



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
ENGENHARIA DE ENERGIA



GABRIELA DE SOUZA NASCIMENTO

**APLICAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES PARA CORREÇÃO DE FATOR DE
POTÊNCIA: UM ESTUDO DE CASO COM CONSUMIDORES DO GRUPO A**

Rio largo – Alagoas

2025

GABRIELA DE SOUZA NASCIMENTO

**APLICAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES PARA CORREÇÃO DE FATOR DE
POTÊNCIA: UM ESTUDO DE CASO COM CONSUMIDORES DO GRUPO A**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Alagoas, como
requisito parcial à obtenção do título de
Bacharela em Engenharia de Energia.

Orientador: Msc. Allan David da Costa Silva.

Rio largo – Alagoas

2025

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 - 1512

N244a Nascimento, Gabriela de Souza.

Aplicação de bancos de capacitores para correção de fator de potência: um estudo de caso com consumidores do grupo A. / Gabriela de Souza Nascimento. – 2025.

50 f.: il.

Orientador(a): Allan David da Costa Silva.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) – Graduação em Engenharia de Energia, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2025.

Inclui bibliografia

1. Fator de potência. 2. Banco de capacitores. 3. Qualidade da energia elétrica. 4. Eficiência energética. 5. Viabilidade econômica. I. Título.

CDU: 621.31

Folha de Aprovação

GABRIELA DE SOUZA NASCIMENTO

Aplicação de Bancos de Capacitores para Correção de Fator de Potência: Um Estudo de Caso com Consumidores do Grupo A

Monografia apresentada ao curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Alagoas, campus de Engenharias e Ciências Agrárias, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Energia.

Aprovado em: 29/10/2025

Banca examinadora



Documento assinado digitalmente

ALLAN DAVID DA COSTA SILVA

Data: 30/10/2025 02:07:48-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. MSc Allan David da Costa Silva - Orientador
UFAL, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias



Documento assinado digitalmente

IGOR CAVALCANTE TORRES

Data: 30/10/2025 08:09:23-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dsc. Igor Cavalcante Torres – Examinador 1
UFAL, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias



Documento assinado digitalmente

ALANA KELLY XAVIER DE BARROS BRANCO

Data: 31/10/2025 11:27:00-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dsc. Alana Kelly Xavier de Barros Branco – Examinador 2
UFAL, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias

RESUMO

O presente trabalho analisa a aplicação de bancos de capacitores para a correção do fator de potência em unidades consumidoras do Grupo A. Neste estudo são abordados os fundamentos teóricos relacionados à qualidade da energia elétrica, bem como uma análise da regulamentação nacional vigente, com destaque para o Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional e a Resolução Normativa N° 1.000/2021 da ANEEL. O estudo foi conduzido em uma unidade industrial localizada na zona rural do estado de Alagoas, onde foi realizada uma análise de qualidade de energia elétrica na unidade. A partir dos dados obtidos, dimensionou-se um banco de capacitores automático, considerando-se um fator de potência alvo de 0,95. De forma a avaliar viabilidade econômica da dessa solução técnica, utilizaram-se os seguintes indicadores: tempo de retorno do investimento, valor presente líquido e taxa interna de retorno. Adicionalmente foi realizado um fluxo de carga no *software* OpenDSS para verificar os impactos da instalação na unidade e no sistema de distribuição de energia elétrica. Como resultado observou-se a eliminação das multas por excedente reativo, diminuição das perdas de potência e melhoria do perfil de tensão. A metodologia adotada permitiu concluir que a correção do fator de potência por meio de bancos de capacitores é uma medida eficiente, segura e financeiramente vantajosa para consumidores do Grupo A e impactam positivamente a rede de distribuição de energia.

Palavras-chave: fator de potência; banco de capacitores; qualidade da energia elétrica; eficiência energética; viabilidade econômica.

ABSTRACT

This study analyzes the application of capacitor banks for power factor correction in high-voltage consumer units classified as Group A. It addresses the theoretical foundations related to power quality, as well as the current national regulations, with emphasis on Module 8 of the Procedures for the Distribution of Electric Energy in the National Electrical System and Regulatory Resolution N° 1,000/2021 of the National Electric Energy Agency. The case study was conducted in an industrial facility located in the rural area of the state of Alagoas, where a power quality analysis was performed. Based on the measured data, an automatic capacitor bank was designed, targeting a power factor of 0.95. To assess the economic feasibility of this technical solution, the following indicators were used: payback period, net present value, and internal rate of return. Additionally, a load flow analysis was carried out using the OpenDSS software to evaluate the impacts of the installation on both the facility and the power distribution system. The results demonstrated the elimination of penalties for excessive reactive power, reduction of power losses, and improvement of the voltage profile. The adopted methodology confirmed that power factor correction through capacitor banks is an efficient, safe, and economically advantageous measure for high-voltage consumers, contributing positively to the performance of the power distribution network.

Keywords: power factor; capacitor bank; power quality; energy efficiency; economic feasibility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução dos indicadores de continuidade do fornecimento de energia elétrica no Brasil.....	13
Figura 2 – Triângulo de potência com carga indutiva.	17
Figura 3 – Triângulo de potência com carga capacitiva	17
Figura 4 – Tetraedro das potências	19
Figura 5 - Tensão Nominal (380/220).	24
Figura 6 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).....	24
Figura 7 - Analisador de energia instalado no QGBT.....	28
Figura 8 - Analisador P53.....	29
Figura 9 - Representação do sistema montado no OpenDSS.	31
Figura 10 – Curva de potência ativa utilizada no estudo de caso.....	32
Figura 11 – Curva de potência reativa utilizada no estudo de caso.	33
Figura 12 – Curva de potência ativa residencial típica.....	33
Figura 13 – Tensões de fase registradas.	34
Figura 14 - Distorções harmônicas de tensão registradas.	35
Figura 15 – Curvas de tensão e corrente referentes à fase A.	35
Figura 16 - Curvas de tensão e corrente referentes à fase B.....	36
Figura 17 - Curvas de tensão e corrente referentes à fase C.....	36
Figura 18 - Fator de potência diário medido no QGBT.....	38
Figura 19 – Curvas de potências ativa e reativa medidas.....	38
Figura 20 – Curva de potência aparente medida.	39
Figura 21 - Potência reativa capacitiva necessária para a adequação do fator de potência.....	40
Figura 22 - Comparação da potência aparente.	42
Figura 23 – Tensão sem o banco de capacitores na unidade consumidora, medição do monitor.	43
Figura 24 – Tensão com o banco de capacitores na unidade consumidora, medição do monitor.	44
Figura 25 – Perfil de tensão do alimentador sem o banco de capacitores.	45
Figura 26 – Perfil de tensão do alimentador com o banco de capacitores.....	45
Figura 27 – Fator de Potência sem o banco.....	46
Figura 28 – Fator de Potência com o banco.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Transformadores.	31
Tabela 2 – Linha.	31
Tabela 3 – Dimensionamento do Banco de Capacitores.	41
Tabela 4 – Tensão nas barras.	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEAL	Balanço Energético de Alagoas
COFINS	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (imposto)
DAF(p)	Demanda de Potência Ativa Faturável (em cada posto tarifário “p”)
DAMT	Demanda de Potência Ativa Medida no intervalo de integralização de uma hora “T”
DRE(p)	Valor, por posto tarifário “p”, correspondente à demanda de potência reativa excedente
DTT%	Distorção harmônica total de tensão
DTT3%	Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3
DTTI%	Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3
DTTP%	Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3
ECE	Elementos de Conversão de Energia
EEAMT	Montante de energia elétrica ativa medida em cada intervalo “T” de uma hora
ERE	Valor correspondente à energia elétrica reativa excedente
ETE	Elementos de Transporte de Energia
FPD	Fator de Potência de Deslocamento
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (imposto)
PIS	Programa de Integração Social (imposto)
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
QEE	Qualidade da Energia Elétrica

QGBT Quadro Geral de Baixa Tensão

REN 1.000 Resolução Normativa nº 1.000 da ANEEL

SDEE Sistema de Distribuição de Energia Elétrica

SEP Sistema Elétrico de Potência

TIR Taxa Interna de Retorno

TMA Taxa Mínima de Atratividade

VPL Valor Presente Líquido

VRDRE Valor de referência para demanda de potência reativa excedente

VRERE Valor de referência equivalente à tarifa de energia “TE” da bandeira verde

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Capacitância (Unidade: F - Farad)
D	Potência de Deslocamento
f_0	Frequência fundamental (50/60 Hz)
f_R	Fator de potência de referência (igual a 0,92)
f_r	Frequência de ressonância
f_T	Fator de potência da unidade consumidora
fp	Fator de Potência (razão entre potência ativa e aparente)
h	Todas as ordens harmônicas de 2 até h_{max}
h_3	Todas as ordens harmônicas múltiplas de 3
h_{3max}	Máxima ordem harmônica múltipla de 3
hi	Todas as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3
$himax$	Máxima ordem harmônica ímpar, não múltipla de 3
$hmax$	Máxima ordem harmônica registrada
hp	Todas as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3
h_{pmax}	Máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3
kVA	Quilovolt-Ampère (unidade de Potência Aparente)
$kVAr$	Quilovolt-Ampère Reativo (unidade de Potência Reativa)
$kVarh$	Quilovolt-Ampère Reativo por hora (unidade de consumo de energia reativa)
kW	Quilowatt (unidade de Potência Ativa)
kWh	Quilowatt-hora (unidade de energia)
L	Indutância (Unidade: H - Henry)
n	Número de intervalos de integralização “T”, por posto tarifário “p”
p	Posto tarifário ponta ou fora de ponta
P	Potência Ativa
Q	Potência Reativa
Q_c	Potência reativa capacitiva (kVAr)
Q_i	Potência reativa indutiva (kVAr)

S	Potência Aparente Real
S_{tr}	Potência aparente do transformador (kVA)
T	Intervalo de uma hora, no período de faturamento
Z	Impedância do transformador (Unidade: Ω - Ohm)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos.....	14
1.2 Organização do Trabalho.....	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1 Qualidade de Energia Elétrica	16
2.1.1 Fator de Potência	16
2.1.2 Dimensionamento de Banco de Capacitores	18
2.1.3 Distorções Harmônicas.....	19
2.1.4 Perdas no SEP.....	21
2.2 Regulamentação Nacional	22
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
4 MATERIAL E MÉTODOS	28
4.1 Local do Estudo	28
4.2 Equipamentos e <i>Softwares</i>	28
4.3 Dimensionamento do Banco de Capacitores	30
4.4 Avaliação Econômico-Financeira	30
4.5 Fluxo de Carga.....	31
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.1 Tensão e Distorção Harmônica.....	34
5.2 Fator de Potência	37
5.3 Dimensionamento do Banco de Capacitores	40
5.4 Análise de Viabilidade Econômica	41
5.5 Análise dos Impactos da Instalação do Banco de Capacitores	42
5.5.1 Impacto no SDEE	43
6 CONCLUSÃO.....	48
REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

A qualidade da energia elétrica é um tema de constante relevância no setor elétrico, especialmente diante do aumento da demanda por energia e da crescente complexidade dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica (SDEE). No contexto brasileiro, essa importância pode ser observada no empenho das concessionárias em assegurar um fornecimento contínuo e adequado de energia aos consumidores. Como mostra a Figura 1, os indicadores de continuidade apresentam melhora consistente ao longo dos anos, evidenciando o investimento e os esforços do setor para aprimorar a qualidade do serviço prestado.

Figura 1 – Evolução dos indicadores de continuidade do fornecimento de energia elétrica no Brasil.



Fonte: ANEEL (2025).

Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), por meio dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), por meio do Módulo 8, estabelece parâmetros de referência que visam assegurar níveis adequados de qualidade de energia, tais como: tensão de fornecimento e fator de potência.

No caso dos consumidores do Grupo A, que operam em média e alta tensão, o fator de potência assume papel fundamental, pois valores inferiores a 0,92 podem resultar em penalidades financeiras, previstas na Resolução Normativa nº 1.000/2021. Nesse cenário, a instalação de bancos de capacitores se consolidou como alternativa técnica economicamente viável, rápida e eficaz.

Contudo, a instalação desses equipamentos, quando realizada sem o devido embasamento técnico, pode gerar efeitos indesejáveis, como a ocorrência de ressonância e a elevação da tensão, o que compromete o desempenho e a segurança do Sistema Elétrico de Potência (SEP). Dessa forma, torna-se essencial a realização de uma análise técnica minuciosa antes da instalação, de modo a avaliar adequadamente os custos e benefícios envolvidos.

Diante disso, este trabalho analisa a aplicação de bancos de capacitores para a correção do fator de potência em um consumidor do Grupo A, a partir de uma avaliação da qualidade da energia elétrica de uma instalação. Adicionalmente, são realizadas análises de viabilidade econômica e uma simulação do impacto dessa correção no SEP.

Assim, a relevância dessa pesquisa se justifica por integrar análises técnicas e dados obtidos em campo, oferecendo subsídios metodológicos para engenheiros de energia e tomada de decisão por parte de empresas consumidoras.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste TCC é realizar um estudo sobre a instalação de bancos de capacitores para correção do fator de potência em consumidores do grupo A. E como objetivos específicos:

- Realizar uma revisão bibliográfica acerca dos impactos da instalação de bancos de capacitores sobre a qualidade da energia elétrica;
- Propor alternativas técnicas capazes de minimizar problemas recorrentes relacionados à qualidade da energia;
- Descrever o procedimento de dimensionamento de um banco de capacitores adequado à instalação estudada;
- Realizar uma análise de qualidade de energia por meio de um estudo de caso com dados reais de um consumidor do Grupo A;
- Avaliar a viabilidade econômica da correção do fator de potência, por meio da estimativa de custos e benefícios associados à sua implementação;

- Realizar uma simulação no sistema elétrico de potência para avaliar o impacto da inserção de potência reativa capacitiva;
- Realizar um estudo dos impactos de banco de capacitores na rede de distribuição.

1.2 Organização do Trabalho

O documento está estruturado conforme a seguir:

- Seção 2: Fundamentação teórica requerida ao desenvolvimento do trabalho;
- Seção 3: Revisão bibliográfica referente ao tema do TCC;
- Seção 4: Apresentação da metodologia;
- Seção 5: Apresentação e discussão dos resultados;
- Seção 6: Apresentação das conclusões do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção tem como objetivo apresentar um resumo dos conceitos mais relevantes ao desenvolvimento do estudo, com ênfase na qualidade da energia elétrica e na legislação aplicável aos consumidores do Grupo A.

2.1 Qualidade de Energia Elétrica

O Módulo 8 do PRODIST, estabelecido pela ANEEL, classifica a qualidade da energia elétrica em três categorias: qualidade do produto, qualidade do serviço prestado e qualidade do tratamento de reclamações. Considerando que o foco deste estudo é o consumidor final, a atenção será direcionada à qualidade do produto.

A qualidade do produto relaciona aos parâmetros de referência da energia fornecida: tensão, corrente e frequência. Variações significativas nesses parâmetros que provoquem falhas ou mau funcionamento de equipamentos caracterizam problemas de qualidade da energia elétrica (SINGH, 2014).

Entre os fatores que afetam a qualidade e a eficiência da energia elétrica, destaca-se o fator de potência, definido como a razão entre a potência ativa e a potência aparente de uma instalação. Quando este fator se encontra abaixo dos valores de referência, uma prática amplamente difundida é a instalação de bancos de capacitores. Isso promove a correção do fator de potência, reduzindo perdas elétricas no sistema, contribuindo para a estabilidade da tensão e mitigando distorções harmônicas (SOUZA, 2024). Essa correção resulta em uma maior eficiência energética, gerando economia na fatura de energia, especialmente para consumidores do Grupo A.

Para compreender a relação entre os diferentes tipos de potência e os efeitos da correção do fator de potência, a próxima subseção apresenta os conceitos de potência ativa, reativa e aparente.

2.1.1 Fator de Potência

O Fator de Potência (FP) é definido como a razão entre a potência ativa (kW) e a potência aparente (kVA). Orsini e Consonni (2021) o definem pela seguinte relação:

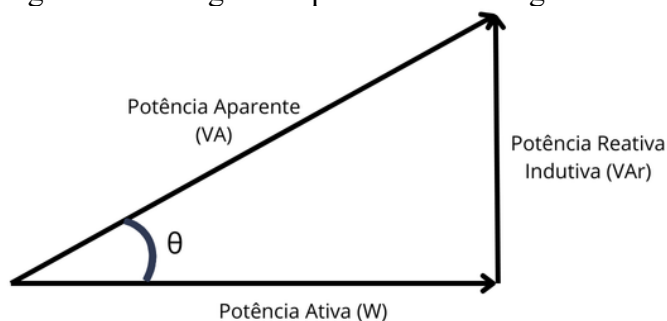
$$FP = \frac{P}{V \times I} . \quad (1)$$

A relação definida pela Equação (1) indica a fração da potência total que é efetivamente convertida em trabalho útil. Um FP próximo de 1 indica operação eficiente, enquanto valores muito baixos apontam para a presença significativa de potência reativa, a qual, embora não realize trabalho, é essencial para o funcionamento de dispositivos eletromagnéticos, tais como motores elétricos, os quais são predominantes em instalações industriais.

A potência reativa pode apresentar natureza indutiva ou capacitiva, dependendo do tipo de elemento que a origina. A potência reativa indutiva está associada a dispositivos como motores, transformadores e reatores, que necessitam de energia para estabelecer campos magnéticos. Nesse caso, a corrente é atrasada em relação à tensão, caracterizando o comportamento indutivo do circuito. Por outro lado, a potência reativa capacitiva é proveniente de elementos capacitivos, que armazenam energia em campos elétricos. Nesses circuitos, a corrente é adiantada em relação à tensão.

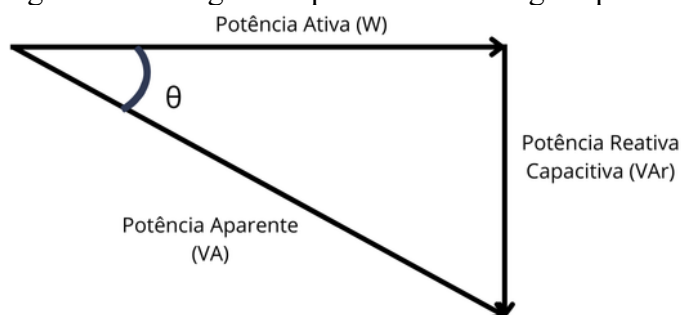
Essas naturezas exercem efeitos opostos: a potência reativa indutiva provoca deslocamento ascendente no triângulo de potências, enquanto a potência reativa capacitiva gera deslocamento descendente, conforme ilustrado nas Figuras 2 e 3. A partir do triângulo de potências, é possível determinar o fator de potência.

Figura 2 – Triângulo de potência com carga indutiva.



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Figura 3 – Triângulo de potência com carga capacitiva



Fonte: elaborado pela autora (2025).

A compensação reativa capacitiva permite reduzir a componente reativa indutiva e, consequentemente, elevar o fator de potência (JOHNSON; HILBURN; JOHNSON, 2018). Esse processo segue os princípios da soma de potências, em que os componentes de sinais opostos se anulam, reduzindo a potência aparente, como consequência pode aumentar capacidade do transformador, evitando sua sobrecarga. Em instalações nas quais a potência aparente medida se aproxima da potência nominal do transformador, a correção do fator de potência é uma estratégia eficaz para prolongar a vida útil do equipamento e aumentar a margem operacional (MARTINEZ, 2015).

Além disso, a instalação de bancos de capacitores pode contribuir para a estabilidade de tensão no SDEE, reduzindo a corrente do circuito e, consequentemente, a queda de tensão (WEG, 2021).

2.1.2 Dimensionamento de Banco de Capacitores

Para dimensionar o banco de capacitores, é necessário definir o fator de potência desejado. Como será visto na próxima subseção, valores inferiores a 0,92 podem ser penalizados com multas, embora o consumidor tenha liberdade para adotar o fator que melhor se encaixe em sua análise custo-benefício. A potência do banco pode ser calculada por:

$$Q_c = Q_i - P \times \tan(\arccos(FP)) , \quad (2)$$

onde:

- Q_c - Potência reativa capacitiva (kVAr);
- Q_i - Potência reativa indutiva (kVAr);
- P - Potência ativa (kW);
- FP - Fator de Potência desejado.

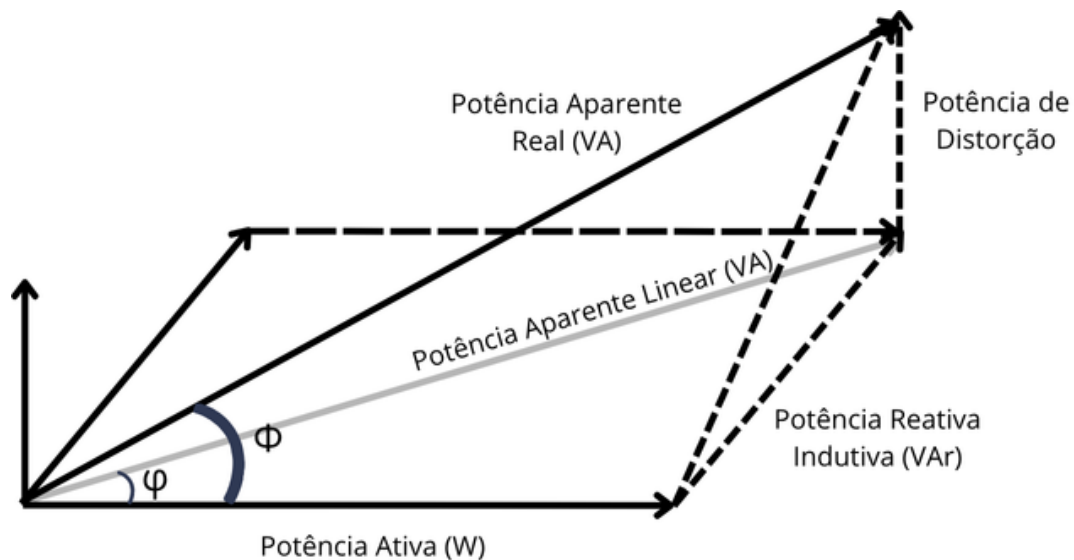
Os bancos de capacitores podem ser classificados em três tipos: fixos, semi-automáticos (temporizados) ou automáticos. Os fixos fornecem a potência total continuamente, exigindo supervisão e proteção adequadas; os temporizados operam em horários e condições predefinidas e os automáticos monitoram a rede e ajustam automaticamente a potência reativa conforme a demanda, garantindo maior eficiência e menor desgaste dos componentes.

Instalações com padrões de consumo estáveis, como indústrias com turnos fixos ou sistemas de climatização com horários definidos, podem se beneficiar de bancos fixos ou temporizados (WEG, 2021). Já em instalações com grande variação na curva de demanda, recomenda-se o uso de bancos automático. O analisador de energia uma ferramenta frequentemente utilizada para identificar padrões de consumo e determinar o tipo de banco mais adequado.

2.1.3 Distorções Harmônicas

As distorções harmônicas podem ser compreendidas como desvios sistemáticos nas formas de onda de tensão e corrente, que, em vez de seguirem a frequência fundamental, passam a apresentar componentes adicionais múltiplos dessa frequência (ANEEL, 2020). Devido ao aumento das cargas não lineares nas instalações elétricas, as distorções harmônicas se tornaram um fator de atenção, especialmente quando pretende instalar banco de capacitores (STAROSTA, 2018). As componentes harmônicas alteram a geometria do triângulo de potências, formando um tetraedro de potência, conforme ilustrado na Figura 4, e podem provocar fenômenos de ressonância.

Figura 4 – Tetraedro das potências



Fonte: elaborado pela autora (2025).

A potência de distorção, vista na Figura 4, corresponde à parcela associada às relações não lineares entre tensão e corrente. Sua presença aumenta a potência aparente e reduz o fator de potência, tornando-se um aspecto relevante no dimensionamento de bancos de capacitores (NETO, 2023).

Os medidores convencionais das concessionárias, não são capazes de detectar essa componente, pois consideram apenas a frequência fundamental. Assim, o fator de potência indicado por esses equipamentos pode ser superestimado em relação ao valor real, que pode ser determinado por meio de analisadores de energia capazes de mensurar as distorções harmônicas

A potência aparente e fator de potência reais podem ser expressos como (NETO, 2023):

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 , \quad (3)$$

$$FP = \frac{1}{\sqrt{1+THD^2}} \times FPD , \quad (4)$$

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2+D^2}} , \quad (5)$$

onde:

- S – Potência Aparente Real;
- P – Potência Ativa;
- Q – Potência Reativa;
- D – Potência de Deslocamento;
- THD – Taxa de Distorção Harmônica Total;
- FPD - Fator de Potência de Deslocamento.

Outro aspecto relevante no dimensionamento de bancos de capacitores é a ressonância harmônica, que pode ser série ou paralela. A ressonância série ocorre entre transformador e banco de capacitores, quando as reatâncias indutiva e capacitiva se anulam, resultando em baixa impedância e correntes elevadas. A ressonância paralela ocorre entre banco e carga não linear, gerando alta impedância e elevação de tensão. Esse fenômeno pode ocorrer mesmo em instalações com fator de potência unitário e ausência de harmônicos (WEG, 2021).

A frequência de ressonância pode ser determinada por:

$$fr = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}} , \quad (6)$$

onde:

- L - Indutância (H);
- C - Capacitância (F).

Como a indutância do sistema raramente é conhecida, utiliza-se a aproximação:

$$fr = f_0 \times \sqrt{\frac{S_{tr}}{Z \times Q_c}} , \quad (7)$$

onde:

- f_0 - Frequência fundamental (50/60 Hz);
- S_{tr} - Potência aparente do transformador (kVA);
- Z - Impedância do transformador (Ω);
- Q_c - Potência reativa do banco (kVAr);

A frequência de ressonância deve ser calculada individualmente para cada estágio do banco de capacitores. Caso essa frequência esteja próxima de alguma frequência harmônica presente na rede elétrica e exceda os limites estabelecidos pelos PRODIST, recomenda-se a instalação de reatores de dessintonia ou filtros anti-harmônicos, os quais podem ser ativos ou passivos.

O Manual de Correção do Fator de Potência da WEG (2021) estabelece:

Se o total de cargas não lineares ultrapassar 20% da carga total instalada deverá ser efetuada uma medição detalhada dos níveis de harmônicas. Detectando-se a existência de harmônicas na instalação elétrica deve-se obedecer aos seguintes critérios:

- Limite de distorção total de harmônicas de tensão (THD) deverá ser menor ou igual à 5%;
- Limite de distorção harmônica individual de tensão deverá ser menor ou igual à 3%;
- Ultrapassando estes limites deverão ser instalados indutores de proteção anti-harmônicas nos capacitores ou filtros para as harmônicas significativas (WEG, 2021).

A principal diferença entre reatores de dessintonia e filtros é que os primeiros têm comportamento indutivo, protegem os capacitores deslocando a frequência de ressonância das ordens harmônicas predominantes na rede, mas sem efetivamente eliminá-las, (WEG, 2021). Já os filtros são projetados para reduzir ou eliminar componentes harmônicos específicos. No caso harmônicas de múltiplas ordens significativas, podem ser aplicados filtros passivos para cada frequência ou, de forma mais abrangente, um filtro ativo capaz de atuar sobre uma faixa mais ampla de frequências (MIKKILI; PANDA, 2018).

O filtro passivo é um circuito composto por elementos R,L e C projetado para apresentar baixa impedância em uma frequência específica. Esse filtro pode amplificar a ordem harmônica imediatamente anterior àquela para a qual foi projetado, portanto não é recomendado para atenuar múltiplas harmônicas sequenciais. (MIKKILI; PANDA, 2018).

Já o filtro ativo é constituído por elementos ativos associados a sistemas de controle, que monitoram a forma de onda da corrente ou da tensão do sistema. A partir dessa medição, o equipamento injeta correntes de compensação iguais em magnitude e defasadas de 180° em relação as harmônicas detectadas, anulando seus efeitos. Além de mitigar várias ordens harmônicas simultaneamente, o filtro ativo também pode contribuir para a correção do fator de potência. Entretanto, apresenta custo e complexidade mais elevados (LEONARDO, 2017).

2.1.4 Perdas no SEP

Como discutido anteriormente, a presença de energia reativa em circuitos elétricos provoca sobrecarga nas instalações, pois ocupa parte da capacidade de condução de corrente que poderia ser destinada à realização de trabalho útil. Esse efeito não se restringe apenas ao

consumidor, mas também impacta diretamente a concessionária responsável pelo fornecimento de energia (CHRISTO; SOUZA, 2006). Além disso, a circulação dessa corrente adicional associada à potência reativa resulta em maiores perdas por efeito Joule.

As chamadas perdas técnicas no sistema elétrico de potência decorrem de fenômenos físicos, como as perdas ôhmicas, e podem ser estimadas por meio de um fluxo de potência (ANEEL, 2016). O qual consiste na análise das tensões, correntes e potências em cada ponto do sistema, permitindo avaliar seu comportamento em regime permanente. Para essa finalidade, a ANEEL recomenda a utilização do *software* OpenDSS.

O OpenDSS é um *software* de código aberto, expansível e amplamente aplicado em simulações do SEP, especialmente no segmento de distribuição (SILVA, 2021). Além de sua flexibilidade, dispõe de modelos padrões que facilitam a implementação de estudos diversos. Na modelagem realizada no ambiente do OpenDSS, o sistema é estruturado a partir de Elementos de Conversão de Energia (ECE) e Elementos de Transporte de Energia (ETE), interligados por barras e representados em linhas de comando. Cada instrução geralmente segue a estrutura de um verbo — como *New*, *Set* ou *Edit* — acompanhada de parâmetros específicos que definem as características dos elementos (SILVA, 2021).

Essa simulação permite não apenas verificar o comportamento do sistema frente à presença de energia reativa, como também avaliar as perdas técnicas e seus impactos na eficiência global da rede. Dessa forma, observa-se que a energia reativa contribui para o aumento das perdas técnicas, justificando a adoção de estratégias de correção, como a instalação de bancos de capacitores.

2.2 Regulamentação Nacional

A exigência do fator de potência é regulamentada pela Resolução Normativa nº 1.000 da ANEEL (REN 1.000), que prevê a aplicação de penalidades financeiras quando os limites não são atendidos. Tais penalidades são descritas na Seção VIII – Do Fator de Potência e do Reativo Excedente, e incidem tanto sobre o consumo de energia quanto sobre a demanda.

Para a quantificação do reativo excedente e o cálculo da respectiva multa, a REN 1.000 estabelece as Equações (8) e (9).

$$E_{RE} = \sum_{T=1}^n [EEAM_T \times \left(\frac{f_R}{f_T} - 1\right)] \times VR_{ERE}, \quad (8)$$

$$D_{RE}(p) = [\sum_{T=1}^n MAX \left(DAM_T \times \frac{f_R}{f_T}\right) - DAF(p)] \times VR_{DRE}, \quad (9)$$

onde:

- E_{RE} - valor correspondente à energia elétrica reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência " f_R ", no período de faturamento, em Reais (R\$);
- $EEAM_T$ - montante de energia elétrica ativa medida em cada intervalo " T " de uma hora, durante o período de faturamento, em megawatt-hora (MWh);
- f_R - fator de potência de referência igual a 0,92;
- f_T - fator de potência da unidade consumidora, calculado em cada intervalo " T " de uma hora, durante o período de faturamento;
- VR_{ERE} - valor de referência equivalente à tarifa de energia "TE" da bandeira verde aplicável ao subgrupo B1, em Reais por megawatt-hora (R\$/MWh);
- $DRE(p)$ - valor, por posto tarifário " p ", correspondente à demanda de potência reativa excedente à quantidade permitida pelo fator de potência de referência " f_R " no período de faturamento, em Reais (R\$);
- DAM_T - demanda de potência ativa medida no intervalo de integralização de uma hora " T ", durante o período de faturamento, em quilowatt (kW);
- $DAF(p)$ - demanda de potência ativa faturável, em cada posto tarifário " p " no período de faturamento, em quilowatt (kW);
- VR_{DRE} - valor de referência, em Reais por quilowatt (R\$/kW), equivalente às tarifas de demanda de potência – para o posto tarifário fora de ponta – das tarifas aplicáveis aos subgrupos do grupo A para a modalidade tarifária horária azul;
- MAX - função que identifica o valor máximo da equação, dentro dos parênteses correspondentes, em cada posto tarifário " p ";
- T - intervalo de uma hora, no período de faturamento;
- p =- posto tarifário ponta ou fora de ponta para as modalidades tarifárias horárias;
- n - número de intervalos de integralização " T ", por posto tarifário " p ", no período de faturamento.

O Módulo 8 também estabelece limites para a tensão em regime permanente e para as distorções harmônicas de tensão. No que se refere à tensão, a concessionária deve garantir que, no ponto de conexão de unidades consumidoras com tensão nominal superior a 1 kV, esta permaneça entre 95% e 105% do valor nominal. A tensão é classificada em três níveis: adequada, precária e crítica. Embora essa seja uma responsabilidade da concessionária, recomenda-se que o consumidor monitore a tensão de operação interna, especialmente na baixa

tensão, que é mais acessível. Para o estado de Alagoas, com tensão de 220/380 V, os limites são apresentados na Figura 5.

Figura 5 - Tensão Nominal (380/220).

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)
Adequada	$(350 \leq TL \leq 399) / (202 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(331 \leq TL < 350 \text{ ou } 399 < TL \leq 403) / (191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 331 \text{ ou } TL > 403) / (TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

Fonte: ANEEL (2020)

Conforme discutido na subseção anterior, a instalação de bancos de capacitores pode elevar tensões abaixo do ideal ou, de forma inversa, acentuar problemas quando a tensão já se encontra acima do limite adequado.

Quanto às distorções harmônicas de tensão, os limites são definidos de acordo com o nível de tensão, a frequência e a ordem harmônica. A Figura 6 apresenta os limites estabelecidos:

Figura 6 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT _{95%}	10,0%	8,0%	5,0%
DTT _{P95%}	2,5%	2,0%	1,0%
DTT _{I95%}	7,5%	6,0%	4,0%
DTT _{395%}	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: ANEEL (2020)

Sendo:

- $DTT\%$ = Distorção harmônica total de tensão, que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas;
- $DTTP\%$ = Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3, que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas;
- $DTTI\%$ = Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3, que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas;
- $DTT3\%$ = Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3, que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas.

Os cálculos são realizados a partir das equações apresentadas a seguir.

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} V_h^2}}{V_1} \times 100, \quad (10)$$

$$DTT_p \% = \frac{\sqrt{\sum_{hp=2}^{hp \max} V_h^2}}{V_1} \times 100 , \quad (11)$$

$$DTT_I \% = \frac{\sqrt{\sum_{hi=5}^{hi \max} V_h^2}}{V_1} \times 100 , \quad (12)$$

$$DTT_3 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h3=3}^{h3 \max} V_h^2}}{V_1} \times 100 , \quad (13)$$

onde:

- h = todas as ordens harmônicas de 2 até $h \max$;
- $h \max$ = máxima ordem harmônica registrada;
- hp = todas as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3;
- $hp \max$ = máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3;
- hi = todas as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3;
- $hi \max$ = máxima ordem harmônica ímpar, não múltipla de 3;
- $h3$ = todas as ordens harmônicas múltiplas de 3;
- $h3 \max$ = máxima ordem harmônica múltipla de 3.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresenta-se neste capítulo os resumos de alguns trabalhos que analisaram o impacto da implementação de banco de capacitores tanto no consumidor final quanto em sistemas de potência.

Starosta (2018) discute que a queima de capacitores em sistemas com cargas não lineares, nos quais a presença de correntes harmônicas pode levar à ocorrência de ressonância e à consequente sobretensões no sistema elétrico. Para mitigar esse fenômeno, recomenda-se a especificação de reatores em série com os capacitores, de modo a controlar a circulação de correntes harmônicas e ajustar a frequência de ressonância do conjunto. O autor ressalta ainda que a perda de um capacitor em um grupo provoca o desbalanceamento da capacitância equivalente, alterando a frequência de ressonância inicialmente projetada e favorecendo a circulação de correntes harmônicas, o que pode culminar em novas situações de ressonância.

Souza (2024) analisou o impacto da instalação de bancos de capacitores em sistemas elétricos, destacando que esses dispositivos melhoram o fator de potência, reduzem perdas energéticas e aumentam a estabilidade e a qualidade da energia. A revisão bibliográfica realizada pelo autor mostrou que a compensação reativa por meio de capacitores contribui para a eficiência energética e sustentabilidade, ao reduzir o consumo de energia e os custos operacionais, além de minimizar flutuações de tensão e distorções harmônicas. O estudo ressalta que os bancos de capacitores equilibram a potência reativa indutiva das cargas, melhorando o desempenho de sistemas industriais e comerciais, embora sua instalação inadequada possa gerar ressonância harmônica. Dessa forma, os bancos de capacitores são apresentados como uma solução eficiente e financeiramente viável para otimizar a operação de sistemas elétricos e promover maior confiabilidade e sustentabilidade.

Siqueira (2023) realizou um estudo de caso em um sistema alimentador de um aparelho de ressonância magnética, avaliando a Qualidade da Energia Elétrica (QEE), a compensação reativa por bancos de capacitores e o impacto da frequência de ressonância. Por meio de medições práticas e análises paramétricas, o autor demonstrou que a implementação de filtros antirressonantes, aliados à compensação reativa adequada, permite controlar a circulação de correntes harmônicas e evitar ressonâncias, mesmo em sistemas com variações de potência ativa e reativa durante o funcionamento do equipamento. O estudo evidenciou que a correta definição da potência reativa injetada e da impedância percentual do transformador é essencial para prevenir ressonância harmônica, enquanto o monitoramento contínuo do sistema possibilita antecipar problemas de QEE e garantir maior confiabilidade e estabilidade elétrica.

Dessa forma, o trabalho reforça a importância de análises detalhadas e parametrizações cuidadosas na instalação de bancos de capacitores, destacando que o planejamento prévio e a avaliação do sistema são fundamentais para mitigar os riscos associados à ressonância e otimizar o desempenho do sistema elétrico.

Leonardo (2017) investigou os efeitos da ressonância e da amplificação harmônica em sistemas de distribuição primária, considerando a crescente presença de cargas não lineares. O estudo evidenciou que a interação entre reatâncias indutivas e capacitivas de equipamentos da rede pode elevar significativamente a distorção harmônica da tensão, afetando a qualidade da energia elétrica, especialmente em cargas sensíveis. Por meio de simulações em tempo real utilizando o RTDS/RSCAD, o autor avaliou técnicas de mitigação, como filtros ativos e híbridos, demonstrando que ambos os métodos são eficazes na redução da distorção harmônica. O filtro híbrido, combinando elementos ativos e passivos, apresentou desempenho superior ao filtro ativo isolado, evidenciando a importância do dimensionamento correto e da correta inserção dos filtros junto às cargas não lineares para garantir a efetividade da mitigação.

Diante disso, observa-se que a instalação de bancos de capacitores constitui uma estratégia eficaz para a correção do fator de potência, redução de perdas e melhoria da qualidade da energia elétrica, desde que seu dimensionamento e implementação sejam realizados com base em análises detalhadas do sistema. Estudos como os de Starosta (2018), Souza (2024), Siqueira (2023) e Leonardo (2017) reforçam que a mitigação de distorções harmônicas e ressonâncias é fundamental para garantir a confiabilidade e a estabilidade do sistema elétrico, sendo imprescindível o monitoramento contínuo e a adoção de dispositivos complementares, como reatores de dessintonia e filtros ativos ou híbridos.

Assim, esses trabalhos fornecem a base conceitual necessária para subsidiar as análises e simulações desenvolvidas neste trabalho, demonstrando que a correta aplicação de bancos de capacitores pode promover eficiência energética, sustentabilidade e maior segurança operacional em sistemas de potência.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo descreve os materiais e equipamentos empregados, bem como os métodos utilizados na aquisição, tratamento e análise dos dados, a modelagem adotada e os critérios para o dimensionamento do banco de capacitores e para as avaliações técnica e econômica.

4.1 Local do Estudo

O estudo de caso foi realizado em uma unidade consumidora classificada como Grupo A, situada na cidade de Batalha, no estado de Alagoas. A unidade é atendida em 13,8 kV e possui uma subestação com potência nominal de 112,5 kVA. Verificou-se que o local apresentava, de forma recorrente, multas por consumo reativo, o que motivou a realização deste estudo. Para preservar a confidencialidade, alguns dados do cliente foram omitidos neste relatório.

4.2 Equipamentos e *Softwares*

Para o levantamento do perfil energético de consumo, foi instalado no Quadro Geral de Baixa Tensão (QGBT) (Figura 7) da unidade consumidora um analisador de energia da marca Primata, modelo P53 (Figura 8), programado para registrar as grandezas elétricas em intervalos de cinco minutos.

Figura 7 - Analisador de energia instalado no QGBT.



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Figura 8 - Analisador P53.



Fonte: Primata Eletrônica (2024).

O equipamento permaneceu em operação durante nove dias consecutivos, entre 4 e 12 de março. Os dados coletados foram transferidos para um computador, armazenados em arquivos eletrônicos e organizados em planilhas, de forma a realizar análises técnicas.

Como ferramentas auxiliares, empregaram-se os *softwares* Excel e OpenDSS, utilizado para a modelagem do alimentador e a simulação do comportamento da rede com a inserção do banco de capacitores. Além disso, foram consultados catálogos técnicos de capacitores, contadores e disjuntores para apoiar a definição da solução comercial. Também foi realizada uma revisão bibliográfica, de forma a fundamentar teoricamente os conceitos e metodologias aplicados neste trabalho. Por fim, adotaram-se como referência normativa a Resolução ANEEL nº 1000/2021 e o Módulo 8 do PRODIST, que estabelecem critérios para avaliação do fator de potência e para o enquadramento tarifário.

Durante o período de medições, o analisador registrou potência ativa (kW), potência reativa (kvar), potência aparente (kVA), fator de potência, curvas de carga, tensão, corrente e taxa de distorções harmônicas média de tensão. Essas variáveis foram essenciais para caracterizar o perfil de consumo, avaliar a qualidade da energia, dimensionar corretamente o banco. O dimensionamento foi realizado conforme especificado na subseção 2.1.2 da fundamentação teórica.

4.3 Dimensionamento do Banco de Capacitores

Para o cálculo da potência reativa capacitiva necessária, adotou-se como fator de potência desejado o valor de 0,95, superior ao mínimo exigido pela ANEEL. Essa escolha visou não apenas eliminar as multas decorrentes do baixo fator de potência, mas também assegurar uma margem de segurança operacional, garantindo maior estabilidade ao sistema. O cálculo foi realizado conforme a equação apresentada na subseção 2.1.2 da fundamentação teórica, considerando os valores médios de consumo registrados durante o período de monitoramento.

Os dispositivos de proteção e comando associados ao banco de capacitores foram dimensionados com base na ficha técnica do fabricante WEG e em conformidade com a NBR 5410. Foi considerada uma margem de 20% no cálculo da potência e para o cálculo da corrente de pico dos capacitores e para a definição da seção adequada dos condutores, foi aplicado um fator de dimensionamento de 1,3, em linha com práticas consolidadas de projeto e recomendações normativas. Esse cuidado buscou garantir a confiabilidade da operação, prevenindo sobrecargas e prolongando a vida útil dos componentes do sistema.

4.4 Avaliação Econômico-Financeira

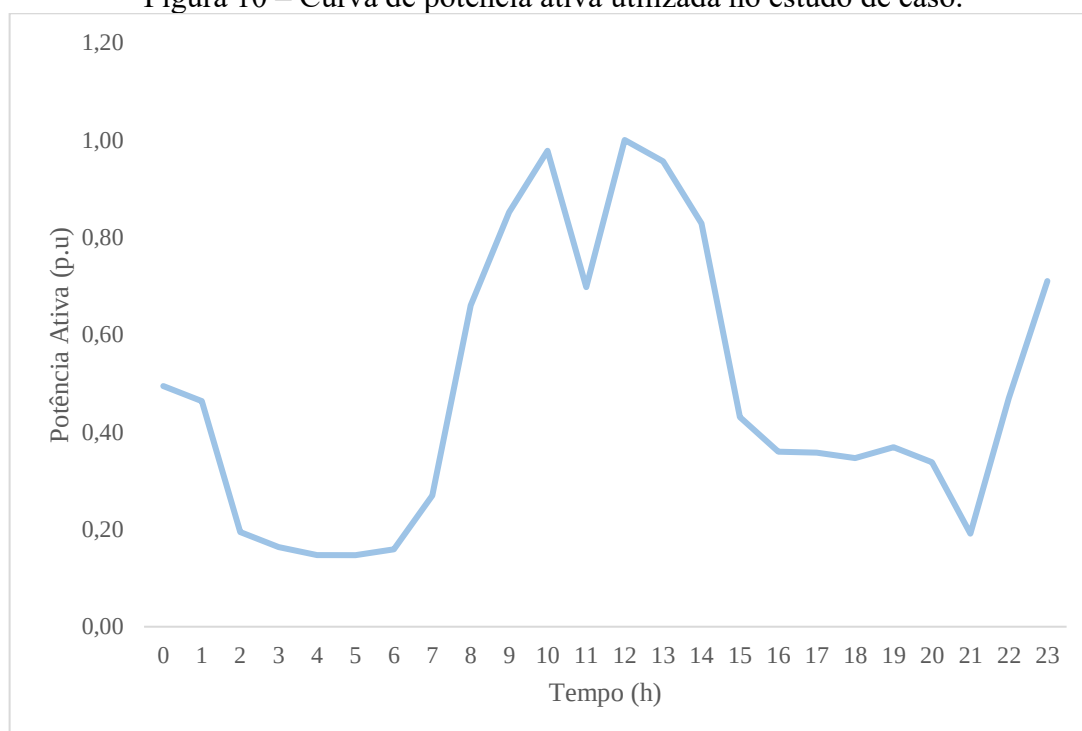
A análise comparativa entre o cenário inicial e o cenário corrigido possibilitou estimar os ganhos obtidos com a compensação reativa. Foram considerados tanto a eliminação das multas por baixo fator de potência quanto os custos associados à aquisição e instalação do banco de capacitores. A economia gerada pelas multas foi calculada multiplicando o consumo reativo médio mensal pelo valor da tarifa vigente, incluindo impostos, praticada no período de análise pela concessionária Equatorial Alagoas. Para o custo de aquisição do banco, foram contabilizados apenas os materiais e a entrega, desconsiderando-se a mão de obra, uma vez que esta seria executada pela equipe fixa da indústria.

Com base nesses dados, determinou-se o tempo de retorno simples do investimento (*payback*), definido como a razão entre o custo total do banco e a economia anual média gerada pela redução das multas. Essa abordagem permitiu quantificar de forma realista o benefício econômico da instalação do banco de capacitores na unidade estudada. Nessa análise, considerou-se os seguintes indicadores econômicos: Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR)

dos cabos e comprimentos. Em seguida, são definidos os transformadores, cujas especificações constam na Tabela 1: um com valores reais conhecidos do consumidor e dois adicionais, com potências arbitrárias apenas para compor a rede.

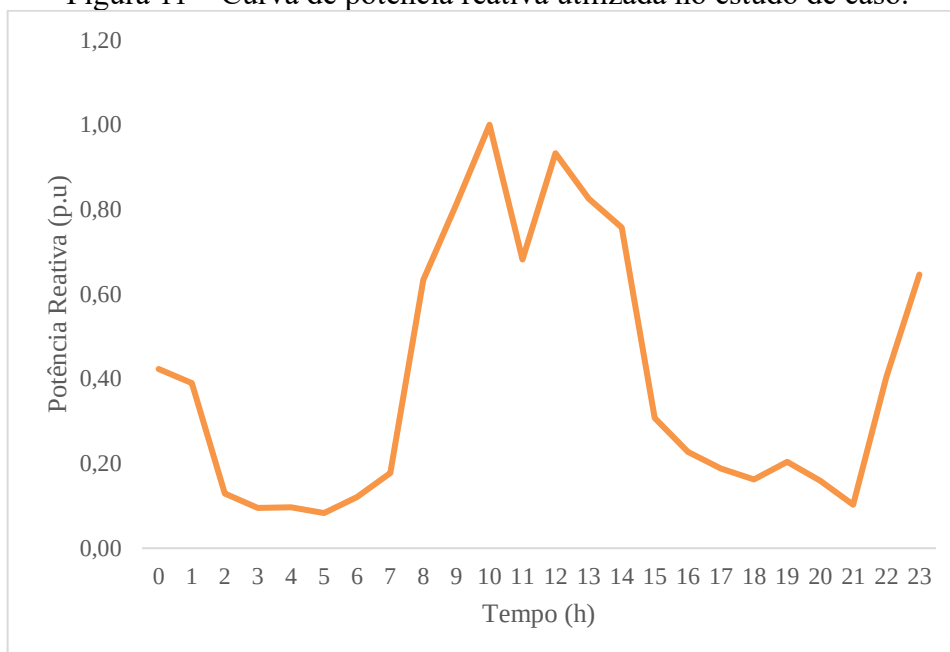
As curvas de carga foram definidas em função das características dos consumidores e estão representadas nas Figuras 10, 11 e 12. As cargas associadas às barras 2 e 6 foram classificadas como residenciais, adotando-se uma curva padrão genérica representativa desse perfil de consumo. Tal curva apresenta comportamento característico de carga praticamente constante durante o período diurno, com elevação no final da tarde e pico de demanda no período noturno (DIAS, 2016). A carga correspondente à barra 4, por sua vez, refere-se ao consumidor em análise, foi feita com base em um dia típico. Ressalta-se que todos os valores foram expressos em p.u. As figuras abaixo apresentam as curvas de carga utilizadas.

Figura 10 – Curva de potência ativa utilizada no estudo de caso.



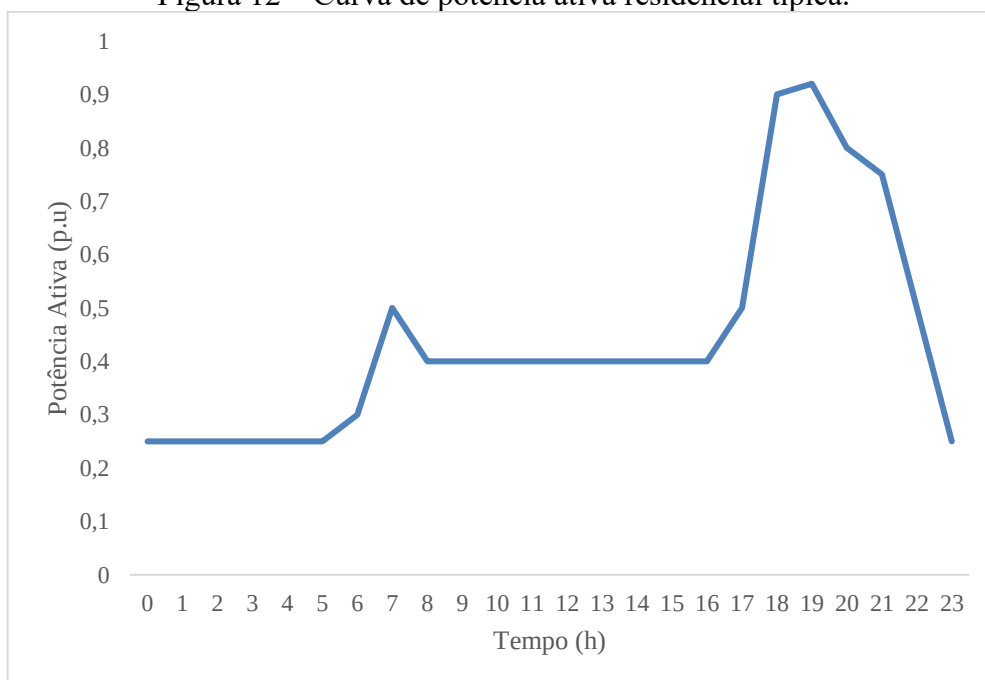
Fonte: elaborado pela autora (2025).

Figura 11 – Curva de potência reativa utilizada no estudo de caso.



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Figura 12 – Curva de potência ativa residencial típica.



Fonte: adaptado OLIVEIRA *et al.*(2004)

O banco de capacitores foi considerado automático, atuando com diferentes potências de acordo com a necessidade.

Para a medição dos resultados, foi instalado um medidor de energia no início do alimentador em L1, responsável por computar as perdas totais do sistema, e dois monitores no secundário do transformador do cliente, para medição de tensão e potência.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

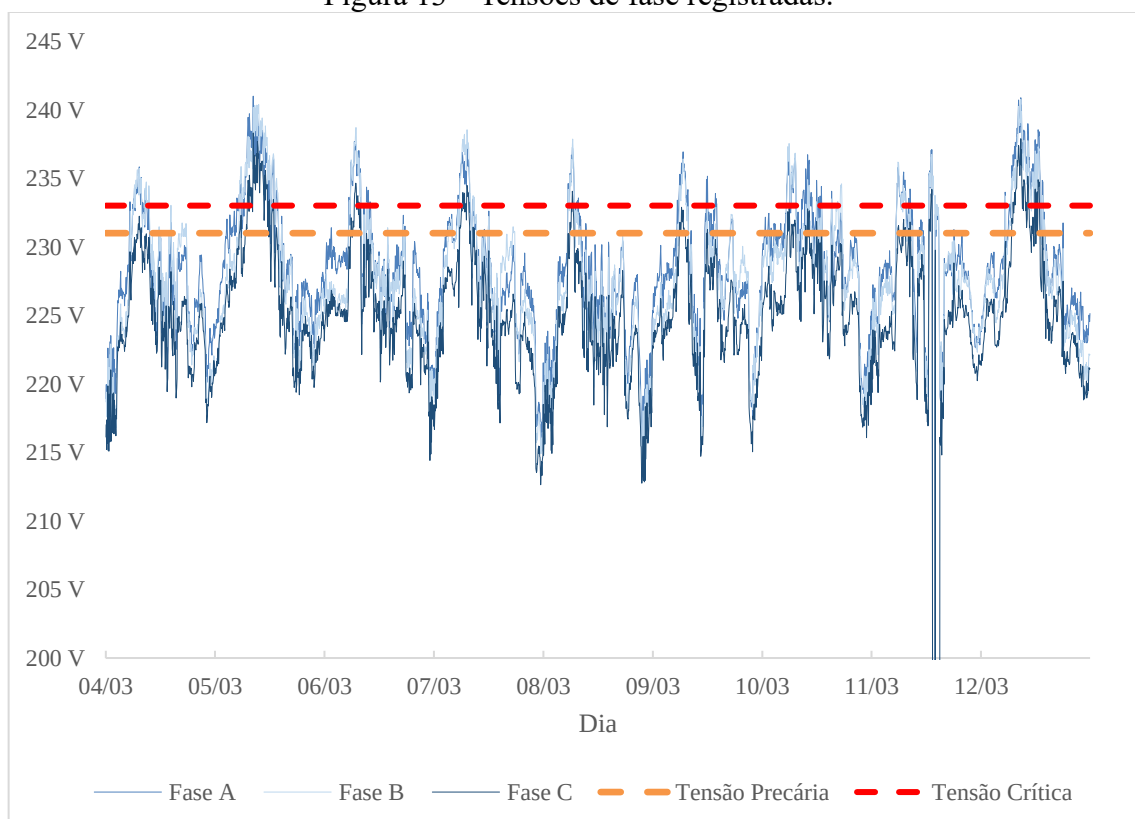
Para avaliar a metodologia proposta, nesta seção são apresentados os resultados obtidos no estudo de caso. A análise foi dividida em subseções, estruturadas de forma a apresentar, inicialmente, as medições de tensão e distorção harmônica, seguidas pela análise das potências e pelo dimensionamento do banco de capacitores, complementadas pela avaliação de viabilidade econômica. Por fim, são apresentadas as simulações realizadas no software OpenDSS.

5.1 Tensão e Distorção Harmônica

A análise inicial concentrou-se na tensão e na taxa de distorção harmônica, uma vez que ambas são diretamente influenciadas pela instalação de bancos de capacitores e podem ocasionar consequências indesejadas caso não sejam devidamente avaliadas, como ressonância e sobretensão.

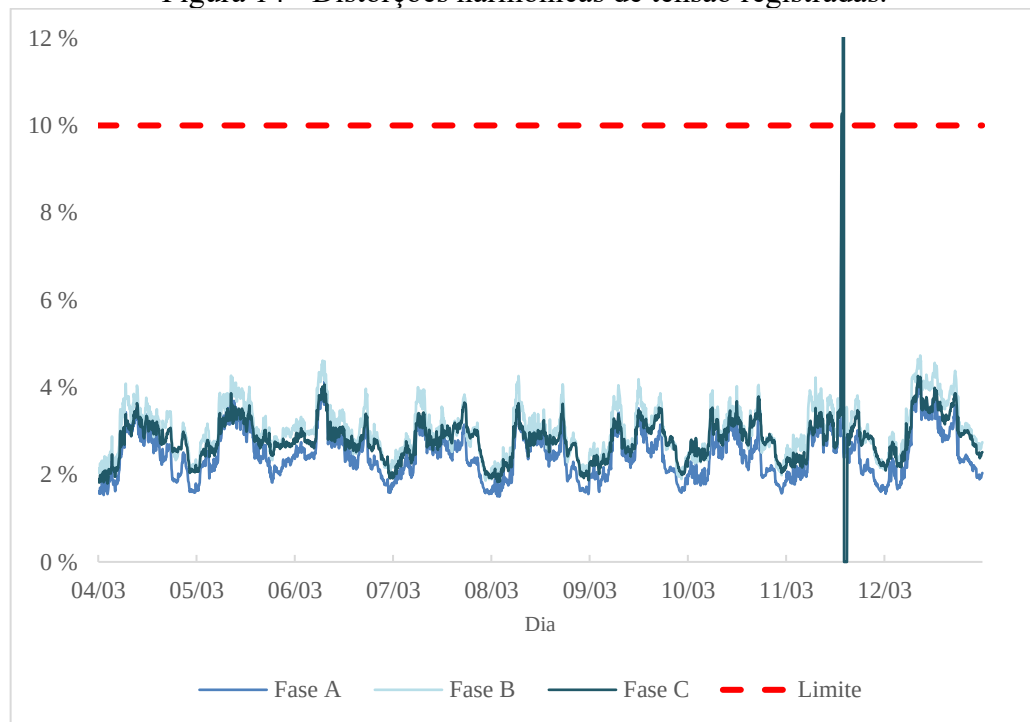
A Figura 13 apresenta a variação da tensão de fase (fase-neutro) registrada ao longo do período de medição, e a Figura 14 a distorção harmônica.

Figura 13 – Tensões de fase registradas.



Fonte: elaborado pela autora (2025).

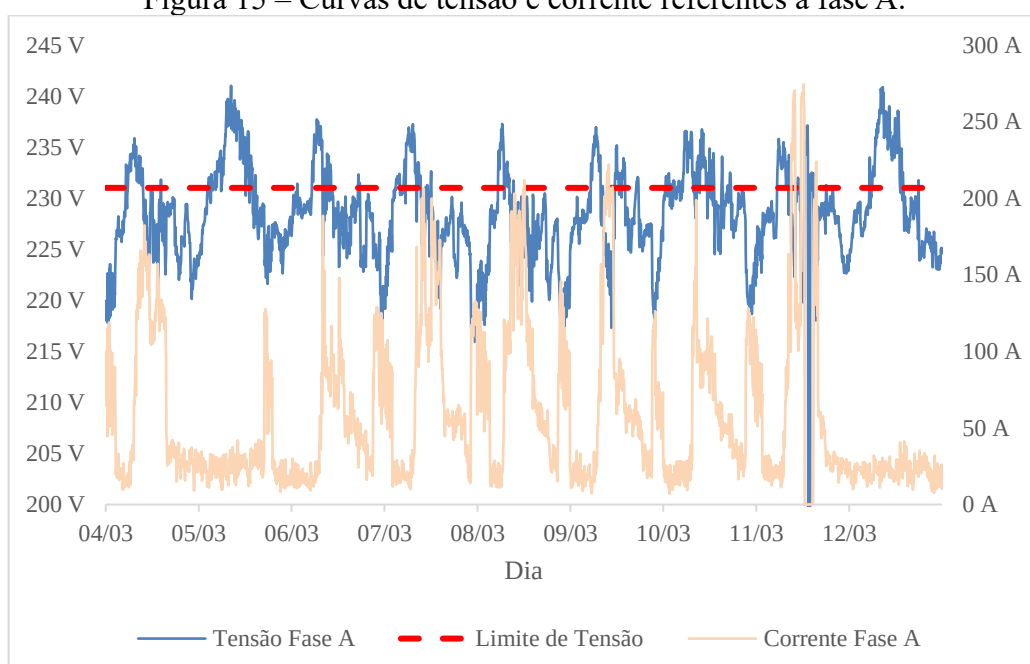
Figura 14 - Distorções harmônicas de tensão registradas.



Fonte: elaborado pela autora (2025).

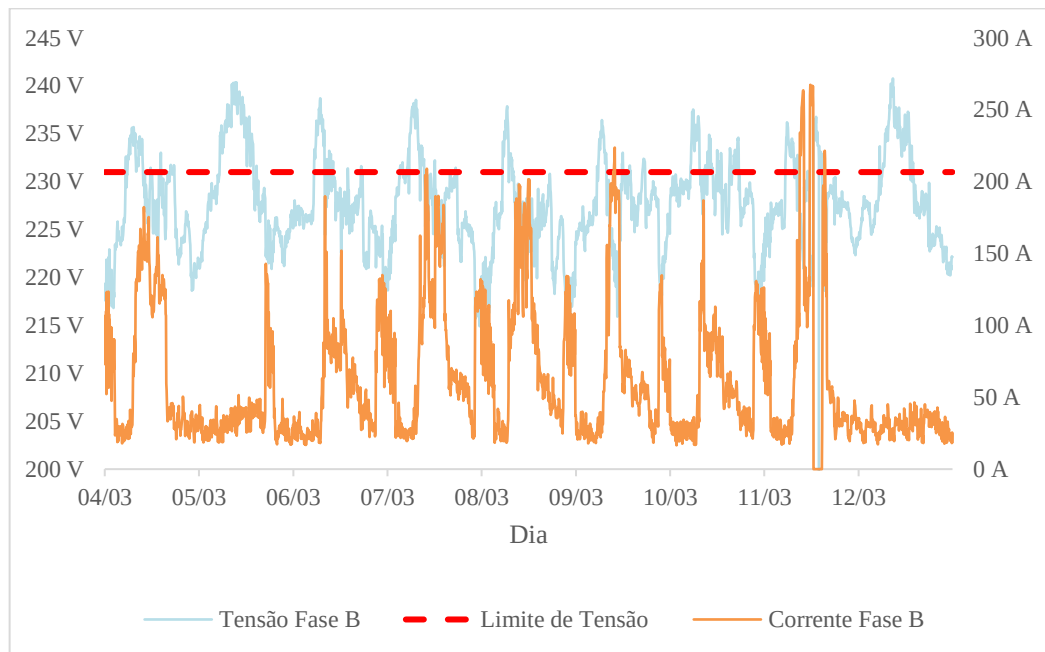
Ao analisar a Figura 13, observa-se que a tensão excedeu os valores adequados periodicamente. A corrente pode ser usada como ferramenta para entender esse comportamento, visto que seu nível pode interferir diretamente na tensão. As Figuras 15, 16 e 17 apresentam essa relação.

Figura 15 – Curvas de tensão e corrente referentes à fase A.



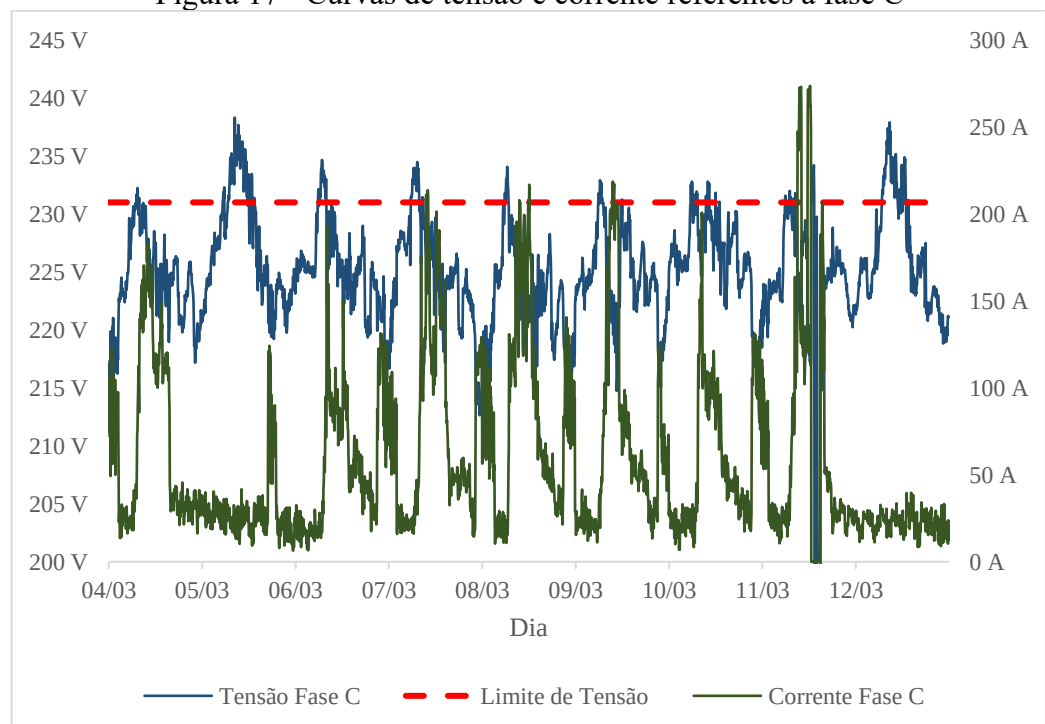
Fonte: elaborado pela autora (2025).

Figura 16 - Curvas de tensão e corrente referentes à fase B.



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Figura 17 - Curvas de tensão e corrente referentes à fase C



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Verifica-se que, em todas as fases, a tensão ultrapassa os limites apenas quando a demanda da instalação é baixa, o que pode ser observado por diminuição da corrente. Contudo, nem sempre a redução de carga resulta em sobretensão, indicando a possibilidade da existência de fatores externos que também influenciam a variação da tensão.

Em determinados momentos, a tensão não ultrapasse o limite devido a uma maior carga conectada na rede externa, o que aumenta a queda de tensão na unidade consumidora. Por ser uma rede extensa e localizada em área rural, é comum a presença de reguladores elevadores de tensão (ENERGISA, 2018), o que pode justificar a ocorrência de níveis de tensão acima do ideal.

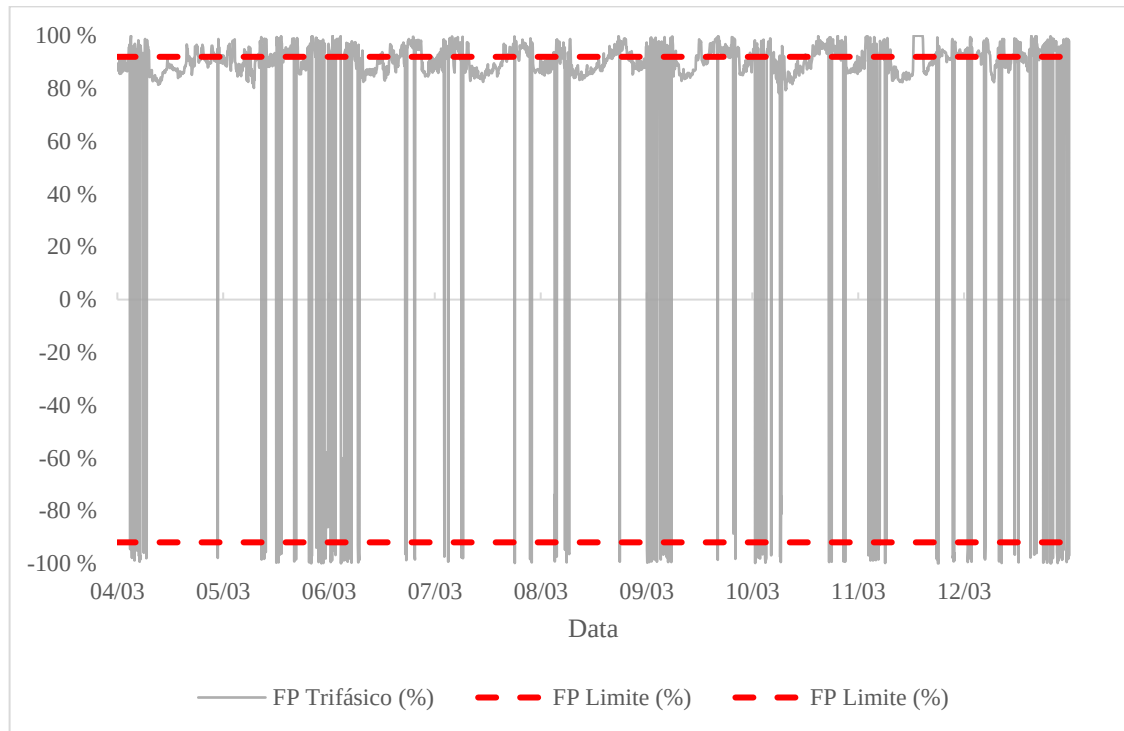
Considerando que uma das consequências da instalação de bancos de capacitores é a redução das perdas elétricas e, conseqüentemente, o aumento da tensão, é previsto um aumento após sua instalação, porém espera-se que a variação seja mínima, uma vez que o acréscimo provocado pelo banco tende a ser pequeno diante da magnitude do sistema. É interessante observar o comportamento do sistema após a inserção do banco, esse aspecto será abordado posteriormente nas simulações.

As distorções harmônicas de tensão, por sua vez, conforme mostrado na Figura 14, apresentaram valores abaixo dos limites estabelecidos pela norma — exceto durante uma interrupção de energia, quando ocorreu um pico momentâneo, podendo ser ignorado —, não configurando risco à operação do sistema.

5.2 Fator de Potência

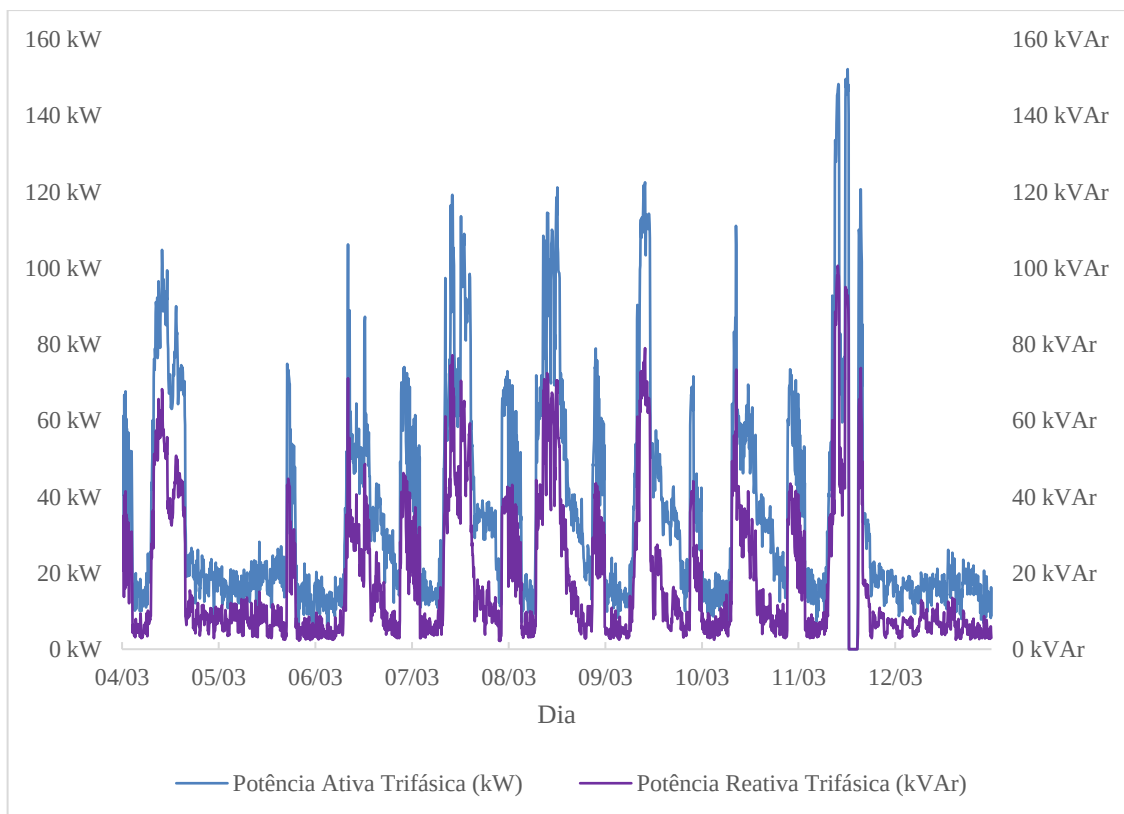
Conforme apresentado na fundamentação teórica, o fator de potência está diretamente relacionado às potências ativa, reativa e aparente. Assim, para compreendê-lo adequadamente, é necessário analisar sua correlação com essas grandezas, conforme ilustrado nas Figura 18 e 19.

Figura 18 - Fator de potência diário medido no QGBT.



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Figura 19 – Curvas de potências ativa e reativa medidas.



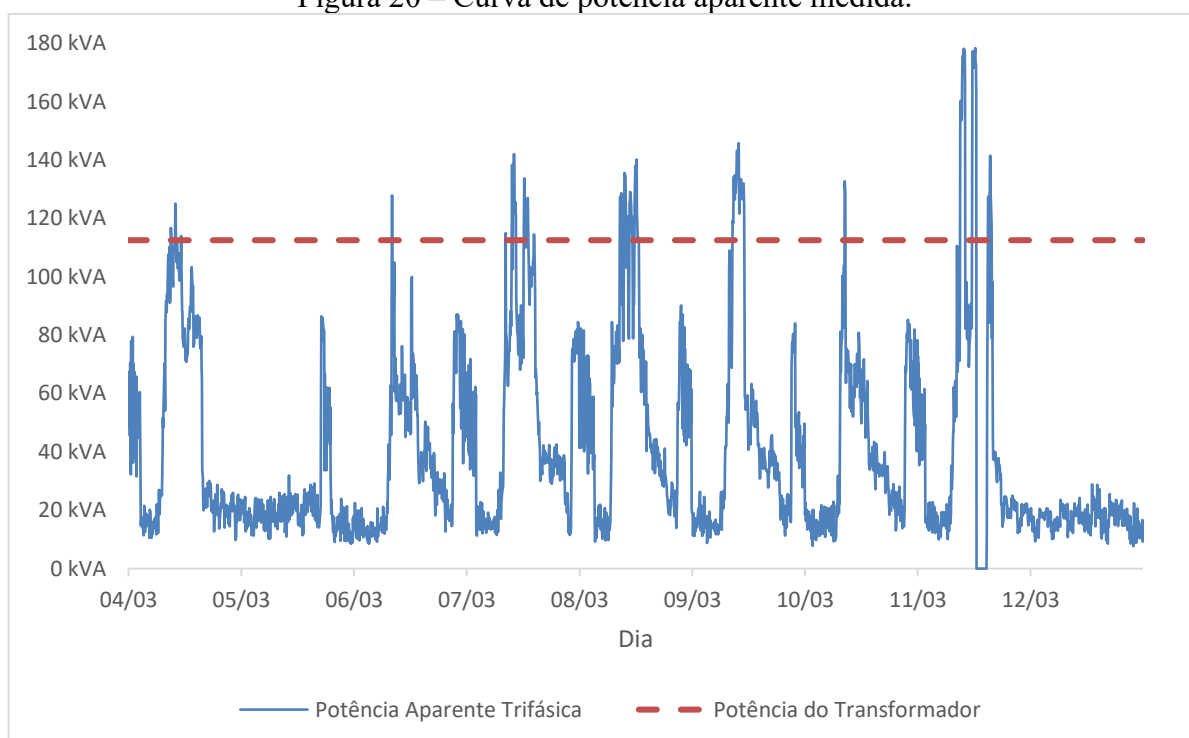
Fonte: elaborado pela autora (2025).

Observa-se que, nos momentos em que há maior demanda, o fator de potência apresenta valores inferiores 0,92, o que explica, como visto na subseção 2.2, a ocorrência de multas recorrentes por consumo de energia reativa.

Caso o baixo fator de potência se manifestasse durante períodos de baixa carga, o consumo de potência reativa seria reduzido, resultando em baixo impacto financeiro. No entanto, na unidade consumidora em estudo ocorre o cenário oposto: o fator de potência é inadequado justamente durante os períodos de maior demanda, o que potencializa o valor das multas. Dessa forma, sob o ponto de vista técnico e econômico, recomenda-se a instalação de um banco de capacitores, a fim de corrigir o fator de potência e reduzir os encargos decorrentes do consumo reativo.

Além disso, foi analisada a potência aparente, que merece atenção especial no estudo. A fábrica passou por um processo de expansão, mas o transformador permanece o mesmo dimensionado para uma carga menor, compatível com as condições anteriores de operação. Essa expansão, por si só, já compromete a capacidade do equipamento. O baixo fator de potência atua como um agravante, pois, como discutido na subseção 2.1.1, quanto menor o fator de potência, maior é a potência não convertida em trabalho para uma mesma potência ativa, e, consequentemente, maior será a potência aparente. Na Figura 20 é apresentada a comparação entre a potência aparente registrada e a potência nominal do transformador.

Figura 20 – Curva de potência aparente medida.



Fonte: elaborado pela autora (2025).

A análise dos valores demonstra que o transformador opera em sobrecarga em diversos momentos, indicando a necessidade de adequação da capacidade instalada. Enquanto isso não é realizado, não é recomendada a operação simultânea de novos maquinários nos horários de pico de demanda. Portanto, como paliativo, é necessário intercalar a utilização dos equipamentos de modo a evitar sobrecargas e prolongar a vida útil do transformador.

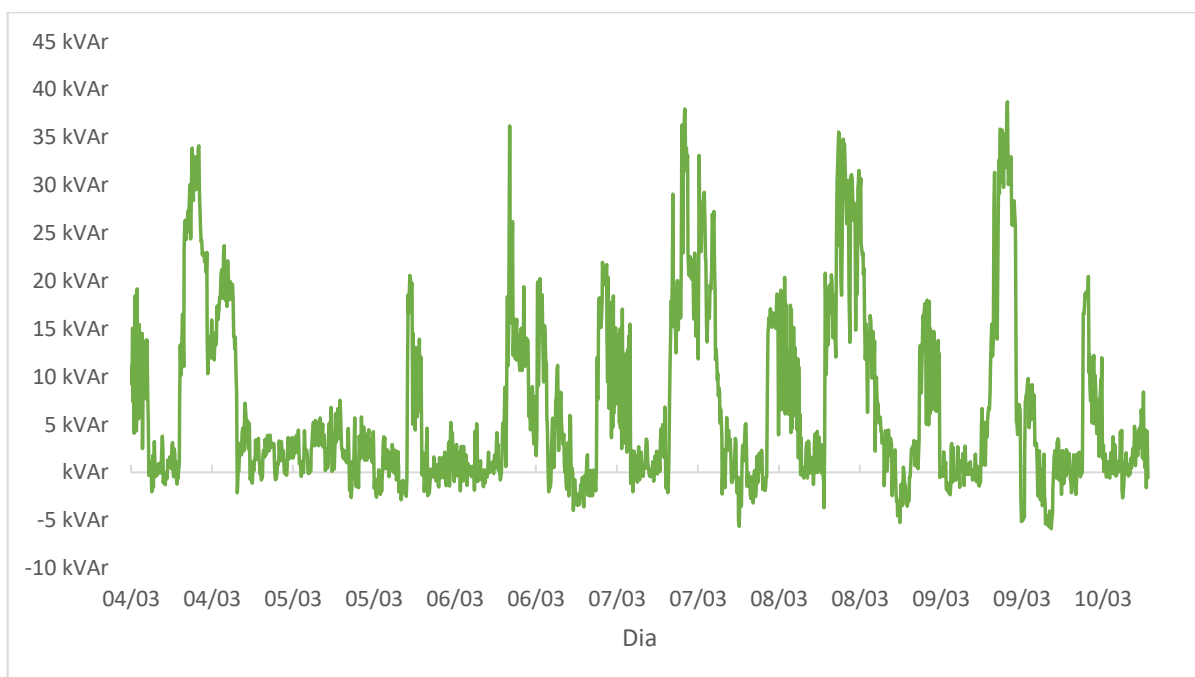
Será analisado posteriormente o comportamento dessa relação após a implementação do banco de capacitores, visando verificar a redução da potência aparente e a melhora no desempenho do sistema.

5.3 Dimensionamento do Banco de Capacitores

Para dimensionar a potência reativa capacitiva necessária foi adotado o valor de 0,95 como fator de potência desejado. Esse valor foi escolhido por ser superior ao mínimo exigido pela norma, garantindo uma margem de segurança operacional e maior estabilidade ao sistema elétrico. O cálculo utilizado baseou-se na metodologia apresentada na fundamentação teórica.

A Figura 21 ilustra a potência reativa capacitiva necessária para a adequação do fator de potência.

Figura 21 - Potência reativa capacitiva necessária para a adequação do fator de potência.



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Com base no padrão de consumo atual, verificou-se que a instalação de um banco de capacitores de 50 kVAr é suficiente para promover a correção do fator de potência, oferecendo

ainda margem de segurança para compensar o decaimento natural da capacitância das células ao longo do tempo.

Os dispositivos de proteção e comando do sistema foram dimensionados conforme as fichas técnicas do fabricante WEG e a norma NBR 5410. Para o cálculo da corrente de projeto, foi adotado o fator de dimensionamento de 1,3, em conformidade com as recomendações técnicas. A Tabela 3 apresenta o resultado do dimensionamento do banco de capacitores proposto.

Tabela 3 – Especificação técnica do banco de capacitores.

N	Capacitor	Tensão nominal	Corrente nominal	Corrente de projeto	Condutor com isolamento em PVC	Disjuntor	Contator
1	5,00 kVAr	380 V	7,60 A	9,88 A	2,50 mm ²	16,00 A	CWBC9
2	5,00 kVAr	380 V	7,60 A	9,88 A	2,50 mm ²	16,00 A	CWBC9
3	10,00 kVAr	380 V	15,19 A	19,75 A	4,00 mm ²	25,00 A	CWBC9
4	15,00 kVAr	380 V	22,79 A	29,63 A	6,00 mm ²	32,00 A	CWBC18
5	15,00 kVAr	380 V	22,79 A	29,63 A	6,00 mm ²	32,00 A	CWBC18

Fonte: elaborado pela autora (2025).

5.4 Análise de Viabilidade Econômica

Para a análise de viabilidade econômica da implementação do banco de capacitores, considerou-se apenas o custo referente aos materiais e à entrega, desconsiderando-se a mão de obra, uma vez que esta seria executada pela equipe técnica fixa da indústria.

Com o intuito de preservar a confidencialidade do orçamento originalmente fornecido ao consumidor, optou-se por não o apresentar neste trabalho. Em seu lugar, adotou-se um valor médio de mercado, obtido a partir de cotações realizadas na região e no período de estudo, resultando em um custo estimado de R\$ 16.000,00.

A economia mensal foi estimada pela multiplicação do consumo reativo médio mensal pela tarifa com impostos (ICMS, PIS e COFINS) aplicável ao consumidor supracitado, resultando em uma economia média mensal de R\$ 2.200,00. Dessa forma, o tempo de retorno do investimento (*payback*) é de aproximadamente 7 meses e 8 dias, evidenciando um retorno rápido.

Para complementar a análise, foram calculados o VPL e a TIR, considerando o retorno financeiro durante todo o período de vida útil do banco de capacitores, estimado em 17 anos (WEG, 2022).

Foi considerada uma Taxa Mínima de Atratividade (TMA) de 16%, sendo o somatório da taxa Selic (15%) e um risco associado arbitrário e 1%.

Com esses parâmetros, obtiveram-se os seguintes resultados:

- VPL = R\$ 150.165,79
- TIR = 165 % a.a.

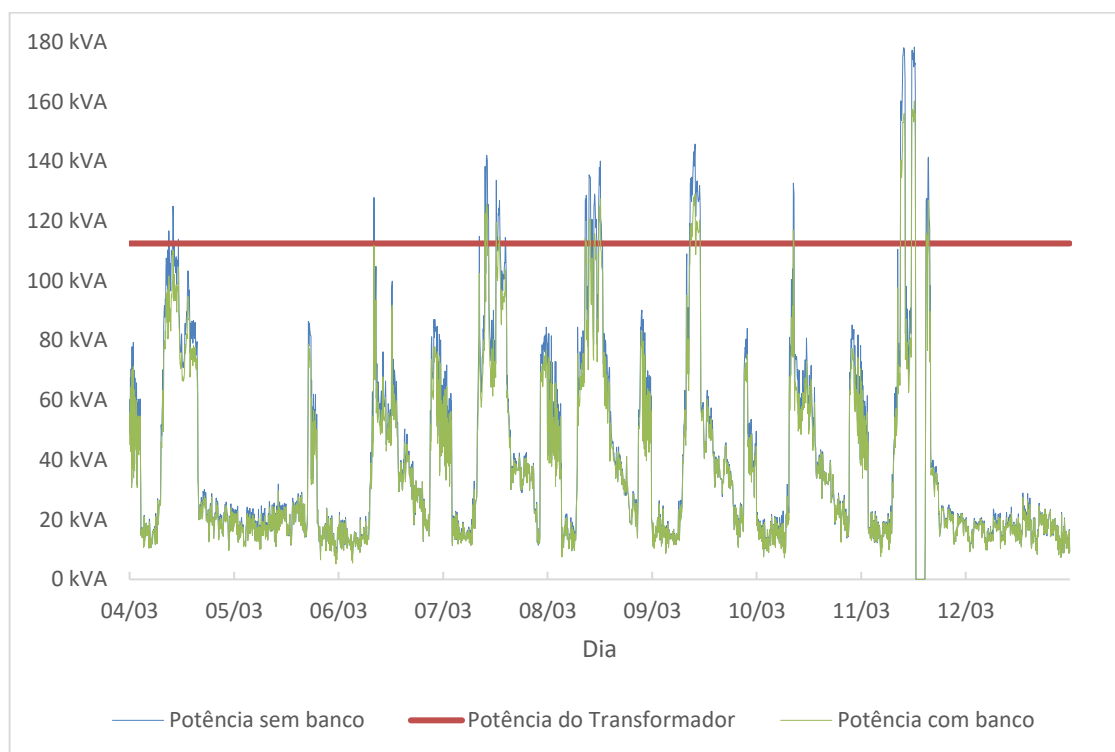
O VPL positivo e de valor expressivo, aliado a uma TIR significativamente superior à TMA, indica que o investimento é atrativo, apresentando segurança pelo retorno imediato longa da vida útil do equipamento.

5.5 Análise dos Impactos da Instalação do Banco de Capacitores

Nesta subseção são apresentadas as simulações comparando o comportamento do sistema antes e após a instalação do banco de capacitores.

Com a instalação do banco de capacitores, espera-se que o fator de potência seja corrigido, apresentando valor mínimo de 0,95 em todo o período de operação. Com base nesse parâmetro, foi calculada uma nova potência aparente, mantendo a mesma potência ativa registrada pelo analisador. A Figura 22 apresenta a comparação entre a potência aparente simulada (considerando o fator de potência corrigido) e a potência originalmente registrada.

Figura 22 - Comparação da potência aparente.



Fonte: elaborado pela autora (2025).

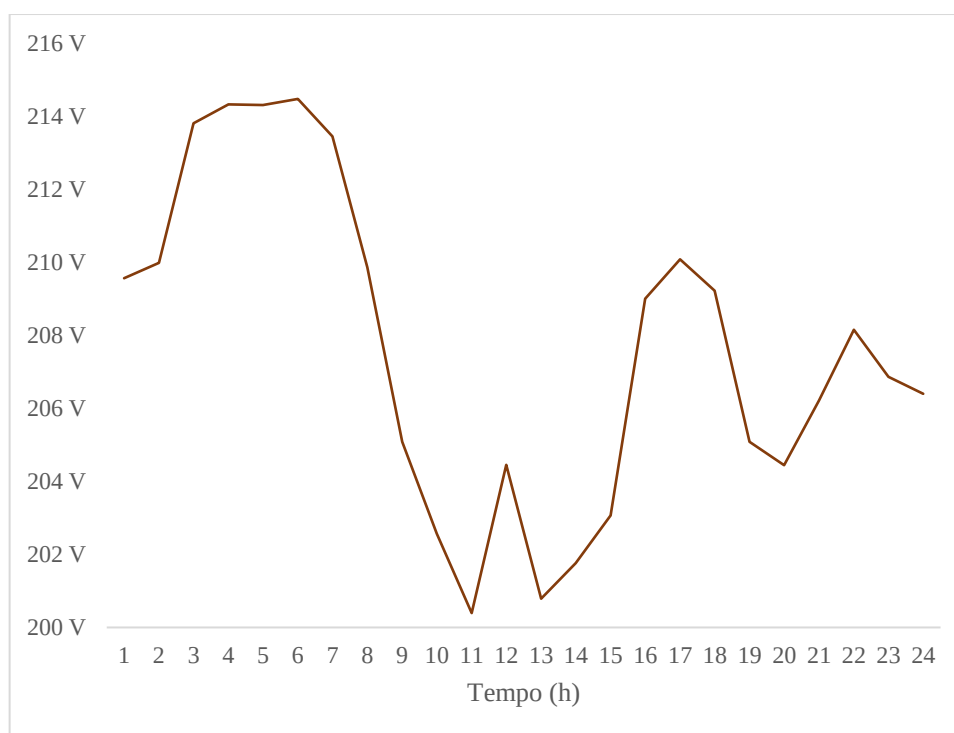
Como esperado, a simulação demonstra uma redução na potência aparente após a correção do fator de potência. Ainda assim, recomenda-se a substituição do transformador, devido à sua limitação de capacidade nominal.

5.5.1 Impacto no SDEE

Por se tratar de um sistema fictício, as simulações realizadas no *software* OpenDSS não representam valores reais, mas permitem compreender o comportamento das grandezas elétricas em função da injeção de potência reativa, bem como realizar estimativas de desempenho.

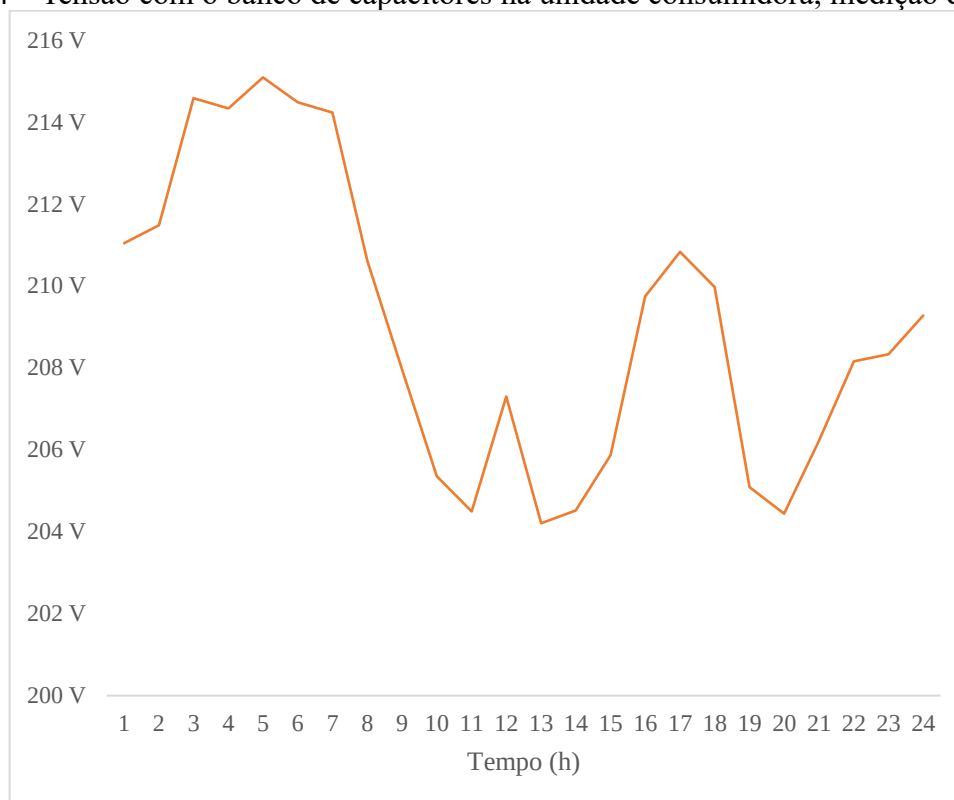
Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 23 a 28.

Figura 23 – Tensão sem o banco de capacitores na unidade consumidora, medição do monitor.



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Figura 24 – Tensão com o banco de capacitores na unidade consumidora, medição do monitor.



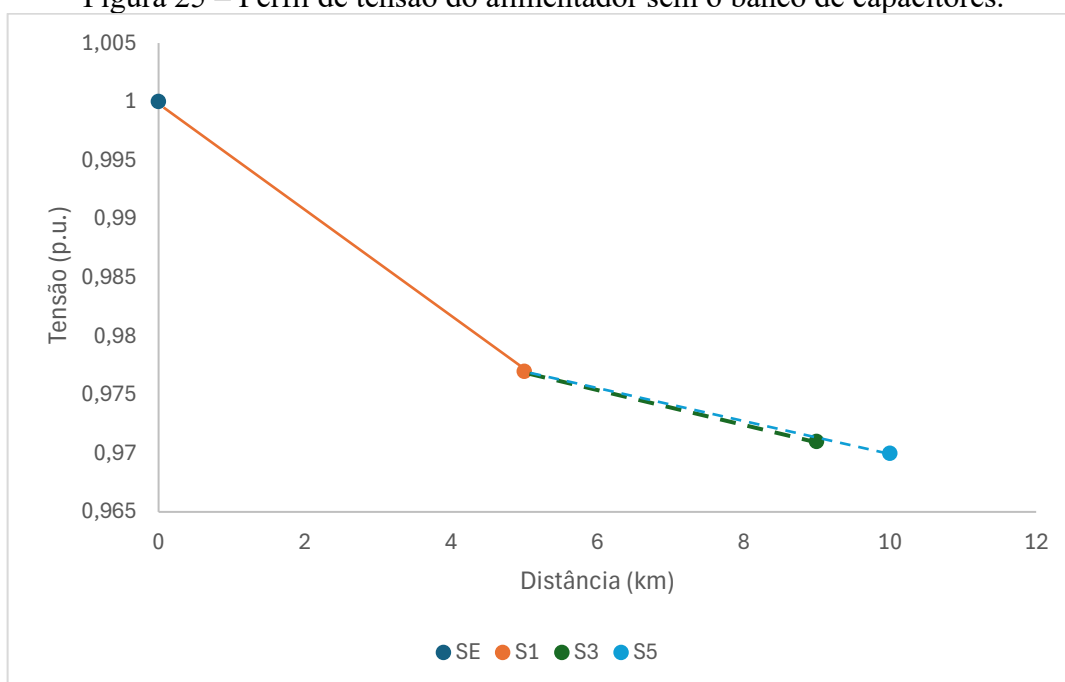
Fonte: elaborado pela autora (2025).

Sem o banco, observaram-se intervalos em que a tensão atingiu níveis precários. Com o banco houve um aumento na tensão, ou seja, assim como descrito na literatura, a simulação demonstra que a injeção de potência reativa capacitiva eleva a tensão registrada. Isso ocorre devido à redução das perdas de potência.

Além disso, ao comparar os resultados com as curvas de carga, nota-se que as cargas conectadas às barras S2 e S6 influenciam o comportamento da tensão na unidade consumidora — conforme deduzido na subseção 5.1. Entre 15h e 21h, a carga industrial é baixa e praticamente constante, o que deveria resultar em uma tensão estável; entretanto, das 19h às 21h, observa-se uma queda acentuada, coincidente com o pico de demanda nas barras S2 e S6.

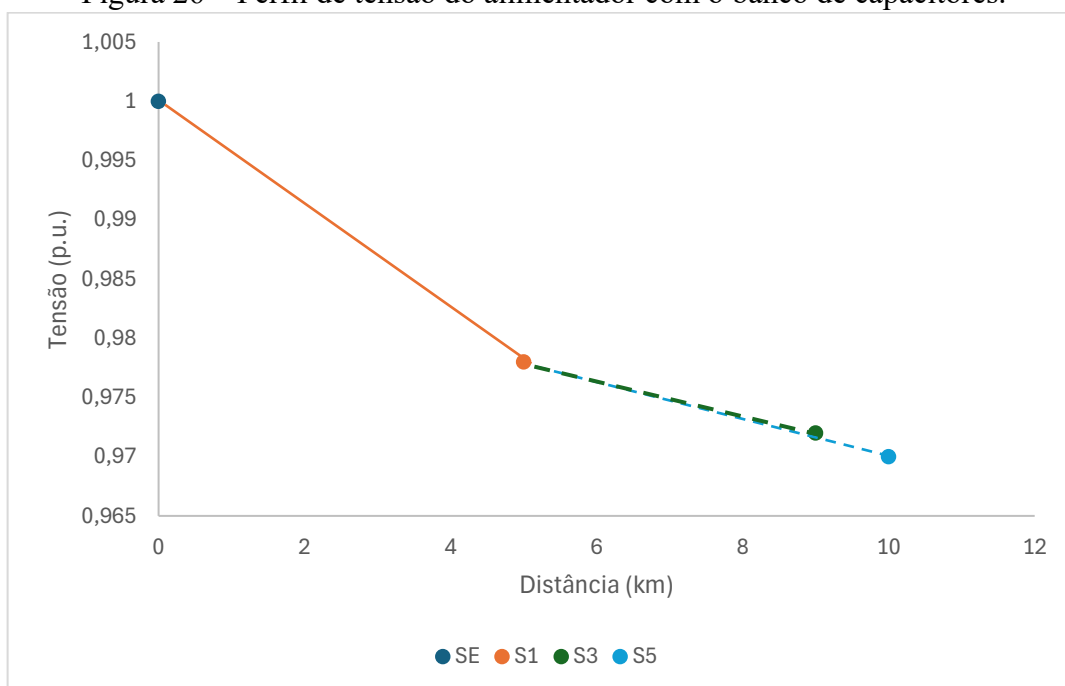
As Figuras 25 e 26 mostram o perfil de tensão.

Figura 25 – Perfil de tensão do alimentador sem o banco de capacitores.



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Figura 26 – Perfil de tensão do alimentador com o banco de capacitores.



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Observa-se que o banco de capacitores reduziu a queda de tensão em L2. Antes da instalação, para o mesmo comprimento de L4, a queda de tensão era maior, mesmo com impedâncias de linha iguais. Isso ocorria devido à presença de potência reativa indutiva superior

em L2 e, conseqüentemente, maiores perdas de potência. Após a instalação do banco, essa condição foi corrigida.

A instalação do banco proporcionou melhorias sutis em outras barras do sistema. A Tabela 4 apresenta as tensões em cada barra.

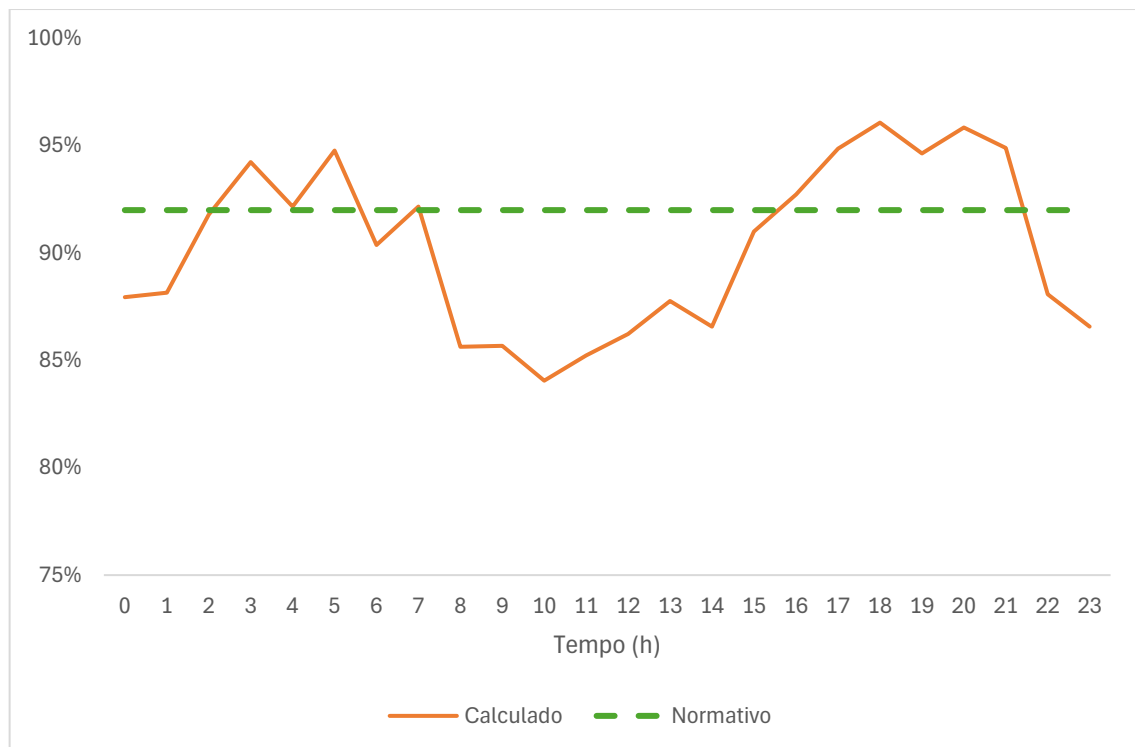
Tabela 4 – Tensão nas barras.

	Tensão em p.u.		
	Sem o Banco	Com o Banco	Diferença Percentual
S1	0,9773	0,9779	0,06%
S3	0,9711	0,972	0,09%
S5	0,9699	0,9704	0,05%

Fonte: elaborado pela autora (2025).

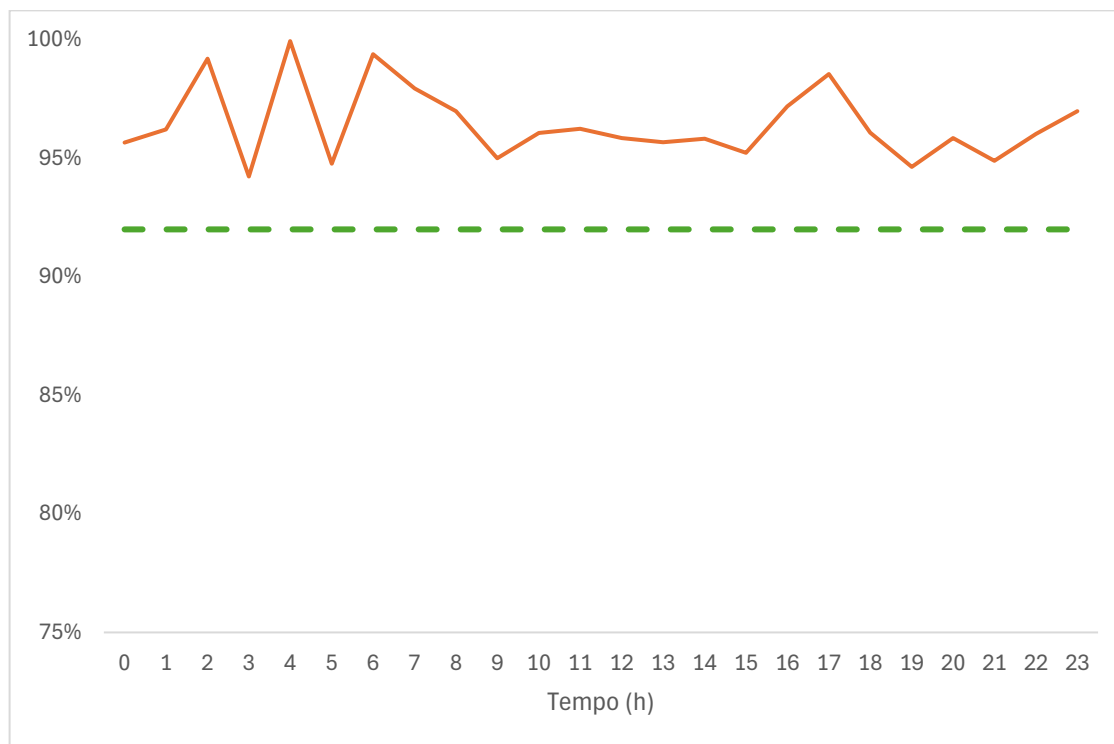
Ademais foi analisado o fator de potência na unidade consumidora antes e após a instalação do banco, conforme apresentado nas Figuras 27 e 28.

Figura 27 – Fator de Potência sem o banco.



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Figura 28 – Fator de Potência com o banco.



Fonte: elaborado pela autora (2025).

Percebe-se que, sem o banco, o fator de potência permanece abaixo do limite normativo em períodos de alta carga. Com o banco instalado, o fator é mantido dentro dos valores recomendados, evidenciando a eficácia da correção.

Outro aspecto importante analisado foram as perdas técnicas no alimentador. O medidor instalado no início do alimentador registrou perdas diárias de 915 kWh sem o banco e 890 kWh com o banco, representando uma redução aproximada de 25 kWh dia.

Embora o impacto da instalação desse banco na rede seja pequeno, é importante destacar que, considerando apenas o setor industrial do estado — que, em 2024, demandou uma potência média de **82.135,52 kW** (BEAL, 2025) —, a potência ativa máxima do estudo de caso representa menos de **0,02%** desse total. Assim, se o fator de potência desse consumidor for representativo do padrão do setor, o impacto das correções individuais é expressivo.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo sobre a aplicação de bancos de capacitores para correção do fator de potência em unidades consumidoras do Grupo A. Inicialmente, foram discutidos os fundamentos teóricos relacionados à qualidade da energia elétrica e às exigências normativas vigentes. Em seguida, realizou-se um estudo de caso em uma unidade industrial, com medições de energia e dimensionamento de um banco de capacitores adequado à instalação. Também foram conduzidas análises de viabilidade econômica e simulações no software OpenDSS

A análise desenvolvida comprovou que a instalação de bancos de capacitores é uma alternativa eficaz para a correção do fator de potência e a melhoria da eficiência energética em consumidores do Grupo A.

Com base na revisão bibliográfica, identificaram-se os principais impactos da instalação de bancos de capacitores sobre a qualidade da energia elétrica. O que foi comprovado no estudo de caso, que suas consequências técnicas e financeiras.

A solução adotada foi a instalação de um banco de 50 kVAr, capaz de elevar o fator de potência para dentro da faixa regulamentar e reduzir as perdas elétricas. A avaliação econômica indicou retorno inferior a oito meses, VPL positivo e TIR superior à TMA, confirmando a viabilidade financeira do projeto.

Por fim, as simulações no *software* OpenDSS mostraram melhora na estabilidade da tensão e redução das perdas no sistema, comprovando os benefícios técnicos da correção.

A aplicação de bancos de capacitores, quando corretamente dimensionado, representa uma solução eficaz e economicamente viável para consumidores de média tensão.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **ANEEL divulga os resultados do desempenho das distribuidoras na continuidade do fornecimento de energia elétrica em 2024.** 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2025/aneel-divulga-os-resultados-do-desempenho-das-distribuidoras-na-continuidade-do-fornecimento-de-energia-eletrica-em-2024>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST: módulo 7 – cálculo de perdas na distribuição.** Brasília: ANEEL, 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST: módulo 8 – qualidade da energia elétrica.** Brasília: ANEEL, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Resolução normativa nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021.** Brasília: ANEEL, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão.** Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

CHRISTO, Eliane da Silva; SOUZA, Reinaldo Castro. **Uma abordagem estatística para a previsão de potência reativa em sistemas elétricos.** Pesquisa Operacional, Rio de Janeiro, v. 26, n. 2, ago. 2006.

DIAS, Amanda A. **Análise da tipologia de curvas de carga baseada em métodos de classificação de dados.** Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia Elétrica. Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2021.

ENERGISA. **NDU 048.4 – Critérios para elaboração de projetos de subestações tipo Rural.** Versão 2.0. João Pessoa: GTD – Gerência Técnica da Distribuição, maio 2018

MARTINEZ, Manuel Luís Barreira. **Análise de consumo de energia e aplicações.** In: Fascículo Cap. IV – Análise de consumo de energia e aplicações. O Setor Elétrico, ed. 111, 2015.

LEONARDO, Gustavo Henrique Santos. **Análise de ressonância e amplificação harmônica em sistemas de distribuição com enfoque na qualidade de energia.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

M. E. DE OLIVEIRA; A. PADILHA-FELTRIN; F. J. CANDIAN. **Investigation of the relationship between load and loss factors for a Brazilian electric utility.** 2006 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, Caracas, Venezuela, 2006, pp. 1-6. DOI: 10.1109/TDCLA.2006.311390.

MIKKILI, Suresh; PANDA, Anup Kumar. **Power Quality Issues: Current Harmonics**. Boca Raton; London; New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2018. ISBN 978-1-315-22247-9. DOI: 10.1201/9781315222479.

NETO, João Cardoso das Neves. **Análise da frequência de ressonância em relação à compensação reativa e à impedância percentual do transformador em sistemas de aparelhos de ressonância magnética de imagem**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

PRIMATA ELETRÔNICA. **Especificações técnicas — P53 Analisador de Energia para Comparação Fiscal (v.2024-02)**. [S.l.], 2024.

SEDICS — Secretaria de Estado do Desenvolvimento, Indústria, Comércio e Serviços. **Balanço Energético de Alagoas – BEAL 2025**. Maceió, 2025.

SILVA, Allan David da Costa. **Desenvolvimento de interfaces para o software OpenDSS**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2021.

SOUZA, Richard Paulino Saraiva de. **O impacto da instalação de um banco de capacitor**. Revista FT, v. 29, ed. 141, dez. 2024. DOI: 10.69849/revistaft/ra10202412090005.

STAROSTA, José. **Queima de capacitores em sistemas antirressonantes**. O Setor Elétrico, 10 maio 2018.

WEG. **Capacitores para correção do fator de potência**. Jaraguá do Sul: WEG, 2022.

WEG. **Manual para Correção do Fator de Potência**. Jaraguá do Sul: WEG, 2021.