REVISTA TÓPICOS
ISSN 2965-6672 | Qualis A2

QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA EM INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS: DIAGNÓSTICO DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS, CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA E ESTRATÉGIAS PARA REDUÇÃO DE PERDAS

POWER QUALITY IN INDUSTRIAL INSTALLATIONS: HARMONIC DISTORTION DIAGNOSIS, POWER FACTOR CORRECTION AND LOSS-REDUCTION STRATEGIES

Engenharias • 07/11/2026

REGISTRO DOI: 10.70773/revistatopicos/793762111

Michel Silva do Carmo[1]

Carla Renata Vitoriano do Carmo[2]

RESUMO

A qualidade da energia elétrica é determinante para a continuidade produtiva, a segurança e a eficiência de instalações industriais com motores, inversores e outras cargas não lineares. Este artigo analisa métodos de diagnóstico de distorções harmônicas, correção do fator de potência e estratégias de redução de perdas, distinguindo medições reais de cálculos ilustrativos. A pesquisa é qualitativa, bibliográfica e analítico-propositiva, com base em oito obras brasileiras publicadas entre 2022 e 2025, além da referência normativa ao Módulo 8 do PRODIST. A análise inclui o estudo de uma indústria de Poá, São Paulo, onde foram identificados níveis expressivos de harmônicas de corrente e fator de potência reduzido, e o relato de uma planta industrial brasileira que registrou melhoria do fator de potência de 0,78 para 0,96 após compensação automática. Desenvolveu-se, adicionalmente, simulação didática trifásica de 300 kW e 380 V, na qual a compensação de aproximadamente 153,2 kvar reduz a corrente estimada de 584 A para 475 A, sob hipóteses idealizadas. Discutem-se riscos de ressonância, limitações de bancos convencionais e necessidade de medições no ponto de acoplamento comum. Como propostas inovadoras, sugerem-se observabilidade contínua da qualidade da energia, compensação reativa coordenada com filtros dessintonizados, diagnóstico por indicadores e manutenção orientada por criticidade. Conclui-se que a mitigação sustentável depende da integração entre medições, modelagem, segurança e validação posterior à intervenção.

Palavras-chave: Qualidade da energia elétrica; Distorção harmônica; Fator de potência; Compensação reativa; Instalações industriais.

ABSTRACT

Power quality directly affects production continuity, safety and

efficiency in industrial facilities using motors, inverters and other nonlinear loads. This paper discusses diagnostic approaches for harmonic distortion, power-factor correction and electrical loss reduction, explicitly distinguishing observed case evidence from illustrative calculations. A qualitative, bibliographic and analytical-propositional review draws on eight Brazilian publications released between 2022 and 2025, supplemented by the Brazilian PRODIST Module 8 regulatory framework. The analysis includes measurements in an industrial facility in Poá, São Paulo, where significant current harmonics and a low power factor were identified, and a Brazilian industrial case reporting an improvement in power factor from 0.78 to 0.96 after automatic reactive compensation. An illustrative three-phase scenario with 300 kW and 380 V is also developed: approximately 153.2 kvar of theoretical compensation lowers estimated line current from 584 A to 475 A under idealized assumptions. Resonance hazards, the limitations of conventional capacitor banks and the importance of measurements at the point of common coupling are addressed. Proposed innovations include continuous power-quality observability, reactive compensation coordinated with detuned filters, indicator-based diagnosis and criticality-based maintenance. The analysis concludes that sustainable mitigation requires coordinated measurement, electrical modeling, safety assessment and post-intervention validation.

Keywords: Power quality; Harmonic distortion; Power factor; Reactive compensation; Industrial electrical installations.

1. INTRODUÇÃO

A confiabilidade de instalações industriais depende da continuidade do fornecimento, mas também da qualidade das formas de onda e

da relação entre energia ativa, reativa e aparente. A ampliação de acionamentos eletrônicos, conversores de frequência, retificadores, soldagem e sistemas automatizados torna os processos mais flexíveis, porém eleva a complexidade da interação entre cargas e a rede interna. Problemas de distorção harmônica, desbalanceamento, flutuações e fator de potência inadequado podem coexistir e agravar aquecimento, indisponibilidades e custos de operação. O tratamento isolado de cada sintoma, sem diagnóstico elétrico, pode produzir correções incompletas ou novos riscos.

A gestão da qualidade da energia elétrica (QEE) precisa considerar que a rede industrial não é apenas receptora passiva de energia. A forma de consumo de cargas não lineares altera a corrente e pode contribuir para distorções nos barramentos internos e no ponto de conexão com a distribuidora. Verissimo (2022), ao estudar uma indústria metalmecânica, identificou baixo fator de potência, distorções harmônicas e demanda contratada sobredimensionada. O caso sugere que o diagnóstico eficaz exige examinar simultaneamente registros elétricos, características de carga e condições de contratação, evitando associar toda despesa energética ao consumo ativo.

O problema se expressa de modo concreto no estudo de Ferreira e Barcelos (2025) sobre uma empresa industrial situada em Poá, São Paulo. Os pesquisadores registraram níveis relevantes de harmônicas de corrente, notadamente componentes de quinta e sétima ordens, além de fator de potência inferior a 0,92. As medidas de mitigação foram sugeridas a partir dos dados; não foram divulgadas medições posteriores capazes de comprovar a eficácia das propostas nessa mesma instalação. A distinção entre

diagnóstico e validação é central para evitar que recomendações sejam apresentadas como ganhos já realizados.

Em direção complementar, Lima Neto e Reis (2025) descrevem a implantação de um banco de capacitores automático em planta industrial brasileira com medições antes e depois, reportando evolução do fator de potência de 0,78 para 0,96. Trata-se de evidência de viabilidade prática sob condições particulares, sem autorizar extrapolação automática de seus percentuais de redução de custos ou consumo a qualquer fábrica. A interpretação técnica requer separar a redução de potência reativa das perdas resistivas e da energia ativa efetivamente medida, porque tais grandezas não respondem da mesma maneira à compensação.

Em indústrias modernas, a mitigação envolve um equilíbrio importante. Bancos de capacitores podem reduzir a circulação de potência reativa indutiva, mas, quando instalados em sistemas com harmônicas, podem deslocar frequências de ressonância e elevar solicitações elétricas. Gonçalves (2024), ao modelar setor industrial no Ceará, identificou harmônicas de quinta, décima primeira, décima terceira e décima sétima ordens, com contribuição expressiva da quinta ordem. Silva, Silva e Pires (2022) analisaram a reorganização de filtros passivos existentes, apontando que corrigir fator de potência e reduzir distorções requer considerar todo o circuito.

Diante disso, formula-se a pergunta de pesquisa: como diagnosticar e mitigar distorções harmônicas e baixo fator de potência em instalações industriais brasileiras de modo tecnicamente seguro, economicamente justificável e verificável por indicadores? O objetivo geral é analisar estratégias de diagnóstico da QEE e propor

um roteiro integrado de mitigação das perdas e dos riscos. Os objetivos específicos incluem discutir indicadores de distorção e potência, comparar evidências nacionais recentes, desenvolver um exercício quantitativo de compensação, avaliar limitações das intervenções e propor medidas inovadoras com possibilidade de adaptação às indústrias brasileiras.

O estudo se justifica pela necessidade de avançar de soluções de engenharia determinadas apenas por ajustes nominais para decisões baseadas em comportamento real da instalação. A qualidade da energia tem dimensão operacional, econômica e de segurança: influencia solicitação de condutores, transformadores, dispositivos de proteção e equipamentos de produção. Em vez de prometer economia genérica com a instalação de bancos de capacitores, defende-se uma abordagem em que cada intervenção seja precedida de medições representativas, modelagem de cenários e comparação dos resultados após a execução.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA OU REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Indicadores de Qualidade da Energia e Fronteiras de Responsabilidade

A QEE reúne fenômenos de duração e natureza diferentes, como distorções de forma de onda, assimetrias entre fases, variações de tensão e desvios de frequência. O Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) fornece critérios brasileiros para avaliação da qualidade do fornecimento. Entretanto, exigências regulatórias de tensão no ponto de entrega não podem ser transpostas automaticamente para todas as barras internas de uma planta. Da mesma forma, a

distorção de corrente deve ser analisada com metodologia e condições de medição apropriadas ao ponto avaliado.

Ferreira e Barcelos (2025) posicionaram a medição no circuito da subestação, próximo ao ponto de acoplamento comum (PAC), com analisador de qualidade de energia. Esse procedimento permite examinar grandezas elétricas sob variações da operação, mas a atribuição causal exige conhecer o perfil das cargas e, quando possível, registros adicionais em alimentadores específicos. Um único indicador médio pode esconder picos associados a partidas, mudanças de turno ou operação simultânea de conversores.

A qualidade do diagnóstico depende também da definição de uma linha de base. Antes de qualquer intervenção convém registrar diagrama unifilar, cargas críticas, tensão nominal, transformadores, características dos inversores, bancos existentes e resultados históricos de manutenção. Verissimo (2022) evidenciou que o dimensionamento da demanda contratada integra a análise energética, embora seja uma questão distinta da distorção harmônica. O levantamento inicial deve, portanto, separar problemas de faturamento, carregamento e forma de onda para que cada um receba medida de correção proporcional.

2.2. Distorções Harmônicas: Fontes, Efeitos e Métricas

As harmônicas são componentes periódicas de frequência múltipla inteira da frequência fundamental. Em redes brasileiras de 60 Hz, a quinta ordem corresponde a 300 Hz e a sétima a 420 Hz. Retificadores, inversores de frequência e fontes chaveadas podem consumir correntes não senoidais, produzindo componentes que circulam conforme as impedâncias do circuito. A presença de

corrente harmônica não equivale necessariamente à ultrapassagem de limite de distorção de tensão, embora possa elevar perdas e temperaturas em cabos, máquinas e transformadores.

A distorção harmônica total de corrente (THD-I) pode ser expressa por $THD\text{-}I = 100 \times \sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + \ldots + I_n^2)}/I_1$, em que I_1 corresponde à corrente eficaz fundamental e I_h às componentes harmônicas de ordem h. Analogamente, THD-V usa tensões eficazes. Essas grandezas são sensíveis à condição de carga: em correntes fundamentais muito pequenas, o THD-I percentual pode crescer sem que a corrente harmônica absoluta seja elevada. Por isso, não se deve confundir THD-I com indicadores de distorção total de demanda, nem inferir conformidade apenas por um valor isolado.

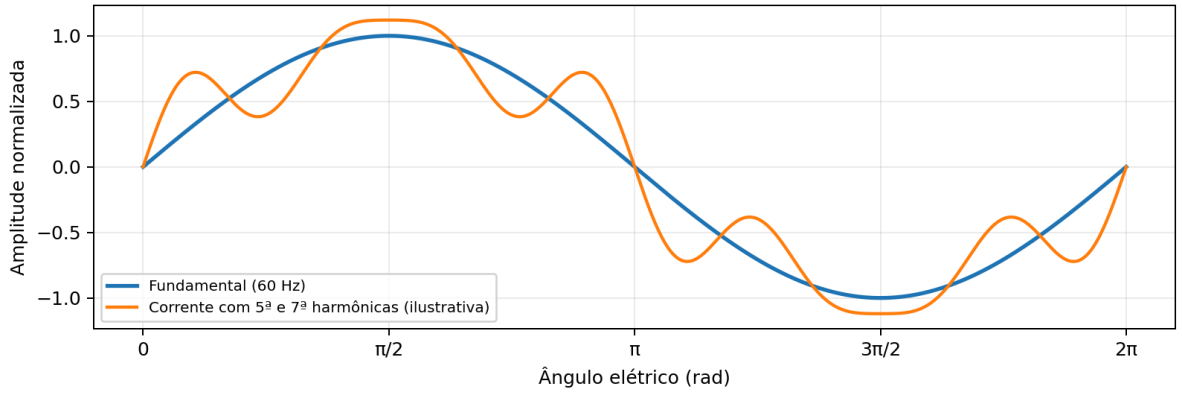
No estudo de Poá, Ferreira e Barcelos (2025) informam média de aproximadamente 1,65% de distorção de tensão e cerca de 18,32% para a corrente, com picos de corrente muito superiores à média. Esses números pertencem ao estudo publicado e não são dados gerados pelos autores deste artigo. Seu significado não se reduz a classificar uma instalação como adequada ou inadequada com base apenas em limites genéricos: a interpretação depende de ponto de medição, corrente de referência, condições da rede e procedimento normativo adotado.

Gonçalves (2024) apresentou uma análise computacional de um complexo industrial no Ceará que relacionou medições preliminares, termografia e modelagem em MATLAB/Simulink. A pesquisa identificou componentes de quinta, décima primeira, décima terceira e décima sétima ordens, atribuindo destaque à quinta ordem. O resultado ilustra uma situação na qual observações de campo e simulação se complementam, principalmente para

investigar possível ressonância. A validade de uma mitigação depende de simular o comportamento sob mais de um regime de carga.

Rocha et al. (2022) analisam qualidade de energia em uma indústria de pneumáticos, demonstrando a importância de estudos situados em sistemas produtivos reais. A diversidade de processos e cargas impede a adoção de uma receita única. Em fábricas com acionamentos variáveis, por exemplo, o número de inversores ativos, seu regime e a impedância do barramento podem alterar significativamente a composição harmônica ao longo de um dia.

Figura 1. Deformação ilustrativa da corrente por harmônicas de 5ª e 7ª ordens



Fonte: elaboração dos autores. Sinais sintéticos apenas para visualização, sem relação com medições de uma instalação específica.

2.3. Fator de Potência: Correção e Limites Físicos da Compensação

O fator de potência verdadeiro expressa a razão entre potência ativa e potência aparente, FP = P/S. Em regime trifásico equilibrado e idealmente senoidal, pode-se relacionar o fator de potência de deslocamento ao ângulo φ por cos φ. Nessa condição simplificada, a potência reativa indutiva é Q = P × tan(arccos FP), sendo P mantida

em kW e Q em kvar. Quando há distorção harmônica, o fator de potência verdadeiro não é necessariamente igual ao cosseno do ângulo de deslocamento da fundamental; essa distinção orienta a escolha de indicadores e dispositivos de compensação.

O baixo fator de potência associado a motores e transformadores indutivos aumenta a potência aparente requerida para transportar uma potência ativa constante. Em condições comparáveis de tensão trifásica, a corrente de linha cresce com S. Uma compensação adequada reduz a parcela reativa demandada da fonte e pode liberar capacidade de cabos e transformadores. Isso não implica que a potência ativa da carga diminua na mesma proporção: eventuais economias de energia ativa dependem da redução efetiva das perdas elétricas e das características da instalação.

Castro e Portilho (2023) documentaram a correção do fator de potência com controlador automático em fábrica brasileira de semijoias, integrando levantamento de cargas, projeto e execução. A experiência demonstra a importância da resposta dinâmica às variações de carga, em contraste com bancos fixos superdimensionados. Verissimo (2022), ao examinar indicadores de qualidade em indústria metalmecânica, reforça a necessidade de avaliar medidas e parâmetros específicos de cada instalação antes de selecionar a compensação reativa.

Lima Neto e Reis (2025) relatam melhora do fator de potência de 0,78 para 0,96 após implantação de banco automático em uma planta industrial. O estudo refere ainda reduções de energia reativa e outros indicadores de operação. A diferença de fator de potência é um resultado empírico informado pelos autores, enquanto qualquer cálculo apresentado neste trabalho é uma demonstração hipotética

baseada em equações conhecidas. A comparação antes-depois serve como evidência aplicada, mas requer cautela com condições de carga, período de observação e possíveis mudanças operacionais concomitantes.

2.4. Ressonância, Filtros e Compensação Híbrida

A inserção de capacitores modifica a impedância equivalente da instalação e pode aproximar uma frequência natural do sistema de uma ordem harmônica relevante. Em condições desfavoráveis, o conjunto rede-capacitor pode amplificar correntes ou tensões, elevar o estresse térmico e provocar atuação de proteção. Assim, o dimensionamento do banco não pode depender exclusivamente da potência reativa calculada a partir do fator de potência médio.

Silva, Silva e Pires (2022) apresentam um caso de reorganização de filtros passivos preexistentes para mitigação de harmônicas e correção do fator de potência em instalação industrial. O estudo destaca a possibilidade de otimizar ativos já instalados, evitando substituições desnecessárias. Silva (2024) examina a aplicação de filtros passivos em plantas de processo contínuo e argumenta que a estabilidade da demanda pode favorecer a viabilidade técnica e econômica desses dispositivos, sem negar a necessidade de avaliar a variação de impedância.

Filtros passivos sintonizados ou dessintonizados, filtros ativos e soluções híbridas representam alternativas com características distintas. Filtros passivos podem oferecer simplicidade e bom desempenho em regimes relativamente estáveis; filtros ativos trazem maior adaptabilidade à composição harmônica; e combinações podem dividir funções. A seleção precisa considerar

espectro de harmônicas, variações de carga, perdas próprias, capacidade térmica, manutenção, compatibilidade eletromagnética e custo do ciclo de vida.

Um plano técnico deve prever levantamento do espectro harmônico por alimentador, cálculo de impedâncias de curto-circuito, análise de frequência de ressonância, coordenação de proteção e condições transitórias de chaveamento. Onde há conversores e bancos de capacitores, instalar primeiro e medir depois representa risco evitável. A proposição de soluções é, portanto, uma etapa diferente da comprovação de sua eficácia em serviço.

2.5. Casos Brasileiros: Diagnóstico e Intervenção Comprovada

O caso relatado por Ferreira e Barcelos (2025), em Poá, São Paulo, documentou a presença de harmônicas de quinta e sétima ordens, picos de distorção de corrente e fator de potência reduzido. O trabalho recomenda filtros e reconfiguração de cargas poluentes. É um exemplo consistente de diagnóstico aplicado em uma indústria de médio porte, mas não permite afirmar que essas medidas já reduziram perdas, porque não apresenta um ensaio pós-intervenção para esse fim.

Como contraponto de implementação, Lima Neto e Reis (2025) descrevem medições antes e depois da instalação de compensação automática em planta industrial. O fator de potência informado evoluiu de 0,78 para 0,96, resultado que dá suporte à viabilidade de controles escalonados de capacitores quando adequadamente projetados. A pesquisa não identifica, no resumo disponível, município específico da planta; por isso, o presente trabalho não atribui cidade que não tenha sido informada pela fonte.

Uma terceira perspectiva é oferecida por Castro e Portilho (2023), com relato de implementação de controlador automático em fábrica de semijoias. A combinação de planejamento, levantamento de carga e execução facilita a transferência metodológica para pequenas e médias empresas brasileiras. Entretanto, a aplicação dessas experiências a setores com muitos inversores deve acrescentar estudo harmônico e de ressonância, mesmo quando a compensação convencional mostrou-se satisfatória em outro ramo de atividade.

O conjunto de casos permite diferenciar três graus de evidência: a observação de indicadores problemáticos, a modelagem e formulação de alternativas, e a comparação de medições após implementação. Essa hierarquia evita conclusões indevidas. Uma análise pode justificar um investimento, mas só o monitoramento posterior, com linha de base compatível, demonstra se os resultados almejados foram alcançados.

3. METODOLOGIA

Este estudo caracteriza-se como pesquisa qualitativa, bibliográfica e analítico-propositiva, estruturada por revisão temática de oito obras de autoria brasileira publicadas entre 2022 e 2025. Foram selecionadas investigações relativas a medições industriais, distorção harmônica, compensação de reativos, filtros passivos, modelagem computacional e estudos de caso. A documentação normativa brasileira foi consultada como referência complementar para contextualização dos indicadores de qualidade do fornecimento, não como evidência de resultado operacional de uma indústria.

O corpus científico contempla: Verissimo (2022); Rocha et al. (2022); Silva, Silva e Pires (2022); Castro e Portilho (2023); Gonçalves (2024); Silva (2024); Ferreira e Barcelos (2025); e Lima Neto e Reis (2025). As fontes foram analisadas quanto a objetivo, método, ponto de medição, tipo de carga, indicadores estudados, intervenção e presença ou ausência de validação posterior. Não foi realizada meta-análise, pois os trabalhos apresentam condições elétricas, tipos de medida e desenhos de pesquisa distintos.

A discussão foi organizada em quatro eixos: caracterização de distúrbios e indicadores; análise do fator de potência e compensação; ressonância e filtros; e implantação com critérios de monitoramento. Para articular teoria e prática, desenvolveu-se cenário didático independente das fontes: instalação trifásica de tensão de linha de 380 V, potência ativa constante de 300 kW e fator de potência de deslocamento alterado de 0,78 para 0,96. O dimensionamento simplificado desconsidera distorções, variações de carga, perdas do próprio sistema e restrições de chaveamento.

Os cálculos ilustrativos contemplam potência reativa inicial e final, compensação requerida, potência aparente, corrente de linha e estimativa relativa da parcela resistiva I^2R sob resistência equivalente constante. A tabela e a figura de comparação foram elaboradas exclusivamente para fins de demonstração. Não representam registros de medição dos casos brasileiros. Essa delimitação é importante porque o presente artigo não realizou experimentos na planta, inspeções de campo ou instalação de capacitores.

A proposta de soluções foi construída pela comparação dos estudos e pelo princípio de implantação verificável: qualquer estratégia de mitigação deve conter linha de base, hipóteses, projeto, análise de

riscos, implementação segura, medição posterior e documentação de resultados. Eventuais percentuais de economia devem ser calculados com dados reais de medição e contrato, e não deduzidos diretamente da elevação do fator de potência.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Síntese dos Estudos e Implicações Operacionais

A revisão evidencia que o baixo fator de potência e a distorção harmônica frequentemente coexistem, mas são fenômenos diferentes. Verissimo (2022) relatou ambos em indústria metalmecânica, enquanto Gonçalves (2024) destacou o papel da ressonância harmônica no setor industrial cearense. Ferreira e Barcelos (2025) encontraram elevada distorção de corrente em determinados períodos, mesmo quando a distorção de tensão média se mostrou muito menor. Essa divergência demonstra por que a especificação de um filtro exige avaliar a grandeza e o ponto de medição corretos.

Os estudos sobre filtros passivos indicam que não há solução universal. Silva, Silva e Pires (2022) valorizam a reconfiguração de filtros existentes; Silva (2024) discute vantagens em processos de operação contínua; e Gonçalves (2024) evidencia que a modelagem de impedâncias pode revelar amplificações perigosas. Uma decisão de engenharia tecnicamente consistente deve comparar pelo menos: compensação automática convencional, banco dessintonizado, filtro passivo sintonizado e filtro ativo, considerando modos operacionais distintos.

Já os relatos de Castro e Portilho (2023) e Lima Neto e Reis (2025) indicam que bancos automáticos podem ser implementados em

contextos industriais reais. A evolução do fator de potência de 0,78 para 0,96 reportada pelo segundo estudo é particularmente ilustrativa, mas não deve ser convertida em uma promessa de economia padronizada. Ganhos dependem do perfil de carga, da potência reativa, da variação tarifária e das perdas efetivamente reduzidas.

4.2. Exercício Quantitativo de Compensação de Potência Reativa

Para demonstrar o procedimento de cálculo, considera-se uma instalação hipotética de 300 kW, tensão trifásica de linha de 380 V e regime equilibrado aproximadamente senoidal. A situação inicial apresenta fator de potência de deslocamento de 0,78, elevado por compensação para 0,96. A escolha desses dois fatores serve apenas para facilitar a comparação com os valores reportados por Lima Neto e Reis (2025); a potência de 300 kW e a tensão de 380 V são premissas criadas neste artigo, sem relação com a instalação investigada por aqueles autores.

A potência reativa inicial é $Q_0 = P \times \tan(\arccos 0{,}78) \approx 240{,}7$ kvar. No estado corrigido, $Q_1 = P \times \tan(\arccos 0{,}96) = 87{,}5$ kvar. Logo, a potência de compensação teórica é $Qc = Q_0 - Q_1 \approx 153{,}2$ kvar. A seleção comercial de módulos e a parametrização do controlador devem considerar intervalos de carga, temperatura, harmônicas, transitórios, suportabilidade e a potência reativa realmente disponível no ponto de instalação; não é tecnicamente adequado converter diretamente o valor teórico em especificação final de equipamento.

A potência aparente diminui de $S_0 = 300/0{,}78 \approx 384{,}6$ kVA para $S_1 = 300/0{,}96 = 312{,}5$ kVA. Em tensão de linha de 380 V, a corrente de

linha estimada pela expressão $I = S \times 1.000/(\sqrt{3} \times V)$ passa de aproximadamente 584 A para 475 A, redução relativa de 18,75%. Mantendo resistência equivalente e condições térmicas constantes, a parcela resistiva proporcional a I^2R poderia cair em torno de 34%; esse percentual refere-se apenas à componente modelada, não à energia total faturada, porque a potência ativa útil permanece fixada em 300 kW.

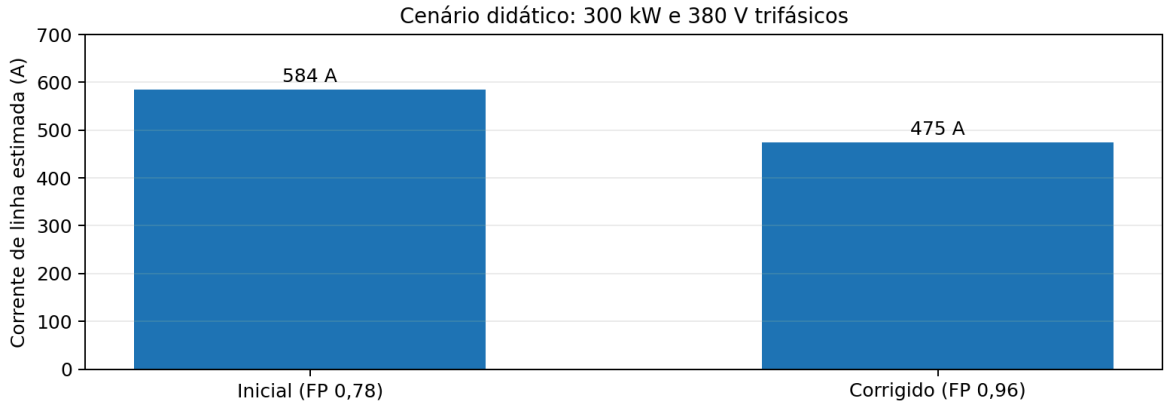
A análise também permite explicitar os limites da compensação. O banco reduz a solicitação aparente associada à potência reativa indutiva, mas não elimina correntes harmônicas geradas por cargas não lineares. Em cenários com THD elevada, o fator de potência verdadeiro pode permanecer inferior ao calculado pelo cosseno de deslocamento. A implantação precisa, portanto, combinar medição de harmônicas e estudo de ressonância, especialmente em plantas com grande densidade de inversores.

Tabela 1. Exercício de correção do fator de potência para uma planta hipotética

Grandeza	Antes (FP 0,78)	Depois (FP 0,96)
Potência ativa P	300,0 kW	300,0 kW
Potência reativa Q	240,7 kvar	87,5 kvar
Potência aparente S	384,6 kVA	312,5 kVA
Corrente de linha I	584,4 A	474,8 A
Compensação requerida Qc	—	153,2 kvar
Redução de corrente	—	18,75%
Redução idealizada em I^2R	—	34,0%

Fonte: cálculos próprios; P = 300 kW e V = 380 V assumidos; rede equilibrada e senoidal. Não são dados medidos.

Figura 2. Corrente teórica antes e depois da compensação de reativos



Fonte: elaboração dos autores. Estimativas para 300 kW, tensão de linha de 380 V e regime aproximadamente senoidal.

4.3. Critérios para Distinguir Resultados Empíricos, Simulações e Propostas

A primeira distinção relevante é epistemológica: registros de analisadores de energia documentam o comportamento observado durante um período específico; simulações representam o comportamento esperado sob hipóteses de um modelo; e propostas de engenharia expressam decisões ainda não testadas. Na indústria de Poá, Ferreira e Barcelos (2025) mediram grandezas e sugeriram medidas corretivas. Em contrapartida, a intervenção descrita por Lima Neto e Reis (2025) inclui resultado antes-depois do fator de potência. Esse contraste deve orientar a avaliação do grau de evidência de qualquer afirmação.

A segunda distinção é técnica. A evolução do FP não demonstra, por si, redução proporcional de energia ativa ou de tarifa. O faturamento depende de modalidades contratuais, medições, perfil horário e

regras aplicáveis. A corrente reduzida também não garante diminuição de defeitos: é necessário avaliar temperaturas, carregamento, surtos de chaveamento e condições de proteção. Por isso, relatórios técnicos devem combinar indicadores elétricos, disponibilidade de processo e custo real ao longo de período suficiente para controlar sazonalidade e alterações de produção.

A terceira distinção refere-se à replicabilidade. Uma fábrica de semijoias, uma unidade metalmecânica e um processo contínuo não compartilham necessariamente o mesmo perfil de cargas. O fato de uma solução funcionar em uma planta brasileira não autoriza implantação automática em outra. A transferência de conhecimento consiste na metodologia de diagnóstico e validação, não na cópia de valores de capacitores ou filtros.

4.4. Soluções Inovadoras para Indústrias Brasileiras

Propõe-se, em primeiro lugar, um programa de observabilidade contínua de QEE, formado por sensores adequados nos pontos críticos, registro sincronizado de tensão e corrente, catalogação de eventos e painéis acessíveis a engenharia, manutenção e gestão energética. Ao contrário de auditorias exclusivamente pontuais, a observabilidade permite relacionar distúrbios a turnos, partidas, equipamentos e mudanças de regime. A solução é inovadora não pela mera aquisição de medidores, mas pela integração dos dados a decisões operacionais documentadas.

A segunda proposta é utilizar compensação reativa coordenada com avaliação harmônica. O controlador do banco deve receber critérios de bloqueio e proteção relacionados a temperatura, tensão, sobrecorrente e eventos anômalos. Quando a análise indicar risco de

ressonância, recomenda-se comparar bancos dessintonizados e filtros adequados, em vez de adotar capacitores convencionais sem avaliação. O planejamento pode incluir etapas modulares para que o efeito de cada mudança seja medido antes da ampliação.

A terceira proposta consiste em estruturar um gêmeo elétrico simplificado da instalação. O diagrama unifilar, as impedâncias, transformadores, cabos, bancos e cargas representativas seriam associados às séries temporais de medição. O modelo permitiria examinar cenários de expansão de conversores, deslocamento de cargas e falhas de equipamento. A validação dependeria da comparação entre simulação e registro real. Em empresas com baixa maturidade digital, esse gêmeo pode começar como planilha técnica auditável antes de evoluir para um simulador de rede.

A quarta inovação é implantar uma rotina de manutenção por criticidade da QEE. Transformadores, painéis e cabos expostos a distorções elevadas devem receber prioridade de termografia, inspeção de conexões, acompanhamento de temperatura e verificação dos dispositivos de proteção. Os relatórios devem registrar não apenas defeitos encontrados, mas sua associação temporal aos eventos elétricos. Isso evita interpretar todo aquecimento como resultado de harmônicas sem verificar sobrecarga, ventilação ou contatos inadequados.

A quinta proposta é instituir um protocolo de comparação antes-depois, envolvendo janela de medição representativa, classe e calibração dos instrumentos, dados brutos preservados, mesma referência de carga e registro de alterações de produção. Indicadores sugeridos incluem FP verdadeiro, cos φ da fundamental, THD-V, THD-I, correntes eficazes, temperaturas de transformadores,

demanda, consumo ativo e energia reativa. Essa matriz torna a implementação passível de auditoria e reduz o risco de anunciar economias não sustentadas por dados.

A sexta proposta é adotar uma análise multicritério de investimento. Além de custo inicial, devem ser avaliados perdas próprias, vida útil, manutenção, disponibilidade, facilidade de retrofit, riscos de ressonância e segurança. Em fábricas de menor porte, uma sequência incremental — medição, ajuste de cargas, correção por estágios e, se necessário, filtragem — pode reduzir custos de implantação. Em plantas de grande concentração de eletrônica de potência, soluções híbridas podem ser economicamente mais justificáveis, desde que os ganhos sejam documentados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo examinou a qualidade da energia elétrica industrial por meio de oito obras brasileiras recentes, com foco no diagnóstico de distorções harmônicas, na correção do fator de potência e na mitigação de perdas. A literatura indica que a eficiência e a confiabilidade não dependem de um único equipamento, mas da relação entre a rede, o perfil de cargas, os dispositivos de compensação e a capacidade de medir os resultados. A presença de harmônicas exige atenção especial, porque intervenções de potência reativa podem alterar condições de ressonância.

Os casos brasileiros permitem reconhecer diferenças entre identificação de problemas e comprovação de melhoria. O estudo de Poá documenta distúrbios e recomenda ações, enquanto outro caso industrial reporta aumento do fator de potência de 0,78 para 0,96 após compensação automática. A experiência da fábrica de

semijoias demonstra adicionalmente a viabilidade de um projeto controlado em ambiente produtivo. Nenhum desses achados dispensa investigação específica em outra planta.

O exercício matemático desenvolvido mostrou que, sob premissas idealizadas, a compensação aproximada de 153,2 kvar para uma demanda ativa de 300 kW pode reduzir potência aparente e corrente de linha. Essa redução teórica não equivale a percentual idêntico de economia de energia ativa e não valida, sozinha, o dimensionamento real de um banco. Verificação de harmônicas, análise de ressonância, coordenação de proteção e monitoramento posterior são etapas necessárias.

Como contribuição propositiva, defende-se um roteiro que integre observabilidade contínua, modelos elétricos progressivos, compensação reativa coordenada, manutenção por criticidade e avaliação técnico-econômica multicritério. Pesquisas futuras devem aplicar esse roteiro em instalações de distintos segmentos industriais, publicar séries temporais antes-depois e quantificar economias líquidas e confiabilidade com indicadores controlados. A inovação de maior valor é transformar a qualidade da energia em processo de engenharia mensurável e permanentemente verificável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). 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_prodist_modulo_8_v13.pdf. Acesso em: 29 out. 2026.

CASTRO, Alysson Santos de; PORTILHO, Leonardo Ribeiro. Estudo de caso: correção do fator de potência utilizando controlador automático em uma fábrica de semijoias. Ponta Grossa: Atena, 2023. DOI: 10.22533/at.ed.420231204. Disponível em: https://educapes.capes.gov.br/handle/capes/730320. Acesso em: 29 out. 2026.

FERREIRA, Rafael dos Santos; BARCELOS, Thiago Schumacher. Estudo de caso: avaliação da qualidade de energia e proposta de correção em uma indústria afetada por harmônicas e energia reativa. Anais da EXATECCA, Guarulhos, v. 5, 2025. Disponível em: https://revista.gru.ifsp.edu.br/exatecca/article/view/295. Acesso em: 29 out. 2026.

GONÇALVES, Amanda Sousa. Modelagem computacional e análise das distorções harmônicas em um complexo industrial. 2024. 65 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/79150. Acesso em: 29 out. 2026.

LIMA NETO, João Francisco de; REIS, Ilmar Duarte dos. Correção do fator de potência com bancos de capacitores automáticos: um estudo de caso em ambiente industrial. Revista Contemporânea, v. 5, n. 6, e8460, 2025. DOI: 10.56083/RCV5N6-100. Disponível em: https://ojs.revistacontemporanea.com/ojs/index.php/home/article/view/8460. Acesso em: 29 out. 2026.

ROCHA, Bruno Antônio Correia; BECKER, Ana Regina Meneses e Silva; MAGALHÃES, Michel Kobbi; FORTES, Márcio Zamboti. Análise da qualidade de energia em uma indústria de pneumáticos. Revista

FSA, Teresina, v. 19, n. 11, p. 298-318, 2022. DOI: 10.12819/2022.19.11.15. Disponível em: https://www4.unifsa.com.br/revista/index.php/fsa/article/view/2645. Acesso em: 29 out. 2026.

SILVA, Fabio Jose Braz da. Utilização de filtros de harmônicas passivos em plantas industriais de processo contínuo. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024. DOI: 10.11606/D.3.2024.tde-29042024-101926. Disponível em: https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-29042024-101926/pt-br.html. Acesso em: 29 out. 2026.

SILVA, Wiverton Nunes; SILVA, Sidelmo Magalhães; PIRES, Igor Amariz. Estudo de mitigação de harmônicos com a otimização de filtros passivos existentes – estudo de caso. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 9., 2022. Anais [...]. Sociedade Brasileira de Automática, v. 2, n. 1, 2022. DOI: 10.20906/sbse.v2i1.2902. Disponível em: https://ojs.sba.org.br/index.php/sbse/article/view/2902. Acesso em: 29 out. 2026.

VERISSIMO, Leonardo Bazarim. Avaliação da qualidade de energia elétrica em instalações industriais. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2022. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/29361. Acesso em: 29 out. 2026.

---

[1] Especialista em Engenharia da Qualidade pela UFPA. E-mail: acesse o artigo original para visualizar o e-mail

[2] Especialista em Engenharia da Qualidade pela UFPA. E-mail:
acesse o artigo original para visualizar o e-mail