



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS
GERAIS *CAMPUS* NEPOMUCENO

BRUNO FERNANDES DE SALES

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

INSPEÇÃO E MEDIÇÃO DE QUALIDADE DE ENERGIA
NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA

NEPOMUCENO

2025

BRUNO FERNANDES DE SALES

**INSPEÇÃO E MEDIÇÃO DE QUALIDADE DE
ENERGIA NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no curso de graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Campus Nepomuceno como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador(a): Hélciner Vitor Ferreira

NEPOMUCENO

2025

BRUNO FERNANDES DE SALES

INSPEÇÃO E MEDIÇÃO DE QUALIDADE DE ENERGIA
NA INDÚSTRIA CIMENTEIRA

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Centro Federal de Educação Tecnológica de
Minas Gerais como requisito parcial para
obtenção do título de Bacharel em Engenheiro
Eletricista.

Data de aprovação: 18 de Julho de 2025

Banca examinadora:

Prof.º Cassio Henrique Garcia Costa
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) -
Campus Nepomuceno

Prof.º André Luíz Marcomini
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) -
Campus Nepomuceno

Prof.º Ludmila Aparecida de Oliveira
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) -
Campus Nepomuceno

DEDICATÓRIA

Dedico este momento primeiramente a Deus, por ter me sustentado em todos os momentos desta caminhada. Agradeço-Lhe por cada livramento no trajeto nestes anos, por me fortalecer nos momentos difíceis e, quando pensei em desistir, por renovar minhas forças e me conceder este grande presente que é minha graduação.

À minha esposa, Taise da Rocha Ferreira, meu amor, e minha eterna gratidão. Obrigado por estar ao meu lado todos estes anos nas horas boas e ruins, por suportar minha ausência em tantos momentos, por ser minha auxiliadora, companheira meu eterno amor. Seu amor incondicional tornou essa jornada mais leve e possível. EU TE AMO!

Agradeço aos meus pais e às minhas irmãs por todo o apoio. Em especial à minha mãe Ilza Maria dos Santos Sales, mãe seu exemplo de fé, suas palavras sábias e seu amor foram luz em meu caminho, obrigado por tudo de coração, Amo muito a Senhora, melhor Mãe do Mundo. EU TE AMO!

Sou grato também à igreja que congrego, ao Meu Pastor Moises, pelos ensinamentos, correções quando necessário e pelas orações que sempre tem feito por todos, às crianças, adolescentes, jovens, homens e mulheres, por todas as orações nestes anos e por todos momentos juntos de comunhão.

Aos colegas de faculdade, minha sincera gratidão por cada ajuda, direta ou indireta, pelas trocas de aprendizado, amizade e companheirismo.

Em memória, ao meu Líder e Pai Espiritual, Airton Xavier de Barros, minha eterna gratidão. Mesmo não estando mais entre nós, sua vida continua sendo exemplo e inspiração para mim, na fé, na caminhada pessoal e por ser inspiração na escolha desta profissão. Agradeço por cada ensinamento, pelos conselhos sábios, por sua liderança firme e amorosa. Levarei comigo, com carinho, as experiências que compartilhamos e o impacto que você teve em minha jornada. Sua memória permanecerá viva em meu coração.

Aos meus colegas de empresa Intercement, minha profunda gratidão por cada gesto de apoio, especialmente nos momentos em que precisei conciliar trabalho em turno com os estudos, em especial (Adriano Ribeiro, José Geraldo, Paulo Henrique, Alexandro Magalhães) que sempre estavam dispostos a ajudar, aos coordenadores Cristiano Ferraz e Admilsio por acreditarem em mim, ao meu coordenador Dalison Mendes pela oportunidade de fazer parte de sua equipe e por cada dica valiosa que tem me ajudado no meu crescimento profissional, ao coordenador Rangel Correa pelos ensinamentos e oportunidades junto a equipe elétrica, o que me ajudou e possibilitou ampliar meus conhecimentos no setor, aos coordenadores Selmo Mafra e Rafael Gomes pelo exemplo de liderança inspiradora e suporte nos momentos de dúvidas, a Gestora de Recursos Humanos Rafaella Campos por ser tão presente e firme em cumprir o seu papel em nossa companhia, admiro muito sua postura, ao Engenheiro Wagner Messias, pela postura como profissional e pessoa, e pelo vasto conhecimento que consegue passar para todos ao seu redor. A todo o time planejamento, que são apoios essenciais nesta nova fase, ao time Elétrica e Mecânica da unidade por compartilhar experiências profissionais. Vocês são inspiração. E, por fim, agradeço ao professor e orientar Helcine Vitor Ferreira, por ter aceitado este desafio e ter conduzido com toda a presteza e cordialidade nesta minha tese, não menos importante aos queridos professores que compuseram a banca, Professor Cássio e Professora Ludmila por fazerem parte deste momento. Agradeço a cada servidor público, cada professor por cada momento que passei nesta Escola, nesta Faculdade, nesta Casa, o meu muito obrigado.

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho de conclusão de curso foi possível graças ao apoio e incentivo de diversas pessoas, às quais expresso minha sincera gratidão.

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder saúde, força e sabedoria ao longo dessa caminhada. Ao meu orientado, Helciner Vitor Ferreira, pela orientação precisa, paciência e dedicação durante o desenvolvimento deste trabalho, contribuindo de forma fundamental para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Aos professores e colegas do curso de Engenharia Elétrica do CEFET Campus Nepomuceno, pela troca de conhecimentos e pelas experiências compartilhadas ao longo dessa jornada.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais, pelo amor incondicional, apoio e incentivo constante, que foram essenciais em todos os momentos da minha formação.

Aos amigos e demais pessoas que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, deixo aqui meu sincero muito obrigado.

RESUMO

A análise da qualidade da energia elétrica é um tema de relevância crescente, especialmente para consumidores com sensibilidade a distúrbios elétricos, como indústrias, estabelecimentos comerciais, empresas de telecomunicações e serviços públicos. A qualidade do fornecimento de energia influencia diretamente o desempenho e a confiabilidade das cargas, podendo afetar significativamente a operação de equipamentos eletroeletrônicos. No contexto da indústria cimenteira, esse fator assume papel crucial, dado o alto consumo energético e a complexidade dos sistemas envolvidos. Este trabalho teve como objetivo a avaliação dos dados obtidos em relatórios de qualidade da energia elétrica em uma planta industrial cimenteira localizada no município de Ijaci, Minas Gerais. As medições foram realizadas ao longo do ano de 2022 em dois pontos distintos definidos pela empresa. Os parâmetros monitorados incluíram: potência ativa, reativa e aparente; tensão; corrente; fator de potência; frequência; harmônicas até a 28ª ordem; distorção harmônica total de tensão (DHTV) e de corrente (DHTI). Os dados foram coletados por meio de medidores instalados em cubículos, com referência de tensão obtida dos secundários dos transformadores de potencial (TPs) e de corrente dos transformadores de corrente (Tcs). O valor médio registrado para o fator de potência foi de 0,937 e não foram identificadas ocorrências de sobretensão superiores a 5% em relação à tensão nominal. A análise do estudo de caso, apresentada por meio de gráficos e tabelas, indicou conformidade com os limites estabelecidos pelas normas técnicas.

Palavras-chave: Qualidade da energia elétrica, planta industrial, grandezas elétricas, indústria cimenteira.

ABSTRACT

The analysis of electric power quality is an increasingly relevant topic, especially for consumers sensitive to electrical disturbances, such as industries, commercial establishments, telecommunications companies, and public service providers. The quality of power supply directly affects the performance and reliability of electrical and electronic loads, potentially compromising equipment operation. In the cement industry context, this factor is particularly critical due to the high energy consumption and complexity of the systems involved. This study aimed to conduct a case analysis based on data from power quality reports in an industrial cement plant located in the municipality of Ijaci, Minas Gerais, Brazil. Measurements were taken throughout 2022 at two distinct points defined by the company. The monitored parameters included: active, reactive, and apparent power; voltage; current; power factor; frequency; harmonic components up to the 28th order; total harmonic distortion of voltage (THDv) and current (THDi). Data collection was carried out using meters installed in switchgear, with voltage reference obtained from the secondary side of potential transformers (VTs) and current from current transformers (CTs). The average recorded power factor was 0.937, and no overvoltage events exceeding 5% of nominal voltage were identified. The case study analysis, presented through graphs and tables, demonstrated compliance with the limits established by technical standards.

Keywords: Power quality, industrial plant, electrical parameters, cement industry.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Mapa do ONS Horizonte 2029.....	17
Figura 2 - Visão geral de um sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.....	18
Figura 3 - Alguns distúrbios típicos que ocorrem na forma de onda de tensão.....	24
Figura 4 - O conceito de qualidade da energia elétrica refere-se à influência de diferentes.....	28
Figura 5 - Interrupção momentânea devido a um curto-circuito e subsequente religamento...	29
Figura 6 - Afundamento de tensão causado por uma flata fase-terra.....	30
Figura 7 - Elevação de tensão devido a uma falta fase-terra.....	31
Figura 8 - Onda deformada e suas componentes harmônicas.....	32
Figura 9 - Forma de onda com distorções harmônicas de 3ª e 5ª ordem.....	36
Figura 10 - Esquema da configuração típica de um filtro ativo.....	37
Figura 11 - Soma vetorial da potência aparente.....	37
Figura 12 - Localização da planta industrial.....	39
Figura 13 - Equipamentos presentes numa planta industrial cimenteira (produção de Clínquer).....	41
Figura 14 - Ciclo produtivo do cimento.....	41
Figura 15 - Subestação da planta industrial.....	43
Figura 16 - Analisador de energia RE-7000 da EMBRASUL.....	44
Figura 17 - Gráfico das medições de Potência trifásica ativa, reativa e aparente.....	48
Figura 18 - Gráfico da medição de tensão de fase EQ1.....	49
Figura 19 - Zonas de conformidade.....	50
Figura 20 - Desbalanço de tensão conforme IEC EQ1 - 138 kV.....	51
Figura 21 - Gráfico das medições de corrente de fase EQ1 - 138 kV.....	51
Figura 22 - Gráfico da medição de fator de potência trifásico EQ1 - 138 kV.....	52
Figura 23 - Gráfico de DHTV.....	53
Figura 24 - Gráfico de DHTI.....	53
Figura 25 - Comportamento das frequências.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos nos sistemas elétricos.....	24
Tabela 2: Categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos nos sistemas elétricos.....	27
Tabela 3: Ordem, frequência e sequência dos harmônicos para equipamentos de eletrônica de potência.....	34
Tabela 4: Limites de distorção de tensão.....	45
Tabela 5: Resultados médios, máximos e mínimos de tensão, corrente e potência no ponto EQ1 (Tempo de integração: 1 s).....	47
Tabela 6: Potências médias por fase e trifásicas no período.....	48

SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CEM – Compatibilidade Eletromagnética

CT's – Current Transformers (Transformadores de Corrente)

DHTI – Distorção Harmônica Total de Corrente

DHTV – Distorção Harmônica Total de Tensão

EMC – Electromagnetic Compatibility (Compatibilidade Eletromagnética)

FP – Fator de Potência

IEE – Instituto de Energia e Ambiente

IEC – International Electrotechnical Commission

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

PCC – Ponto de Acoplamento Comum

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

QDBT – Quadro de Distribuição de Baixa Tensão

QEE – Qualidade da Energia Elétrica

THD – Total Harmonic Distortion (Distorção Harmônica Total)

THDi – Total Harmonic Distortion of Current (Distorção Harmônica Total de Corrente)

THDv – Total Harmonic Distortion of Voltage (Distorção Harmônica Total de Tensão)

TR – Tensão de Referência

VT's – Voltage Transformers (Transformadores de Potencial ou de Tensão)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. OBJETIVOS.....	15
2.1 Geral.....	15
2.2 Específicos.....	15
3. JUSTIFICATIVAS.....	16
4. REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
4.1 Sistema Elétrico Nacional.....	16
4.2 Qualidade da Energia.....	19
4.3 Fenômenos que Afetam a Qualidade da Energia Elétrica.....	23
4.3.1 Transitórios.....	26
4.3.2 Variações de Tensão de Curta Duração.....	28
4.3.3 Interrupções.....	29
4.3.4 Afundamento de Tensão.....	30
4.3.5 Elevação de Tensão.....	31
4.3.6 Harmônicos.....	32
4.4 Fator de Potência.....	37
5. PLANTA INDUSTRIAL.....	39
5.1 Localização.....	39
5.2 Caracterização da Empresa.....	40
5.3 Caracterização do Processo Produtivo.....	40
6. METODOLOGIA.....	42
6.1 Medições.....	42
6.2 Valores de Referência Adotados.....	44
6.2.1 Fator de Potência.....	44
6.2.2 Limites de Variação de Tensão.....	44
6.2.3 Variação da Frequência.....	46
6.2.4 Normas de Referência.....	46
7. RESULTADOS.....	47
8. CONCLUSÃO.....	56
REFERÊNCIAS.....	57

1. INTRODUÇÃO

A crescente dependência da energia elétrica em todas as esferas da sociedade contemporânea torna essencial a garantia de um fornecimento energético eficiente e estável. A intensificação da concorrência industrial, somada ao crescimento no consumo de energia elétrica, tem estimulado avanços tecnológicos, visando melhorar a eficiência dos processos e reduzir perdas e custos na fabricação do produto final.

Porém, a carência de estudos e análises adequadas para a implementação de novas tecnologias em muitas indústrias tem ocasionado problemas de qualidade de energia, resultando em prejuízos e interrupções na produção. Em razão disso, concessionárias e consumidores têm se mostrado cada vez mais atentos à Qualidade da Energia Elétrica (QEE). Os principais distúrbios associados à QEE são os afundamentos de tensão, os transitórios e os harmônicos.

A qualidade da energia elétrica vai além da simples disponibilidade, envolve parâmetros técnicos como a forma de onda, a estabilidade da tensão e da corrente, além da frequência do sistema. Essas variáveis são determinantes para o desempenho e a durabilidade dos equipamentos e motores elétricos, especialmente em ambientes industriais, onde interrupções ou distorções nos sinais elétricos podem gerar prejuízos expressivos.

A expressão “qualidade da energia elétrica” refere-se à conformidade das grandezas elétricas com os padrões técnicos definidos pelas normas regulamentadoras aplicáveis no país. No contexto brasileiro, destacam-se as normas IEEE ANSI 1159-2009 e IEEE 519-2014 como principais referências nesse aspecto (MEHL, 2001).

De acordo com a norma IEEE 1159-2009, a qualidade da energia elétrica está relacionada a diversos fenômenos eletromagnéticos que afetam as formas de onda da tensão e da corrente em pontos específicos do sistema elétrico, em determinados instantes de tempo. Para atender à demanda por energia com qualidade adequada, torna-se essencial o uso de analisadores de qualidade de energia, equipamentos responsáveis por monitorar perturbações que podem comprometer o desempenho da rede, como variações abruptas, distorções ou até interrupções no fornecimento. Esses dispositivos permitem identificar falhas e distúrbios que afetam diretamente a estabilidade do sistema elétrico.

A norma IEEE 519-2014 define limites recomendados para a distorção harmônica de tensão (THDv) e corrente (THDi) nos pontos de acoplamento comum (PCC), visando garantir a qualidade da energia e o desempenho adequado dos sistemas elétricos (IEEE, 2014).

Problemas relacionados à má qualidade de energia podem ocasionar perdas na produção industrial, interrupções no fornecimento em áreas residenciais, além de danos ou mau funcionamento de equipamentos elétricos e eletrônicos. Sendo assim, devido a necessidade de garantir uma boa qualidade de energia elétrica, o presente trabalho aborda algumas das principais causas que comprometem a qualidade de energia elétrica, classificando-as segundo os efeitos que geram na rede.

Garantir que a energia elétrica chegue ao consumidor final com qualidade é um desafio. A eletricidade percorre extensas redes de distribuição e passa por diversos transformadores e equipamentos, o que pode causar alterações em suas características. Além disso, não existe a possibilidade de remover ou descartar a energia que não atenda aos padrões de qualidade. As alterações na qualidade de energia (desvios da perfeição) podem ser classificadas em cinco categorias distintas:

- Interrupções (Blackouts);
- Sub ou Sobretensão de longa duração;
- Afundamentos de tensão e surtos de curta duração;
- Transitório;
- Distorções Harmônicas.

Cada tipo de distúrbio relacionado à qualidade da energia elétrica possui origens distintas, sendo provocado por diferentes fatores dentro do sistema elétrico. Falhas na rede, por exemplo, podem gerar problemas de grande escala, impactando simultaneamente um número significativo de consumidores.

Da mesma forma, distúrbios gerados por uma única instalação, como a ocorrência de transitórios em cargas não lineares ou manobras de comutação, podem se propagar pelo subsistema e comprometer a qualidade da energia fornecida a outros usuários conectados à mesma rede.

O interesse em novas técnicas e tecnologias de análise da energia elétrica, instrumentos de medição, bem como equipamentos capazes de mantê-la dentro de padrões pré-definidos, consolidaram nas últimas décadas a expressão Qualidade da Energia Elétrica (QEE), a qual hoje representa uma área específica na engenharia.

No setor industrial, toda e qualquer característica que possa causar uma diferenciação da energia de um fornecedor para outro, passou a ser extremamente importante. Além disso várias características associadas a qualidade da energia são definidas em contratos de fornecimento e compra da energia, baseadas em normas e portaria pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

A Qualidade de Energia não se aplica apenas à garantia de que a energia fornecida a uma determina indústria esteja apenas dentro dos limites padrões estabelecidos, uma grande parte dos equipamentos industriais, comerciais e até mesmos residenciais podem provocar distúrbios que resultam na alteração de sinais elétricos responsáveis pela circulação da energia.

A energia elétrica de boa qualidade é aquela que garante o funcionamento contínuo, seguro e adequado dos equipamentos elétricos e os processos associados, sem causar danos ao meio ambiente e o bem-estar da população (CORRÊA, 2007).

A presença de distúrbios na rede, como variações de tensão, harmônicas e quedas momentâneas, pode comprometer desde linhas de produção até sistemas de automação e controle. A análise dos relatórios de qualidade de energia elétrica torna-se uma ferramenta estratégica para a identificação de não conformidades e para a tomada de decisões corretivas e preventivas. Além de contribuir para a redução de custos operacionais, essas análises garantem maior confiabilidade e segurança no fornecimento.

A proposta central do trabalho é analisar os dados referentes à qualidade da energia elétrica coletados em diferentes setores de uma planta industrial cimenteira situada no município de Ijaci, no sul do estado de Minas Gerais. A investigação se baseia nos principais parâmetros e grandezas estabelecidos pelas normas técnicas do setor elétrico, notadamente as diretrizes da IEEE 1159-2009 e IEEE 519-2014. Os medidores de qualidade de energia monitoraram, nos pontos de interesse, as seguintes grandezas:

- Potências ativa, reativa e aparente;
- Tensão;
- Corrente;
- Fator de potência;
- Frequência;
- Harmônicas;
- Distorção Harmônica Total de Tensão (DHTV);

- Distorção Harmônica Total de Corrente (DHTI).

Busca-se compreender o comportamento das variáveis elétricas ao longo do sistema industrial e identificar possíveis desvios que possam comprometer a eficiência operacional e o desempenho dos equipamentos. O estudo desenvolve-se a partir de uma revisão de literatura aliada à análise de um estudo de caso referente ao monitoramento da qualidade da energia elétrica na planta, realizado no ano de 2022.

A metodologia adotada caracteriza-se por uma abordagem qualitativa, fundamentada em pesquisa bibliográfica sobre os principais conceitos e parâmetros de qualidade de energia. Para o trabalho, foram utilizados dados secundários oriundos de medições realizados na entrada da estratégicos da planta industrial: a entrada da rede elétrica na subestação (EQ1 – 138 kV), possibilitando uma avaliação comparativa das condições de fornecimento e distribuição interna de energia.

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Analisar a qualidade da energia elétrica em uma planta industrial do setor cimenteiro, com base nos principais parâmetros definidos pelas normas do setor elétrico, a fim de identificar distúrbios que possam comprometer a eficiência e a confiabilidade das operações industriais.

2.2 Específicos

O trabalho apresentou os seguintes objetivos específicos:

- Realizar uma revisão de literatura sobre os principais parâmetros que definem qualidade da energia elétrica, com base em normas como IEEE 1159-2009 e IEEE 519-2014;
- Avaliar, o comportamento das grandezas elétricas (fator de potência, corrente, potência, frequência e distorção harmônica total) na subestação da planta industrial analisada;
- Identificar eventuais não conformidades que possam comprometer a eficiência energética e a operação segura dos equipamentos.

3. JUSTIFICATIVAS

A realização de estudos sobre qualidade da energia elétrica torna-se essencial em ambientes industriais complexos, como o setor cimenteiro, onde variações constantes de carga, inserção de equipamentos e entrada de sistemas de compensação reativa ocorrem de forma dinâmica. A medição e o monitoramento contínuo da qualidade da energia são fundamentais sempre que há alterações significativas no perfil de carga, na geração local ou na inserção de dispositivos compensadores, como capacitores e filtros harmônicos.

Essas mudanças podem provocar desequilíbrios, distorções harmônicas, variações de tensão e oscilações no fator de potência, comprometendo o desempenho dos equipamentos e a confiabilidade do processo produtivo. Em indústrias com elevada demanda energética, como as cimenteiras, tais distúrbios podem resultar em perdas operacionais, falhas de máquinas, desperdício de energia e custos adicionais com manutenção corretiva.

Dessa forma, o presente trabalho justifica-se pela necessidade de aprofundar o entendimento técnico sobre a influência da qualidade da energia elétrica no desempenho industrial. Além disso, busca contribuir com subsídios técnicos que auxiliem na tomada de decisões voltadas à correção de distúrbios e à otimização da eficiência energética, promovendo maior estabilidade operacional e redução de perdas.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Sistema Elétrico Nacional

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), instituído em 1998, é o órgão responsável pela coordenação e supervisão da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica que compõem o Sistema Interligado Nacional (SIN). Além disso, atua no planejamento operacional dos sistemas isolados existentes no território brasileiro, sob regulamentação e fiscalização da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). A Figura 1 mostra o mapa geoeletrico da rede de operação Sudeste/Centro Oeste esperado para o 2029 disponibilizado pelo ONS.

De acordo com o Relatório Anual do ONS (2024), o Brasil possui uma capacidade instalada de aproximadamente 234,2 GW, dos quais 35,1 GW são provenientes de micro e minigeração distribuída. A Rede Básica conta com cerca de 175.735 km de linhas de transmissão de alta tensão, fundamentais para a integração das regiões produtoras e consumidoras de energia elétrica no país (ONS, 2024).

O SIN é a principal malha de fornecimento elétrico do país, integrando geradores e concessionárias de distribuição com o objetivo de garantir o equilíbrio entre qualidade, segurança energética e custo operacional. A estrutura interligada do sistema atende praticamente à totalidade da geração e do consumo de energia elétrica nacional, abrangendo quase todo o território brasileiro (ver na Figura 1). A exceção é a cidade de Boa Vista, capital de Roraima, que permanece fora da rede interligada.

Figura 1- Mapa do ONS Horizonte 2029



Fonte: ONS, 2024.

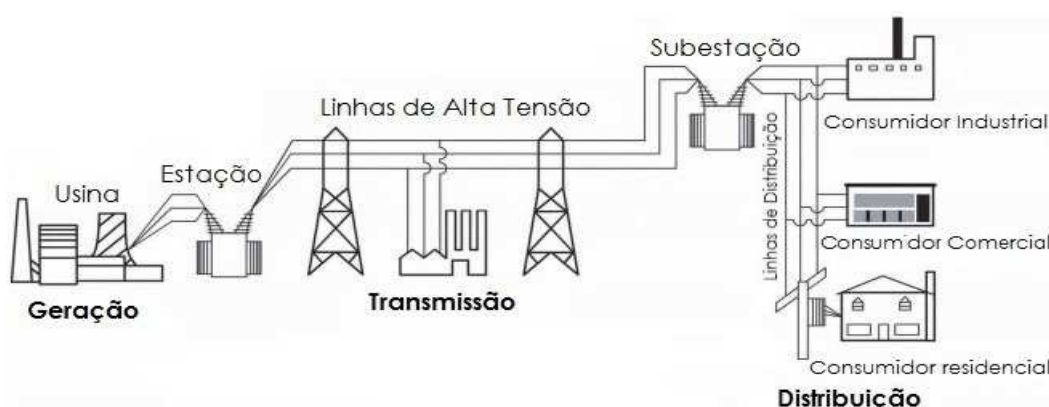
Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) são compostos por instalações e equipamentos responsáveis por gerar, transmitir e distribuir energia elétrica. Sua origem está na ligação entre usinas geradoras e cargas específicas, como industriais ou urbanas, com linhas de transmissão projetadas conforme a potência requerida e a distância entre os pontos.

À medida que a demanda energética aumentou, tornou-se necessário integrar diferentes pontos de consumo e geração, o que levou à padronização da frequência e das tensões para permitir interligações mais eficientes e confiáveis.

Com o crescimento das cargas e a necessidade de geração em maior escala e a distâncias maiores, os projetos passaram a demandar linhas de transmissão mais extensas e com tensões mais elevadas. Esse processo resultou na formação dos grandes SEPs atuais, caracterizados pela unificação técnica e pela capacidade de fornecer energia com maior segurança e menor custo por megawatt-hora distribuído, otimizando o desempenho do sistema ao longo de sua vida útil (BICHELS, 2018).

A Figura 2 apresenta uma representação geral e simplificada de um sistema elétrico completo, abrangendo as etapas de geração, transmissão e distribuição de energia (BLUME, 2007).

Figura 2 - Visão geral de um sistema de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica



Fonte: BLUME, 2007.

4.2 Qualidade da Energia

Observa-se que, mesmo em países com alto grau de industrialização, há uma demanda crescente por revisão dos critérios relacionados à qualidade e à confiabilidade da energia elétrica. Essa temática se torna ainda mais relevante no cenário atual de transformação do setor elétrico brasileiro, marcado por uma progressiva redução da participação estatal e, em contrapartida, pelo aumento da presença de agentes privados. Nesse contexto competitivo, a oferta de energia com elevados padrões de qualidade torna-se um diferencial estratégico entre as concessionárias (ALVES, 1999).

Desde a década de 1980, tanto as empresas fornecedoras de energia quanto os próprios consumidores vêm demonstrando preocupação com a qualidade da energia elétrica (QEE), uma vez que ambos figuram como os principais responsáveis pelas perturbações no sistema, ao mesmo tempo em que também são os mais afetados por suas consequências (DUGAN et al., 2002).

Tal relevância se reflete no fortalecimento de uma área específica da QEE dedicada à pesquisa e desenvolvimento de soluções voltadas para os desafios enfrentados por consumidores e geradoras. Esse movimento é evidenciado pelo crescimento contínuo na produção de artigos científicos e na realização de congressos especializados que tratam do tema (CORRÊA, 2007).

A literatura técnica define os problemas de qualidade de energia como qualquer anormalidade nos níveis de tensão, corrente ou frequência do fornecimento elétrico, os quais podem gerar impactos significativos sobre os equipamentos conectados, tanto nas instalações dos consumidores quanto nos sistemas de distribuição (HADDAD, 2004).

No contexto brasileiro, a regulamentação e fiscalização dos padrões associados à qualidade da energia elétrica (QEE) são competências da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Cabe a esse órgão a formulação de normas e diretrizes técnicas que assegurem a padronização e a eficiência do fornecimento de energia elétrica pelas concessionárias (CORRÊA, 2007).

Esse conjunto normativo está reunido nos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), com destaque para o Módulo 8, que trata especificamente da QEE. Esse módulo estabelece definições, categorização de fenômenos e parâmetros técnicos, além de valores de referência aplicáveis aos aspectos como tensão em regime permanente e perturbações relacionadas.

Entretanto, para que os níveis de tensão permaneçam dentro de faixas operacionais adequadas, tanto nas redes de transmissão quanto nas de distribuição, é necessário empregar mecanismos de controle, visto que esses sistemas estão frequentemente sujeitos a oscilações. Mesmo quando essas variações se mantêm dentro dos limites regulamentares, podem ocasionar falhas no funcionamento de equipamentos elétricos sensíveis utilizados em diferentes segmentos industriais e comerciais (OLESKOVICZ, 2006).

De acordo com Xavier (2016), a implementação de um sistema eficiente de monitoramento da qualidade da energia elétrica requer o conhecimento prévio dos padrões operacionais definidos pelas normas técnicas elaboradas por órgãos reguladores nacionais e internacionais.

Além da definição dos critérios de desempenho do sistema elétrico, essas normas também estabelecem diretrizes específicas para os sistemas de medição, com o objetivo de uniformizar os resultados obtidos e garantir a confiabilidade das análises (BONATTO, 1999).

Contudo, observa-se que ainda não existe uma padronização global entre os diferentes institutos de normalização. Assim, no cenário atual, coexistem normas brasileiras com recomendações internacionais.

Essa ausência de harmonização normativa pode acarretar prejuízos aos consumidores, principalmente quando estes adquirem equipamentos projetados para operar sob condições elétricas vigentes em outros países, as quais podem divergir significativamente das condições locais. Tal incompatibilidade pode comprometer o funcionamento adequado dos dispositivos, resultando em falhas técnicas e danos operacionais, conforme alerta Santos (2011).

No Brasil, a responsabilidade pela regulamentação e fiscalização do sistema elétrico nacional é atribuída à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Em 2009, a agência instituiu os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), que consolidam as diretrizes técnicas aplicáveis às atividades de distribuição de energia no país.

No contexto internacional, destaca-se a atuação da International Electrotechnical Commission (IEC), fundada em 1906 em Londres e atualmente sediada em Genebra, Suíça. A IEC tem como missão promover a padronização técnica global nos campos da eletricidade e da eletrônica, contribuindo para a harmonização dos critérios de certificação e para a eliminação de barreiras técnicas ao comércio internacional.

Um dos conjuntos normativos mais relevantes elaborados por essa entidade é a família de normas IEC 61000, voltada à compatibilidade eletromagnética *Electromagnetic Compatibility* (EMC). A EMC estabelece que qualquer equipamento deve operar de forma a não interferir no funcionamento de outros dispositivos situados no mesmo ambiente, nem ser suscetível a interferências externas (LOPEZ, 2013).

A estrutura das normas IEC 61000 está organizada em diferentes partes, cada uma com objetivos específicos:

Quadro 1 - Estrutura das normas IEC 61000

Parte	Objetivos específicos
1 - Geral	Apresenta os princípios fundamentais, conceitos e definições básicas relacionados à compatibilidade eletromagnética
2 - Ambiente	Define os procedimentos para descrição e categorização dos ambientes em que os equipamentos serão utilizados
3 – Limites	Especifica os limites admissíveis de emissão de distúrbios e os níveis de imunidade exigidos para cada tipo de equipamento
4 – Técnicas de testes e medição	Estabelece os métodos aplicáveis à concepção de sistemas de medição e aos ensaios de distúrbios elétricos
5 – Guia de instalação e medição	Fornecer orientações para a instalação adequada dos equipamentos, de modo a elevar a imunidade a interferências eletromagnéticas
6 – Normas genéricas	Define padrões abrangentes de emissão e imunidade, aplicáveis a diferentes ambientes de operação

Fonte: IEC, 2018.

A qualidade da energia elétrica constitui uma área específica de estudo dentro dos Sistemas de Potência, tendo ganhado destaque nas últimas décadas devido à crescente complexidade dos sistemas elétricos e à maior sensibilidade dos equipamentos modernos. Nos últimos trinta anos, esse tema tem sido alvo de diversas pesquisas e iniciativas voltadas à compreen-

são, diagnóstico e aprimoramento das condições do fornecimento de energia, visando garantir maior confiabilidade e eficiência operacional (BRONZEADO, 1997).

Idealmente, um sistema elétrico trifásico deve apresentar tensões perfeitamente senoidais, equilibradas e com frequência e amplitude constantes em qualquer ponto da rede. Qualquer desvio em relação a essas condições, quando ultrapassa limites aceitáveis, é caracterizado como um problema de qualidade da energia elétrica.

No cenário brasileiro, a preocupação com a padronização da QEE levou à criação do Grupo de Qualidade de Energia Elétrica (GQEE), uma iniciativa conjunta entre o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Este grupo técnico, composto por especialistas da área, é responsável por estabelecer critérios e procedimentos para a mensuração e avaliação da qualidade da energia no país.

Como marco regulatório importante, em 2009 a ANEEL publicou os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Esse conjunto normativo consolida as diretrizes relativas à operação dos sistemas de distribuição, incluindo aspectos técnicos e operacionais relacionados à QEE. Entre os principais objetivos do PRODIST, segundo a própria ANEEL (2021), destacam-se:

- Assegurar uma operação segura, eficiente, confiável e com qualidade nos sistemas de distribuição;
- Garantir o acesso equitativo aos sistemas por todos os agentes setoriais;
- Estabelecer normas técnicas para o planejamento da expansão, operação, medição e controle da qualidade da energia;
- Regular o intercâmbio de informações entre os agentes envolvidos;
- Padronizar os requisitos técnicos na interface com a Rede Básica e complementar os Procedimentos de Rede.

O PRODIST está estruturado em oito módulos, sendo eles:

Quadro 2 - Módulos do PRODIST

Módulos	
1	Introdução
2	Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição
3	Acesso ao Sistema de Distribuição
4	Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição
5	Sistemas de Medição
6	Informações Requeridas e Obrigações
7	Cálculo de Perdas na Distribuição
8	Qualidade da Energia Elétrica

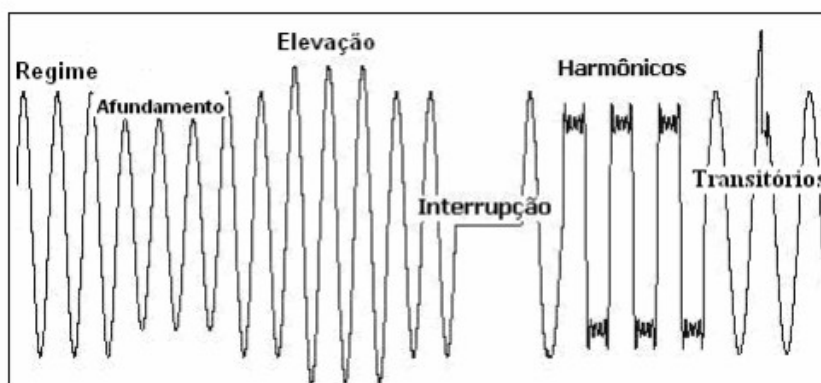
Fonte: ANEEL, 2018.

Este último, o Módulo 8, trata especificamente dos critérios, métodos e indicadores associados à QEE, sendo referência fundamental para as concessionárias, geradoras, consumidores e demais agentes do setor elétrico nacional.

4.3 Fenômenos que Afetam a Qualidade da Energia Elétrica

O conceito de qualidade da energia elétrica refere-se à influência de diferentes fenômenos eletromagnéticos sobre as formas de onda de tensão e corrente nos sistemas elétricos de potência, levando em consideração variáveis de tempo e local de ocorrência. A figura apresentada a seguir fornece uma visão geral dos principais distúrbios que podem afetar a forma de onda da tensão, como afundamentos momentâneos (sags), elevações súbitas (swells), interrupções temporárias, distorções harmônicas e transitórios elétricos, todos elementos que podem comprometer a estabilidade e o desempenho do sistema.

Figura 3 - Alguns distúrbios típicos que ocorrem na forma de onda de tensão



Fonte: CORRÊA, 2007.

As nomenclaturas e definições adotadas para descrever cada um desses fenômenos seguem o padrão estabelecido na norma *Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, desenvolvida pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE). Tal padronização tem como finalidade promover clareza e uniformidade na comunicação técnica entre pesquisadores, engenheiros e demais profissionais que atuam na área de qualidade da energia elétrica (Tabela 1).

Tabela 1: Categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos nos sistemas elétricos

Categoria	Conteúdo Espectral Típico	Duração Típica	Amplitude de Tensão Típica
1.0 - Transitórios			
1.1 - Impulsivo			
1.1.1 – Nanosegundo	5ns	< 50 ns	
1.1.2 - Microsegundo	1 μ s	50 ns – 1 ms	
1.1.3 - Milisegundo	0,1 ms	> 1 ms	
1.2 - Oscilatórios			
1.2.1 – Baixa frequência	< 5kHz	3 – 50 ms	0,4 pu
1.2.2 – Média frequência	5 – 500 kHz	20 μ s	0,4 pu
1.2.3 Alta frequência	0,5 - 5MHz	5 μ s	0,4 pu

2.0 Variações de tensão de curta duração
2.1 Instantânea

2.1.1 Interrupção	0,5 – 30 ciclos	< 0,1 pu
2.1.2 Afundamento de tensão	0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 pu
2.1.3 Elevação de tensão	0,5 – 30 ciclos	1,1 – 1,8 pu

2.2 – Momentânea

2.2.1 Interrupção	30 ciclos – 3 s	< 0,1 pu
2.2.2 Afundamento de tensão	30 ciclos – 3 s	0,1 – 0,9 pu
2.2.3 Elevação de tensão	30 ciclos – 3 s	1,1 – 1,2 pu

2.3 - Temporária

2.3.1 Interrupção	3 s – 1 minuto	< 0,1 pu
2.3.2 Afundamento de tensão	3 s – 1 minuto	0,1 – 0,9 pu
2.3.3 Elevação de tensão	3 s – 1 minuto	1,1 – 1,2 pu

3.0 – Variações de Tensão de Longa Duração

3.1 – Interrupção Sustentada	> 1 minuto	0,0 pu
3.2 – Subtensão Sustentada	> 1 minuto	0,8 – 0,9 pu
3.3 – Sobreensão Sustentada	> 1 minuto	1,1 – 1,2 pu

4.0 Desequilíbrio de Tensão

regime permanente	0,5 – 2 %
-------------------	-----------

5.0 – Distorções de Forma de Onda

5.1 – Nível CC		regime permanente	0 – 0,1 %
5.2 - Harmônicos	de ordem 0 - 100	regime permanente	0 – 20 %
5.3 – Inter-harmônicos	0 – 6 kHz	regime permanente	0 – 2 %
5.4 – Notching		regime permanente	
5.5 - Ruídos		regime permanente	0 – 1 %

6.0 – Flutuação de Tensão

< 25 Hz	intermitente	0,1 – 7 %
---------	--------------	-----------

7.0 – Variação de Frequência do Sistema

< 10 s

Fonte: DUGAN, 1996 (Adaptado por Corrêa 2007).

4.3.1 Transitórios

Os fenômenos conhecidos como transitórios ocorrem em sistemas elétricos em virtude de diferentes condições operacionais. Na maioria dos casos, esses eventos estão associados a variações abruptas de corrente que, ao interagir com a impedância do sistema, produzem picos instantâneos de tensão. Diversas situações podem originar esses fenômenos, incluindo a operação de cargas intermitentes, manobras de bancos de capacitores, curtos-circuitos à terra, acionamento de dispositivos semicondutores e falhas em condutores. Um caso específico de transitório de alta severidade são as descargas atmosféricas, que envolvem altos níveis de energia e tempos de resposta extremamente curtos (IEEE, 1995 apud Corrêa, 2007).

Embora de curta duração, os transitórios possuem grande relevância técnica, pois submetem os componentes dos sistemas elétricos a solicitações elevadas de tensão e/ou corrente, podendo comprometer sua integridade e funcionamento.

Esses fenômenos são geralmente classificados em duas categorias principais: os transitórios impulsivos e os transitórios oscilatórios. Os primeiros, normalmente originados por descargas atmosféricas, caracterizam-se por mudanças abruptas nos valores de tensão ou corrente, ou ambos, e por apresentarem pulsos unidirecionais, com polaridade positiva ou negativa, cuja frequência difere significativamente da frequência nominal da rede. Já os transitórios oscilatórios são mais comumente associados a operações de chaveamento no sistema elétrico (CORRÊA, 2007).

Transitórios Oscilatórios são fenômenos que ocorrem, principalmente, em situações como a energização de linhas de transmissão, o desligamento abrupto de cargas indutivas, a eliminação de falhas no sistema elétrico, bem como durante o chaveamento de transformadores e bancos de capacitores. Esses eventos resultam em oscilações rápidas na forma de onda, podendo comprometer a estabilidade da rede e afetar o funcionamento de equipamentos sensíveis (POLL, 2013).

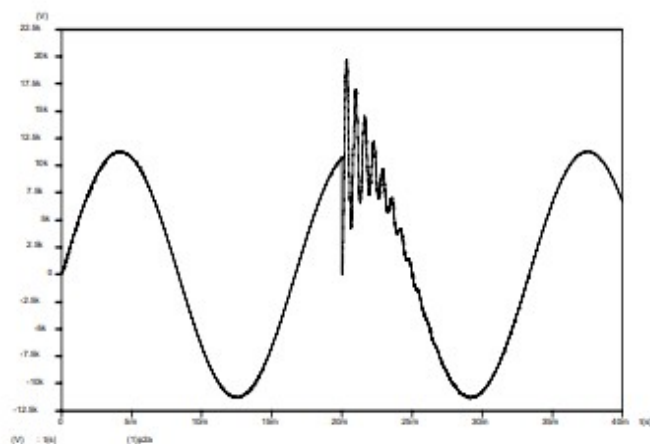
Tabela 2: Categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos nos sistemas elétricos

Tipo de Transistório Oscilatório	Faixa de Frequência	Causas Comuns	Características Principais	Efeitos e Medidas de Mitigação
Baixa Frequência	300 a 900 Hz (também < 300 Hz em alguns casos)	Energização de bancos de capacitores; Ferrorressonância; Energização de transformadores	Oscilações de tensão com magnitudes típicas de 1,3 a 1,5 pu (máx. 2,0 pu) - Duração entre 0,5 a 3 ciclos - Frequência comum entre 300–900 Hz	Pode causar sobretensões temporárias; uso de amortecimento e controle de chaveamento recomendado
Média Frequência	10 – 50 kHz	Energização de capacitores; chaveamento de disjuntores; resposta a transistórios impulsivos	Correntes transitórias rápidas; oscilações não senoidais; associadas a eventos de chaveamento	Podem desgastar proteções; mitigação com filtros e coordenação de proteção
Alta Frequência	Centenas de kHz até MHz	Descargas atmosféricas; chaveamento de circuitos indutivos; desenergização de cargas indutivas	Impulsos de altíssima frequência; curta duração; causam interferências em cargas eletrônicas	Filtros de alta frequência e transformadores isoladores são recomendados

Fonte: CORRÊA, 2007).

De acordo com a apresentação realizada por Corrêa (2007), a Figura 4 demonstra os resultados obtidos a partir da simulação da energização de um banco de capacitores com capacidade de 600 kVAr de potência reativa, inserido em uma rede elétrica operando a uma tensão nominal de 13,8 kV. Essa simulação permite visualizar os efeitos transitórios associados à comutação desses equipamentos capacitivos no sistema.

Figura 4 - O conceito de qualidade da energia elétrica refere-se à influência de diferentes



Fonte: CORREA, 2007.

4.3.2 Variações de Tensão de Curta Duração

As variações de curta duração correspondem a alterações na amplitude da tensão de fornecimento, que se mantêm por um intervalo de tempo inferior ou igual a um minuto, conforme os limites previamente estabelecidos (DUGAN, 1996).

Quadro 3: Classificação das variações de tensão de curta duração

Tipo de variação	Duração	Descrição
Variação instantânea	Inferior a 30 ciclos (~0,5s)	Oscilações muito rápidas de tensão, geralmente imperceptíveis a olho nu
Variação momentânea	Entre 30 ciclos e 3 segundos	Perturbações perceptíveis que podem causar reinicialização de equipamentos
Variação temporária	Entre 3 s e 1 minuto	Oscilações de maior duração, capazes de afetar o funcionamento de cargas sensíveis

Fonte: IEEE 1159-2009.

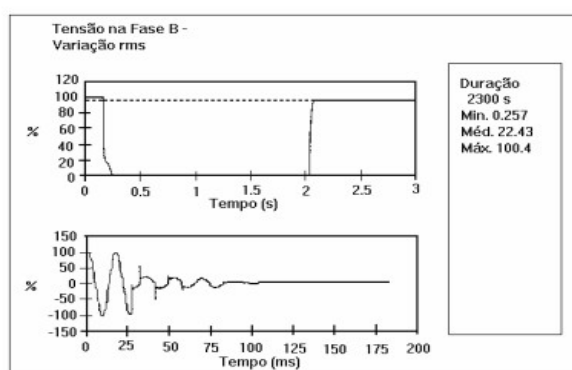
As variações de curta duração representam eventos relevantes no contexto da análise da qualidade da energia elétrica. Entre esses distúrbios, destacam-se especialmente a interrupção momentânea, o afundamento de tensão e a elevação temporária dos níveis de tensão, por sua frequência de ocorrência e impacto sobre os equipamentos elétricos.

4.3.3 Interrupções

As interrupções no fornecimento de energia elétrica geralmente decorrem de falhas nos equipamentos do sistema, defeitos na rede elétrica ou disfunções nos sistemas de controle automatizado. Esses eventos são usualmente categorizados com base em sua duração e pela redução da tensão de alimentação para níveis inferiores a 10% do valor nominal estabelecido.

A Figura 5 mostra as o comportamento da tensão elétrica em uma fase durante uma momentânea interrupção devido a um curto-circuito e seu subsequente religamento.

Figura 5 - Interrupção momentânea devido a um curto-circuito e subsequente religamento



Fonte: CORRÊA, 2007.

Além disso, como mostra o Quadro 4, é comum classificar tais interrupções em dois tipos principais: momentâneas, quando ocorrem por um curto intervalo de tempo, e temporárias, quando sua duração é mais prolongada (Dugan et al., 2002)..

Quadro 4: Classificação das interrupções conforme o tempo de duração

Tipo de interrupção	Tempo de duração	Causa comum	Características técnicas	Impactos na indústria
Momentânea	30 ciclos a 3 segundos	Curto-circuito, falhas temporárias na rede	Tensão reduzida a <10% do valor nominal; pode ser precedida por afundamento	Pode provocar desligamento de cargas sensíveis; reinício de processos; interferência em CLPs e inversores
Temporária	3 segundos a 1 minuto	Falha prolongada, atuação de proteção/religador	Perda completa da tensão de suprimento por um período limitado	Interrupção do processo produtivo; perda de dados em sistemas computacionais

Fonte: Adaptado de IEEE Std 1159-2009 e dos autores [Dugan et al., 2002] e [Corrêa, 2007].

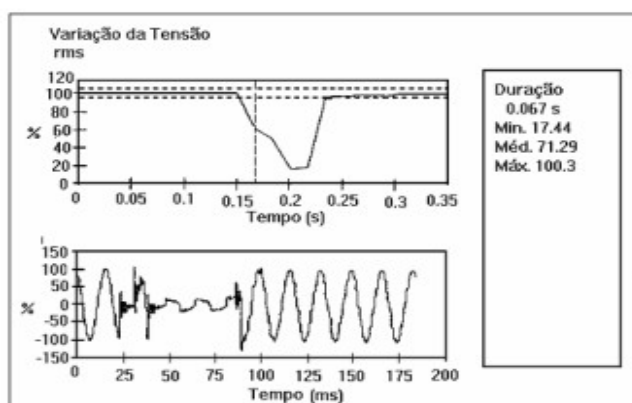
Historicamente, a presença de distorções na rede elétrica apresentava níveis que não despertavam maiores preocupações. Contudo, com o aumento significativo da utilização de cargas eletrônicas — como inversores de frequência, computadores e demais dispositivos sensíveis —, esse índice passou a exercer um impacto considerável sobre o desempenho do sistema elétrico. Atualmente, tais cargas são amplamente reconhecidas como fatores contribuintes para a desativação inesperada de equipamentos, o que compromete a continuidade dos processos industriais e pode acarretar prejuízos financeiros expressivos às empresas (CORRÊA, 2007).

4.3.4 Afundamento de Tensão

O afundamento de tensão (Figura 6), ou sag, refere-se a uma queda temporária na magnitude da tensão elétrica, ocorrendo por um curto período de tempo. Esse fenômeno é caracterizado pela redução do valor eficaz da tensão alternada, variando entre 10% e 90% do seu valor nominal (isto é, entre 0,1 e 0,9 pu), na frequência fundamental, com duração que pode variar desde meio ciclo até, no máximo, um minuto (OLIVEIRA, 2000).

A Figura 6 mostra o afundamento de tensão causado por uma falha fase-terra, que consiste basicamente em uma queda temporária no nível de tensão elétrica em um sistema de energia, geralmente devido a um curto-circuito entre uma fase e a terra.

Figura 6 - Afundamento de tensão causado por uma flata fase-terra



Fonte: CORRÊA, 2007

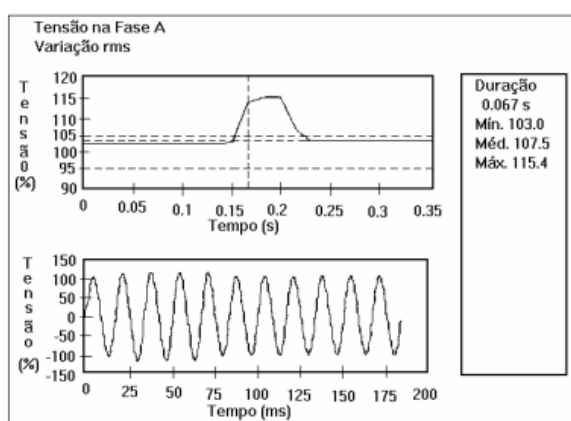
Esse tipo de perturbação está geralmente relacionado à ocorrência de falhas em redes de transmissão e distribuição de energia elétrica. No entanto, também pode ter como causa a energização súbita de cargas de grande porte, a partida de motores de elevada potência ou ainda a corrente de magnetização inicial associada à energização de transformadores (adaptado de DUGAN et al., 2002).

4.3.5 Elevação de Tensão

O afundamento de tensão, ou sag, refere-se a uma queda temporária na magnitude da tensão elétrica, ocorrendo por um curto período de tempo. Esse fenômeno é caracterizado pela redução do valor eficaz da tensão alternada, variando entre 10% e 90% do seu valor nominal (isto é, entre 0,1 e 0,9 pu), na frequência fundamental, com duração que pode variar desde meio ciclo até, no máximo, um minuto (OLIVEIRA, 2000).

A Figura 7 exemplifica uma situação de sobretensão decorrente de uma falha do tipo fase-terra. Embora elevações de tensão também possam ocorrer devido à desconexão repentina de grandes blocos de carga ou pela energização de extensos bancos de capacitores, essas ocorrências tendem a ser menos frequentes quando comparadas às sobretensões originadas por falhas fase-terra em sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica (adaptado de Dugan et al., 2002).

Figura 7 - Elevação de tensão devido a uma falta fase-terra



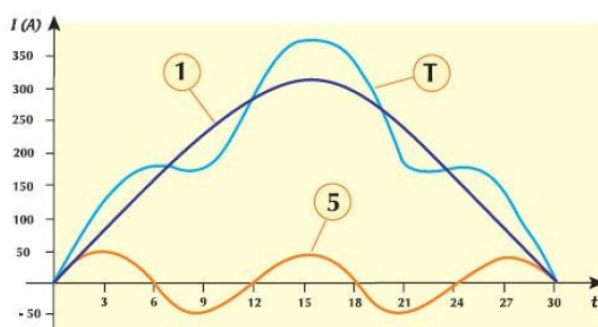
Fonte: CORRÊA, 2007.

4.3.6 Harmônicos

As harmônicas caracterizam-se por serem distúrbios contínuos no sistema elétrico e, por essa razão, não devem ser confundidas com fenômenos transitórios ou de curta duração, como picos momentâneos de sobretensão ou subtensão. Esses eventos mais breves podem, em geral, ser mitigados com o uso de supressores de transitórios ou filtros de linha, os quais, contudo, não são eficazes na redução ou eliminação de harmônicos de tensão e corrente, que exigem abordagens específicas de compensação (IEEE, 2009; Rocha, 2016).

As componentes harmônicas de tensão e corrente caracterizam-se como sinais senoidais cuja frequência corresponde a múltiplos inteiros da frequência fundamental do sistema de alimentação elétrica. Essas componentes, ao se somarem à onda fundamental, resultam na deformação da forma de onda original. Por exemplo, quando se observa a superposição da frequência fundamental (1) com uma onda de quinto harmônico (5), obtém-se uma forma de onda distorcida (T), o que pode ser visualizado graficamente pela adição ponto a ponto dessas duas contribuições (ROCHA, 2006).

Figura 8 - Onda deformada e suas componentes harmônicas



Fonte: ROCHA, 2006.

A presença de harmônicos está diretamente relacionada à degradação da qualidade da energia fornecida. Sistemas elétricos que operam com elevado conteúdo harmônico demonstram baixa qualidade, o que acarreta perdas adicionais, principalmente pela intensificação do efeito Joule em condutores, transformadores e demais componentes do sistema elétrico (Rocha, 2016). Dessa forma, manter níveis adequados de qualidade de energia é condição essencial para garantir a eficiência energética e a segurança das instalações.

Conforme definição da norma IEEE 1159-2009, as harmônicas consistem em componentes de tensão ou corrente senoidais cujas frequências são múltiplos inteiros da frequência fundamental do sistema (normalmente 50 Hz ou 60 Hz). Essas componentes, quando somadas à forma de onda fundamental, provocam distorções que alteram o comportamento esperado da tensão e da corrente. Tais distorções ocorrem devido à presença de cargas com características não lineares, que, mesmo quando alimentadas por formas de onda senoidais ideais, geram correntes distorcidas (IEEE, 2009; Rocha, 2016).

O grau de distorção harmônica em um sistema pode ser avaliado por meio de seu espectro harmônico, que contempla a amplitude e o ângulo de fase de cada componente harmônica individual. No entanto, para simplificação das análises, é comum utilizar-se uma medida consolidada denominada Distorção Harmônica Total (THD – *Total Harmonic Distortion*), que expressa o conteúdo harmônico agregado presente na forma de onda (IEEE, 2009).

Harmônicos, portanto, representam uma forma contínua de perturbação do sistema elétrico, distinta de eventos transitórios, e estão cada vez mais presentes devido à crescente inserção de cargas eletrônicas como fontes chaveadas, inversores e acionamentos estáticos, principalmente em ambientes industriais. Essas distorções comprometem a forma ideal senoidal da tensão, que deveria ser mantida com frequência e amplitude constantes, conforme os critérios de qualidade estabelecidos pelas concessionárias. Além disso, o distúrbio causado por um consumidor pode repercutir negativamente em outros usuários conectados à mesma rede (Rocha, 2016).

As componentes harmônicas de tensão e corrente são caracterizadas como sinais senoidais cujas frequências correspondem a múltiplos inteiros da frequência fundamental do sistema de alimentação elétrica.

A magnitude e a natureza das distorções dependem do tipo de carga não linear envolvida. Contudo, algumas generalizações são aceitas na literatura: os harmônicos ímpares são os que mais frequentemente causam problemas e, em geral, sua magnitude tende a diminuir à medida que a ordem da frequência aumenta (IEEE, 2009).

Tabela 3: Ordem, frequência e sequência dos harmônicos para equipamentos de eletrônica de potência

Ordem	Frequência (Hz)	Sequência
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
n	n*60	(+,-,0)

Fonte: MORENO, 2001.

Duas métricas derivadas da Série de Fourier são amplamente empregadas: a Distorção Harmônica Total (THD), que mede o conteúdo agregado de harmônicos em relação à componente fundamental, e a Distorção Harmônica Individual (TDI), que avalia a contribuição de uma harmônica específica em relação à fundamental. Ambas podem ser aplicadas tanto à análise de tensão quanto de corrente, conforme as equações apresentadas em normas técnicas e literatura especializada (IEEE, 2009; Rocha, 2016). As expressões matemáticas comumente utilizadas para o cálculo da THD em tensão e corrente são apresentadas nas Equações 1 e 2.

$$DHV_T = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{nm\acute{a}x} V_n^2}{V_1^2}} \quad (1)$$

$$DHI_T = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{nm\acute{a}x} I_n^2}{I_1^2}} \quad (2)$$

Onde:

DHV_T= distorção harmônica total de tensão;

DHI_T= distorção harmônica total de corrente;

V_n= valor eficaz da tensão de ordem n;

I_n= valor eficaz de corrente de ordem n;

V₁= valor eficaz de tensão fundamental;

I₁= valor eficaz da corrente fundamental;

n = ordem das harmônicas.

A distorção harmônica individual é um parâmetro técnico utilizado para mensurar o nível de distorção causado por uma componente harmônica específica da tensão ou da corrente elétrica. Essa grandeza representa a relação percentual entre a amplitude de uma harmônica específica e a amplitude da componente fundamental correspondente. Essa medida é essencial para avaliar o impacto isolado de cada harmônico no sistema elétrico, sendo matematicamente expressa por fórmulas padronizadas, conforme demonstrado nas Equações 3 e 4.

$$DHV_I = \frac{V_n}{V_1} \times 100 (\%) \quad (3)$$

$$DHI_I = \frac{I_n}{I_1} \times 100 (\%) \quad (4)$$

Onde:

DHV_I = distorção harmônica individual de tensão;

DHI_I = distorção harmônica individual de corrente.

Na prática, harmônicas de ordens muito elevadas (acima da 25ª ou 50ª, dependendo da aplicação) tendem a ser desprezadas em estudos de sistemas de potência, pois sua influência direta é limitada. No entanto, elas podem interferir em circuitos de baixa potência e eletrônicos sensíveis, exigindo cuidados adicionais (IEEE, 2009).

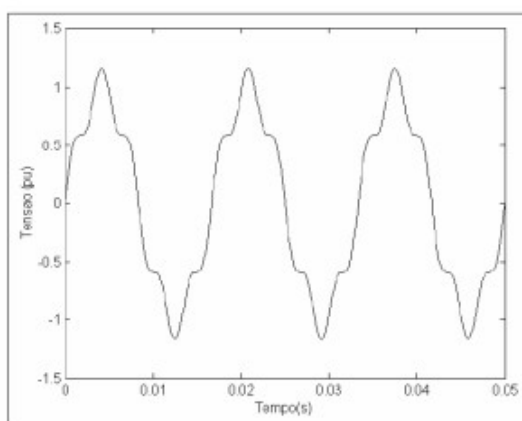
Entretanto, com o avanço da eletrônica de potência e a busca por maior eficiência energética, a presença de harmônicos tornou-se mais frequente e crítica. Equipamentos modernos, cada vez mais sensíveis às variações da qualidade de energia, são suscetíveis a falhas e perda de desempenho quando expostos a elevados níveis de distorção, agravando o desafio de manter a estabilidade e a confiabilidade dos sistemas elétricos (ROCHA, 2016).

Historicamente, o impacto das harmônicas era menos significativo, em parte porque os equipamentos utilizados nas instalações eram mais robustos e menos sensíveis a tais distúrbios.

O funcionamento de equipamentos como motores, transformadores e fornos depende de uma composição específica da energia elétrica, a qual apresenta duas componentes principais: uma ativa e outra reativa. Com o objetivo de mitigar os efeitos provocados por distorções harmônicas geradas por cargas não lineares, é comum, no ambiente industrial, a aplicação de filtros harmônicos, tanto passivos quanto ativos (DUGAN, 2012).

A Figura 9 evidencia as deformações na forma de onda por consequência de distorções harmônicas de 3ª e 5ª ordem.

Figura 9 - Forma de onda com distorções harmônicas de 3ª e 5ª ordem



Fonte: ROCHA, 2016.

Os filtros harmônicos passivos são compostos por circuitos com elementos resistivos, indutivos e capacitivos conectados em série, projetados para bloquear ou atenuar harmônicos específicos presentes na rede elétrica. Já os filtros ativos como mostra a Figura 10, utilizam tecnologias avançadas de eletrônica de potência e operam por meio da injeção de correntes harmônicas com magnitude igual, porém em fase oposta àsquelas geradas pelas cargas distorcidas. Essa estratégia possibilita que a corrente total resultante no sistema seja senoidal, contribuindo assim para a eliminação das distorções harmônicas e a melhoria da qualidade da energia elétrica (PRADO, 2007).

Figura 10 - Esquema da configuração típica de um filtro ativo



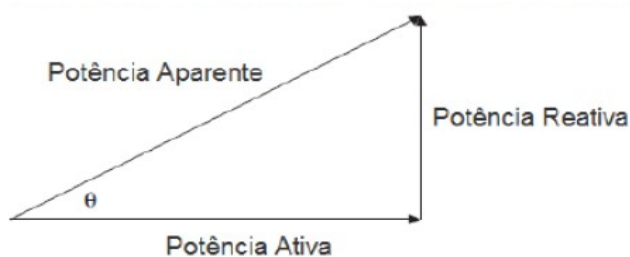
Fonte: PRADO, 2007.

4.4 Fator de Potência

Em sistemas elétricos industriais, a energia consumida por equipamentos como motores, transformadores e fornos é composta por duas parcelas fundamentais: a energia ativa e a energia reativa. A energia ativa, expressa em quilowatt-hora (kWh), é a responsável por efetuar trabalho útil, por exemplo, a rotação mecânica em motores. Já a energia reativa, medida em quilovolt-ampère reativo por hora (kVArh), não realiza trabalho diretamente, mas é imprescindível para a criação dos campos eletromagnéticos que possibilitam o funcionamento adequado de equipamentos eletromecânicos (TORELLI, 2018).

A combinação vetorial entre essas duas formas de energia origina a energia aparente, também denominada energia total (Figura 10).

Figura 11 - Soma vetorial da potência aparente



Fonte: ROCHA, 2016

O fator de potência (FP) é uma métrica que expressa a eficiência com que a energia elétrica é utilizada. Ele representa a razão entre a potência ativa (realmente utilizada para realizar trabalho) e a potência aparente (total fornecida ao sistema) (PAIVA, 2022). Essa relação pode ser representada pela equação 5.

$$f_p = \frac{P(W)}{S(VA)} \quad (5)$$

Onde:

f_p = fator de potência;

P= potência ativa;

S= potência aparente.

Conceitualmente, o fator de potência é frequentemente associado ao cosseno do ângulo de defasagem entre a corrente e a tensão ($\cos \varphi$) Equação 6, porém essa equivalência só é válida para sinais puramente senoidais, ou seja, na ausência de distorções harmônicas.

$$\cos \varphi_n = \frac{P_{hn}}{S_{hn}} \quad (6)$$

Onde:

$\cos \varphi_n$ = fator de potência de uma componente harmônica;

$P_{hn}(W)$ = potência ativa harmônica ordem n;

$S_{hn}(VA)$ = potência aparente harmônica ordem n.

Em sistemas que apresentam harmônicos, o valor do fator de potência deve ser calculado considerando a soma das contribuições de todas as componentes do sinal periódico (Rocha, 2016).

De acordo com a definição da ANEEL, o fator de potência pode também ser descrito como a razão entre a energia ativa e a raiz quadrada da soma dos quadrados das energias ativa e reativa acumuladas em um mesmo intervalo de tempo. Essa definição é coerente com a norma do PRODIST (Procedimentos de Distribuição da Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), que classifica o fator de potência como um dos principais indicadores de qualidade da energia elétrica em regime permanente (ANEEL, 2021).

$$f_p = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (7)$$

Onde:

f_p = fator de potência;

P= potência ativa;

Q= potência reativa.

O controle do fator de potência é essencial para garantir a eficiência energética e evitar penalizações tarifárias impostas pelas distribuidoras de energia elétrica. Valores reduzidos de FP indicam um uso ineficiente da energia fornecida, pois há maior circulação de energia reativa na rede, o que resulta em perdas elétricas adicionais e sobrecarga nos equipamentos de fornecimento e transformação de energia (TORELLI, 2018, ANEEL 2021).

5. PLANTA INDUSTRIAL

5.1 Localização

As medições analisadas neste estudo de caso foram obtidas em uma planta industrial do setor cimenteiro, situada no município de Ijaci, no estado de Minas Gerais. Os dados foram utilizados para avaliar a qualidade da energia elétrica em diferentes pontos do sistema, permitindo a identificação de possíveis distúrbios e não conformidades em relação aos parâmetros normativos.

Figura 12 - Localização da planta industrial



Fonte: Google Earth, 2025.

5.2 Caracterização da Empresa

A empresa Intercement Brasil S.A., que atua sob o nome fantasia Cimento Cauê, desenvolve atividades nos setores de mineração, produção de cimento e coprocessamento de resíduos industriais, estando sediada no município de Ijaci, em Minas Gerais.

No segmento de mineração, a empresa opera com duas unidades de extração de calcário: a Mina Sul, com capacidade produtiva de 1.100 toneladas por hora, e a Mina Santa Helena, com capacidade de 500 toneladas por hora.

Já no processo industrial de fabricação de cimento, a planta apresenta uma capacidade instalada de produção de até 5.000 toneladas diárias de clínquer e 2.000.000 de toneladas anuais de cimento. A marca Cimento Cauê está entre as cinco principais do mercado nacional, consolidando a posição da Intercement como uma das líderes do setor cimenteiro brasileiro.

5.3 Caracterização do Processo Produtivo

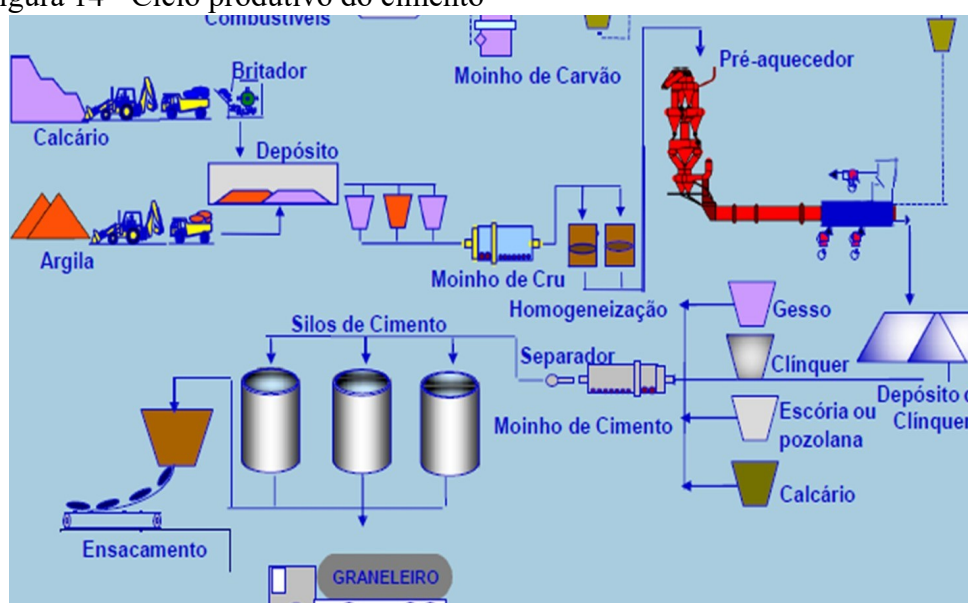
O cimento Portland é um dos mais importantes materiais de construção e altamente empregado pela humanidade. Por definição o cimento é um aglomerante hidráulico resultante da mistura homogênea de Clínquer Portland, material resultante da calcinação a aproximadamente 1450 °C de uma mistura de calcário e argila e eventuais corretivos químicos de natureza silicosa, aluminosa ou ferrífera, o gesso e as adições normalizadas e finamente moídas (CSN, 2019).

O processo de fabricação do cimento Portland, por ser um processo por via seca, do Cimento Portland pode ser descrito sucintamente a seguir e esquematizado na Figura 12.

As principais estruturas que compõem a planta industrial são descritas a seguir, com ênfase especial no forno de produção de clínquer, elemento central do processo produtivo, a Figura 14 ilustra essas unidades.



Figura 14 - Ciclo produtivo do cimento



Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

6. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho consistiu na realização de uma revisão de literatura voltada para as principais anomalias que afetam a Qualidade da Energia Elétrica (QEE), conforme estabelecido pelas normas técnicas do setor (IEE e PRODIST).

Complementarmente, foram analisados dados secundários provenientes de medições e relatórios técnicos de qualidade da energia obtidos em uma planta industrial do setor cimenteiro, com o objetivo de identificar desvios e avaliar o comportamento das grandezas elétricas em diferentes pontos do sistema.

6.1 Medições

As medições da qualidade da energia foram realizadas em 7 pontos definidos pela Intercement e com o tempo de duração em cada ponto. Segue abaixo a lista dos locais de medição designados:

- Entrada – 138,0 kV;
- Secundário do transformador principal 1 – 6,6 kV;
- Secundário do transformador principal 2 – 6,6 kV;
- QDBT Moagem de Cru – 440,0V;
- QDBT Forno – 440,0V;
- QDBT Moagem de Carvão – 440,0V;
- QDBT – Moagem de Cimento 2 – 440,0V.

Os medidores de qualidade de energia monitoraram, nos pontos de interesse, as seguintes grandezas:

- Potências ativa, reativa e aparente;
- Tensão;
- Corrente;
- Fator de potência;
- Frequência;
- Harmônicas até 28ª ordem;
- Distorção Harmônica Total de Tensão (DHTV);
- Distorção Harmônica Total de Corrente (DHTI).

As medições foram realizadas entre os dias 14 a 18 de dezembro de 2022 e contemplaram as condições nominais de operação dos sistemas. Porém no seguinte estudo foi exposto somente a análise da entrada da planta industrial, na Subestação – 138,0 kV, como mostra a Figura 15.

Figura 15 - Subestação da planta industrial



Fonte: Intercement, 2025.

As medições foram realizadas por uma terceirizada nos 14 a 18 de dezembro de 2022, todos os dados presentes no relatório foram cordialmente cedidos pela Intercement.

Para a realização de todas as medições de qualidade da energia elétrica, foram utilizados analisadores de energia modelo RE-7000 (Figura 16), fabricados pela empresa Embrasul, os quais são compatíveis com os requisitos das normas técnicas aplicáveis e oferecem recursos avançados de monitoramento das principais grandezas elétricas.

Figura 16 - Analisador de energia RE-7000 da EMBRASUL



Fonte: Embrasul, 2025.

6.2 Valores de Referência Adotados

6.2.1 Fator de Potência

De acordo com o disposto no Artigo 95, Seção IV da Resolução Normativa nº 414 da ANEEL, os consumidores devem manter o fator de potência, no ponto de conexão com o sistema de distribuição, dentro da faixa de 0,92 a 1, seja no regime indutivo ou capacitivo. O não cumprimento desse intervalo acarreta a cobrança de encargos adicionais, devido ao consumo excessivo de potência reativa, conforme previsto pela regulamentação vigente.

6.2.2 Limites de Variação de Tensão

A avaliação das tensões operacionais nas barras do sistema foi realizada com base nos limites estabelecidos pelas normas NBR 14039 (para média tensão) e NBR 5410 (para baixa tensão). Conforme essas diretrizes, considerou-se admissível uma variação máxima de $\pm 5\%$ em relação ao valor nominal da tensão, sendo esse intervalo aplicado tanto para casos de subtensão quanto de sobretensão durante as condições normais de operação.

Tabela 4: Limites de distorção de tensão

Tensão de barra- mento V no PCC	Harmônica	
	Individual	Distorção harmónica total (%)
	(%)	
$V \leq 1,0 \text{ kV}$	5,0	8
$1 \text{ kV} < V \leq 69 \text{ kV}$	3,0	5
$69 \text{ kV} < V \leq 161 \text{ kV}$	1,5	2,5
$161 \text{ kV} < V$	1,0	1,5 ^a

^aSistemas de alta tensão podem ter até 2,0% de DHT quando a causa é um terminal HVDC cujos efeitos terão sido atenuados em pontos da rede onde futuros utilizadores podem ser ligados

Fonte: IEEE Std. 141 e a IEEE Std. 519.

6.2.3 Variação da Frequência

Para a análise das variações de frequência, adotou-se como critério o limite estabelecido pela norma ABNT NBR 17094-1, especificamente para a Zona B, que admite flutuações de até +3% e -5% em relação à frequência nominal do sistema elétrico. Com base nesse intervalo, a frequência operacional considerada aceitável situa-se entre 57 Hz e 62 Hz.

6.2.4 Normas de Referência

-ABNT NBR 14039:2021 – Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

-ABNT NBR 5356:2018 – Transformadores de potência. Versão corrigida: 2014. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

-ABNT NBR 5410:2004 – Instalações elétricas de baixa tensão. Versão corrigida: 2008. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

-ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. Revisão 10, 2018.

-ANEEL. Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010 – Estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica de forma atualizada e consolidada. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica.

-IEEE Std. 141 (Red Book):1993 – IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants. Institute of Electrical and Electronics Engineers.

-IEEE Std. 1531:2003 – Guide for Application and Specification of Harmonic Filters. Institute of Electrical and Electronics Engineers.

IEEE Std. 519:2014 – Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. Institute of Electrical and Electronics Engineers.

NFPA 70:2020 – National Electrical Code (NEC). National Fire Protection Association.

7. RESULTADOS

As medições foram efetuadas no ponto de entrada da subestação de 138,0 kV, abrangendo o período entre os dias 14 e 15 de dezembro de 2022, com uma duração total de 29 horas, 41 minutos e 50 segundos. Esse intervalo permitiu a captação de dados representativos sob condições operacionais típicas da planta industrial.

Os dados obtidos por meio da medição no ponto EQ1 (entrada da subestação, 138,0 kV) com tempo de integração de 1 segundo, possibilitando uma análise detalhada das variações instantâneas de grandezas elétricas fundamentais.

A Tabela 5 apresenta os valores médios, máximos e mínimos registrados para tensão, corrente e potência durante o período de monitoramento.

Na sequência, a Tabela 6 consolida os valores de **potência ativa, reativa e aparente** em cada fase, bem como os correspondentes valores trifásicos médios.

Tabela 5: Resultados médios, máximos e mínimos de tensão, corrente e potência no ponto EQ1 (Tempo de integração: 1 s)

Grandeza/ Fase	Média	Mínimo	Máximo	Data/Hora (Mínimo)	Data/Hora (Máximo)
Tensão [V] Fase A	81,47 k	78,86 k	574,62 k	20:08:45,00 15/12/2022	16:36:39,00 14/12/2022
Tensão [V] Fase B	81,40 k	78,90 k	574,62 k	20:08:46,00 15/12/2022	16:36:39,00 14/12/2022
Tensão [V] Fase C	81,39 k	78,97 k	82,64 k	20:08:47,00 15/12/2022	22:36:27,00 14/12/2022
Corrente [A] Fase A	110,623	0,00	149,464	16:36:39,00 14/12/2022	13:42:41,00 15/12/2022
Corrente [A] Fase B	110,863	43,053	158,657	15:52:22,00 14/12/2022	18:28:53,00 14/12/2022
Corrente [A] Fase C	108,164	41,511	146,206	15:52:49,00 14/12/2022	13:42:41,00 15/12/2022

Fonte: Intercement, 2022.

Tabela 6: Potências médias por fase e trifásicas no período

Fase	Potência (kW)	Potência Reativa (kVAr)	Potência Aparente (kVA)	Fator de Potência (FP)
Fase A	8,487	3,000	9,001	0,943
Fase B	8,364	3,360	9,013	0,928
Fase C	8,269	2,989	8,793	0,940
Total	25,120	9,348	26,803	0,937

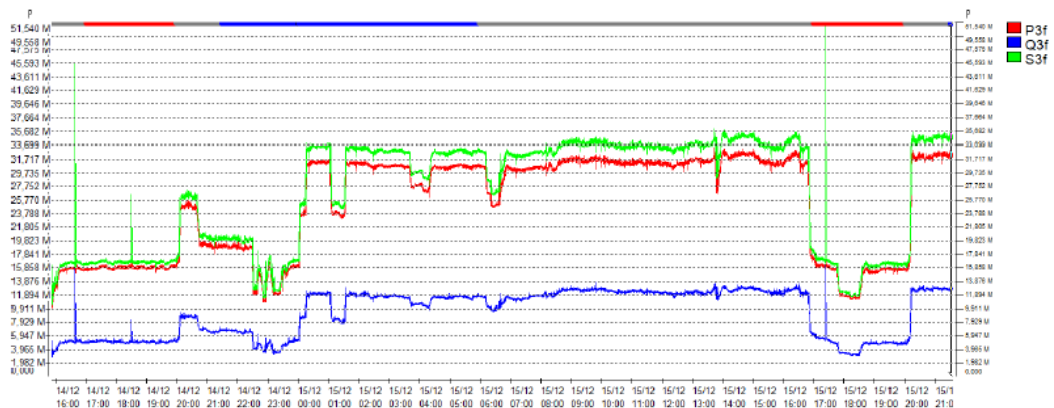
Fonte: Intercement, 2022.

O gráfico apresentado na Figura 17 mostra o comportamento das medições da potência trifásica ativa, reativa e aparente. Observa-se uma variação significativa nos níveis de potência ao longo do tempo, com diferentes estágios de carga refletindo o comportamento operacional da planta.

A potência ativa (P3f) mantém-se relativamente estável durante os períodos produtivos, oscilando entre 17 e 35 MW.

A potência aparente (S3f) apresenta picos mais acentuados, alcançando valores superiores a 45 MVA, especialmente entre a madrugada e o final da manhã do dia 15/12, indicando momentos de maior demanda.

Figura 17 - Gráfico das medições de Potência trifásica ativa, reativa e aparente

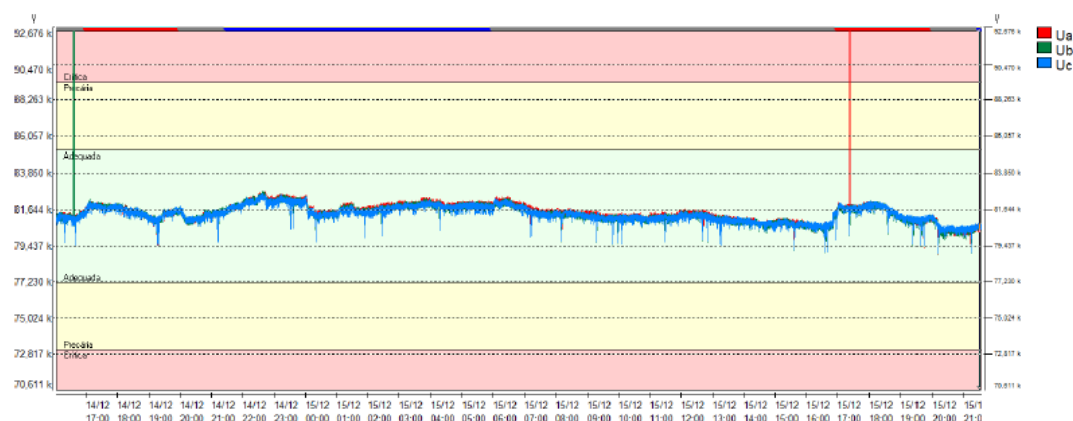


Fonte: Intercement, 2022.

A potência reativa (Q3f) mostra comportamento flutuante, sugerindo presença de cargas indutivas e possível falta de compensação reativa em determinados períodos.

O gráfico apresentado na Figura 18 mostra o comportamento das tensões das três fases (Ua – vermelho, Ub – verde, Uc – azul) ao longo do período de medição entre os dias 14/12 às 17h e 15/12 às 21h. O gráfico está dividido em faixas de qualidade de fornecimento, conforme critérios estabelecidos pelas normas NBR 14039 e NBR 5410.

Figura 18 - Gráfico da medição de tensão de fase EQ1



Fonte: Intercement, 2022.

As zonas de conformidade referem-se a faixas específicas de variação de tensão dentro das quais o fornecimento de energia elétrica é considerado adequado, conforme os limites estabelecidos por normas técnicas, como a NBR 5410 (para baixa tensão) e a NBR 14039 (para média tensão).

As zonas de conformidade apresentadas na Figura 19 são geralmente classificadas em níveis que indicam a qualidade do serviço: a faixa adequada representa o intervalo ideal de operação, no qual os equipamentos podem funcionar com segurança e eficiência; as faixas precária ou de atenção sinalizam situações de desvio moderado, que podem afetar a durabilidade e o desempenho de dispositivos sensíveis; já as zonas críticas, tanto de subtensão quanto de sobretensão, indicam condições fora dos limites toleráveis, representando risco de falhas, queima de componentes e interrupções no processo produtivo.

As faixas são definidas da seguinte forma:

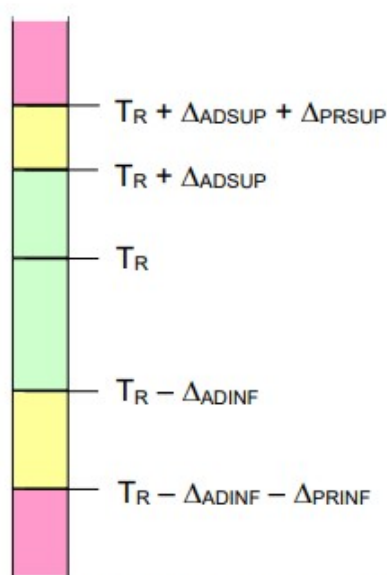
-Tensão de Referência (TR): valor nominal adotado como base para comparação das variações de tensão medidas no sistema;

-Faixa Adequada de Tensão: compreende os valores entre $(T_R - \Delta ADINF)$ e $(T_R + \Delta ADSUP)$, sendo considerada a zona de conformidade ideal, na qual o fornecimento atende plenamente aos requisitos de qualidade;

-Faixas Precárias de Tensão: localizam-se entre $(T_R + \Delta ADSUP)$ e $(T_R + \Delta ADSUP + \Delta PRSUP)$ no caso de sobretensões, ou entre $(T_R - \Delta ADINF - \Delta PRINF)$ e $(T_R - \Delta ADINF)$ para subtensões. Nessas faixas, o fornecimento ainda pode ser mantido, porém com risco de impacto ao desempenho e à durabilidade dos equipamentos;

-Faixas Críticas de Tensão: ocorrem quando os valores medidos ultrapassam os limites máximos definidos pelas faixas precárias, ou seja, quando são superiores a $(T_R + \Delta ADSUP + \Delta PRSUP)$ ou inferiores a $(T_R - \Delta ADINF - \Delta PRINF)$. Nesses casos, o fornecimento elétrico é considerado inadequado, podendo acarretar falhas operacionais severas e danos aos equipamentos.

Figura 19 - Zonas de conformidade

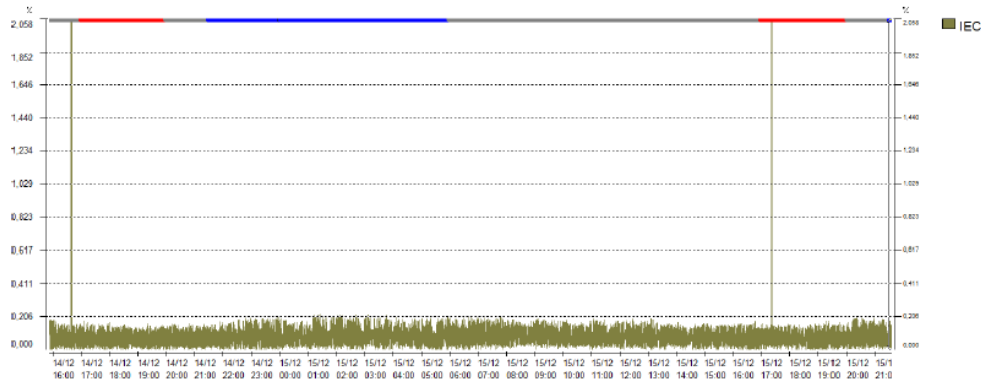


Fonte: ANEEL, 2020.

A classificação da tensão de atendimento deve ser realizada com base em faixas de variação em torno de um valor de referência conhecido como Tensão de Referência (T_R). Essa categorização é fundamental para a avaliação da conformidade do fornecimento de energia elétrica e segue critérios normativos bem estabelecidos.

O gráfico apresentado na Figura 20 mostra o desbalanço de tensão conforme a IEC.

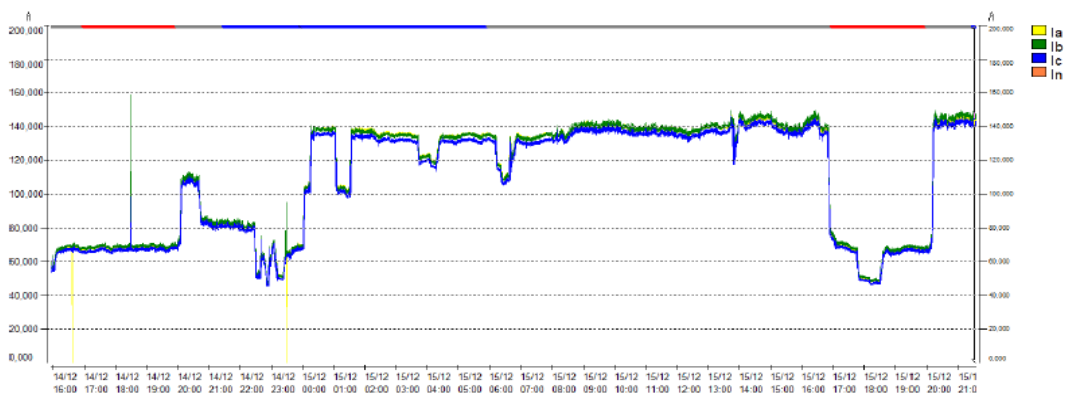
Figura 20 - Desbalanço de tensão conforme IEC EQ1 - 138 kV



Fonte: Intercement, 2022.

O gráfico apresentado na Figura 21 mostramos o comportamento das medições das correntes nas fases A,B e C.

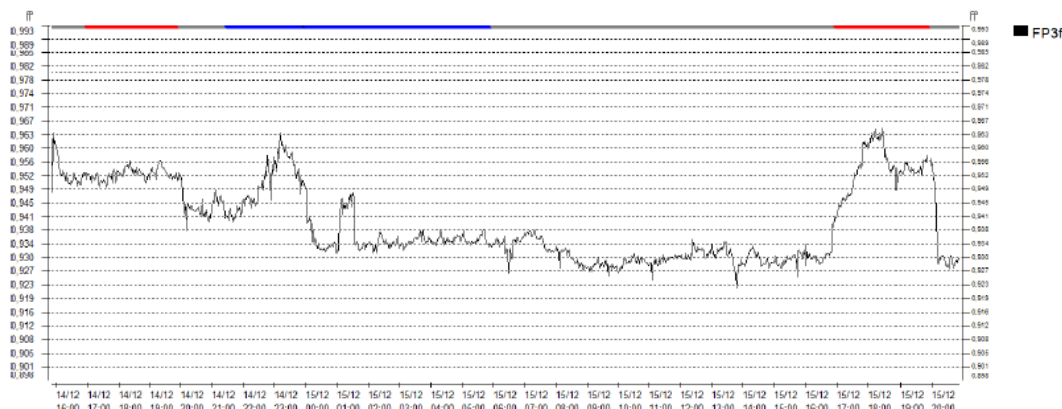
Figura 21 - Gráfico das medições de corrente de fase EQ1 - 138 kV



Fonte: Intercement, 2022.

O gráfico apresentado na Figura 22 mostra o comportamento do fator de potência trifásico.

Figura 22 - Gráfico da medição de fator de potência trifásico EQ1 - 138 kV



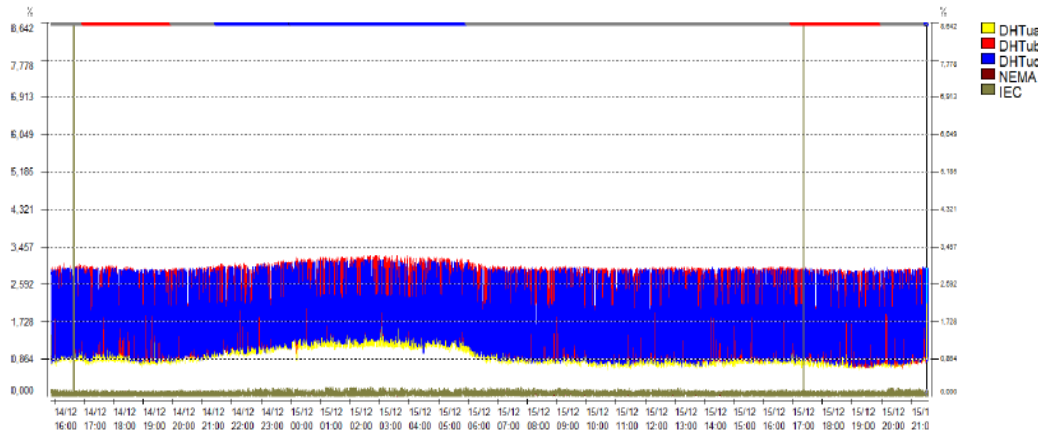
Fonte: Intercement, 2022.

O fator de potência médio registrado durante o período de medição foi de 0,937, valor que se encontra dentro dos padrões estabelecido pela Resolução Normativa ANEEL nº 414, demonstrando conformidade com os padrões regulatórios.

O gráfico apresentado na Figura 23 mostra comportamento da DHTV - Distorção Harmônica Total de Tensão, os valores médios obtidos para a Distorção Harmônica Total de Tensão (DHTV) apresentaram-se dentro dos limites estabelecidos pela norma IEEE 519-2014, que recomenda um valor máximo de 5% para sistemas de média e alta tensão no ponto de acoplamento comum (PCC).

Os resultados observados foram de 1,45% na fase A, 2,00% na fase B e 1,93% na fase C, resultando em uma média trifásica de 1,79%. Esses dados indicam que a forma de onda da tensão fornecida ao sistema está adequadamente preservada, sem distorções significativas, o que contribui para a operação segura e eficiente dos equipamentos conectados à rede elétrica da planta.

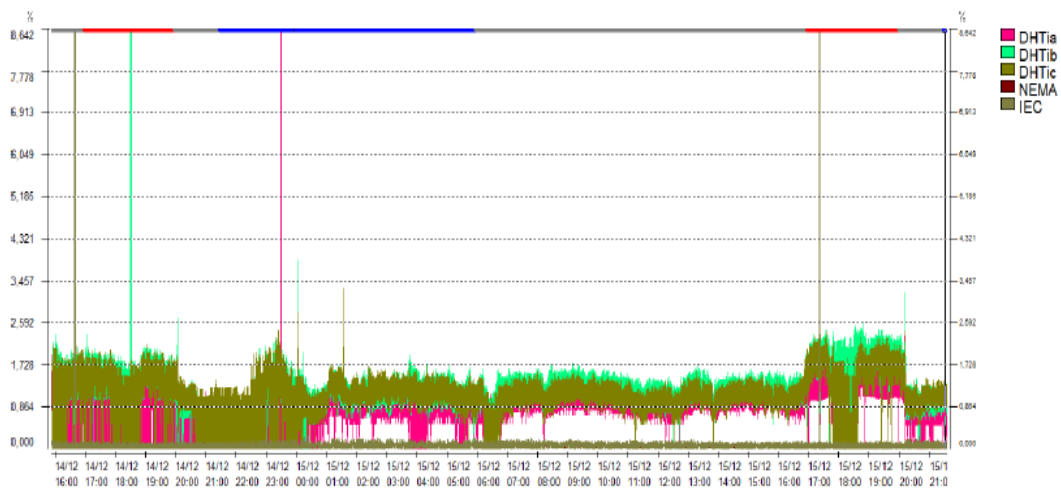
Figura 23 - Gráfico de DHTV



Fonte: Intercement, 2022.

Em relação à Distorção Harmônica Total de Corrente (DHTI) como mostra a Figura 24, os valores médios registrados durante o período de medição no ponto EQ1 – 138 kV também se mantiveram em níveis satisfatórios, compatíveis com as exigências estabelecidas pela norma IEEE 519-2014.

Figura 24 - Gráfico de DHTI

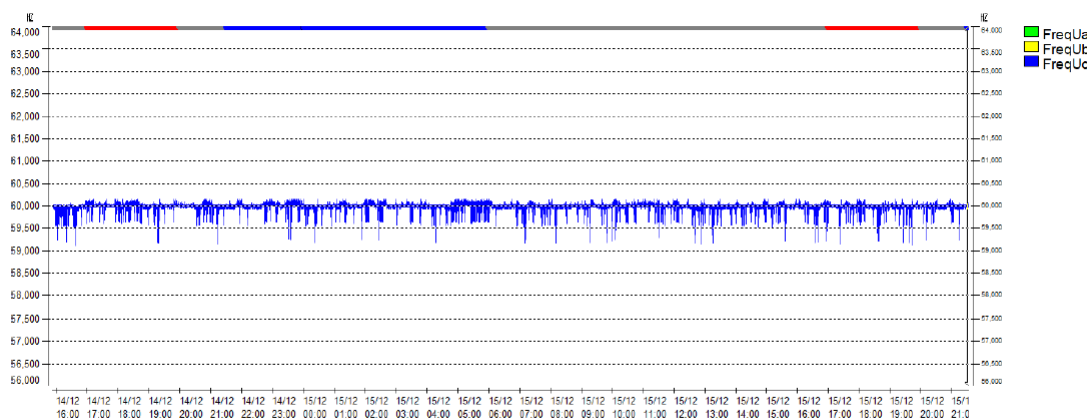


Fonte: Intercement, 2022.

Os resultados foram de 0,91% na fase A, 1,21% na fase B e 1,14% na fase C, com uma média trifásica de 1,09%. Esses índices indicam um baixo conteúdo harmônico nas correntes medidas, o que reflete o bom desempenho das cargas quanto à emissão de distorções na rede. A baixa DHTI contribui para a preservação da integridade dos equipamentos e da eficiência do sistema elétrico, minimizando perdas, aquecimentos indesejados e riscos operacionais associados a distúrbios harmônicos.

A frequência elétrica manteve-se estável durante praticamente todo o período de medição, com variações instantâneas oscilando entre 59,9 Hz e 60,1 Hz, valores que se encontram dentro da faixa de tolerância estipulada pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), que permite desvios de até $\pm 0,5$ Hz em relação ao valor nominal de 60 Hz. Embora tenham sido observadas quedas pontuais abaixo de 59,5 Hz, essas ocorrências foram de curta duração e não apresentaram impacto relevante sobre a operação da planta. O gráfico apresentado na Figura 25 mostra o comportamento das frequências.

Figura 25 - Comportamento das frequências



Fonte: Intercement, 2022.

Com base nas medições realizadas e conforme os resultados representados nos gráficos, é possível destacar os seguintes comportamentos das principais grandezas elétricas observadas no ponto de entrada da planta industrial em 2022:

Variação de tensão: Não foram identificadas ocorrências de sobretensão superiores a 5% em relação à tensão nominal. De forma geral, os valores de tensão permaneceram concentrados dentro da faixa considerada adequada, com variações de queda inferiores a 5%, em conformidade com os limites normativos.

Fator de potência: O valor médio registrado para o fator de potência foi de 0,937, o que indica desempenho satisfatório, embora sujeito a eventuais oportunidades de melhoria por meio de compensação reativa.

Distorção harmônica de tensão (DHTV): A média dos índices de distorção harmônica total de tensão foi de 1,79%, valor que se encontra abaixo do limite máximo de 5% estabelecido pela norma IEEE 519-2014, indicando boa qualidade da forma de onda da tensão.

Corrente elétrica: A corrente média registrada foi de 109,88 A, com pico máximo de 158,66 A, estando ambos os valores dentro da faixa operacional segura, considerando a corrente nominal do transformador de corrente (400/5 A).

Potência aparente: A potência aparente média observada durante o período de monitoramento foi de 26,80 MVA, refletindo o nível de demanda energética no ponto de acoplamento comum durante as condições normais de operação.

8. CONCLUSÃO

A qualidade da energia elétrica é um fator primordial para garantir o desempenho eficiente, seguro e confiável dos sistemas elétricos, especialmente nos ambientes industriais com elevada demanda energética e processos contínuos, como é o caso da indústria cimenteira. A manutenção de níveis adequados de tensão, corrente, frequência e distorção harmônica não apenas assegura o funcionamento correto dos equipamentos, como também contribui para a redução de perdas técnicas, a prevenção de falhas e o prolongamento da vida dos equipamentos.

Neste contexto, a análise da qualidade da energia torna-se uma ferramenta estratégica para as empresas, permitindo identificar distúrbios, otimizar o uso de recursos e evitar penalidades regulatórias, como aquelas relacionadas ao fator de potência ou à distorção harmônica. Além disso, a conformidade com normas técnicas, como a IEEE 519 e os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica (PRODIST/ANEEL), fortalece a confiabilidade do sistema e favorece o cumprimento de metas de eficiência energética e sustentabilidade.

Os resultados obtidos evidenciam que os parâmetros elétricos avaliados na planta industrial cimenteira mantiveram-se dentro dos limites estabelecidos pelas normas técnicas. A tensão permaneceu estável, o fator de potência apresentou desempenho satisfatório (0,937) e os índices de distorção harmônica total de tensão (1,79%) estiveram abaixo do limite normativo. Tais dados confirmam a conformidade da qualidade da energia fornecida, assegurando a operação eficiente e segura dos equipamentos industriais.

Portanto, investir em monitoramento, diagnóstico e na correção dos parâmetros de qualidade da energia não é apenas uma exigência técnica ou regulatória, mas uma necessidade econômica e operacional para qualquer empreendimento que busca alto desempenho, estabilidade e competitividade no setor insutrial nacional.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, módulo 8. Brasília, 2018.
- ALDABÓ, RICARDO. Qualidade na Energia Elétrica. São Paulo, Artliber Editora, 2001.
- ALVES, M.; RIBEIRO, T. Análise da Qualidade de Energia Elétrica: Metodologia e Caso Exemplo. In: Anais III SBQEE - Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica, Brasília, 1999.
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica. Revisão 10. Brasília: ANEEL, 2018.
- ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica. Brasília: ANEEL, 2022. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/prodist>. Acesso em: 03 jul. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14039:2021. Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR14724: informação e documentação – Trabalhos acadêmicos - Apresentação. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5356:2018. Transformadores de potência. Rio de Janeiro: ABNT, 2018. Versão corrigida: 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 5410:2004. Instalações elétricas de baixa tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. Versão corrigida: 2008.
- BICHELS, Arlei. Sistemas elétricos de potência: métodos de análise e solução [recurso eletrônico]. Curitiba: EDUTFPR, 2018. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/3482>. Acesso em: em 12 de julho de 2025.
- BONATTO, B.; MERTEUS, E.; FERNANDES, F. Diagnóstico da Qualidade de Energia Elétrica em Clientes Industriais. In: Anais III SBQEE - Seminário Brasileiro sobre a Qualidade de Energia Elétrica, Brasília, 1999. FÓRUM BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DA COMUNICAÇÃO, 28., 2005. Rio de Janeiro.
- BRONZEADO, H. et al. Uma Proposta de Nomenclatura Nacional de Termos e Definições Associados à Qualidade de Energia Elétrica. In: Anais II SBQEE-Seminário Brasileiro da Qualidade da Energia Elétrica, Itajubá, Brasil, Dezembro de 2007.
- COMISSÃO ELETROTÉCNICA INTERNACIONAL. Structure of IEC 61000. Genebra: IEC, 2008.

CORRÊA, F. I. M. Estudo de um Sistema de Distribuição com Enfoque na Qualidade da Energia Elétrica. Trabalho de conclusão de curso apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo. Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação. São Carlos - SP, 2007.

DUGAN, R. C. et al. Electrical Power Systems Quality - McGraw-Hill, Second Edition, New York, 2002.

DUGAN, R. C.; McGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W. Electrical Power System Quality. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 1996.

HADDAD, J. Energia Elétrica: Conceitos, Qualidade E Tarifação. Disponível em: <https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>. Acesso em 02 de julho de 2025.

IEEE – INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Std 141-1993 (Red Book): IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants. New York: IEEE, 1993.

IEEE – INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Std 1531-2003: Guide for Application and Specification of Harmonic Filters. New York: IEEE, 2003.

IEEE – INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Std 519-2014: Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. New York: IEEE, 2014.

Indústria brasileira de cimento: Base para a construção do desenvolvimento / Confederação Nacional da Indústria. Associação Brasileira de Cimento Portland. – Brasília; CNI, 2012. 58 p.

LOPEZ, Ricardo Aldabó. Qualidade na energia elétrica. 2ª ed. São Paulo: Artliber Editora, 2013.

LUME, S. W. ELECTRIC POWER SYSTEM BASICS FOR THE NONELECTRICAL PROFESSIONAL. IEEE PRESS, 2007.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Procedimentos de rede. ONS, 2025. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>. Acesso em: 30 jun. 2025.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. O sistema em números. ONS, 2025. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>. Acesso em: 30 jun. 2025.

PAIVA, J. Análise de índices de qualidade da energia elétrica considerando uma planta de geração eólica. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Unidade Acadêmica Cabo de Santo Agostinho, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Cabo de Santo Agostinho, 2022.

POLL, F. D. C. Análise da qualidade de energia elétrica em baixa tensão: Estudo de caso em um ambiente universitário. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2013.

PRADO L. G B., Qualidade Da Energia Eletrica No Brasil E Os Crescentes Problemas Causados Por Harmônicos. Relatório apresentado à Banca Examinadora do Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Elétrica para análise e aprovação. Campinas - SP, Dezembro de 2007.

RELATÓRIO DE SUSTENTABILIDADE 2023 – INTERCEMENT. Disponível em: https://intercement.com/wp-content/uploads/2024/12/Relatorio-de-Sustentabilidade-ICB-2023_compressed_compressed_compressed_compressed-compactado.pdf

ROCHA, Joaquim Eloir. Qualidade de Energia. 2016.37f. Monografia (Especialização) – Curso de Engenharia Elétrica, Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

TORELLI, Gabriel. Eficiência energética em pequenas indústrias: Estratégias de baixo custo objetivando aumento de produtividade. 2018. 56 f. Monografia (MBA em Gestão Empresarial), Departamento Acadêmico de Gestão e Economia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.