REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

ESTUDO DA QUALIDADE DE ENERGIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS

STUDY OF POWER QUALITY IN ELECTRICAL SYSTEMS

ESTUDIO DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

Lucas Guilherme de Godoy Fondato[1], Ronaldo Gomes Figueira[1], Fabiana Florian[1]

e6116966
https://doi.org/10.47820/recima21.v6i11.6966

PUBLICADO: 11/2025

RESUMO

A qualidade da energia elétrica tornou-se um fator essencial para a segurança e eficiência das instalações contemporâneas. A crescente utilização de equipamentos eletrônicos sensíveis aumenta a vulnerabilidade dos sistemas produtivos a distúrbios na rede, que resultam em falhas operacionais e perdas econômicas significativas. Este estudo se propõe a investigar os principais distúrbios que degradam a qualidade da energia, como harmônicos e variações de tensão, com foco na análise de seus impactos financeiros sobre o setor industrial. A análise dos dados revela que os prejuízos aumentam exponencialmente com a duração das interrupções, o que demonstra que a gestão da qualidade da energia transcende a dimensão técnica, consolidando-se como um pilar estratégico para a competitividade e a sustentabilidade econômica das empresas.

PALAVRAS-CHAVE: Harmônicos. Flutuação de tensão. Qualidade da energia elétrica.

ABSTRACT

Power quality is an essential factor in ensuring the proper performance, reliability, and durability of equipment connected to distribution networks. This work presents a comprehensive review of the main disturbances that compromise power quality, including voltage variations, harmonic distortions, imbalances, noise, and frequency fluctuations. The causes of these phenomena—such as nonlinear loads, switching operations, lightning strikes, and poor three-phase load distribution—are discussed. The classification of disturbances is structured according to their duration, magnitude, and spectral content, in line with international technical standards. Furthermore, the impacts of these events on industrial, commercial, and residential systems are addressed, highlighting operational losses, equipment degradation, and interruptions of critical processes. The study also considers the role of regulatory standards. Corrective and preventive strategies are proposed, such as the use of filters, proper grounding, and segmentation of sensitive loads, aiming to improve the quality of power supply. The conclusion of this study reinforces the need for continuous monitoring and regulatory updates in light of the growing complexity of modern electrical systems

KEYWORDS: *Harmonics. Voltage fluctuation. Power quality.*

RESUMEN

La calidad de la energía eléctrica es un factor esencial para garantizar el adecuado desempeño, la confiabilidad y la durabilidad de los equipos conectados a las redes de distribución. Este trabajo presenta una revisión exhaustiva de las principales perturbaciones que comprometen la calidad de la energía, incluyendo variaciones de tensión, distorsiones armónicas, desequilibrios, ruido y fluctuaciones de frecuencia. Se discuten las causas de estos fenómenos, tales como cargas no lineales, operaciones de conmutación, descargas atmosféricas y una mala distribución de cargas trifásicas. La clasificación de las perturbaciones se estructura según su duración, magnitud y contenido espectral, en conformidad con las normas técnicas internacionales. Además, se abordan los impactos de estos eventos en sistemas industriales, comerciales y residenciales, destacando

[1] UNIARA - Universidade de Araraquara.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

las pérdidas operativas, la degradación de equipos y la interrupción de procesos críticos. El estudio también considera el papel de las normas regulatorias. Se proponen estrategias correctivas y preventivas, como el uso de filtros, una adecuada puesta a tierra y la segmentación de cargas sensibles, con el objetivo de mejorar la calidad del suministro eléctrico. La conclusión de este estudio refuerza la necesidad de un monitoreo continuo y de actualizaciones regulatorias ante la creciente complejidad de los sistemas eléctricos modernos.

***PALABRAS CLAVE**: Armónicos. Fluctuación de tensión. Calidad de la energía eléctrica.*

INTRODUÇÃO

A qualidade da energia em sistemas elétricos é um fator essencial para a segurança e eficiência das instalações elétricas, garantindo a confiabilidade do fornecimento e a proteção dos equipamentos. Com o avanço da tecnologia e a crescente dependência de dispositivos eletrônicos sensíveis, torna-se cada vez mais necessário estudar e minimizar os impactos de distúrbios elétricos na rede.

Este trabalho investiga os principais fatores que comprometem a qualidade da energia em sistema elétricos como flutuações de tensão, harmônicos, afundamentos e interrupções no fornecimento, além de seus impactos em processos industriais, comerciais e residenciais. É fundamental compreender o surgimento desses distúrbios e de que forma eles podem ser mitigados a fim de evitar danos e prejuízos.

Os objetivos deste trabalho incluem analisar as principais anomalias na rede elétrica, identificar suas causas e consequências, avaliar soluções tecnológicas para mitigação e propor estratégias para aumentar a confiabilidade do fornecimento elétrico. O trabalho também busca destacar a importância da legislação e das normativas vigentes para a manutenção de padrões adequados de qualidade da energia.

REFERENCIAL TEÓRICO

A qualidade da energia elétrica é regida por um conjunto de normas e regulamentos nacionais e internacionais que estabelecem limites e parâmetros de desempenho. Entre as principais referências estão a IEEE 519:2014, que trata dos limites de distorção harmônica em sistemas elétricos, e a IEC 61000-4-30:2015, que define métodos para medição e avaliação de distúrbios de qualidade da energia.

No contexto brasileiro, destaca-se a Resolução Normativa nº 1000/2021 da ANEEL, que consolida as disposições sobre a qualidade do serviço e do produto da energia elétrica, além de diretrizes de monitoramento e indicadores de continuidade. A observância dessas normativas é essencial para garantir a confiabilidade e a conformidade das instalações com padrões internacionais.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Além das normas, diversos estudos e publicações técnicas abordam o impacto de anomalias como harmônicos, flutuações de tensão e interrupções no desempenho de equipamentos elétricos e eletrônicos. A literatura aponta que a presença desses distúrbios reduz a vida útil de equipamentos, aumenta perdas energéticas e pode comprometer a operação de processos industriais automatizados.

MÉTODOS

A pesquisa foi conduzida por meio de uma revisão bibliográfica e normativa, envolvendo documentos técnicos, artigos científicos e legislações relacionadas à qualidade da energia elétrica. Foram analisadas publicações que abordam as principais anomalias elétricas, suas causas e efeitos, bem como soluções tecnológicas aplicadas à mitigação desses distúrbios.

A metodologia também compreendeu o levantamento e análise de soluções emergentes, como sistemas inteligentes de monitoramento, correção do fator de potência e integração de fontes renováveis. Essa abordagem possibilitou identificar boas práticas e tendências no aprimoramento da qualidade da energia em sistemas elétricos de diferentes portes.

Gerais de Qualidade da Energia Elétrica

A qualidade da energia elétrica é um conceito amplo, que abrange uma diversidade de fenômenos técnicos com impacto direto em toda a cadeia do sistema elétrico desde a geração, passando pela transmissão e distribuição, até o consumo final. Esses fenômenos, que incluem distorções em tensões e correntes, variações de frequência e desequilíbrios, influenciam não apenas a operação eficiente dos sistemas elétricos, mas também a vida útil e o desempenho de equipamentos conectados à rede. A compreensão e o monitoramento desses aspectos são essenciais para garantir maior eficiência energética e produtividade, tanto no ambiente industrial quanto no doméstico.

Distúrbios na qualidade da energia podem ocorrer em pontos comuns de acoplamento ou mesmo dentro das instalações dos próprios consumidores, e suas consequências têm impulsionado tanto concessionárias quanto usuários a buscar soluções conjuntas. Esses esforços envolvem não apenas a aplicação de medidas técnicas corretivas, como também a adoção de estratégias de gestão energética mais racionais, que passam pela correção do fator de potência e pelo uso consciente dos recursos.

Especialistas na área costumam definir a perda de qualidade da energia como qualquer anormalidade nos parâmetros elétricos (tensão, corrente ou frequência) capaz de provocar falhas ou funcionamento inadequado em dispositivos. Essa preocupação tem crescido nas últimas décadas devido a uma série de fatores. Entre eles, destaca-se o aumento da sensibilidade dos equipamentos modernos, que frequentemente utilizam controladores eletrônicos ou

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

microprocessados, tornando-os mais vulneráveis a pequenas perturbações que antes passavam despercebidas.

Além disso, a busca por maior eficiência energética levou à popularização de tecnologias como bancos de capacitores e acionamentos eletrônicos, que embora tragam ganhos operacionais, também contribuem para o aumento das distorções harmônicas. Simultaneamente, os consumidores estão mais conscientes dos efeitos provocados por interrupções e outros eventos anômalos no fornecimento, o que tem gerado maior pressão sobre as distribuidoras por um serviço mais estável e confiável.

Outro ponto relevante é o crescimento da utilização de sistemas de comunicação baseados em dados, cada vez mais integrados a processos industriais e comerciais. A necessidade de continuidade operacional constante, especialmente em ambientes que exigem controle automatizado e conexões ininterruptas, como em *smart grids*, torna a discussão sobre qualidade da energia ainda mais estratégica.

Nesse contexto, o fornecimento de energia elétrica de qualidade deve atender não apenas critérios técnicos, mas também econômicos, sociais e ambientais. Espera-se que o serviço seja capaz de assegurar o funcionamento seguro e eficiente dos equipamentos, sem comprometer o bem-estar da população nem o meio ambiente. Assim, o conceito de qualidade passa a englobar também o atendimento prestado pelas concessionárias seja no relacionamento cotidiano com o cliente ou na resposta a situações emergenciais.

A avaliação da qualidade do fornecimento pode ser dividida em três dimensões: o serviço (continuidade e confiabilidade da entrega), o atendimento (relacionamento com o consumidor) e o produto (características elétricas da energia fornecida). Esta última diz respeito à capacidade do sistema de entregar energia com parâmetros estáveis: tensões senoidais equilibradas, com frequência e amplitude dentro dos limites definidos. Qualquer desvio desses padrões representa uma perda de qualidade e pode ser classificado como uma perturbação elétrica.

Um dos grandes desafios na gestão da qualidade da energia elétrica é a complexidade do próprio sistema elétrico. Diferente de outros produtos industriais, a energia não pode ser estocada e passa simultaneamente por geração, transmissão, distribuição e consumo. Isso cria dificuldades adicionais no controle preventivo da qualidade, uma vez que cada etapa do processo está sujeita a influências externas e pode afetar as demais. Além disso, a rede elétrica cobre vastas extensões geográficas, o que a torna vulnerável a interferências climáticas, falhas técnicas e sobrecargas.

O estabelecimento de indicadores confiáveis para mensurar a qualidade da energia é outro ponto crítico. Esses indicadores precisam lidar com fatores como a aleatoriedade dos distúrbios, a inevitabilidade de certas ocorrências, e as diferentes sensibilidades entre consumidores. Um equipamento hospitalar, por exemplo, pode ser afetado por uma perturbação mínima que não causaria nenhum problema em uma residência comum.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Diante disso, garantir a qualidade da energia elétrica exige não só investimento em infraestrutura e tecnologia, mas também uma abordagem integrada, que envolva fornecedores, reguladores e consumidores, com foco em prevenção, monitoramento e resposta rápida. A evolução das redes inteligentes e dos sistemas de monitoramento contínuo traz novas possibilidades nesse campo, permitindo intervenções mais eficazes e a manutenção da confiabilidade dos sistemas elétricos mesmo em cenários de alta complexidade.

Principais Distúrbios Associados à Qualidade da Energia Elétrica

A avaliação da qualidade da energia elétrica está diretamente associada à caracterização de diversos fenômenos eletromagnéticos que afetam as formas de tensão e corrente em pontos específicos do sistema elétrico. Esses distúrbios podem comprometer o desempenho de equipamentos, reduzir a vida útil de componentes e até interromper processos produtivos, sendo classificados conforme sua natureza, origem e duração.

Entre os principais eventos que degradam a qualidade da energia estão os transitórios eletromagnéticos, que resultam de mudanças abruptas nas condições de operação da rede. Esses eventos, embora breves, impõem elevadas solicitações elétricas aos dispositivos, podendo causar falhas instantâneas. Os transitórios podem ser impulsivos, geralmente provocados por descargas atmosféricas, ou oscilatórios, frequentemente associados a manobras de chaveamento de cargas ou linhas.

Outro grupo de distúrbios amplamente identificado envolve as variações de tensão de curta duração, que ocorrem durante afundamentos ("*sags*"), elevações momentâneas ("*swells*") ou interrupções transitórias da alimentação elétrica. Essas oscilações são frequentemente associadas à energização de grandes cargas, falhas temporárias na rede ou desequilíbrios transitórios de carga. Quando prolongadas por mais de três minutos, essas variações passam a ser classificadas como variações de longa duração, indicando anomalias mais persistentes no sistema, como perdas de fase ou desequilíbrios de carga significativos.

Os desequilíbrios de tensão ou corrente também figuram entre os distúrbios relevantes, especialmente em sistemas trifásicos. Eles ocorrem quando há assimetrias na distribuição de cargas monofásicas, resultando em componentes de sequência negativa que afetam o desempenho de motores e equipamentos industriais. A má distribuição de cargas dentro de instalações trifásicas pode agravar esse problema, levando à injeção de correntes desbalanceadas na rede da concessionária.

As distorções da forma de onda constituem outra categoria crítica. Elas englobam variações permanentes nas características senoidais das tensões e correntes, causadas principalmente por cargas não lineares. Os harmônicos, que são múltiplos inteiros da frequência fundamental do sistema (50 ou 60 Hz), provocam deformações nas formas de onda e resultam em

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

sobreaquecimento, ressonâncias e perdas adicionais. Já os inter-harmônicos, que não obedecem à relação de múltiplos inteiros, surgem principalmente de conversores eletrônicos e podem causar efeitos como cintilação luminosa e interferência em sinais de controle (Mehl, 2000).

O nível DC (offset) em redes de corrente alternada representa outra distorção indesejada. Originado, por exemplo, da operação de retificadores de meia-onda, esse componente contínuo pode levar à saturação de transformadores e outros efeitos cumulativos de perda e degradação. Outro fenômeno relevante é o chamado *notching*, caracterizado por pequenas lacunas ou entalhes na forma de onda da tensão, resultantes da comutação entre fases em equipamentos de eletrônica de potência. Essas perturbações apresentam componentes de frequência elevadas, muitas vezes não detectáveis por analisadores convencionais.

Os ruídos elétricos, consistem em sinais indesejados de ampla faixa espectral com frequência inferior a 200 kHz, representam uma ameaça à operação de circuitos sensíveis. Eles podem ser introduzidos por dispositivos como fontes chaveadas, retificadores, equipamentos de solda e falhas de aterramento, interferindo no controle e na medição de processos industriais e comerciais.

A identificação, classificação e mitigação desses distúrbios são etapas fundamentais para assegurar a conformidade dos parâmetros elétricos, a integridade dos sistemas e a continuidade operacional em todos os setores que dependem da energia elétrica. Além disso, o conhecimento aprofundado dessas perturbações embasa o desenvolvimento de tecnologias corretivas, como filtros, protetores e dispositivos de monitoramento inteligente, promovendo um ambiente elétrico mais estável e confiável.

A qualidade da energia elétrica pode ser comprometida por diversos tipos de perturbações eletromagnéticas que, além de afetarem a forma e estabilidade dos sinais de tensão e corrente, também impactam diretamente o funcionamento de dispositivos conectados à rede. Esses fenômenos se apresentam com diferentes durações, amplitudes e efeitos, sendo tradicionalmente classificados em três grandes grupos: transitórios, variações temporárias e distúrbios de regime permanente.

Entre os fenômenos de regime permanente, destacam-se as flutuações de tensão, caracterizadas por oscilações repetitivas no valor eficaz da tensão dentro da faixa de 0,95 a 1,05 pu. Apesar de parecerem discretas, essas variações sistemáticas podem causar efeitos perceptíveis e danosos, como o efeito de cintilação luminosa (*flicker*), variações de torque em motores e interferência em sistemas de proteção. São geralmente associadas a cargas industriais com operação intermitente, como fornos a arco, máquinas de solda ou partidas diretas de grandes motores. Dependendo da frequência e da previsibilidade das oscilações, essas flutuações podem ser classificadas como aleatórias, repetitivas ou esporádicas (Mehl, 2000).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Outro fenômeno relevante são as variações de frequência, que representam desvios em relação ao valor nominal da frequência da rede (60 Hz no Brasil). Esses desvios ocorrem, principalmente, como resposta a desequilíbrios entre carga e geração. Em sistemas interligados, variações moderadas podem ser corrigidas por ajustes automáticos nos geradores. No entanto, em sistemas isolados, como unidades industriais com geração própria, mesmo pequenas variações podem ser suficientes para comprometer a operação dos equipamentos, causando problemas de sincronismo, perdas de rendimento e riscos à integridade das turbinas e máquinas girantes.

A classificação técnica dos distúrbios segue critérios padronizados internacionalmente, considerando a duração, magnitude e conteúdo espectral. Os transitórios são eventos de curtíssima duração, geralmente causados por descargas atmosféricas ou manobras de chaveamento, e podem ser impulsivos ou oscilatórios, com amplitudes elevadas e tempos inferiores a 1 milissegundo. As variações temporárias de tensão, por sua vez, englobam desde interrupções breves até quedas e elevações de tensão que duram de alguns ciclos a alguns segundos. Já os distúrbios de regime permanente incluem desequilíbrios, harmônicos, flutuações e ruídos que permanecem continuamente superpostos à forma de onda da rede.

As tabelas técnicas normalmente utilizadas por especialistas organizam essas perturbações conforme sua natureza. Por exemplo, os harmônicos são múltiplos inteiros da frequência fundamental, causados por cargas não lineares e eletrônica de potência, enquanto os inter- harmônicos envolvem frequências não múltiplas inteiras, podendo causar cintilação visual e interferência em sistemas de sinal. O nível CC, que consiste na presença indesejada de componente contínua em um sistema de corrente alternada, pode provocar saturação em transformadores e danos cumulativos. Fenômenos como *notching* e ruídos elétricos também aparecem como causas recorrentes de degradação da forma de onda, principalmente em instalações com alta densidade de dispositivos eletrônicos.

Do ponto de vista normativo, diversas instituições internacionais têm desenvolvido diretrizes para padronizar a medição e os limites aceitáveis desses distúrbios. Organizações como o IEEE, a IEC e o CIGRÉ lideram essas iniciativas, propondo documentos como a norma IEEE 519 / 2014, voltada para controle de harmônicos, e a IEC 61000 / 2019, referência mundial para medição e compatibilidade eletromagnética.

No Brasil, a ANEEL, por meio do Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição (Prodist / 2021) define os requisitos mínimos para qualidade da energia elétrica entregue aos consumidores. Complementarmente, o ONS estabelece padrões para a rede básica, enquanto normas como a EN50160 / 2010 e a curva ITIC/CBEMA / 1996 são amplamente utilizadas por fabricantes para garantir que os equipamentos sejam tolerantes às variações mais comuns na rede.

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

A sistematização desses distúrbios e a padronização dos critérios de avaliação são passos fundamentais para garantir a integridade da infraestrutura elétrica, a confiabilidade dos processos produtivos e a segurança dos consumidores. À medida que os sistemas elétricos se tornam mais complexos e interdependentes, especialmente com o avanço das redes inteligentes e da geração distribuída, a gestão da qualidade da energia exige não apenas monitoramento contínuo, mas também ação coordenada entre concessionárias, reguladores e usuários.

Consequências da Instabilidade Elétrica no Ambiente Industrial

Em um cenário industrial cada vez mais competitivo, em que a automação, a produtividade e a eficiência operacional são diferenciais estratégicos, a má qualidade da energia elétrica tem se revelado como um fator de grande impacto negativo, capaz de comprometer seriamente a sustentabilidade econômica e tecnológica das organizações. Diversas indústrias, especialmente aquelas situadas em regiões economicamente estratégicas, têm enfrentado falhas operacionais recorrentes, cuja origem está relacionada a distúrbios na rede elétrica. Esses distúrbios, por vezes breves, geram efeitos desproporcionais, como desligamentos intempestivos de sistemas produtivos, paralisação de linhas de montagem, falhas em sistemas de controle e prejuízos consideráveis com retrabalhos e descarte de matéria-prima.

A criticidade do problema se intensifica à medida que se observam setores produtivos fortemente dependentes da estabilidade energética, especialmente aqueles que lidam com processos contínuos ou que empregam tecnologia de ponta. O uso de equipamentos eletronicamente controlados, que demandam padrões rígidos de tensão e frequência, torna as instalações industriais extremamente sensíveis a qualquer oscilação, seja ela sustentada ou momentânea. Nessas condições, é comum o acionamento indevido de proteções, a falha de sensores, o desligamento de motores e o travamento de sistemas informatizados. Em alguns casos, essas falhas causam interrupções que obrigam a reconfiguração de sistemas, reprocessamento de lotes ou até mesmo a perda total de produtos em elaboração.

Além dos danos imediatos à produção, identificam-se prejuízos de natureza secundária, como o desgaste acelerado de equipamentos, a redução da vida útil de componentes eletrônicos e o aumento do consumo energético por operação fora dos parâmetros ideais. Os custos não são apenas técnicos, mas também administrativos e logísticos: atrasos em entregas, quebra de contratos, impacto negativo sobre o atendimento a clientes e aumento das demandas por manutenção corretiva são frequentemente relatados. Há ainda prejuízos financeiros mensuráveis decorrentes das paradas inesperadas, especialmente em setores com alta carga térmica ou dependência de refrigeração, como alimentos e medicamentos, onde a instabilidade da energia pode inviabilizar lotes inteiros de produção. A análise de casos reais demonstra que, em algumas empresas, perdas econômicas foram expressivas mesmo diante de interrupções de duração

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

inferior a alguns segundos. Os prejuízos vão desde o comprometimento de matéria-prima até o impacto direto na receita operacional líquida, reduzindo a competitividade de empresas frente ao mercado e gerando efeitos em cadeia, como a desmotivação da força de trabalho e o comprometimento da imagem institucional.

Outro dado alarmante está na constatação de que muitas dessas falhas ocorrem sem que a empresa tenha meios adequados para prever ou reagir a tempo, já que os indicadores tradicionalmente utilizados pelas concessionárias para medir a conformidade da energia não são suficientes para capturar os efeitos econômicos causados por flutuações de curta duração. Diante da ausência de um modelo de compensação eficaz ou de exigências contratuais mais rígidas, as empresas acabam absorvendo esses prejuízos de forma recorrente. Ainda que algumas tenham adotado programas internos de qualidade de energia, com investimentos em sistemas de backup, bancos de capacitores, filtros harmônicos e dispositivos de correção, o custo desses recursos é elevado, e nem sempre evita integralmente os danos causados.

Ao analisar a situação de diversas plantas industriais, verifica-se que a magnitude dos impactos varia conforme o setor, o tipo de carga instalada, a infraestrutura da rede local e a criticidade dos processos, mas é unânime a percepção de que a falta de qualidade no fornecimento energético representa um obstáculo real para o crescimento e a modernização das empresas. Além disso, os custos com falhas energéticas ultrapassam a esfera interna das fábricas, interferindo em cadeias produtivas inteiras, impactando fornecedores, distribuidores e consumidores finais. Esse contexto demonstra a urgência em rever os atuais modelos de avaliação da qualidade da energia, incorporando indicadores mais sensíveis às realidades industriais e promovendo a inclusão de fatores econômicos na análise técnica. A ausência de políticas públicas específicas para apoiar empresas afetadas por tais distúrbios agrava ainda mais a situação, especialmente em regiões onde o desenvolvimento industrial é estratégico para a economia local. Assim, a má qualidade da energia elétrica se consolida como um gargalo estrutural que precisa ser tratado não apenas com soluções técnicas, mas com uma abordagem sistêmica, envolvendo regulação, fiscalização, investimento em infraestrutura e, principalmente, reconhecimento da energia como um insumo econômico de alto impacto. Garantir sua qualidade é, portanto, assegurar a competitividade industrial, a preservação de empregos e o fortalecimento da economia regional.

Impactos Econômicos da Baixa Qualidade de Energia na Indústria

Para ilustrar e quantificar os impactos financeiros causados por falhas na qualidade de energia, este trabalho se aprofunda na investigação prática conduzida por Melo (2008). Nesse estudo fundamental, o autor realizou uma análise direta dos prejuízos gerados por interrupções e distúrbios energéticos considerando custos fixos e varáveis. A pesquisa de campo foi conduzida

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

em um total de 17 unidades industriais distribuídas em estados do Nordeste brasileiro, abrangendo localidades como João Pessoa, Campina Grande, Recife, Maceió, Aracaju e Salvador, em zonas industriais e regiões metropolitanas. As empresas participantes foram agrupadas segundo diversos critérios, permitindo uma análise mais detalhada das variáveis que influenciam os efeitos das falhas de energia. Entre os fatores utilizados para essa estratificação estão o ramo de atividade conforme a Classificação Nacional de Atividades Econômicas (CNAE), o porte da empresa, o volume de energia consumida, a localização geográfica, os custos operacionais vinculados às falhas, o número de funcionários, o tempo médio das interrupções e os indicadores financeiros como receita e lucro anuais.

Os segmentos industriais analisados compreendem desde a transformação de minerais não metálicos até a fabricação de produtos farmacêuticos, alimentícios, metalúrgicos, plásticos, têxteis, elétricos, de madeira, papel, couro, bebidas, borracha, e diversos outros. Para medir o impacto financeiro real das falhas de qualidade da energia, foram definidos diversos tipos de custos, refletindo as perdas mais recorrentes enfrentadas pelas empresas. Entre eles, destacam-se os gastos com consertos ou reposição de equipamentos danificados; as perdas de produtos ainda em processo de fabricação ou já finalizados; os prejuízos com matéria-prima deteriorada durante quedas ou oscilações de energia; a perda de vendas por paralisações inesperadas; os investimentos realizados em sistemas de proteção e contingência; os custos associados à operação de geradores próprios ou baterias em momentos críticos; a perda de informações armazenadas em meios digitais; os custos com horas extras quando a produção precisa ser prolongada para compensar as falhas; e ainda os gastos necessários para retomar a produção normal após uma interrupção, incluindo ajustes em máquinas, limpeza, reposição de ferramentas e reconfiguração de sistemas.

Esses dados foram organizados em um banco estruturado, possibilitando o cálculo de diversos indicadores econômicos. A análise dos resultados pode ser realizada de diferentes formas, como o custo por evento de falha (cada interrupção ou distúrbio), por unidade de tempo (ex.: impacto de uma falha de 1 segundo, 1 minuto ou 1 hora), por setor econômico (química, bebidas, metalurgia etc.), por consumo de energia (R$/MWh), por localidade geográfica (como polos industriais específicos), por porte da empresa ou ainda em função da receita líquida anual.

Tais resultados demonstram não apenas a multiplicidade dos prejuízos enfrentados pelo setor industrial, mas a necessidade urgente de mecanismos de compensação, regulação e prevenção voltados à melhoria da qualidade do fornecimento energético. Ao transformar os impactos técnicos em perdas econômicas mensuráveis, a metodologia oferece uma ferramenta poderosa para embasar políticas públicas, decisões empresariais e a priorização de investimentos em infraestrutura energética.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

A partir da coleta e análise dos dados obtidos junto às empresas industriais de diferentes setores econômicos, foi possível identificar padrões significativos de prejuízos relacionados às interrupções no fornecimento de energia elétrica. Os dados revelam que os impactos financeiros variam consideravelmente conforme o setor de atividade, a escala de produção, o tipo de processo envolvido e o tempo de interrupção.

No segmento químico, por exemplo, observou-se que os custos associados a paradas energéticas podem ultrapassar facilmente a marca de meio milhão de reais para eventos com duração de até uma hora, mesmo em empresas com consumos de energia bastante distintos. Em algumas plantas, perdas financeiras de R$ 270 mil a R$ 500 mil foram registradas em episódios pontuais, demonstrando que o volume de consumo não é, isoladamente, um determinante para o impacto, mas sim a sensibilidade do processo produtivo. Em termos proporcionais ao consumo, empresas do mesmo setor apresentaram custos unitários que chegaram a R$ 238,10 por megawatt-hora (R$/MWh), valor significativamente superior à média observada para outros setores industriais, sugerindo vulnerabilidade elevada da produção química a distúrbios na qualidade da energia (Melo, 2008).

Ao detalhar as origens desses custos, verificou-se que a maior parte das perdas está concentrada na interrupção das vendas, representando cerca de 72% do total. Outras parcelas expressivas incluem perdas com matéria-prima comprometida, custos para retomar a produção, e gastos operacionais decorrentes da interrupção. Esse perfil de perdas demonstra que os danos ultrapassam a esfera técnica e atingem diretamente os resultados financeiros e comerciais das empresas, dificultando o cumprimento de prazos e contratos. Já no setor metalúrgico, os custos médios em interrupções curtas, como de apenas 1 segundo, giraram em torno de R$ 30 mil, com algumas exceções.

Para falhas prolongadas de uma hora, os prejuízos chegaram a R$ 70 mil em média, ainda que com variações específicas conforme o tipo de processo produtivo. Apesar de menores em relação ao setor químico, esses valores são relevantes, principalmente quando acumulados ao longo do tempo. As perdas, nesse segmento, estão associadas sobretudo à deterioração de produtos finalizados, vendas não concretizadas e investimentos em medidas de proteção juntos, esses fatores chegaram a representar quase 100% dos prejuízos totais em algumas indústrias (Melo, 2008).

A análise do consumo específico por energia revelou ainda que, para o setor metalúrgico, os custos relativos ao consumo são proporcionalmente mais baixos, com médias entre R$ 0,02 e R$ 0,25 por MWh, o que, embora abaixo da média geral de outros setores (entre R$ 1,50 e R$ 45,00/MWh), não elimina a preocupação, já que o impacto operacional se mantém considerável.

Por fim, no setor têxtil, foram constatadas diferenças expressivas entre empresas do mesmo ramo. Em casos mais leves, perdas de R$ 1 mil a R$ 4 mil por hora de interrupção foram

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

registradas, enquanto em outras situações o prejuízo atingiu a faixa de R$ 63 mil, sugerindo que a estrutura produtiva e a complexidade do parque industrial influenciam diretamente na vulnerabilidade ao fornecimento elétrico. Independentemente do porte ou setor, os dados analisados reforçam a conclusão de que interrupções energéticas, mesmo que breves, representam uma ameaça real à continuidade operacional e à sustentabilidade financeira das empresas, afetando produtividade, reputação comercial e competitividade (Melo, 2008).

A análise dos custos gerados por falhas no fornecimento de energia elétrica no setor têxtil e alimentício evidência como empresas de diferentes portes e características operacionais são afetadas de maneiras distintas por interrupções mesmo de curta duração. No setor têxtil, observou-se uma discrepância considerável entre o porte das empresas analisadas, especialmente em relação ao consumo energético e à receita líquida anual. Uma das empresas, classificada como de médio porte, apresentou consumo energético equivalente a apenas 15% daquele verificado em uma empresa de grande porte do mesmo segmento, enquanto seu faturamento representava apenas 3% da receita da maior. Apesar disso, ao se observar os custos proporcionais ao consumo de energia (R$/MWh), as diferenças entre elas se reduzem significativamente.

Em termos absolutos, os prejuízos variaram entre R$ 1 mil e R$ 187 mil por evento de interrupção. Já quando se considera o custo proporcional ao consumo, os valores oscilaram entre aproximadamente R$ 2,00 e R$ 2,77 por megawatt-hora nas empresas de médio porte valores inferiores à média setorial, que gira em torno de R$ 45,00/MWh. A exceção ficou por conta de uma empresa cujo custo por MWh atingiu cerca de R$ 26,79, posicionando-a mais próxima da faixa crítica observada em setores de maior complexidade operacional. Ao examinar a composição dos prejuízos financeiros no setor têxtil, os maiores impactos foram associados à necessidade de reparos em equipamentos danificados (59% do total), seguida pelos custos relacionados à proteção e segurança dos sistemas (19%) e perdas com vendas não realizadas (8%) (Melo, 2008).

No setor de produtos alimentares, os dados também revelam perdas importantes, ainda que em menor escala quando comparadas a outros ramos industriais mais intensivos em energia. As perdas médias registradas para eventos de uma hora ficaram em torno de R$ 17 mil, valor que, apesar de representar um impacto significativo para empresas de médio porte, está muito abaixo dos montantes observados em segmentos como o químico ou metalúrgico, cujos custos podem ultrapassar facilmente os R$ 500 mil por hora.

Os custos específicos por consumo energético também demonstraram grande variação entre as empresas. Em uma delas, os valores oscilaram entre 0,2 e 3,26 R$/MWh, permanecendo abaixo da média nacional. Já em outra empresa do mesmo segmento, o custo chegou a 13,5 R$/MWh durante uma interrupção de uma hora, ainda assim inferior à média de referência para o setor industrial como um todo.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

O detalhamento da estrutura de perdas nesse segmento revelou uma distribuição bastante equilibrada entre diferentes tipos de custos: produtos em elaboração comprometidos durante a falha, deterioração de matéria-prima armazenada, horas extras necessárias para compensar a paralisação e os custos associados à retomada dos processos produtivos após a estabilização da rede elétrica cada um representando cerca de 25% do prejuízo total. Esses dados reforçam que, embora os impactos financeiros absolutos possam ser menores em setores como o alimentício, os prejuízos relativos ao porte e à capacidade financeira das empresas ainda representam um entrave expressivo à continuidade operacional e à previsibilidade da produção (Melo, 2008).

Em síntese, tanto no setor têxtil quanto no alimentício, o custo da má qualidade da energia vai além das perdas técnicas, atingindo a estrutura econômica e produtiva das empresas em níveis que variam conforme o grau de automatização, a complexidade das operações e a sensibilidade dos equipamentos. Mesmo valores proporcionalmente baixos, quando recorrentes, comprometem a rentabilidade e exigem investimentos adicionais em proteção e mitigação, tornando a questão da estabilidade energética um elemento decisivo para a eficiência industrial e a sustentabilidade econômica dessas atividades.

Os impactos da má qualidade da energia elétrica são ainda mais expressivos em setores industriais que operam com produtos de alto valor agregado, como os ramos farmacêutico e veterinário. Nestes, mesmo interrupções relativamente curtas são capazes de gerar prejuízos extremamente elevados. Em uma das empresas analisadas, classificada como de médio porte, foi identificado um custo total superior a R$ 4 milhões em razão de uma única interrupção com duração de uma hora. Tal montante supera em muito os valores médios observados em outros segmentos industriais, que oscilam geralmente entre R$ 90 mil e R$ 500 mil para o mesmo período. Este resultado revela o grau de criticidade operacional envolvido nesse tipo de produção, onde a precisão, a rastreabilidade e a integridade das informações são tão importantes quanto a produção física dos bens.

Essa sensibilidade operacional fica ainda mais evidente quando se analisa o custo proporcional ao consumo energético, que chegou a ultrapassar os R$ 9.300 por megawatt-hora um valor extremamente elevado, frente à média do setor industrial que gira em torno de R$ 45/MWh. Essa disparidade sugere que os danos não estão apenas associados ao volume de energia utilizado, mas sim à natureza dos processos, à dependência de sistemas digitais e à impossibilidade de tolerar falhas.

Além disso, o detalhamento dos custos mostrou que três parcelas concentraram aproximadamente 75% das perdas: os reparos em equipamentos danificados, as vendas não realizadas e, principalmente, a perda de dados e informações armazenadas digitalmente. Esses elementos reforçam o papel central da informação e do controle de qualidade na cadeia produtiva farmacêutica, tornando este segmento altamente vulnerável a qualquer distúrbio elétrico. Em contrapartida, no setor mecânico, os prejuízos apresentaram um perfil diferente. Os custos

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

variaram de R$ 150 mil para eventos de curtíssima duração até cerca de R$ 400 mil para uma interrupção de uma hora valores dentro da média nacional, mas ainda assim impactantes.

Quando analisados proporcionalmente ao consumo energético, os valores foram mais modestos, oscilando entre R$ 0,6 e R$ 1,67 por MWh, permanecendo significativamente abaixo da média setorial. Isso indica que, embora o impacto direto sobre o processo produtivo mecânico seja relevante, ele tende a ser menos intensivo economicamente quando comparado a setores com maior complexidade sanitária, tecnológica ou regulatória.

Outros setores industriais também demonstraram variações consideráveis quanto aos prejuízos causados por falhas na qualidade da energia elétrica. A indústria de transformação de minerais não metálicos, por exemplo, apresentou valores bastante baixos, com perdas que não ultrapassaram R$ 6,5 mil mesmo para interrupções de uma hora. O mesmo padrão foi identificado em empresas de materiais elétricos e de comunicação, onde o prejuízo estimado ficou em torno de R$ 117 mil. Já em empresas de vestuário, calçados e artigos têxteis, os custos foram ainda mais reduzidos, girando em torno de R$ 2,5 mil para eventos pontuais.

A análise comparativa desses segmentos deixa evidente que a exposição ao risco de prejuízo em decorrência de falhas no fornecimento energético depende fortemente da complexidade dos processos, da dependência de equipamentos sensíveis e da estrutura de armazenamento e rastreabilidade das informações e dos produtos. Mesmo com volumes energéticos semelhantes, empresas com maior exigência tecnológica e menor margem de tolerância a variações tendem a sofrer mais intensamente os efeitos da instabilidade elétrica.

Assim, o panorama geral revelado pela análise mostra que a má qualidade da energia afeta setores de maneira desigual, sendo especialmente crítica em indústrias com processos contínuos, exigência de controle rigoroso, sensibilidade digital ou elevado valor unitário dos produtos. Isso reforça a necessidade de estratégias segmentadas de mitigação, onde políticas de investimento em infraestrutura elétrica, sistemas de proteção e monitoramento devem ser adaptadas às características de cada setor.

Em setores como o farmacêutico e veterinário, por exemplo, o gerenciamento da qualidade da energia deve ser tratado como parte central da estratégia de produção, dado o potencial de perdas milionárias mesmo com falhas pontuais. Já em setores de menor impacto unitário, o foco pode estar em medidas preventivas mais básicas, mas ainda assim relevantes para manter a confiabilidade do processo. Em todos os casos, a padronização das medições e o detalhamento dos custos associados são essenciais para orientar a tomada de decisão e justificar investimentos em soluções de mitigação de distúrbios elétricos.

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Consolidação dos Resultados dos Custos das Perdas

Ao consolidar os dados obtidos nas diferentes empresas industriais avaliadas, foi possível construir uma visão abrangente sobre os impactos financeiros associados às interrupções no fornecimento de energia elétrica. Essa consolidação permitiu a elaboração de modelos matemáticos que representam o comportamento médio dos custos, tanto em termos absolutos (valores monetários diretos) quanto proporcionais ao consumo energético (R$/MWh), com base em diferentes durações de interrupção.

As análises demonstraram que os custos médios em função do tempo de falha iniciam- se na faixa de R$ 90 mil para interrupções curtas de cerca de um segundo até dois minutos e crescem progressivamente até alcançar, em média, R$ 500 mil quando a interrupção se estende por uma hora. Esse comportamento crescente foi descrito com precisão por uma curva exponencial com alta correlação, refletindo a sensibilidade crescente dos processos industriais à continuidade do fornecimento elétrico. A equação ajustada aos dados mostra a relação exponencial entre tempo e custo, destacando a gravidade dos prejuízos mesmo com aumentos relativamente pequenos na duração das falhas.

Quando se considera o custo proporcional ao consumo de energia, os resultados seguem uma tendência semelhante. Para interrupções extremamente breves, os valores giram em torno de R$ 1,50 por megawatt-hora (R$/MWh), aumentando significativamente com o tempo, até atingir cerca de R$ 45,00/MWh em uma hora de paralisação. Essa progressão evidencia que, mesmo quando o volume de energia não é elevado, a interrupção pode causar perdas substanciais por comprometer processos contínuos, danificar produtos em andamento ou forçar a repetição de etapas produtivas.

Entre os setores avaliados, destacam-se diferenças importantes. No segmento de vestuário, calçados e artigos de tecidos, por exemplo, foi identificado um custo de até R$ 961 mil para uma única hora de interrupção valor que supera a média geral observada em outros setores industriais. Esse dado revela a vulnerabilidade de processos com baixa automação, mas alto volume de produção, onde interrupções geram perdas em larga escala de produtos em fabricação. Além disso, o custo por consumo de energia nesse setor alcançou R$ 240,25/MWh, posicionando-se muito acima da média nacional, o que reflete não apenas o prejuízo direto, mas também a baixa densidade energética do processo em comparação aos danos causados.

Outros setores, como o de transformação de minerais não metálicos, apresentaram custos absolutos significativamente menores. Nesses casos, os prejuízos variaram de R$ 2,5 mil a R$ 6,5 mil para interrupções de até uma hora, refletindo processos menos sensíveis à instabilidade elétrica. No entanto, em setores como materiais elétricos e de comunicação, os valores observados foram substancialmente mais altos, com custos de até R$ 163,64/MWh, também acima da média, indicando processos sensíveis e produtos com maior valor agregado.

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

A decomposição dos custos revelou padrões recorrentes entre os diferentes setores. Na indústria de materiais elétricos e comunicação, por exemplo, os principais componentes das perdas foram os custos com reparos de equipamentos (31%), perda de vendas (15%) e perda de informações (30%). Já no setor de vestuário e calçados, os maiores prejuízos se concentraram em produtos em processo que foram descartados (38%), vendas não realizadas (36%) e produtos finalizados danificados (16%). Juntas, essas parcelas representaram até 90% do total das perdas em determinados casos.

A comparação entre setores específicos reforça essas diferenças. Em gráfico comparativo entre uma empresa mecânica e uma empresa do setor de alimentos, observou-se que a primeira apresentou custos médios entre R$ 150 mil e R$ 400 mil por hora de interrupção, enquanto a segunda apresentou valores muito inferiores, em torno de R$ 17 mil, ainda que ambas atuem com processos industriais. Essa diferença se deve principalmente à complexidade dos processos, ao nível de automação e à criticidade da operação contínua.

Esses dados consolidados revelam que, embora os efeitos das interrupções variem conforme o setor e a empresa, há um padrão claro de crescimento exponencial dos prejuízos à medida que o tempo de falha aumenta. Eles também demonstram a necessidade de avaliações personalizadas da qualidade da energia, com base no perfil produtivo de cada instalação, para que medidas preventivas e corretivas possam ser adotadas com maior eficiência técnica e viabilidade econômica. A utilização de curvas de tendência, como as obtidas neste estudo, é uma ferramenta valiosa para estimar perdas potenciais e justificar investimentos em sistemas de proteção, monitoramento e mitigação de distúrbios energéticos.

CONSIDERAÇÕES

Este trabalho teve como objetivo analisar os principais distúrbios na qualidade da energia elétrica e seus impactos em sistemas produtivos. A partir da análise, conclui-se que a qualidade da energia elétrica é um fator determinante para o bom funcionamento dos sistemas produtivos e para a eficiência energética de consumidores industriais, comerciais e residenciais. Ao longo deste estudo, foram abordados os principais distúrbios que comprometem a integridade do fornecimento elétrico, como flutuações de tensão, harmônicos, variações de frequência, desequilíbrios e transitórios. Tais eventos, além de afetarem diretamente a operação de equipamentos eletrônicos e de potência, também geram impactos econômicos significativos, como perdas de produção, queima de componentes e interrupções em processos críticos.

Com base na literatura técnica analisada, observou-se que a evolução tecnológica dos equipamentos e a crescente digitalização dos processos tornam as cargas mais sensíveis às variações na qualidade da energia. Isso amplia a necessidade de se adotar estratégias mais eficazes de monitoramento e controle. A aplicação de metodologias avançadas de avaliação de

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

perdas fornece dados essenciais para gestores de energia, reguladores e concessionárias, contribuindo para a definição de políticas mais eficazes e investimentos direcionados à melhoria do serviço.

Conclui-se, portanto, que garantir a qualidade da energia elétrica é mais do que atender aos requisitos normativos; trata-se de assegurar a competitividade industrial, a segurança operacional e a sustentabilidade do setor elétrico. O avanço das metodologias de avaliação, aliado a investimentos em infraestrutura e à conscientização dos diversos agentes envolvidos, será decisivo para enfrentar os desafios impostos por um sistema elétrico cada vez mais exigente e interdependente.

REFERÊNCIAS

ARRUDA, E. F. **Análise de distúrbios relacionados com a qualidade da energia elétrica utilizando a transformada Wavelet**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003. Disponível em: https://doi.org/10.11606/D.18.2003.tde-25102007-090916. Acesso em: 10 nov. 2025.

CARVALHO, B. C. **Desenvolvimento de modelo computacional de sistemas eólicos utilizando geradores síncronos para estudos de desempenho no contexto da qualidade da energia elétrica**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006. Disponível em: https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14338. Acesso em: 10 nov. 2025.

FERREIRA, D. D.; MARQUES, C. A. G.; CERQUEIRA, A. S. et al. Sistema automático de detecção e classificação de distúrbios elétricos em qualidade da energia elétrica. **SBA: Controle & Automação**, v. 20, n. 1, p. 53–62, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0103-17592009000100005. Acesso em: 10 nov. 2025.

KAGAN, N.; ROBBA, E. J.; SCHMIDT, H. P. **Estimação de indicadores de qualidade da energia elétrica**. São Paulo: Ed. Blucher, 2009.

MEDEIROS, C. A. G. **Contribuições para a conceituação, medição, efeitos e análise dos limites relacionados com flutuações de tensão**. 2003. 201 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2003. Disponível em: https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/27353. Acesso em: 10 nov. 2025

MEHL, E. L. M. **Qualidade da energia elétrica**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná – UFPR, 2012. Disponível em: http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/downloads/qualidade-energia.pdf. Acesso em: 09 abr. 2025.

MELO, Miguel Otávio Barreto Campelo de. Avaliação do impacto da qualidade de energia elétrica na produção industrial: proposta de metodologia. **Produto & Produção**, v. 9, n. 3, p. 15–25, 2008.

OLESKOVICZ, Mário et al. Estudo comparativo de ferramentas modernas de análise aplicadas à qualidade da energia elétrica. **Revista Controle & Automação**, v. 17, n. 3, p. 331–341, 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0103-17592006000300007. Acesso em: 10 nov. 2025.

PAULILO, G. Conceitos gerais sobre qualidade da energia. *In:* **Qualidade de Energia**. [S. l.]: O Setor Elétrico, 2013. Disponível em: https://osetoreletrico.com.br. Acesso em: 19 maio 2025.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

PINTO, J. G. **Nova topologia de UPQC sem transformador para compensação de problemas de qualidade de energia elétrica**. 2012. Tese (Doutorado) – Universidade do Minho, Braga, 2012. Disponível em: https://repositorium.sdum.uminho.pt. Acesso em: 30 maio 2025.

ISSN: 2675-6218 - RECIMA21

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.