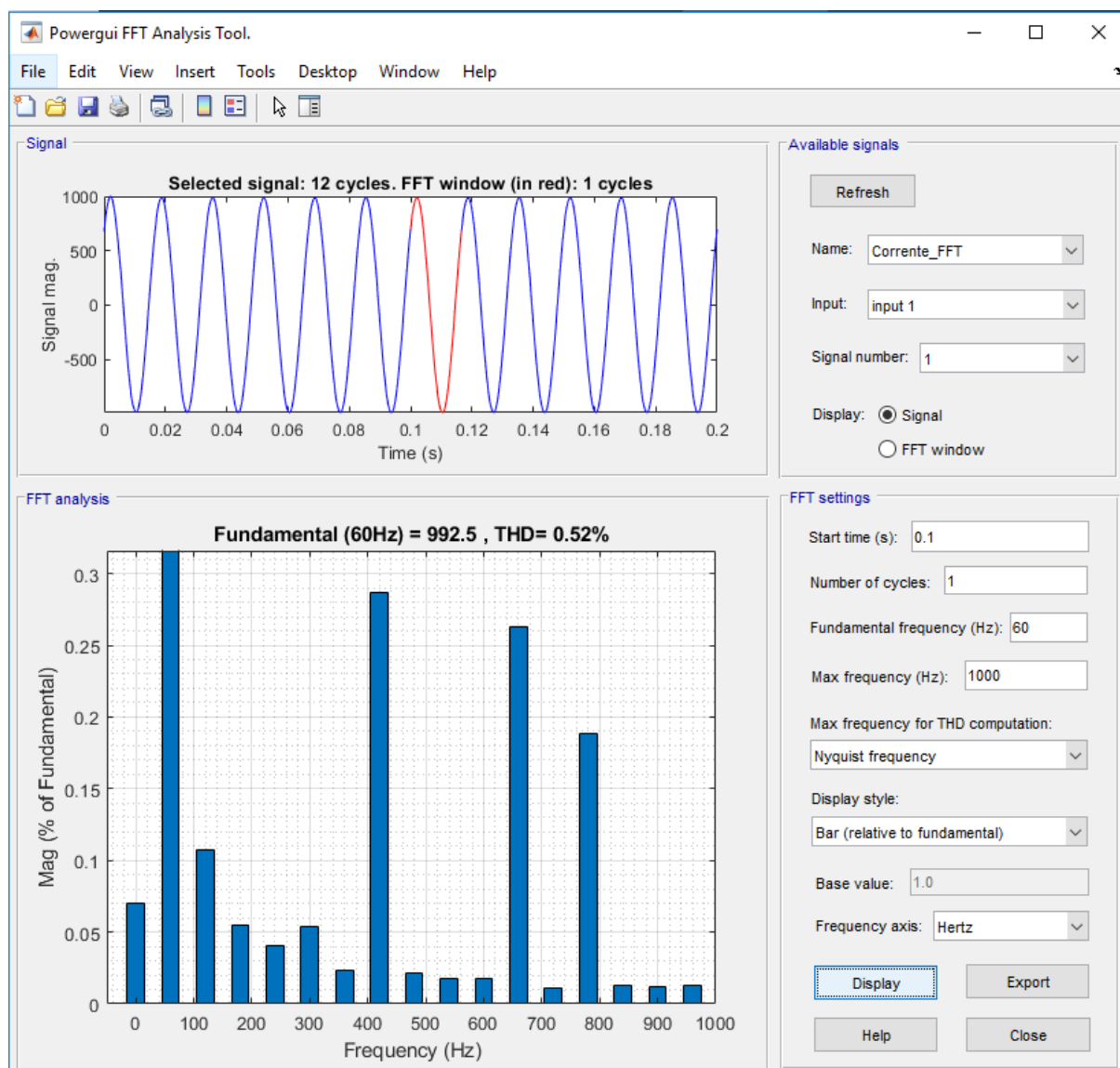
O impacto visual no Ponto de Acoplamento Comum foi imediato, com o ramo RLC em série absorvendo a maior parte das correntes de alta frequência que antes retornavam para a rede. O resultado prático dessa mitigação, evidenciando a restauração do perfil senoidal de tensão e corrente, pode ser visualizado na Figura 7.

Figura 7 – Oscilograma restaurado após a conexão do filtro passivo (Cenário 3)



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Figura 8 – Espectro harmônico (FFT) evidenciando a atenuação após a filtragem



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A análise quantitativa da FFT na Figura 8, comprova o sucesso da estratégia de mitigação. A magnitude da 5ª harmônica foi drasticamente atenuada para 0,05%. Como resultado direto, a Distorção Harmônica Total de Corrente decaiu para 0,52%, readequando a planta industrial aos parâmetros exigidos pelas normas vigentes. Além da filtragem, observou-se uma melhora no deslocamento angular entre tensão e corrente, indicando que o banco de capacitores do filtro também contribuiu para a compensação reativa do sistema.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo atingiu seu objetivo principal ao propor e validar, através de modelagem computacional, uma metodologia eficaz para o diagnóstico e mitigação de distorções harmônicas em usinas de geração industrial. A utilização do ambiente MATLAB/Simulink provou ser uma ferramenta robusta para a engenharia, permitindo a reprodução fiel da dinâmica de um sistema elétrico de potência sem os riscos e custos associados a testes em plantas reais.

A análise do cenário de operação com cargas não lineares (Ponte de Graetz) confirmou a alta severidade da poluição harmônica gerada por conversores estáticos, como os inversores de frequência. A injeção maciça de correntes de 5ª e 7ª ordens resultou em uma severa deformação oscilográfica e elevou a Distorção Harmônica Total (THD) para níveis muito superiores ao limite de 8% exigido pelo PRODIST. Este diagnóstico evidencia o risco iminente de falhas prematuras nos ativos da instalação, especialmente devido ao sobreaquecimento do transformador de distribuição por perdas suplementares.

Diante deste cenário crítico, o projeto e a inserção do filtro passivo harmônico de sintonia única (*Single-Tuned*) demonstraram extrema eficácia. A simulação comprovou que o dimensionamento correto do ramo RLC série em 300 Hz foi capaz de criar um caminho de escoamento de baixa impedância, desviando as correntes poluidoras do Ponto de Acoplamento Comum (PCC). Como resultado, observou-se a restauração imediata da forma de onda senoidal e a readequação dos índices de THD para patamares seguros e regulamentados.

Por fim, conclui-se que a crescente modernização dos parques industriais, impulsionada pela eletrônica de potência, exige que os projetos elétricos contemplem soluções de filtragem desde a sua concepção. O método de análise de frequência (FFT) aliado ao uso de filtros passivos sintonizados configura-se não apenas como uma adequação normativa, mas como uma estratégia fundamental para garantir a eficiência energética, a longevidade dos equipamentos e a segurança operacional das usinas de geração industrial.

REFERÊNCIAS

ABDEL-RAHMAN, A. S. et al. Harmonic Analysis and Mitigation in Industrial Microgrids. *Energies*, Basel, v. 14, n. 13, p. 1-22, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST): Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica. Brasília: ANEEL, 2024.

BACH, J.; PINTO, L. S. Avaliação da distorção harmônica em uma indústria alimentícia. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2014.

GALHARDO, M. A. B.; PINHO, J. T. Modelagem de cargas não-lineares em sistemas elétricos de potência. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA (SBQEE), 5., 2003, Aracaju. Anais... Aracaju: SBQEE, 2003.

GARCIA, M. A. Qualidade da energia elétrica: impactos das harmônicas em sistemas industriais e métodos de mitigação. Ilha Solteira: UNESP, 2024.

IEEE. IEEE Std 519-2022: IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. New York: IEEE, 2022.

OLIVEIRA, T. T. Estudo da distorção harmônica em redes de distribuição de baixa tensão com sistemas fotovoltaicos e veículos elétricos. 2019. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

SANTOS, V. C. M. et al. Desenvolvimento de um filtro dinâmico para aplicação em instalações industriais e comerciais. In: SEMINÁRIO DE EXTENSÃO E INOVAÇÃO & SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA UTFPR, 14. e 29., 2024, Francisco Beltrão. Anais... Francisco Beltrão: Even3, 2024.