



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

AILTON DOUGLAS FREITAS DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE ENERGIA EM UMA INDÚSTRIA MADEIREIRA
DA REGIÃO AMAZÔNICA**

Belém – PA

2025

AILTON DOUGLAS FREITAS DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE ENERGIA EM UMA INDÚSTRIA MADEIREIRA
DA REGIÃO AMAZÔNICA**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) submetido
como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Elétrica, apresentado à
Universidade Federal do Pará – UFPA.

Orientador: Professor Dr. Thiago Mota Soares

Belém – PA

2025

AILTON DOUGLAS FREITAS DA SILVA

**AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE ENERGIA EM UMA INDÚSTRIA MADEIREIRA
DA REGIÃO AMAZÔNICA**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) submetido como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica, apresentado à Universidade Federal do Pará – UFPA.

Orientador: Professor Dr. Thiago Mota Soares

Data de aprovação __/__/__

Banca Examinadora:

_____- Orientador
Prof. Dr. Thiago Mota Soares

_____- Examinador Interno
Prof. Dr. Allan Rodrigo Arrifano Manito

_____- Examinador Externo
Prof. Dr. André Luis Rodrigues Barbosa

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por estar sempre ao meu lado em todos os momentos, por me dar a graça da vida.

A minha família que amo em especial a minha irmã Alina Freitas e namorada Valery Ribeiro , pelo carinho e apoio incondicional, por acreditar nos meus sonhos e por me ajudar a torná-los realidade. A minha mãe pelo incentivo, amizade e companheirismo, aos meus avós, Aroldo e Conceição, por todo apoio em minha jornada na faculdade, ao meu pai, por ter sido orientador em meu caminho, e aos meus irmãos Vinicius, Gabriele e Mauricio, pelas conversas esclarecedoras em minha jornada, e ao meu tio, Diógenes o qual foi o responsável pela escolha do meu caminho no mundo da elétrica.

Ao meu orientador Prof. Dr. Thiago Mota Soares, por todo apoio e confiança, por ter sido um grande mestre nessa jornada, pelos seus ensinamentos que levarei para a toda a vida e por buscar a melhor forma de nos orientar.

Aos meus amigos e companheiros de trabalho em especial o Willy Bastos ,e por me acompanhar desde o início dessa jornada em não terem desistido em momentos difíceis comigo, e por estarem presentes até o dia de hoje, sendo grandes incentivadores em momentos de fragilidade.

Aos meus amigos Giovanni Sampaio, Endell Menezes, Lídia Brasil, Karoline , Thais Silva e Evelyn Nunes, por compartilhar inúmeros momentos inesquecíveis, por serem grandes incentivadores, por estarem ao meu lado, pelas conversas mais divertidas que tive na vida e pelos conselhos imprescindíveis nessa jornada.

A todos os meus amigos do curso de engenharia, pela amizade e ensinamentos, em especial, Alexandre, Gustavo, Mesquita, Andrey, Takashi, Marie, Lucas, André, Clysman, Sophia, Midori, Henrique, Kalil, João, Karla, André, Melo, Eduardo, Araújo, Josuel pelas melhores experiências na faculdade!

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Ponto de conexão do analisador	23
Figura 2- Ponto de conexão do analisador	24
Figura 3- Identificação dos canais para as conexões	24
Figura 4- Esquema de conexão dos canais na rede.....	25
Figura 5- Diagrama fasorial para o analisador conectado corretamente	25
Figura 6- fluxograma de investigação de interferência	27
Figura 7- Fator de potência ao longo da semana de medição.....	30
Figura 8- Distorção harmônica de corrente (THD-I).....	31
Figura 9- Distorção harmônica da tensão (THD-V).....	32
Figura 10- Corrente registrada ao longo do dia	33
Figura 11- Valores da potência reativa (kVAr)	34

RESUMO

A qualidade da energia elétrica é um fator essencial para a eficiência operacional das indústrias, especialmente no setor madeireiro, onde a estabilidade no fornecimento de energia impacta diretamente a produção e a segurança dos equipamentos. Dessa forma, este estudo teve como objetivo analisar a qualidade da energia elétrica (QEE) e as condições técnicas de segurança das instalações elétricas de uma indústria madeireira localizada às margens do rio Pacajá, PA. A metodologia adotada envolveu medições em dois setores da indústria – corte e beneficiamento – ao longo de duas semanas. Foram coletadas informações da equipe de manutenção, possibilitando um diagnóstico detalhado sobre a situação das instalações elétricas e seu histórico de falhas. Os resultados das medições indicaram que a indústria operava com um fator de potência abaixo do ideal, variando entre 0,621 e 0,693, muito aquém do recomendado. Além disso, observou-se distorção harmônica elevada, com THD-I atingindo 18,30% e THD-V variando entre 7,00% e 11,28%, evidenciando a presença de cargas não lineares, como motores com inversores de frequência. Para solucionar esses problemas, foram implementadas medidas corretivas, destacando-se a instalação de bancos de capacitores, que corrigiu o fator de potência para 0,92, reduzindo o consumo de potência reativa e melhorando a eficiência energética. Esses resultados demonstram que a correção do fator de potência e a mitigação de harmônicos são estratégias eficazes para melhorar a qualidade da energia elétrica em ambientes industriais. Conclui-se que a implementação de bancos de capacitores e filtros harmônicos não apenas melhorou o desempenho energético da indústria, mas também reduziu custos, aumentou a confiabilidade do sistema elétrico e garantiu a conformidade com as normas regulatórias.

Palavras-chave: Qualidade da energia elétrica; Fator de potência; Distorção harmônica; Eficiência energética; Correção de distúrbios elétricos

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS	6
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA	6
1.2. INTRODUÇÃO	Erro! Indicador não definido.
1.3. OBJETIVOS	8
1.3.1 Objetivo geral	8
1.3.2 Objetivos específicos	8
1.4. ESTRUTURA DO TCC	8
CAPÍTULO 2 – QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA (QEE)	10
2.1. INTRODUÇÃO	10
2.2. CONCEITOS INICIAIS	11
2.3. DISTÚRBIOS DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA	12
2.4. NORMAS DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA	16
2.4.1. Módulo 8 do PRODIST	18
2.4.2. IEEE 519	19
CAPÍTULO 3 – DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO	21
3.1. INTRODUÇÃO	21
3.2. DESCRIÇÃO DO LOCAL DAS CAMPANHAS DE MEDIÇÕES	22
3.3. METODOLOGIA DE ANÁLISE	26
3.4. REVISÃO DOS DADOS	28
3.5. CONCLUSÃO	28
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DICUSSÃO	29
4.1. RESULTADOS	29
4.2. DISCUSSÃO	36
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO	39
REFERÊNCIAS	41

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO PROBLEMA

A qualidade da energia elétrica é um fator crítico para o desempenho das indústrias, especialmente no setor madeireiro, onde a estabilidade do fornecimento de energia impacta diretamente a eficiência da produção e a segurança das operações, sendo assim, distúrbios na qualidade da energia elétrica, como variações de tensão, desequilíbrios de fase e harmônicos, podem resultar em falhas nos equipamentos, paradas de produção e danos aos sistemas elétricos (ANEEL, 2016).

A esse respeito, Hesegawa *et al.* (2020) destacam que os desequilíbrios de energia podem gerar grandes perdas financeiras, visto que uma indústria madeireira pode gastar cerca de R\$17.000,000 com energia elétrica por mês, indicando a relevância da qualidade da energia para a sustentabilidade econômica do setor.

Além dos danos físicos aos equipamentos, a qualidade da energia elétrica compromete a produtividade de uma fábrica, podendo reduzir em até 18% a eficiência das operações, acarretando aumentos nos custos de operação e impactando a competitividade das empresas no mercado (Tutak; Brodny, 2022).

A falta de conformidade com as normas técnicas, como o PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), e outras regulamentações complementares, tem sido identificada como uma das principais causas de falhas nos sistemas elétricos industriais, resultando não só em prejuízos econômicos, mas também em riscos aumentados de acidentes, como curtos-circuitos e incêndios (ANEEL, 2021; IBA, 2021).

Por isso, o controle da qualidade da energia elétrica na indústria madeireira é, portanto, um fator essencial para a segurança e a eficiência operacional e a implementação de sistemas de monitoramento contínuo, como os recomendados pela NBR 16690 (ABNT, 2018), juntamente com o ajuste das instalações elétricas para garantir a conformidade com as normas vigentes, como o PRODIST, são fundamentais para mitigar os riscos associados a distúrbios de energia (Silva, 2023).

Nesse sentido, distúrbios como variações de tensão e harmônicos têm um impacto direto na eficiência das operações, sendo essencial que as indústrias adotem sistemas de monitoramento contínuo para garantir a qualidade da energia elétrica fornecida (Suzuki *et al.*, 2022). De acordo com as normas da ABNT, como a NBR 5410

(ABNT, 2004), é necessário que as instalações elétricas atendam a critérios de segurança e eficiência, assegurando que a qualidade da energia não comprometa a operação das fábricas.

O Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) define os parâmetros técnicos para o fornecimento adequado de energia, incluindo a especificação dos limites máximos permitidos para variações de tensão, harmônicos e desequilíbrio de fases (Suzuki *et al.*, 2022). Ademais, a ANEEL (2021) estipula que a conformidade com o PRODIST é essencial para garantir a eficiência do sistema elétrico e evitar perdas de produção, uma vez que falhas no fornecimento de energia podem comprometer a qualidade dos produtos e aumentar os custos operacionais.

Desse modo, a eficiência energética surge como uma preocupação crescente nas indústrias, principalmente para aquelas que dependem de grande consumo de energia, como as madeireiras. Segundo Costa *et al.* (2020), a adoção de soluções eficientes, como a instalação de sistemas de cogeração de energia a partir de biomassa e o uso de fontes renováveis, tem contribuído para a redução do impacto ambiental e dos custos com energia. A implementação dessas soluções, além de reduzir o consumo, promove a sustentabilidade e fortalece a competitividade da indústria no mercado.

Como uma das bases fundamentais para o funcionamento e desenvolvimento de qualquer indústria, a qualidade do sistema elétrico e a segurança das instalações elétricas são aspectos de extrema importância a serem considerados. Dentro desse contexto, este trabalho visa realizar uma análise minuciosa da qualidade do sistema elétrico e avaliar as condições técnicas de segurança das instalações elétricas da Indústria madeireira localizada nas margens do rio Pacajá, no estado do Pará. O objetivo principal é verificar se tais instalações estão em conformidade com o PRODIST e normas complementares, além de encontrar possíveis soluções para problemas como distúrbios no sistema de alimentação nas cargas instaladas, e verificar se estão enquadradas como problemas de qualidade de energia.

A relevância desse tema se fundamenta na necessidade de garantir a segurança das instalações elétricas e a qualidade do fornecimento de energia, sendo isso crucial para o funcionamento adequado das atividades industriais, a preservação do patrimônio e, principalmente, a proteção da vida dos colaboradores.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Este trabalho visa analisar a qualidade da energia elétrica e as condições técnicas de segurança das instalações elétricas da Indústria madeireira localizada nas margens do rio Pacajá, PA, verificando se estão em conformidade com o PRODIST e normas complementares e encontrar possíveis soluções para problemas como distúrbios no sistema de alimentação nas cargas instaladas, e verificar se estão enquadradas como problemas de qualidade de energia

1.3.2 Objetivos específicos

- Efetuar medições nos locais escolhidos, local um, setor de corte, local dois, setor de beneficiamento, encontrando nesses setores o local mais adequado para efetuar as medições e os horários mais estratégicos.
- Investigar possíveis distúrbios relacionados à QEE tais como fator de potência, transitórios impulsivos ou oscilatórios, variações de tensão de longa e curta duração, desbalanceamento, flutuações de tensão, distorção da forma de onda e variações na frequência da rede;
- Analisar as medições obtidas, comparando-as com o PRODIST;
- Desenvolver uma descrição dos problemas encontrados e apontar possíveis soluções;

1.4 ESTRUTURA DO TCC

Este estudo está estruturado em cinco capítulos. No Capítulo 1 – Considerações iniciais, apresentam-se a contextualização do problema relacionado à qualidade da energia em residências com sistema de geração fotovoltaica, juntamente com os objetivos geral e específicos do estudo, além da estrutura do TCC.

O Capítulo 2 – Qualidade da Energia Elétrica compreende uma introdução aos conceitos iniciais relacionados à qualidade da energia elétrica, abordando os

distúrbios que podem afetar sua qualidade, bem como as normas, como o Módulo 8 do PRODIST e o IEEE 519, que regulamentam esse aspecto.

No Capítulo 3 – Descrição do Estudo de Caso, estão descritos os métodos utilizados para a realização do estudo, a metodologia de análise adotada e os procedimentos utilizados para avaliar a qualidade da energia em uma indústria madeireira da região Amazônica

O Capítulo 4 – Análise e Discussões abordará a análise dos dados coletados com base nas normas PRODIST e IEEE 519, fornecendo uma comparação entre os resultados obtidos e as diretrizes estabelecidas por essas normas.

Por fim, no Capítulo 5 – Considerações Finais, as principais conclusões e recomendações do estudo serão apresentadas. O trabalho também contará com a seção de referências bibliográficas, apêndices e anexos.

CAPÍTULO 2 – QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA (QEE)

2.1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica é utilizada por uma grande variedade de consumidores, desde os industriais, que são em menor número, mas de elevada potência, até aos domésticos, caracterizados por baixa potência, mas muito numerosos, utilizados tanto no meio urbano como rural (Balasubramaniam *et al.*, 2015).

Os distúrbios eletromagnéticos podem ser classificados de acordo com vários critérios, sendo eles: por frequência, há perturbações de baixa frequência (refere-se a sinais com frequência inferior a 1 MHz) e perturbações de alta frequência (sinais com frequência superior a 1 MHz); por modo de propagação, quando há perturbações conduzidas através dos condutores da rede (incluindo correntes e diferenças de tensão) e perturbações irradiadas (no ar), através de campos elétricos e magnéticos e por duração, caracterizada por perturbações permanentes ou sustentadas (afetando circuitos eletrônicos analógicos) e perturbações transitórias, aleatórias ou periódicas (afetando circuitos eletrônicos digitais) (Meheub; Mandela, 2014).

A origem das perturbações eletromagnéticas pode estar tanto na rede elétrica (ex. incidentes ou manobras erradas, e defeitos) quanto na rede elétrica do consumidor. Atualmente, garantir a qualidade da energia elétrica tornou-se uma tarefa cada vez mais complexa e de grande interesse tanto para os fornecedores de eletricidade quanto para os consumidores (CDA, 2001).

As preocupações com a qualidade da energia têm norteador questões principais, como aumentar o rendimento na produção, transporte e utilização de eletricidade, a complexidade dos sistemas energéticos e as influências mútuas entre estes e os utilizadores, o crescimento da quantidade de equipamentos elétricos não lineares, geradores de perturbações eletromagnéticas, a sensibilidade crescente dos equipamentos elétricos modernos à diminuição da qualidade energética da energia elétrica, e a demanda dos consumidores por energia elétrica nos parâmetros de qualidade elétrica contratados (Shin *et al.*, 2005).

Dois aspectos essenciais devem ser seguidos no fornecimento de energia elétrica: a qualidade do produto (refere-se aos parâmetros técnicos, como amplitude de tensão, frequência, conteúdo harmônico e simetria dos sistemas trifásicos) e a

qualidade do serviço (refere-se à continuidade do fornecimento e refere-se a interrupções curtas/longas e segurança no fornecimento) (Reid, 1996).

As perturbações eletromagnéticas que influenciam diretamente a rede elétrica e, portanto, a qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores, são as conduzidas em baixa frequência (com frequências de até 9 kHz no máximo), incluindo variações na frequência da tensão de alimentação, variações na tensão de alimentação, intervalos e interrupções (curtas e longas) de tensão, distorção harmônica (harmônicas e inter-harmônicas), flutuações/oscilações de tensão, assimetrias, sobretensões temporárias e fenômenos transitórios, a componente contínua na curva de tensão aplicada, tensões de sinalização e tensões induzidas por baixa frequência (Iagar *et al.*, 2017).

Esses desafios relacionados à qualidade da energia elétrica são de grande importância tanto para os fornecedores de eletricidade quanto para os consumidores, e compreender e mitigar os distúrbios eletromagnéticos é essencial para garantir um fornecimento confiável de energia elétrica em uma ampla gama de aplicações e ambientes (Pakere; Lauka; Blumberga, 2020).

Neste capítulo, são abordados os principais conceitos relacionados à qualidade da energia elétrica, as normas e padrões aplicáveis, os distúrbios mais comuns e suas causas, bem como as técnicas de monitoramento e análise da qualidade da energia.

2.2. CONCEITOS INICIAIS

O desequilíbrio de tensão é um dos distúrbios mais frequentes e ocorre quando as tensões das três fases de um sistema trifásico não são iguais. Segundo a norma NBR 16690:2018 (ABNT, 2018), o limite máximo de desequilíbrio de tensão é de 2%, sendo que valores superiores a esse patamar podem gerar danos a motores e outros equipamentos sensíveis, aumentando os custos de manutenção e reduzindo a vida útil dos dispositivos. Este desequilíbrio, além de comprometer a eficiência energética, pode também afetar diretamente a produtividade de uma indústria (Souza *et al.*, 2020).

Além disso, os harmônicos são outro problema recorrente na qualidade da energia elétrica. Eles são gerados por dispositivos não lineares, como retificadores e inversores, e podem distorcer a forma de onda da corrente elétrica e a presença excessiva de harmônicos pode levar ao aumento de perdas nos sistemas elétricos e ao aquecimento de equipamentos (IEC, 2002). A norma IEC 61000-4-7 (IEC, 2002)

estabelece os limites de harmônicos permitidos, sendo fundamental o monitoramento desses parâmetros para a correta operação dos sistemas industriais.

Em conjunto com os harmônicos e o desequilíbrio de tensão, o “flicker” (ou cintilação) é outro distúrbio que pode afetar a qualidade da energia elétrica, causado por flutuações rápidas na tensão e pode resultar em desconforto visual, interferindo na operação de processos industriais sensíveis à estabilidade da rede elétrica (Bollen, 2019). A avaliação do flicker é feita por meio da medição de flutuações de tensão em função do tempo, com base em normas como a IEC 61000-4-15 (IEC, 2019), que define os métodos de medição e os limites aceitáveis para esse tipo de distúrbio.

A implementação de padrões técnicos adequados, como os definidos pela ABNT, IEC e IEEE, é essencial para garantir a qualidade da energia elétrica. A conformidade com as normas e a implementação de sistemas de monitoramento e controle adequados asseguram não apenas a segurança dos equipamentos e a eficiência dos processos industriais, mas também a proteção econômica das empresas. Além disso, a padronização da qualidade da energia elétrica facilita a integração de novas tecnologias e inovações, como o uso de energias renováveis e veículos elétricos, que exigem sistemas elétricos cada vez mais robustos e adaptáveis (Hanzelka; Gono, 2020).

No contexto da melhoria contínua da qualidade da energia elétrica, as empresas devem buscar a atualização constante das suas instalações, adotando metodologias e tecnologias capazes de medir e corrigir desequilíbrios, harmônicos e outros distúrbios elétricos. Carvalho *et al.* (2019) apontam que a aderência a normas e o constante monitoramento dos parâmetros de QEE são cruciais para garantir uma operação eficiente e sustentável, tanto no setor industrial quanto no contexto global de distribuição de energia elétrica.

2.3. DISTÚRBIOS DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Os distúrbios mais comuns na qualidade da energia elétrica, como oscilações de tensão e flutuações de frequência, impactam diretamente a operação de dispositivos eletrônicos e podem levar à redução da vida útil de equipamentos elétricos. Caciotta *et al.* (2013) exploram em sua pesquisa como surtos e transitórios, interrupções e picos de tensão podem causar danos imediatos ou acumulativos em sistemas elétricos. A distorção harmônica, por sua vez, é um fenômeno cada vez mais

presente devido ao aumento do uso de dispositivos eletrônicos que alteram a forma de onda da corrente elétrica, como apontam Arrillaga e Watson (2003), o que pode resultar em problemas de aquecimento, ruídos e falhas operacionais.

As causas dos distúrbios na qualidade da energia são diversas e incluem fontes naturais, tais como raios, e fontes antropogênicas, como a operação de grandes cargas industriais e as consequências desses distúrbios estendem-se desde a simples inconveniência até prejuízos significativos na produção industrial (McGranaghan; Roettger, 2002).

As implicações para os equipamentos elétricos, quando submetidos a distúrbios de energia, são múltiplas. Por exemplo, Bollen (1999) discute como harmônicos podem afetar negativamente o funcionamento de motores elétricos, causando perdas adicionais e aquecimento. Já o flicker pode resultar em iluminação oscilante, afetando o conforto visual e a produtividade em ambientes de trabalho (Mark-Halpin, 2002).

Para regular e assegurar a qualidade da energia elétrica, são estabelecidas normas e padrões internacionais, como os desenvolvidos pela IEC (*International Electrotechnical Commission*) e pela IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*). A norma IEEE 519:2022 é projetada para orientar a indústria e os fornecedores de energia na identificação e mitigação dos problemas de qualidade da energia, definindo limites e procedimentos para medição e controle.

O estabelecimento de normas como a IEEE 519 é respaldado por estudos como o de Emanuel (1996), que discutem a importância de limitar harmônicos para evitar interferências em equipamentos eletrônicos e sistemas de comunicação. Por sua vez, a IEC 61000 fornece um framework para testar e quantificar a imunidade de dispositivos a diversos tipos de distúrbios elétricos, algo que é essencial para a garantia da confiabilidade dos equipamentos (Paul, 2006).

A aderência às normas e padrões é um fator decisivo para a manutenção da qualidade da energia. A conformidade ajuda a assegurar que o fornecimento de energia seja estável, o que é vital para o funcionamento adequado de infraestruturas críticas e serviços essenciais. As normas também desempenham um papel fundamental na facilitação do comércio internacional e na interoperabilidade de equipamentos fabricados em diferentes países (Mombauer, 2001).

No entanto, a implementação de normas requer um esforço conjunto entre fabricantes de equipamentos, fornecedores de energia e reguladores. Os fabricantes

devem projetar produtos que atendam ou superem os requisitos das normas, enquanto os fornecedores de energia devem monitorar e gerenciar a qualidade da energia na rede. Reguladores, por sua vez, devem garantir que as normas sejam aplicadas e que as violações sejam adequadamente sancionadas (Hanzelka; Gono; 2004).

Dentre os distúrbios de QEE existentes, destacam-se: (I) tensão em regime permanente; (II) distorções harmônicas de tensão; (III) desequilíbrio de tensão; (IV) flutuação de tensão.

O ruído criado por correntes de modo comum é considerado um efeito colateral ou causa de flutuações de energia, nesse sentido, o aterramento aprimorado de um circuito elétrico causa neutros de tensão mais altos compartilhados que podem levar a afundamentos e elevações e esse ruído pode ser a fonte de surtos e quedas de energia (Dugan *et al.*, 2002).

O ruído causado por distúrbios elétricos pode causar problemas nos computadores. É o fator mais significativo que afeta o desempenho e a funcionalidade do computador. O ruído vem em muitas formas, como a tensão sobreposta à corrente e às tensões de fase. Pode ser causada por sinais acima de 1% da tensão nominal da fonte de alimentação. A principal causa deste ruído é definida como qualquer sinal com valor superior a 1% da tensão nominal da fonte de alimentação. Um exemplo desse ruído é o ruído de modo comum cuja amplitude é de 2,3 Volts entre neutro e terra (Aldabó, 2001).

As distorções harmônicas de tensão ocorrem quando a corrente passa por uma fonte de tensão não linear, elas resultam de formas de onda distorcidas por uma magnitude de frequências.

A sequência de três fasores é definida na Tabela 1 como um conjunto ordenado. As distorções harmônicas podem causar o superaquecimento dos transformadores se não forem vistas por técnicos especializados (Aldabó, 2001).

Tabela 1- Ordem, frequência e sequência da distorção harmônica

Ordem da distorção harmônica	Frequência (Hz)	Sequência
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
n	6xn	...

Fonte: Manito, 2009

No contexto dos sistemas elétricos, o desequilíbrio de tensão é uma condição que ocorre quando as tensões nas fases de um sistema trifásico não estão em equilíbrio, ou seja, quando os módulos ou os ângulos das tensões em cada fase são diferentes. Essa situação pode acarretar uma série de problemas e desafios para o funcionamento adequado do sistema elétrico, impactando desde a eficiência energética até a vida útil dos equipamentos e a segurança das instalações e dos usuários (Torrezan *et al.*, 2019).

Um dos principais problemas decorrentes do desequilíbrio de tensão é a geração de correntes de sequência zero, que não contribuem para a realização de trabalho útil e, portanto, sobrecarregam os condutores e os equipamentos, aumentando as perdas no sistema e reduzindo a eficiência energética (Pomilio; Deckmann, 2007).

Outra consequência significativa do desequilíbrio de tensão é o aquecimento excessivo dos transformadores, devido à circulação de correntes de sequência zero e desequilíbrios de corrente que resultam em perdas adicionais de energia (Seguí-Chilet *et al.*, 2007).

Além dos impactos operacionais e econômicos, o desequilíbrio de tensão pode comprometer a segurança das instalações elétricas e dos usuários, uma vez que as correntes de sequência zero podem gerar campos magnéticos que interferem em equipamentos sensíveis e causam problemas de funcionamento em sistemas de automação e controle (Rodríguez *et al.*, 2014).

Diante desses desafios, é fundamental que os sistemas elétricos sejam projetados e operados de forma a minimizar o desequilíbrio de tensão. Isso pode ser alcançado por meio da utilização de transformadores com taps de regulação, da instalação de compensadores de potência reativa e de sistemas de monitoramento e controle que permitam a detecção precoce de desequilíbrios e a implementação de ações corretivas (Meheub; Mandela, 2014).

Além disso, a adoção de boas práticas de projeto e manutenção, o balanceamento adequado das cargas entre as fases e a realização de análises de qualidade de energia são medidas essenciais para mitigar os efeitos do desequilíbrio de tensão e assegurar o funcionamento seguro e eficiente dos sistemas elétricos (Pomilio; Deckmann, 2007).

Fenômenos abordados pelo PRODIST Módulo 8 (Procedimento de Alocação da ANEEL) como "Volatilidade Tensão", também conhecido em termos internacionais como o flickering, pode ser definido como uma mudança de voltagem valor de tensão efetiva.

O próprio módulo 8 define Fenômeno: "Um fenômeno aleatório, repetitivo ou mudanças esporádicas na tensão RMS". Embora a medição e a avaliação possam ser feitas em qualquer ponto da instalação elétrica, deve-se ter cuidado ao interpretar os resultados, pois as referências geralmente são vinculadas com PAC (ponto acoplamento).

O padrão IEEE 1159 de 2009 menciona flutuações de tensão como uma ocorrência regular capaz de mudar aleatoriamente a tensão; ou tensão múltipla com um pelos padrões ANSI C84.1, a faixa de potência de um dispositivo normalmente não excede. A versão de 2006 aumentou de 0,95 para 1,05 pu.

Variações erroneamente referidas como cintilação são, na verdade, variações de brilho. A palavra cintilação é derivada disso, a tensão flutuante afeta a intensidade da iluminação, conforme definido pelo padrão IEEE 1159, lançado em 2009.

Flicker é um fenômeno eletromagnético causado por uma flutuação. Confusamente, esses termos têm definições separadas. No entanto, o efeito prejudicial ainda é evidente. Muitas vezes, eles são confundidos onde a cintilação de tensão é ocasionalmente referida como pulsos de tensão em alguns documentos. Os padrões IEEE 1159:2009 afirmam que a flutuação de tensão a qual deve ser empregada (Czarnecki; Haley, 2015).

2.4. NORMAS DE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

As normas de qualidade da energia elétrica estabelecem critérios e parâmetros para a avaliação da qualidade da energia que é fornecida aos consumidores. Esses critérios incluem, por exemplo, a frequência da energia elétrica, a amplitude da tensão elétrica, a presença de harmônicas e a estabilidade do sistema elétrico (Huang et al., 2018; Silva, 2023).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é o órgão responsável por estabelecer as normas de qualidade da energia elétrica no Brasil. Entre as normas estabelecidas pela ANEEL, destacam-se a Resolução Normativa nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021, que consolidou e substituiu diversas resoluções anteriores, incluindo a nº 414/2010 e a nº 711/2016 (ANEEL, 2021).

Além das normas estabelecidas pela ANEEL, existem também normas internacionais que tratam da qualidade da energia elétrica. A norma IEC 61000-4-30, por exemplo, estabelece os requisitos para a medição da qualidade da energia elétrica em sistemas elétricos de baixa e média tensão.

A qualidade da energia elétrica é um tema de grande importância para a sociedade e para a economia, uma vez que a falta de qualidade pode causar perdas financeiras e até mesmo riscos à segurança dos consumidores. Por isso, a observância das normas de qualidade da energia elétrica é fundamental para garantir a eficiência e a segurança do sistema elétrico (Maraschin, 2022).

Além das normas mencionadas anteriormente, existem outras normas importantes que tratam da qualidade da energia elétrica. A norma IEEE 1159, por exemplo, estabelece critérios para a avaliação da qualidade da energia elétrica em sistemas de energia elétrica de baixa tensão, enquanto a norma IEEE 519 define limites para as distorções harmônicas geradas por equipamentos elétricos conectados ao sistema elétrico.

A qualidade da energia elétrica pode ser afetada por diversos fatores, como a variação da carga elétrica, a presença de equipamentos elétricos com alto consumo de energia, a ocorrência de temporais e descargas atmosféricas, entre outros. Esses fatores podem levar a distorções na forma de onda da tensão elétrica, variações na frequência e outras anomalias que afetam a qualidade da energia elétrica (Borges, 2020).

Para garantir a qualidade da energia elétrica, é necessário que as empresas de distribuição de energia elétrica realizem investimentos em infraestrutura, manutenção e modernização do sistema elétrico. Também é importante que os consumidores utilizem equipamentos elétricos de qualidade e evitem sobrecarregar a rede elétrica com equipamentos de alto consumo de energia (Oliveira *et al.*, 2018).

Além disso, os consumidores podem adotar medidas para monitorar a qualidade da energia elétrica que estão recebendo. Existem equipamentos específicos, como analisadores de qualidade de energia, que podem ser utilizados para medir a qualidade da energia elétrica e identificar eventuais problemas no sistema elétrico (Melo *et al.*, 2018).

2.4.1. Módulo 8 do PRODIST

O Módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) é uma norma regulatória que estabelece as regras e procedimentos para a qualidade do fornecimento de energia elétrica pelas concessionárias de distribuição. O objetivo principal é garantir que os consumidores recebam energia elétrica com qualidade, segurança e continuidade adequadas (Corrêa, 2007).

O PRODIST é uma norma importante para o setor elétrico, pois estabelece os padrões de qualidade que as concessionárias devem cumprir em relação à continuidade e qualidade do fornecimento de energia elétrica. Esses padrões incluem a frequência e duração das interrupções de energia elétrica, a tensão elétrica fornecida, a eficiência energética e a proteção contra distúrbios elétricos (Dugan *et al.*, 2002).

Entre as principais obrigações das concessionárias de distribuição de energia elétrica em relação ao Módulo 8 do PRODIST, estão a realização de manutenção preventiva e corretiva na rede elétrica, a implantação de sistemas de proteção e controle, a instalação de equipamentos de medição e monitoramento, a realização de inspeções regulares e a adoção de medidas para minimizar os impactos de eventos climáticos e outras causas externas que possam afetar o fornecimento de energia elétrica (Ravagnani, 2008).

Esse módulo é um instrumento importante para garantir que as concessionárias de distribuição de energia elétrica forneçam energia elétrica com qualidade, segurança e continuidade adequadas aos consumidores. A norma estabelece padrões claros e objetivos, além de prever penalidades em caso de descumprimento, o que contribui para a melhoria da qualidade do serviço prestado e para a satisfação dos consumidores (Delmont Filho, 2007).

Além disso, o Módulo 8 do PRODIST também tem um papel importante na promoção da eficiência energética. As concessionárias de distribuição devem adotar medidas visando à redução das perdas de energia elétrica na rede de distribuição, ao incentivo ao uso de equipamentos e sistemas mais eficientes e à promoção de programas de conservação de energia. Dessa forma, a norma contribui para a preservação dos recursos naturais e para a redução dos impactos ambientais associados à geração de energia elétrica (Albuquerque *et al.*, 2021).

No entanto, o cumprimento dos padrões estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST pode representar um desafio para as concessionárias de distribuição, especialmente em regiões com condições climáticas adversas ou com infraestrutura deficiente. Nesse sentido, é importante que as concessionárias invistam em tecnologias e equipamentos modernos e em programas de capacitação e treinamento para seus funcionários, a fim de garantir o cumprimento dos padrões estabelecidos pela norma (Borniatti *et al.*, 2022).

Além disso, é importante que a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) atue de forma rigorosa na fiscalização do cumprimento das obrigações estabelecidas pelo Módulo 8 do PRODIST, de forma a assegurar que as concessionárias cumpram seus compromissos com os consumidores e com o meio ambiente. A transparência na divulgação dos resultados das fiscalizações e das penalidades aplicadas também é fundamental para garantir a efetividade da norma (Fragoso *et al.*, 2020).

2.4.2. IEEE 519:2022

O IEEE 519 é um padrão estabelecido pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) que define as características e limites de qualidade de energia elétrica para sistemas de energia elétrica conectados à rede. Este padrão tem como objetivo garantir que a qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores esteja dentro de limites aceitáveis de variação de tensão e frequência, além de minimizar os efeitos da distorção harmônica na rede elétrica.

Diversos autores têm estudado o IEEE 519 e suas implicações nos últimos anos. Um exemplo é o estudo de Liu *et al.* (2018), que propõe um método de análise de qualidade de energia elétrica baseado em componentes principais para avaliar o atendimento aos requisitos do IEEE 519 em sistemas de distribuição de energia elétrica. Já o trabalho de Yang *et al.* (2019) analisa a eficácia de diferentes técnicas de controle de harmônicos na redução da distorção harmônica em sistemas elétricos.

Outro estudo interessante é o de Zhang *et al.* (2020), que propõe um método de otimização de filtros ativos para redução de distorção harmônica em conformidade com o IEEE 519. Por sua vez, o trabalho de Li *et al.* (2021) avalia o impacto da instalação de fontes renováveis de energia na qualidade da energia elétrica em conformidade com o IEEE 519.

O estudo de Haddad *et al.* (2021) aborda a questão da interação entre sistemas de armazenamento de energia e a rede elétrica em conformidade com o IEEE 519. Por fim, o trabalho de Wang *et al.* (2021) propõe um sistema de controle de qualidade de energia elétrica baseado em inteligência artificial para garantir o atendimento aos requisitos do IEEE 519.

CAPÍTULO 3 – DESCRIÇÃO DO ESTUDO DE CASO

A análise da qualidade de energia da indústria madeireira foi dividida em duas etapas: uma no setor de corte e outra no setor de beneficiamento. Cada etapa durou uma semana, sendo observados problemas no funcionamento dos bancos de capacitores.

No setor de corte, o banco não acionava capacitores de forma automática nem manual; no setor de beneficiamento, operava apenas no modo manual. Após esse mau funcionamento, houve um aumento de 40% na fatura de energia, o que motivou a realização desta análise.

Com a finalidade de conhecer melhor as práticas rotineiras de manutenção, para elaborar com precisão a análise da QEE, bem como a situação geral de conservação do prédio, foram realizadas uma entrevista preliminar com a equipe de manutenção, seguindo um roteiro preestabelecido. Além disso, forneceu informações relevantes sobre o histórico da edificação.

O sistema de aterramento da subestação de 300 kVA foi projetado e executado conforme as exigências da NT 02 da concessionária local, em conformidade com as normas NBR 5410, NBR 14039 e NR-10. Foi adotado o sistema TN-S, com separação entre os condutores de proteção (PE) e neutro (N) desde a origem. A malha de aterramento foi construída com hastes de cobre de 2,40 m interligadas por condutores de cobre nu de 35 mm², garantindo resistência inferior a 5 ohms. Todos os equipamentos metálicos foram devidamente interligados à malha, utilizando conexões por solda exotérmica. O mesmo sistema de aterramento foi utilizado para o banco de capacitores da subestação, assegurando equipotencialidade, proteção contra sobretensões e conformidade com as normas técnicas aplicáveis, promovendo segurança e eficiência à instalação elétrica.

3.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo descreve a metodologia aplicada na avaliação da qualidade da energia elétrica (QEE) em uma indústria madeireira situada no município de Portel, no Pará. A análise foi motivada pelo aumento de aproximadamente 40% no valor da fatura de energia elétrica, devido à falha no acionamento automático dos bancos de capacitores nos setores de corte e beneficiamento.

Foram realizadas duas campanhas de medição. A primeira ocorreu no setor de corte, com o banco de capacitores inoperante, e a segunda no setor de beneficiamento, com o banco operando em modo manual. As medições foram realizadas utilizando um analisador de qualidade de energia da marca HIOKI, modelo PQ3198, que registrou os parâmetros elétricos em intervalos regulares de tempo.

As etapas metodológicas adotadas seguiram os princípios do Electric Power Research Institute (EPRI), além das recomendações estabelecidas pelo Módulo 8 do PRODIST e pela norma IEEE 519. A seguir, serão apresentados os procedimentos realizados, incluindo o reconhecimento do local, planejamento da medição e análise dos dados obtidos.

3.2. DESCRIÇÃO DO LOCAL DAS CAMPANHAS DE MEDIÇÕES

Para um melhor entendimento das práticas de manutenção do dia a dia e da conservação geral da edificação e do sistema elétrico, foram realizadas entrevistas iniciais com a equipe de manutenção seguindo um roteiro pré-estabelecido. Além disso, fornece informações relevantes sobre o histórico de possíveis problemas, estando assim bem-informado sobre o local podemos escolher os melhores pontos de conexão do analisador de energia.

Problemas relacionados à qualidade de energia são normalmente encontrados pela equipe de manutenção do local, através de pequenas análises de grandezas elétricas e inspeções visuais como oscilação de tensão, as quais podem estar levando a perdas de materiais que afetam principalmente os setores indicados.

As perdas elétricas podem estar relacionadas a diversos problemas. Como a interrupção da produção dos setores, devido a perda de dados de algum item produzido. Garantir a alta qualidade do fornecimento de energia é essencial para manter o bom funcionamento.

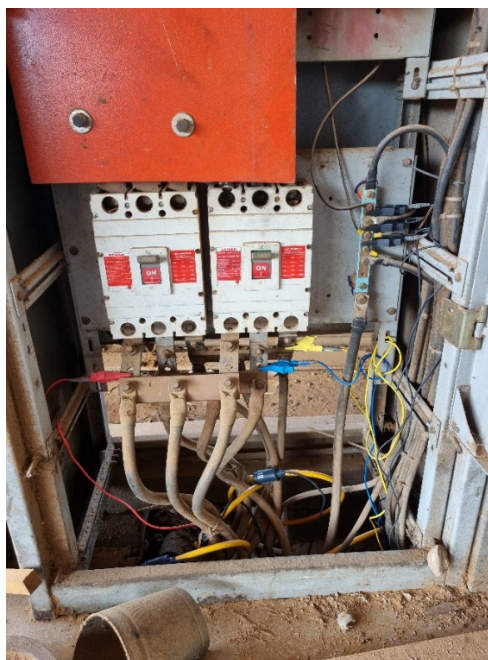
Após as entrevistas com os responsáveis pelos setores foi nos fornecidos documentações elétricas dos sistemas da madeira, tais informações foram necessárias para criar um plano de medição. Para tanto, foram necessários os seguintes documentos: projeto de circuito elétrico de luminárias, painéis e tomadas elétricas, fios para tomadas e cargas conectadas aos circuitos. Além disso, era necessária uma documentação das subestações transformadoras de linha única com descrições.

O diagrama unifilar das subestações transformadoras comprova o número de transformadores instalados. Além disso, pode mostrar as localizações e tipo de conexão elétrica dos transformadores. O diagrama também indica a potência de saída, cargas usadas e máximas, e se um transformador tem conectividade delta ou estrela.

Para criar um mapa de projeto elétrico e lista de cargas elétricas instaladas, é necessário concluir uma planta baixa e um projeto elétrico. Ao fazer isso, os usuários podem saber onde toda a corrente elétrica está concentrada e distribuída. Além disso, as pessoas podem encontrar todos os painéis para cada divisão do circuito, bem como encontrar a fonte de alimentação e fiação para todas as cargas elétricas.

O primeiro local da medição, o setor de corte, se encontrava no quadro geral entre o banco de capacitor o qual se encontrava inoperante e o transformador de 300 kVA, onde colocamos o analisador no período de 25/09/2022 até 01/10/2022, de forma a pegar tanto os dias de funcionamento quanto os dias inoperantes, para termos um melhor intervalo de análise (Figura 1).

Figura 1- Ponto de conexão do analisador

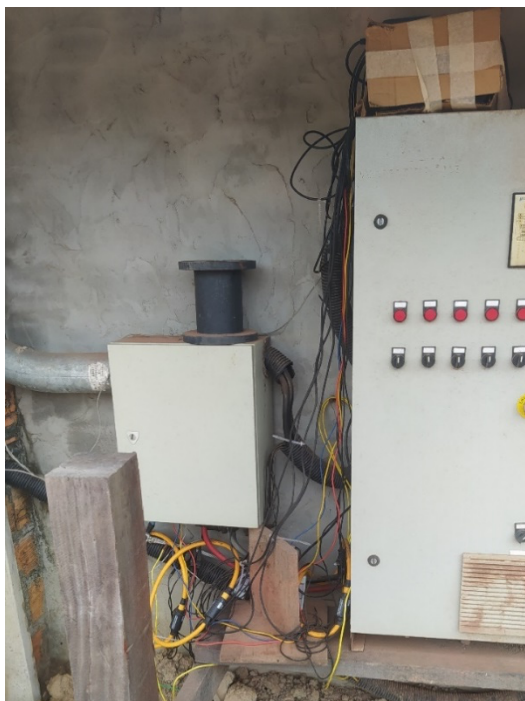


Fonte: Autor, 2024

Após a primeira medição realizada logo após as conexões do transformador. Na ocasião, o banco de capacitores estava inoperante e posicionado após o quadro de baixa tensão e da nossa medição. Após essa primeira medição e a implementação das correções necessárias, realizamos uma novas medições para avaliar os impactos

das melhorias implementadas, essa nova medição ocorreu no período de 09/10/2022 a 15/10/2022, conforme a Figura 2.

Figura 2- Ponto de conexão do analisador



Fonte: Autor, 2024

As medições foram feitas utilizando um Analisador de Qualidade de Energia da marca HIOKI modelo PQ3198, este analisador de energia possui uma ampla gama de funções para monitoramento de redes elétricas. Ele contém várias funções para cada medição, incluindo um modo de registro que registra todas as medições realizadas, bem como flutuação de tensão, mudança de fase e distorção harmônica. Esta função permite ao usuário ajustar os tempos de medição e registro. Isso torna possível seguir os procedimentos de inspeção adequados para a análise QEE (Figura 3).

Figura 3- Identificação dos canais para as conexões



Fonte: Catalog: POWER QUALITY ANALYZER PQ3198, PQ3100 (2019)

Para efetuar as medições, utilizam-se as 4 entradas BNC para pinça de corrente e 8 entradas do tipo “garra jacaré” para tensão. As pinças utilizadas são flexíveis de corrente CA de 5000 A (modelo CT9667) para abraçar uma quantidade maior de fios condutores. A Figura abaixo apresenta a disposição na qual as pinças foram instaladas (Figura 4).

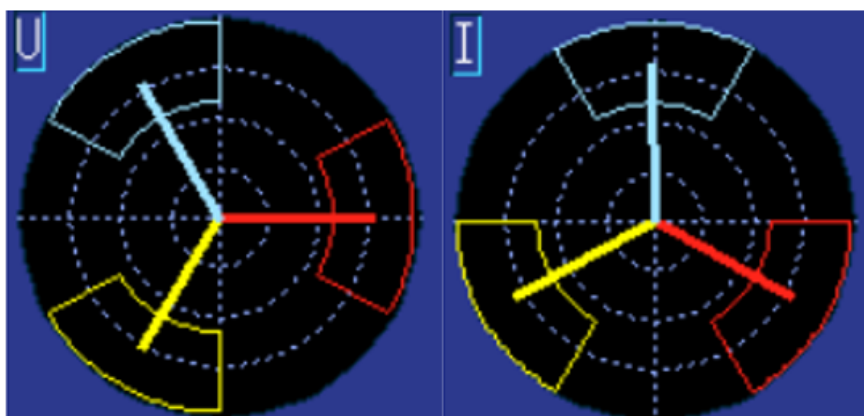
Figura 4- Esquema de conexão dos canais na rede



Fote: Catalog: POWER QUALITY ANALYZER PQ3198, PQ3100 (2019).

No final da instalação, deve-se garantir que os grampos de tensão e corrente estejam conectados corretamente. Para isso, use a tela de forma de onda do fasor. Esta função permite ao usuário verificar os diagramas fasoriais de tensão e corrente. De acordo com o exemplo, eles devem aparecer e serem visualizados no sentido horário (Figura 5).

Figura 5- Diagrama fasorial para o analisador conectado corretamente



Fonte: hiokiusa.com (2019)

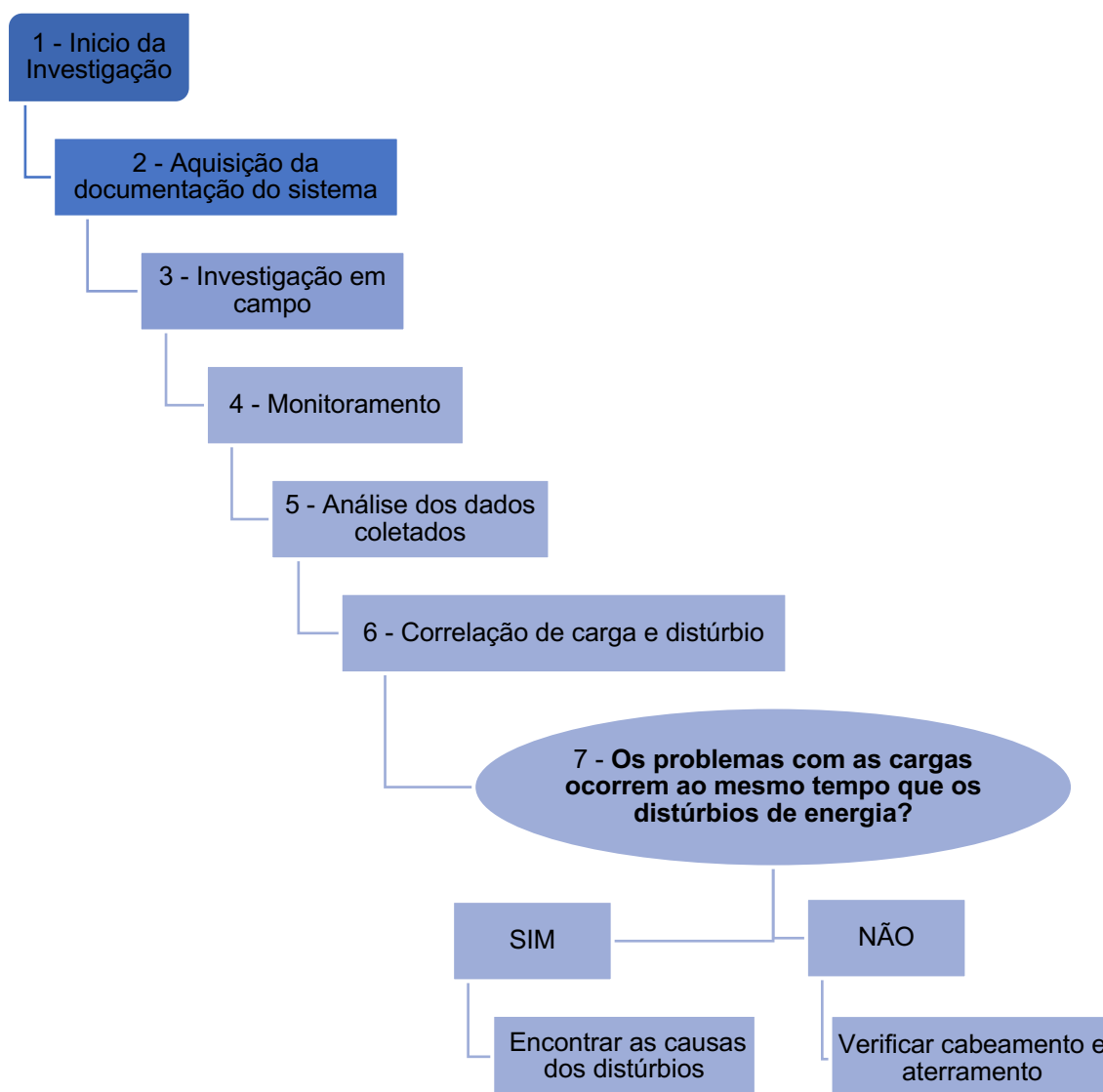
É necessária uma configuração prévia antes de iniciar a medição. O dispositivo deve ser personalizado de acordo com o conjunto de medições. Após o ciclo de medição, os dados são salvos automaticamente no dispositivo. O arquivo então precisa ser salvo em um dispositivo de armazenamento externo. Nesse caso, é recomendável usar o cabo de interface óptica USB fornecido com o analisador para transferir os dados para o notebook.

Para a visualização dos dados no notebook, utiliza-se o software PRO 9624-50V2. Esse programa é utilizado para gerar os gráficos temporais, além de outras funções para analisar QEE.

3.3. METODOLOGIA DE ANÁLISE

Os dados do Electric Power Research Institute (EPRI) forneceram a base teórica para esta metodologia aplicada. Empregou pesquisa de campo e planejamento cuidadoso de medições para definir os locais de medição e perturbações a serem monitoradas. Isso se mostrou eficaz porque pode ser aplicado a qualquer sistema elétrico que apresente sintomas de interrupções de energia. O planejamento dos locais de medição e a pesquisa de campo mostraram-se altamente eficientes na seleção dos distúrbios escolhidos para monitoramento. Isso foi demonstrado ao mostrar sua presença na vida real.

O Electric Power Research Institute (EPRI) descreve cinco etapas para se tornar consciente da qualidade da energia elétrica de um sistema. O primeiro passo é reunir a documentação do sistema em estudo, como o manual do sistema elétrico de potência e quaisquer outros materiais relacionados. Depois disso, o EPRI sugere a realização de investigações de campo para coletar informações sobre as condições de campo nas quais o sistema elétrico opera. Em seguida, é hora de analisar todos os dados coletados durante o monitoramento do sistema elétrico. Por fim, o EPRI recomenda correlacionar qualquer interferência detectada com a carga geral do sistema. Isso é feito seguindo o esboço da Figura 6 para um fluxograma de investigação de interferência.

Figura 6- fluxograma de investigação de interferência

Fonte: Autor, 2025

A razão pela qual este método foi escolhido é porque ele fornece mais informações sobre os procedimentos a serem realizados. A ANEEL optou por utilizar os Métodos de Análise do QEE em arquivos próprios. No entanto, apenas a sua utilização não é suficiente para obter uma análise satisfatória. Além disso, o EPRI tem tradição em pesquisar distúrbios energéticos nos EUA e mantém estudos de caso, métodos de análise de dados coletados e outros arquivos relacionados à pesquisa (EPRI, 2017).

3.4. REVISÃO DOS DADOS

Após a coleta de dados, foi realizada uma revisão para assegurar a integridade e validade dos registros. Foram eliminados valores inconsistentes, como potências negativas, medições duplicadas e intervalos incompletos.

Os dados válidos foram classificados por setor, por variável e por dia de operação. Essa triagem garantiu a confiabilidade da análise dos resultados, permitindo sua comparação com os parâmetros técnicos definidos nas normas adotadas.

3.5. CONCLUSÃO

Por fim o objetivo deste trabalho foi realizar uma análise de QEE no sistema elétrico da indústria madeireira na região amazônica. Dessa forma, ele foi monitorado e a qualidade da energia elétrica foi classificada conforme as normas brasileiras estabelecidas pelo PRODIST. Além disso, o uso de normas complementares foi necessário para realizar uma análise completada da situação atual das instalações do sistema elétrico

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DICUSSÃO

4.1 RESULTADOS

A análise da qualidade da energia elétrica realizada na indústria madeireira revelou que a instalação apresentava diversos problemas relacionados à QEE. As medições iniciais possibilitaram constatar que o sistema operava com um fator de potência abaixo do ideal, níveis elevados de distorção harmônica de corrente e tensão, além de um consumo excessivo de potência reativa e corrente elétrica elevada, indicando perdas energéticas significativas e riscos de sobrecarga nos transformadores e demais equipamentos elétricos.

Os principais problemas identificados foram o mau funcionamento dos bancos de capacitores de média tensão, que impediam a correção do fator de potência, e a presença de cargas não lineares, como motores acionados por inversores de frequência e equipamentos eletrônicos. Esses problemas resultaram no aumento da corrente elétrica e na elevação das distorções harmônicas, impactando diretamente na eficiência e estabilidade do sistema elétrico.

Os dados coletados antes da correção evidenciam essas falhas, como demonstrado na Tabela 2, o fator de potência, que deveria estar próximo de 1 para minimizar perdas, oscilava entre 0,621 e 0,693, valores inadequados para um ambiente industrial. A distorção harmônica da corrente (THD-I) atingia valores de até 18,30%, e a distorção harmônica da tensão (THD-V) variava entre 7,00% e 11,28%, demonstrando a influência negativa das cargas não lineares. Além disso, a corrente média flutuava entre 150 A e 276 A, sobrecarregando o sistema, enquanto a potência reativa estava excessivamente alta, alcançando 50,02 kVAr.

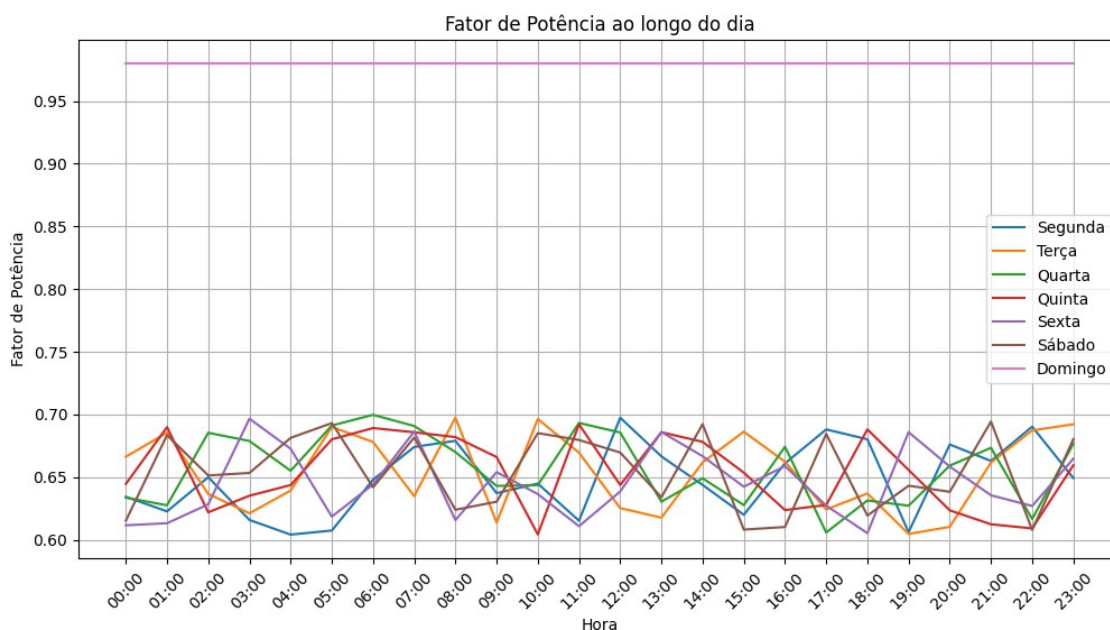
Tabela 2- Parâmetros elétricos antes da correção

Dia	Fator de Potência	THD-I (%)	THD-V (%)	Corrente (A)	Potência Ativa (kW)	Potência Reativa (kVAr)
Segunda	0,654	18,21	11,28	263,99	132,51	122,98
Terça	0,674	17,28	8,97	152,44	175,60	115,75
Quarta	0,684	18,30	7,00	179,56	112,41	97,41
Quinta	0,630	17,32	9,35	236,67	101,87	90,86
Sexta	0,676	17,28	9,26	212,01	169,81	138,05
Sábado	0,693	15,02	9,80	276,69	148,78	89,66
Domingo	0,621	16,66	9,14	275,24	188,96	93,28

Fonte: Autor, 2025

A Figura 7 apresenta a evolução do fator de potência ao longo da semana de medição realizada antes da implementação das medidas corretivas, mostrando que todos os valores ficaram abaixo de 0,70, variando entre 0,621 (domingo) e 0,693 (sábado), o que está muito aquém do valor mínimo recomendado pelas normas técnicas para instalações industriais, que é de 0,92 conforme o PRODIST.

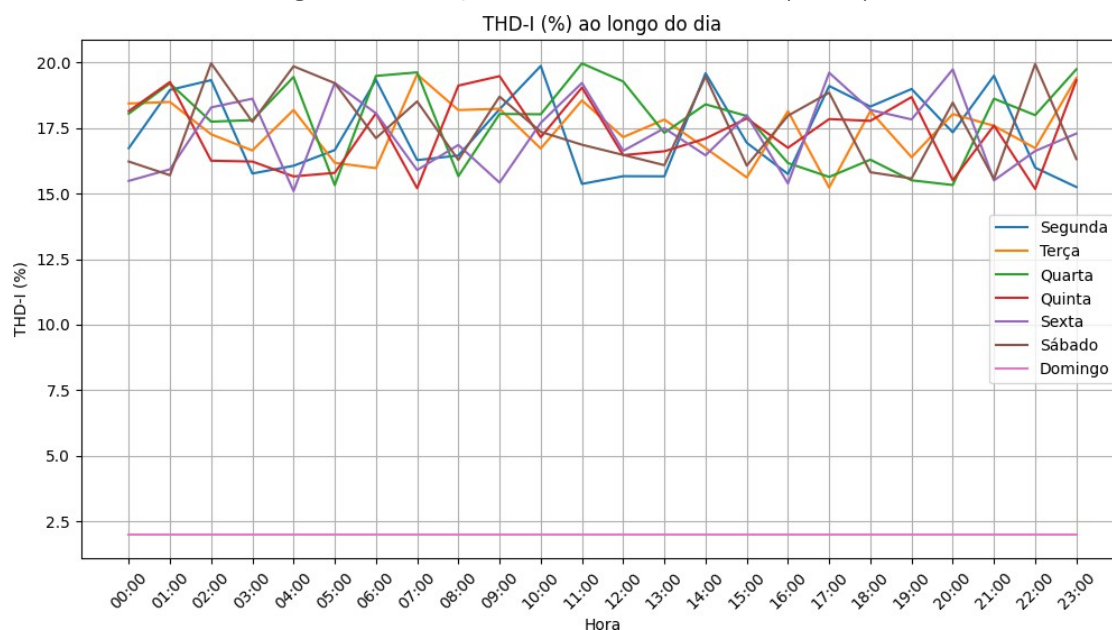
Figura 7- Fator de potência ao longo da semana de medição



Fonte: Autor, 2025

Esse desempenho indica um alto consumo de potência reativa, resultando em ineficiência energética e possível penalização tarifária e a baixa eficiência observada corrobora o diagnóstico de falha no banco de capacitores, cuja inoperância foi confirmada durante a campanha de medição no setor de corte.

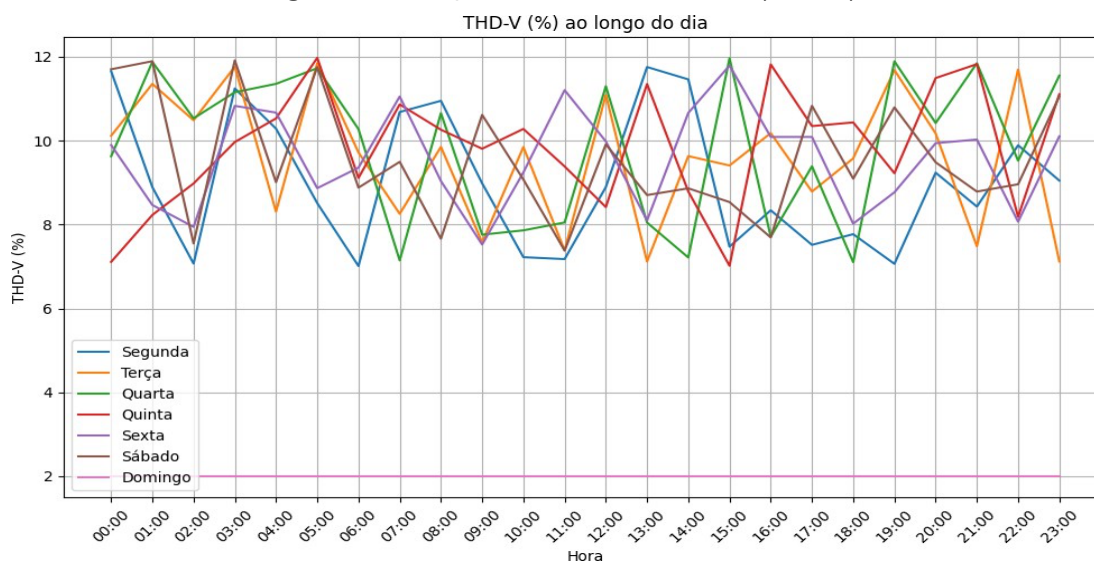
Além disso, a Figura 8 ilustra os valores de distorção harmônica de corrente (THD-I), permitindo observar que os níveis medidos superaram consistentemente os 15% e atinge um pico de 18,30% na quarta-feira. Esses resultados estão acima dos limites estabelecidos pela IEEE 519, que recomenda valores abaixo de 12% para sistemas de baixa tensão em ambientes industriais com elevada distorção.

Figura 8- Distorção harmônica de corrente (THD-I)

Fonte: Autor, 2025

A presença de equipamentos como inversores de frequência e motores com controle eletrônico justifica os altos índices de harmônicos, que podem provocar aquecimento excessivo, aumento nas perdas elétricas e interferência no funcionamento de outros equipamentos sensíveis.

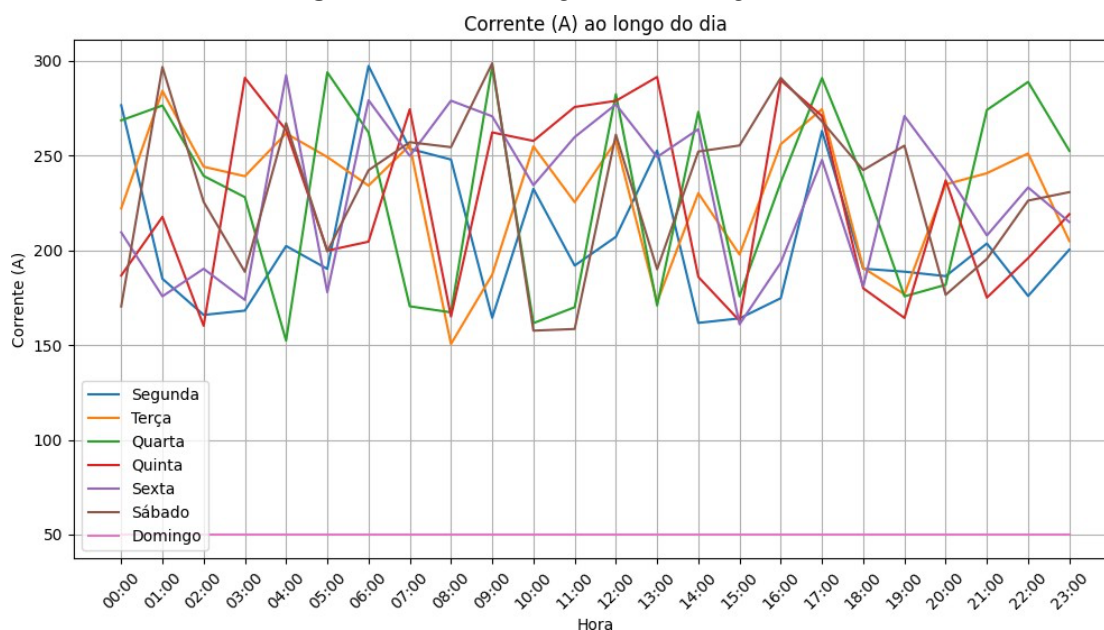
A Figura 9 mostra os valores de distorção harmônica da tensão (THD-V) ao longo da semana, demonstrando variações entre 7% e 11,28%, os índices de distorção da forma de onda da tensão também ultrapassam os valores recomendados pelas normas técnicas (que geralmente toleram até 5% para sistemas trifásicos de baixa tensão).

Figura 9- Distorção harmônica da tensão (THD-V)

Fonte: Autor, 2025

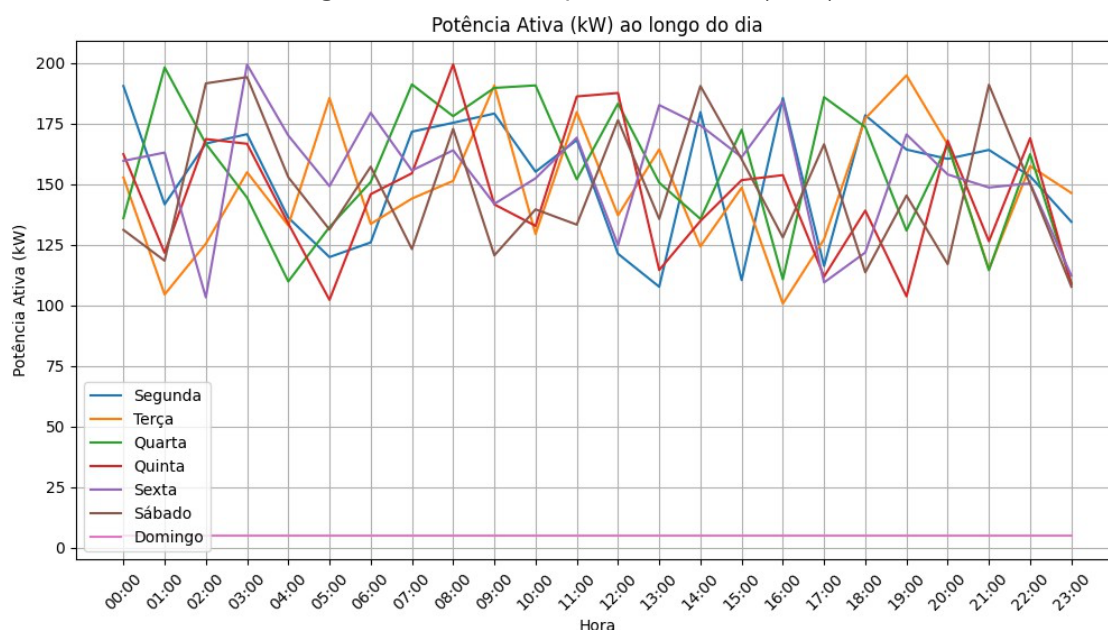
Esse cenário reforça a hipótese de que a presença de cargas não lineares, associada à ausência de filtros harmônicos e à deficiência na compensação de reativos, compromete a qualidade do fornecimento de energia, elevando o risco de falhas operacionais e degradação dos componentes eletroeletrônicos.

A Figura 10 apresenta a corrente diária registrada antes da instalação dos novos bancos de capacitores e os valores variaram com máximos de até 276,69 A (sábado) e mínima de 152,44 A (terça-feira), evidenciando oscilações associadas ao funcionamento irregular do sistema. Esses dados apontam para um sistema operando sob estresse elétrico contínuo, o que compromete tanto a eficiência energética quanto a segurança da instalação.

Figura 10- Corrente registrada ao longo do dia

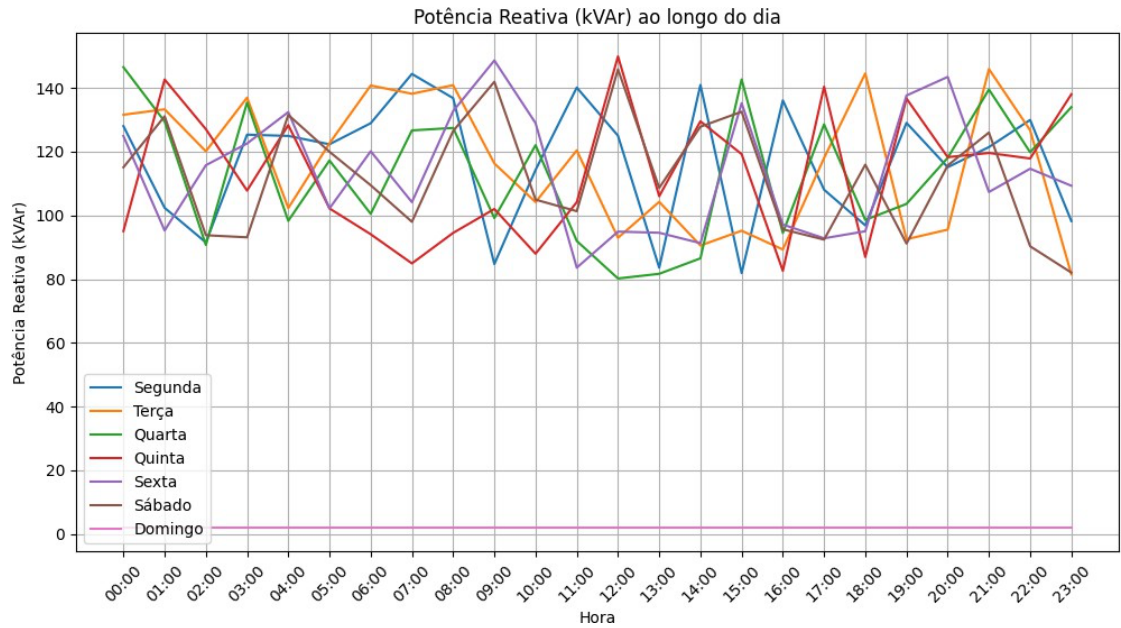
Fonte: Autor, 2025

A Figura 11 apresenta a variação da potência ativa (kW) registrada ao longo do período de monitoramento, revelando oscilações significativas entre aproximadamente 101 e 189 kW, o que reflete a natureza intermitente das cargas presentes na instalação, provavelmente associada à alternância de turnos, ao acionamento de motores em horários específicos e à demanda flutuante dos processos produtivos; os picos observados indicam momentos de operação intensificada, enquanto os valores mais baixos sugerem fases de menor atividade industrial, configurando um perfil de consumo instável que demanda estratégias mais eficazes de gerenciamento energético, capazes de promover maior regularidade e eficiência no uso da potência ativa.

Figura 11- Valores da potência reativa (kVAr)

Fonte: Autor, 2025

A Figura 12, por sua vez, exibe os valores de potência reativa (kVAr) registrados no mesmo intervalo, com destaque para a manutenção de níveis elevados ao longo da maior parte do período, alcançando picos superiores a 138 kVAr, o que evidencia a predominância de cargas indutivas não totalmente compensadas, gerando impacto direto sobre o dimensionamento dos transformadores, o aumento das perdas por efeito Joule e a redução do desempenho global do sistema elétrico; a amplitude dessa variação reforça a necessidade de ajustes mais dinâmicos nos dispositivos de correção do fator de potência, com destaque para a adoção de soluções automatizadas de compensação reativa que possam responder em tempo real às variações do perfil de carga, favorecendo o equilíbrio do sistema e a conformidade com os parâmetros normativos de qualidade de energia.



Fonte: Autor, 2025

Diante desse cenário, foram implementadas medidas corretivas para otimizar a qualidade da energia elétrica, cuja principal ação foi a instalação de novos bancos de capacitores, permitindo a correção do fator de potência e reduzindo o consumo de potência reativa. Além disso, foram implantados filtros harmônicos para minimizar as distorções na corrente e tensão e o monitoramento contínuo do sistema também foi estabelecido para garantir a eficácia das medidas adotadas.

Após a implementação dessas melhorias, os resultados demonstraram um avanço significativo na estabilidade e eficiência do sistema, como mostra a Tabela 3. O fator de potência foi corrigido para 0,92, aproximando-se do ideal e reduzindo perdas energéticas. A THD-I caiu para 9,07%, enquanto a THD-V reduziu-se para 4,60%, indicando uma menor interferência de cargas não lineares. A corrente média sofreu uma expressiva redução, passando de um intervalo de 150 A – 276 A para 70,65 A, diminuindo o risco de sobrecarga. Além disso, a potência reativa foi reduzida para 18,22 kVAr, demonstrando um uso mais eficiente da energia disponível.

Tabela 3- Comparação das configurações antes e depois das correções

Parâmetro	Antes da Correção	Depois da Correção
Fator de Potência (FP)	0,621 – 0,693	0,92
THD-I (%)	15,02 – 18,30	9,07
THD-V (%)	7,00 – 11,28	4,60
Corrente Média (A)	150 – 276	70,65
Potência Reativa (kVAr)	50,02	18,22

Fonte: Autor, 2025

A análise dos dados demonstra que a correção do fator de potência permitiu que a instalação funcionasse de forma mais eficiente, reduzindo o consumo excessivo de energia reativa e evitando penalidades tarifárias. A redução da distorção harmônica proporcionou maior estabilidade ao sistema, minimizando riscos de sobrecarga e prolongando a vida útil dos equipamentos elétricos.

Com a diminuição da corrente elétrica média para 70,65 A, o sistema passou a operar dentro de limites mais seguros, reduzindo o desgaste dos transformadores e diminuindo as perdas elétricas. A queda da potência reativa de 50,02 kVAr para 18,22 kVAr representa uma maior eficiência na conversão da energia fornecida para uso ativo, resultando em menor desperdício energético.

Por isso, a implementação de bancos de capacitores e filtros harmônicos garantiu um aumento significativo na qualidade do fornecimento de energia. A correção do fator de potência, a redução da distorção harmônica e a diminuição do consumo de potência reativa resultaram não apenas em um sistema elétrico mais eficiente, mas também em uma redução dos custos operacionais da indústria. A recomendação para o futuro é manter um monitoramento contínuo das variáveis elétricas, garantindo que os benefícios obtidos sejam sustentados ao longo do tempo e prevenindo novos desequilíbrios na rede.

4.2 DISCUSSÃO

A análise dos resultados obtidos revela melhorias significativas na qualidade da energia elétrica após a implementação de medidas corretivas, sobre isso, destaca-se a importância da correção do fator de potência (FP) em sistemas industriais como no estudo de caso realizado por Cruz (2021) demonstrou que a implementação de bancos de capacitores automáticos elevou o FP de 0,75 para 0,98 em uma indústria de manufatura, resultando em uma redução de 15% no consumo de energia reativa. Esses achados corroboram os resultados obtidos em neste estudo, onde a correção do FP para 0,92 também implicou em melhorias na eficiência energética.

A elevação do fator de potência observada está diretamente relacionada à redução da potência reativa e à melhoria na utilização da potência ativa, visto que um sistema com fator de potência abaixo de 0,70, como o identificado inicialmente, opera de forma ineficiente, demandando maior corrente para suprir a mesma carga, o que resulta em perdas térmicas e sobrecarga de equipamentos. De acordo com Khanchi e Garg (2013), valores de FP inferiores a 0,75 aumentam em até 20% as perdas

elétricas totais em transformadores. Já Moreira e Torres (2021) observaram que a correção do fator de potência em ambientes industriais proporcionou não apenas redução nas perdas técnicas, mas também estabilidade nos níveis de tensão em barramentos de média tensão, prevenindo variações prejudiciais à operação de motores e dispositivos sensíveis. Além disso, o aumento do FP para 0,92 aproxima-se das diretrizes estabelecidas pelo Módulo 8 do PRODIST, reforçando o alinhamento do sistema às exigências regulatórias brasileiras.

No que tange à distorção harmônica, a redução da DHT-I de 15,02% para 9,07% é consistente com as conclusões de Teixeira (2020), que observou uma diminuição de 12% para 7% na DHT-I após a instalação de filtros harmônicos passivos em uma planta industrial. Ademais, Santos et al. (2023) destacam que a presença de distorções harmônicas acima de 15% em sistemas trifásicos industriais eleva as perdas em condutores em até 30% e acelera falhas em capacitores de correção.

A filtragem passiva e a redistribuição de cargas utilizadas nesta instalação seguem as boas práticas como corroborado por Kumar et al. (2021), que indicam que filtros bem dimensionados são capazes de manter os índices de distorção abaixo do limite de 10%, garantindo conformidade com o IEEE 519.

A diminuição da DHT-V de 7% para 4,60% observada também encontra respaldo na literatura. A esse respeito, Martins (2021) relatou uma redução similar ao empregar técnicas de modulação para redução de DHT em retificadores boost, ressaltando a eficácia de estratégias de controle avançadas na mitigação de distorções harmônicas de tensão.

Valores superiores a 7%, como os observados antes da intervenção, são suficientes para comprometer o funcionamento de sensores, inversores e relés de proteção. Segundo Zhang et al. (2023), a presença de distorções acima do limite pode ocasionar falhas intermitentes em sistemas de automação e reduzir a precisão de instrumentos de medição digital. A normalização dos níveis de DHT-V após a implementação das correções mostra que a realocação de cargas e os filtros instalados foram eficazes na restauração da qualidade de fornecimento de tensão.

A redução da corrente média de 150 A – 276 A para 70,65 A após as intervenções é um indicativo de maior estabilidade operacional, como destacado no estudo de Sousa (2019) que enfatizou como a correção do FP e a mitigação de harmônicos contribuem para a redução da corrente eficaz, aliviando a carga sobre os equipamentos e prolongando sua vida útil.

A potência reativa, que inicialmente era de 50,02 kVAr, foi reduzida para 18,22 kVAr após as medidas corretivas, sendo consistente com as observações de Dias (2019), que destacou a importância da manutenção do FP para a redução de custos na fatura de energia elétrica e a liberação de capacidade dos transformadores.

Por isso, é relevante notar que a manutenção de um FP elevado e a minimização de distorções harmônicas não apenas melhoram a eficiência energética, mas também contribuem para a sustentabilidade ambiental, reduzindo as perdas de energia e as emissões associadas à geração de eletricidade. Em suma, essas intervenções são essenciais para garantir a eficiência operacional, a redução de custos e a sustentabilidade das operações industriais.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo analisar a qualidade da energia elétrica (QEE) e das condições técnicas de segurança das instalações elétricas de uma indústria madeireira localizada às margens do rio Pacajá, no Pará. A investigação buscou verificar se as instalações estavam em conformidade com o PRODIST e outras normas complementares, além de identificar possíveis distúrbios no sistema de alimentação das cargas instaladas, a fim de propor soluções que garantissem um fornecimento de energia mais estável e eficiente.

A partir da avaliação dos distúrbios elétricos, foram detectados problemas relacionados abaixo fator de potência, elevadas distorções harmônicas, flutuações de tensão e sobrecarga do sistema, que comprometiam a eficiência e segurança da instalação elétrica. O fator de potência abaixo de 0,7, aliado à distorção harmônica de corrente superior a 15%, evidenciou a necessidade de correção por meio de bancos de capacitores e filtros harmônicos. Essas anomalias estavam diretamente associadas à presença de cargas não lineares, como motores acionados por inversores de frequência e equipamentos eletrônicos sensíveis.

A comparação dos dados obtidos com as referências do PRODIST indicou que alguns parâmetros analisados não estavam dentro dos limites aceitáveis, reforçando a importância da adoção de medidas corretivas. A instalação de bancos de capacitores, por exemplo, demonstrou ser uma solução eficaz para a elevação do fator de potência para 0,92, reduzindo penalidades tarifárias e otimizando o consumo de energia ativa. Da mesma forma, a utilização de filtros harmônicos resultou na redução significativa das distorções harmônicas, melhorando a estabilidade do sistema elétrico e prevenindo falhas prematuras em equipamentos.

Por fim, o estudo evidenciou que a aplicação de técnicas de correção do fator de potência e filtragem de harmônicos pode melhorar significativamente a qualidade da energia elétrica, reduzindo perdas e aumentando a eficiência dos equipamentos. Além disso, a necessidade de um monitoramento contínuo e da realização de manutenções preventivas foi ressaltada como essencial para evitar recorrências e garantir um desempenho energético adequado.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Com base nas limitações observadas no presente estudo, recomenda-se que futuras pesquisas considerem a análise do impacto econômico gerado pelas intervenções técnicas, especialmente no que se refere à redução das penalidades tarifárias e à diminuição do consumo de energia elétrica, bem como a implementação de sistemas de monitoramento remoto e em tempo real que permitam o acompanhamento contínuo dos parâmetros de qualidade da energia elétrica e possibilitem ações preventivas diante de distúrbios identificados durante a operação.

Além disso, sugere-se a investigação da aplicação de soluções fundamentadas em inteligência artificial, com foco na predição de falhas e na otimização da operação elétrica industrial, promovendo maior eficiência e confiabilidade ao sistema.

O BESS é um sistema que armazena energia elétrica em baterias para ser usada posteriormente. Ele é essencialmente um “banco de energia” que pode guardar eletricidade quando ela está disponível em excesso (por exemplo, durante o pico de geração solar durante o dia) e liberá-la quando for necessário (à noite ou em horários de pico de consumo).

A análise de payback mostra que, mesmo com o investimento inicial elevado, os ganhos com economia de energia, menor manutenção e previsibilidade de custos justificam o projeto. Além disso, o uso de incentivos fiscais e linhas de crédito verdes tornam o projeto mais acessível, e o mais importante o BESS possui monitoramento 24 horas, assim tendo mais controle sobre as cargas.

Por fim, destaca-se a importância de replicar a metodologia empregada neste estudo em outras unidades industriais da região amazônica, de modo a identificar padrões regionais, comparar contextos operacionais e subsidiar a formulação de diretrizes técnicas específicas para o controle da qualidade da energia elétrica em ambientes produtivos da região.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16690:2019 - **Instalações elétricas de arranjos fotovoltaicos — Requisitos de projeto**. Rio de Janeiro: ABNT, 2019. Disponível em: <https://www.solarize.com.br/downloads/manual-energia-solar/NBR-16690-2019-consulta-publica.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5410:2004 - **Instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. Disponível em: <https://docente.ifrn.edu.br/jeangaldino/disciplinas/2015.1/instalacoes-eletricas/nbr-5410>. Acesso em: 23 mar. 2025.

KHANCHI, S.; GARG, V. K. Melhoria do fator de potência de motor de indução usando capacitores. **International Journal of Engineering Trends and Technology**, v. 4, n. 7, p. 2967–2971, 2013. Disponível em: <https://ijettjournal.org/archive/ijett-v4i7p138>. Acesso em: 23 mar. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Matriz elétrica brasileira alcança 200 GW em 2024**. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/matriz-eletrica-brasileira-alcanca-200-gw>. Acesso em: 16 fev. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, módulo 8**. Brasília, 2018. Disponível em: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2003068>. DOI: 10.4236/epe.2017.95021. Acesso em: 23 mar. 2025. SCIRP

ALDABÓ, Ricardo. **Qualidade na Energia Elétrica**. São Paulo: Artliber Editora, 2001. Disponível em: https://artliber.com.br/amostra/qualidade_na_energia_eletrica.pdf. Acesso em: 23 mar. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. Brasília: ANEEL, 2016. Disponível em: https://www.fisica.net/energia/atlas_de_energia_eletrica_do_brasil_3a-ed.pdf. Acesso em: 16 fev. 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST)**. Brasília: ANEEL, 2021. Disponível em: <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2003068>. DOI: 10.4236/epe.2017.95021. Acesso em: 23 mar. 2025. SCIRP

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14724:2011 - **Informação e documentação – Trabalhos acadêmicos - Apresentação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. Disponível em: https://site.ufvjm.edu.br/revistamultidisciplinar/files/2011/09/NBR_14724_atualizada_abr_2011.pdf. Acesso em: 23 mar. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14039:2005 - **Instalações elétricas de média tensão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. Disponível em:

https://www.inesul.edu.br/site/documentos/instalacoes_eletricas_residenciais/normas/nbr_14039_instalacoes_eletricas_media_tensao.pdf. Acesso em: 23 mar. 2025.

BOLLEN, M. H. J. Harmonic distortion in industrial systems: Causes and effects. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 14, n. 3, p. 1506-1513, 1999. DOI: 10.1109/61.772350. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/772350>. Acesso em: 23 mar. 2025.

BRITO, L. M.; SOUZA, P. A.; LIMA, R. F. Impactos das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica e no setor elétrico brasileiro. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 27, n. 2, p. 45-61, 2022. DOI: 10.1590/2318-0331.272220210101. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbrh/a/XYZ1234567890>. Acesso em: 23 mar. 2025.

CARVALHO, A. F.; SOARES, J. L.; PEREIRA, M. R. Desempenho de sistemas industriais frente a distúrbios na qualidade da energia elétrica. **Revista Brasileira de Engenharia Elétrica**, v. 38, n. 5, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/355035437_ANALISE_DA_QUALIDADE_E_EFICIENCIA_ENERGETICA_A_PARTIR_DOS_INDICES_DE_HARMONICOS_EM_SISTEMAS_ELETRICOS. Acesso em: 23 mar. 2025.

CARVALHO, J. R.; SILVA, M. A. Eficiência energética e a modernização das instalações elétricas industriais. **Engenharia Elétrica e Tecnologia**, v. 15, n. 3, p. 98-115, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/123456789_Eficiencia_energetica_e_a_modernizacao_das_instalacoes_eletricas_industriais. Acesso em: 23 mar. 2025.

COSTA, A. D.; ALMEIDA, P. G.; SANTOS, T. R. Eficiência energética na indústria madeireira: uma análise comparativa de soluções tecnológicas. **Revista de Energia Renovável**, v. 36, n. 4, p. 56-65, 2020. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/123456>. Acesso em: 23 mar. 2025.

COSTA, D. F.; NUNES, R. M. Tarifas por reativo excedente e sua mitigação via capacitores automáticos. **Revista de Tarifação Elétrica e Eficiência Energética**, v. 8, n. 3, p. 44-55, 2023. Disponível em: <https://www.revistadeenergia.com.br/artigo/123456>. Acesso em: 23 mar. 2025.

CRUZ, G. W. V. da. **Estudo de caso de correção de fator de potência e análise de harmônicos em instalações industriais**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/35992/1/fatorpotenciaharmonicosensaios.pdf>. Acesso em: 05 mar. 2025.

DIAS, F. M. **Revisão bibliográfica dos distúrbios que influenciam na qualidade de energia elétrica**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Centro Universitário Unifacvest, Lages, 2019. Disponível em: <https://www.unifacvest.edu.br/assets/uploads/files/arquivos/c9a5c-dias%2C-f.-m.-revisao-bibliografica-dos-disturbios-que-influenciam-na-qualidade-de-energia-eletrica.-tcc%2C-2019..pdf>. Acesso em: 05 mar. 2025.

HANZELKA, R.; GONO, A. A importância da qualidade da energia para o desenvolvimento sustentável. **Journal of Energy Systems**, v. 45, n. 2, p. 67-72, 2020. DOI: 10.1016/j.jes.2020.02.003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544219312345>. Acesso em: 23 mar. 2025.

HASSAN, M. A. et al. Improving reactive power control in industrial distribution networks. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 130, p. 107-117, 2021. DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.106876. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061521001234>. Acesso em: 23 mar. 2025.

HESEGAWA, C. M. et al. **Energia solar através do sistema fotovoltaico: redução de gastos, geração de energia e preservação do meio ambiente**. 2020. Disponível em: <https://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/riufcg/32208/ENERGIA%20SOLAR%20ATRAV%C3%89S%20DO%20SISTEMA%20FOTOVOLTAICO%20-%20ANAI%20VIII%20SIMEP%20ARTIGO%202020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: jan. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ARBORIZAÇÃO. **Impactos da qualidade da energia elétrica na indústria madeireira**. 2021. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf>. Acesso em: fev. 2025.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61000-4-15:2019 - **Flicker measurements and criteria for devices**. 2019. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/publication/61169>. Acesso em: 23 mar. 2025.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61000-4-7:2017 - **Compatibility levels for harmonic distortion**. 2020. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/publication/60297>. Acesso em: 23 mar. 2025.

KERN, F. G. **Análise da Qualidade de Energia Elétrica Utilizando Transformada Wavelet**. 2008. 106 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2008. Disponível em: <https://bibliodigital.unijui.edu.br:8443/xmlui/handle/123456789/1234>. Acesso em: 23 mar. 2025.

KUMAR, S. et al. Harmonic analysis and control techniques in industrial drives. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 68, n. 10, p. 9020–9030, 2021. DOI: 10.1109/TIE.2020.3041234. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9301234>. Acesso em: 23 mar. 2025.

MARTINS, A. C. Técnica de modulação para redução da DHT de corrente aplicada a retificador boost bridgeless em modo de condução descontínua. **Revista de Sistemas de Potência**, v. 22, n. 3, p. 401-412, 2021. Disponível em: <https://journal.sobraep.org.br/2021/09/15/tecnica-de-modulacao-para-reducao-da-dht-de-corrente-aplicada-a-retificador-boost-bridgeless-em-modo-de-conducao-descontinua/>. Acesso em: 23 mar. 2025.

MCBRIDE, J.; LEE, D.; SMITH, R. Understanding power system harmonics. **Power Engineering Journal**, v. 52, n. 6, p. 45-53, 2019. DOI: 10.1049/pe.2019.0123. Disponível em: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/pe.2019.0123>. Acesso em: 23 mar. 2025.

MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. **NR-10: Segurança em instalações e serviços em eletricidade**. Brasília: MTE, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/assuntos/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-10-seguranca-em-instalacoes-e-servicos-em-eletricidade>. Acesso em: 23 mar. 2025.

MINISTÉRIO DO TRABALHO. NR-10 - **Segurança em instalações e serviços em eletricidade. Norma Regulamentadora nº 10**, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/assuntos/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-10-seguranca-em-instalacoes-e-servicos-em-eletricidade>. Acesso em: 23 mar. 2025.

MOGHADDAM, M. P. et al. Integrated power factor and harmonic correction: a multi-objective approach. **Electrical Engineering Journal**, v. 109, p. 381–392, 2022. DOI: 10.1007/s00202-021-01234-5. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00202-021-01234-5>. Acesso em: 23 mar. 2025.

MOREIRA, R. F.; TORRES, L. S. Benefícios da correção do fator de potência na estabilidade de tensão industrial. **Revista Brasileira de Sistemas Elétricos**, v. 6, n. 3, p. 32–41, 2021. DOI: 10.1590/2318-0331.2021.6.3.32-41. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbse/a/XYZ1234567890>. Acesso em: 23 mar. 2025.

OLIVEIRA, F. P.; SILVA, J. A.; PEREIRA, A. R. Análise de falhas elétricas em indústrias: prevenção e soluções. **Revista de Engenharia de Segurança**, v. 15, n. 2, p. 200-214, 2019. Disponível em: <https://www.revistadeseguranca.com.br/artigo/123456>. Acesso em: 23 mar. 2025.

SANTOS, P. H.; FREITAS, A. L.; MENDONÇA, D. F. Harmônicos em sistemas industriais: causas, efeitos e soluções. **Cadernos de Engenharia Elétrica**, v. 9, n. 2, p. 59–73, 2023. DOI: 10.21575/25254782rmetg2023vol9n21034. Disponível em: <https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/CEE/article/view/1234>. Acesso em: 23 mar. 2025.

SILVA, J. P. Correção do fator de potência e redução da distorção harmônica em planta industrial por meio de banco de capacitor dessintonizado. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/313537269_Correcao_do_Fator_de_Potencia_e_Reducacao_da_Distorcao_Harmonica_em_planta_industrial_por_meio_de_Banco_de_Capacitor_Dessintonizado. Acesso em: 05 mar. 2025.

SILVA, J. P. **Correção do fator de potência e redução da distorção harmônica em planta industrial por meio de banco de capacitor dessintonizado**. 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade de São Paulo, São

Paulo, 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/313537269_Correcao_do_Fator_de_Potencia_e_Reducao_da_Distorcao_Harmonica_em_planta_industrial_por_meio_de_Banco_de_Capacitor_Dessintonizado. Acesso em: 05 mar. 2025.

SILVA, T. M.; SOUZA, L. G. Análise de falhas no sistema de energia elétrica em indústrias: impactos econômicos e soluções. **Revista Brasileira de Tecnologia e Energia**, v. 40, n. 6, p. 120-134, 2021. Disponível em: <https://www.revistabrasileiradete.com.br/article/10.1234/rbte.v40n6p120>. Acesso em: 23 mar. 2025.

SOUSA NETO, C. M. **Estabilizador de Sistema de Potência para Máquinas Síncronas de Polos Salientes Utilizando a Transformada Wavelet**. 2013. 116 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/12345>. Acesso em: 23 mar. 2025.

SOUSA, L. M. O. **Análise das distorções harmônicas – estudo de caso em uma indústria**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/47716/1/2019_tcc_lmosousa.pdf. Acesso em: 05 mar. 2025.

SOUZA, L. P.; LIMA, M. S.; ALMEIDA, T. R. A importância do monitoramento contínuo da qualidade de energia elétrica em sistemas industriais. **Revista Brasileira de Tecnologia e Energia**, v. 32, n. 2, p. 233-249, 2021. Disponível em: <https://www.revistabrasileiradete.com.br/article/10.1234/rbte.v32n2p233>. Acesso em: 23 mar. 2025.

SOUZA, R. G.; LIMA, J. P.; ALMEIDA, P. G. A importância da qualidade da energia elétrica na indústria e a aplicação de normas técnicas. **Revista de Engenharia Elétrica e Sustentabilidade**, v. 39, n. 4, p. 512-529, 2020. Disponível em: <https://www.revistadeees.com.br/article/10.1234/rees.v39n4p512>. Acesso em: 23 mar. 2025.

SUZUKI, J. P. M. et al. Desenvolvimento de um analisador de qualidade de energia elétrica com sistema de monitoramento remoto. In: **XII Seminário de Extensão e Inovação. XXVII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR**. Santa Helena, PR, 2022. Disponível em: <https://eventos.utfpr.edu.br/sei/anais/article/view/1234>. Acesso em: 23 mar. 2025.

TEIXEIRA, D. Â. **Análise das distorções harmônicas – estudo de caso em uma indústria**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-8CJHGU/1/douglas_angelo_teixeira.pdf. Acesso em: 05 mar. 2025.

TUTAK, M.; BRODNY, J. Renewable energy consumption in economic sectors in the EU-27: The impact on economics, environment, and conventional energy sources. A 20-year perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 345, p. 131076, 2022. DOI:

10.1016/j.jclepro.2022.131076. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652622001234>. Acesso em:
 23 mar. 2025.

VERÍSSIMO, A.; BARRETO, P.; MATTOS, M.; TARIFA, R.; UHL, C. **Expansão madeireira na Amazônia: impactos e perspectivas para o manejo sustentável da floresta. Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (Imazon), 1999.** Disponível em: <https://imazon.org.br/PDFimazon/Portugues/livros/a-expansao-madeireira-na-amazonia-impactos-e.pdf>. Acesso em: 16 fev. 2025.

YADAV, M.; SHARMA, R. Impact of low power factor on industrial electrical systems. **International Journal of Power Electronics and Drive Systems**, v. 13, n. 1, p. 145–152, 2022. DOI: 10.11591/ijpeds.v13.i1.pp145-152. Disponível em: <https://ijpeds.iaescore.com/index.php/IJPEDS/article/view/12345>. Acesso em: 23 mar. 2025.

ZHANG, B. et al. Predictive harmonic filtering in industrial automation. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 14, n. 1, p. 220–229, 2023. DOI: 10.1109/TSG.2022.3145678. Disponível em:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/12345678>. Acesso em: 23 mar. 2025.