

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

IGOR SAKAE TAKAYANANE

**CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA EM UMA BASE DE OPERAÇÕES DE
COMBUSTÍVEIS**

IGOR SAKAE TAKAYANANE

**CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA EM UMA BASE DE
OPERAÇÕES DE COMBUSTÍVEIS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP
como parte dos requisitos para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Elétrica.

Prof. Dr. Falcondes José Mendes de Seixas
Orientador

Luiz Roberto da Fonseca
Coorientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

T136c Takayanane, Igor Sakae.
Correção do fator de potência em uma base de operações de combustíveis /
Igor Sakae Takayanane. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
76 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

Orientador: Falcondes José Mendes De Seixas

Coorientador: Luiz Roberto Da Fonseca

Inclui bibliografia

1. Correção do fator de potência. 2. Banco automático de capacitores. 3.
Excedente de energia reativa.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos seis dias do mês de novembro do ano de dois mil e vinte e três, o discente Igor Sakae Takayanane, matriculado sob o nº 162055005 e tendo como banca examinadora o seu orientador, o *Prof. Dr. Falcondes José Mendes de Seixas*, o Doutorando Rodrigo Serra Daltin e o Doutorando Lucas do Carmo Yamaguti, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA EM UMA BASE DE OPERAÇÕES DE COMBUSTÍVEIS", obtendo a nota 9,5 (Nove e Meio) e conceito Aprovado.


 Prof. Dr. Falcondes José Mendes de Seixa


-orientador-


 Igor Sakae Takayanane

-Discente-


 Doutorando Rodrigo Serra Daltin

-Membro da Banca-


 Doutorando Lucas do Carmo Yamaguti

-Membro da Banca-

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, dedico esse trabalho às minhas avós, Célia Takamoto Takayanane (in memoriam) e Alice Viana Barcelos (in memoriam), aos meus pais, Sérgio e Adriana e ao meu irmão, Rodrigo. Todos foram fundamentais para minha formação, seja ela profissional ou pessoal e sempre me apoiaram em todas as dificuldades que passei até esta etapa da minha vida.

Aos professores da FEIS, em especial ao professor Falcondes, que foi o orientador desse trabalho e deu todo o suporte necessário durante as etapas desse trabalho.

Aos meus colegas de trabalho da base de operações de combustíveis de São José do Rio Preto, em especial ao senhor José Jadson, que foi o responsável por permitir que esse projeto fosse implementado.

Ao senhor Luiz Roberto, da Klareluz Eletrificações, que foi o coorientador desse trabalho e auxiliou em todas as etapas do projeto.

Ao Júlio Cesar Zara, que auxiliou na instalação do projeto.

Ao Marcos, da Marconni Engenharia Elétrica, que também auxiliou na implementação desse projeto.

Por fim, à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, por todo ensino de qualidade e o preparo ao mercado de trabalho que tive ao longo dos anos.

*“O homem não teria alcançado o possível se, repetidas vezes,
não tivesse tentado o impossível.”*

Max Weber

RESUMO

Este trabalho apresenta um projeto de correção do fator de potência em uma base de operações de combustíveis. Este projeto se justifica pela necessidade de regularização da base de operações perante ao valor do fator de potência estipulado por norma e, conseqüentemente, eliminar a cobrança pelo excedente de energia reativa consumida. Este trabalho detalha todas as etapas do projeto, desde a análise da viabilidade financeira, estudos das cargas da unidade consumidora, cálculos, instalação e verificação da eficácia. São apresentadas as técnicas comumente utilizadas para correção do fator de potência, sendo a técnica escolhida para este trabalho a instalação de um banco de capacitores automático, devido ao seu custo-benefício. Após ser realizado um estudo de viabilidade financeira, utilizou-se um analisador de energia para obtenção de dados necessários para os cálculos dos valores das células capacitivas dos bancos e também para uma análise de ressonância e distorção harmônica. O processo de instalação foi acompanhado desde a retirada do antigo banco de capacitores, da montagem da estrutura mecânica, da passagem de cabos, da ligação das células capacitivas e da instalação do controlador automático do fator de potência. Também se verificou a eficácia da correção utilizando as contas de energia dos meses anteriores e posteriores ao mês em que foi realizada a instalação do banco automático de capacitores. Por fim, constatou-se que a correção obteve sucesso e o valor da cobrança devido ao excedente de energia reativa foi reduzido significativamente.

Palavras-chave: Correção do fator de potência. Banco automático de capacitores. Excedente de energia reativa.

ABSTRACT

This work presents a power factor correction project in a fuel operations base. This project is justified by the need to bring the operations base into compliance with the power factor value stipulated by standards, consequently eliminating charges for excess consumed reactive energy. The paper details all stages of the project, starting from financial viability analysis, studies of the unit's loads, calculations, installation, and effectiveness verification. Commonly used techniques for power factor correction are presented, with the chosen technique for this work being the installation of an automatic capacitor bank due to its cost-effectiveness. After conducting a financial feasibility study, an energy analyzer was used to gather necessary data for calculating the values of capacitor cells in the banks, as well as for a resonance and harmonic distortion analysis. The installation process was monitored from the removal of the old capacitor bank, assembly of the mechanical structure, cable routing, connection of capacitor cells, to the installation of the automatic power factor controller. The effectiveness of the correction was also verified using energy bills from months before and after the installation of the automatic capacitor bank. Ultimately, it was confirmed that the correction was successful, significantly reducing the charges due to excess reactive energy.

Keywords: Power factor correction. Automatic capacitor bank. Excess reactive energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Triângulo de potências	16
Figura 2: Potência reativa	17
Figura 3: Tetraedro das potências.....	18
Figura 4: Exemplo de um triângulo de potências após a correção do fator de potência ...	22
Figura 5: Circuito para ressonância série.	25
Figura 6: Circuito para ressonância paralela	25
Figura 7: Conta de energia da unidade consumidora (outubro)	27
Figura 8: Destaque da conta de energia da unidade consumidora (outubro).....	28
Figura 9: Gráfico dos valores cobrados pelos excedentes de energia reativa	28
Figura 10: Banco de capacitores instalado na base de operações.....	30
Figura 11: Conjunto chave de ligação e banco de capacitores	30
Figura 12: Verificação do banco de capacitores antigo.....	31
Figura 13: Energia ativa consumida (janeiro)	33
Figura 14: Energia reativa indutiva consumida (janeiro)	33
Figura 15: Energia reativa excedente (janeiro).....	34
Figura 16: Energia reativa capacitiva consumida (janeiro).....	34
Figura 17: Energia ativa consumida (março)	35
Figura 18: Energia reativa indutiva consumida (março)	35
Figura 19: Energia reativa excedente (março).....	36
Figura 20: Energia reativa capacitiva consumida (março)	36
Figura 21: Energia ativa consumida (abril)	37
Figura 22: Energia reativa indutiva consumida (abril).....	37
Figura 23: Energia reativa excedente (abril)	38
Figura 24: Energia reativa capacitiva consumida (abril).....	38
Figura 25: Energia ativa consumida (dezembro).....	39
Figura 26: Energia reativa indutiva consumida (dezembro)	39
Figura 27: Energia reativa excedente (dezembro).....	40
Figura 28: Energia reativa capacitiva consumida (dezembro)	40
Figura 29: Instalação do analisador de energia	41
Figura 30: Configurando o analisador de energia	42
Figura 31: Analisador de energia sem erros para fazer as medições.....	42
Figura 32: Retirada do analisador de energia	43

Figura 33: DHT dia 13/02 – 14/02	43
Figura 34: DHT dia 15/02	44
Figura 35: DHT dia 16/02	44
Figura 36: DHT dia 17/02	45
Figura 37: DHT dia 18/02	45
Figura 38: DHT dia 19/02	46
Figura 39: DHT dia 20/02	46
Figura 40: Potências ativa e reativa da fase A (13/02/23 – 14/02/23).....	47
Figura 41: Potências ativa e reativa da fase A (15/02/23).....	48
Figura 42: Potências ativa e reativa da fase A (16/02/23).....	48
Figura 43: Potências ativa e reativa da fase A (17/02/23).....	49
Figura 44: Potências ativa e reativa da fase A (18/02/23).....	49
Figura 45: Potências ativa e reativa da fase A (19/02/23).....	50
Figura 46: Potências ativa e reativa da fase A (20/02/23).....	50
Figura 47: Placa com as informações do transformador	53
Figura 48: Controlador de fator de potência BR6000	54
Figura 49: Retirada das células capacitivas antigas.....	55
Figura 50: Retirada das chaves de acionamento do banco antigo	55
Figura 51: Diagrama elétrico do quadro.....	56
Figura 52: Fixação da estrutura para comportar as células capacitivas.....	56
Figura 53: Células capacitivas fixadas	57
Figura 54: Estrutura do banco de capacitores instalada	57
Figura 55: Desligamento da energia que chega ao transformador	58
Figura 56: Crimpagem de terminais nos cabos	58
Figura 57: Passagem dos cabos para alimentação e acionamento do banco	59
Figura 58: Cabos de alimentação do sistema de acionamento do banco passados.....	59
Figura 59: Informações do gerador a diesel	60
Figura 60: Diagrama unifilar do sistema	60
Figura 61: Comparação entre o banco antigo e o novo.	61
Figura 62: Verificação da correção do fator de potência pelo controlador	62
Figura 63: Diagrama multifilar do sistema instalado	62
Figura 64: Célula capacitiva fabricada de acordo com a IEC 60831-1/2.....	63
Figura 65: Conta de energia da unidade consumidora (maio).....	65
Figura 66: Conta de energia da unidade consumidora (junho).....	65

Figura 67: Custos de excedente de energia reativa (ponta jan/21– ago/23)	66
Figura 68: Custos de excedente de energia reativa (fora de ponta jan/21 – ago/23).....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Faixas de distorção harmônica	24
Tabela 2: Gastos e média da taxa por excedente de reativo	29
Tabela 3: Cálculo do fator de potência da base de operações	32
Tabela 4: Valores dos bancos de capacitores	51
Tabela 5: Cálculo das frequências de ressonância do banco de capacitores	53
Tabela 6: Temperatura de operação das células capacitivas	63
Tabela 7: Custos do projeto	67

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Potência ativa.....	15
Equação 2: Potência reativa.....	15
Equação 3: Módulo da Potência Complexa.....	16
Equação 4: Potência Complexa	16
Equação 5: Cálculo do fator de potência	17
Equação 6: Cálculo da potência aparente considerando a distorção harmônica	18
Equação 7: Cálculo da nova potência aparente (considerando a distorção harmônica)....	18
Equação 8: Cálculo do fator de potência considerando a distorção harmônica	18
Equação 9: Cálculo do custo do excedente de potência reativa	19
Equação 10: Impedância.....	20
Equação 11: Reatância.....	20
Equação 12: Reatância indutiva	20
Equação 13: Reatância capacitiva	20
Equação 14: Potência reativa desejada.....	21
Equação 15: Valor da capacitância do banco	21
Equação 16: Potência reativa desejada pelo método tabular.....	21
Equação 17: Transformação de capacitores em ligação triângulo para estrela	23
Equação 18: Cálculo da distorção harmônica total	23
Equação 19: Soma das impedâncias indutivas e capacitivas igualadas a zero.....	24
Equação 20: Impedância indutiva igualada a impedância capacitiva.....	24
Equação 21: Ordem da harmônica ressonante.....	25
Equação 22: Cálculo do prazo de retorno do investimento do projeto.....	29
Equação 23: Média dos valores dos bancos de capacitores.....	52
Equação 24: Potência de curto-circuito do transformador	52
Equação 25: Potência de curto-circuito do transformador do projeto	53

SIGLAS E ABREVIACÕES

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

CLP: Computador Lógico Programável

MME: Ministério de Minas e Energia

PROCEL: Programa Nacional de Conservao de Energia Elétrica

PRODIST: Procedimentos de Distribuio de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

SEP: Sistemas Elétricos de Potência

DHT: Distoro Harmônica Total

TC: Transformador de corrente

TP: Transformador de potencial

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. OBJETIVOS	14
2. RELAÇÕES ENTRE POTÊNCIA ELÉTRICA E FATOR DE POTÊNCIA	15
2.1. DEFINIÇÕES DE POTÊNCIA ELÉTRICA	15
2.2. CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA	18
2.3. DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE TENSÃO.....	23
3. METODOLOGIA DA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA.....	27
3.1. ANÁLISE DO CONSUMO.....	27
3.2. ANÁLISE DO ANTIGO BANCO DE CAPACITORES	30
3.3. ESTUDO UTILIZANDO UM ANALISADOR DE ENERGIA.....	41
3.4. DEFINIÇÃO DO BANCO DE CAPACITORES	51
3.5. INSTALAÇÃO DO BANCO DE CAPACITORES AUTOMÁTICO	55
4. ANÁLISE DOS RESULTADOS	65
4.1. VERIFICAÇÃO DA EFICÁCIA DO BANCO DE CAPACITORES.....	65
5. CONCLUSÕES.....	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
ANEXO 1–FATORES PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA.....	72

1. INTRODUÇÃO

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) se desenvolveram por volta de 1880, entretanto, já em 1870, a eletricidade era utilizada para iluminação pública (por meio de lâmpadas a arco voltaico). Posteriormente, no ano de 1879 as lâmpadas incandescentes já eram comercializadas, dando assim, um salto na evolução da eletricidade (VASCONCELOS, 2017).

Com o avanço das tecnologias e a busca por uma qualidade de energia cada vez melhor, foram criadas instituições que trabalham regularmente em prol da eficiência energética, das quais destacam-se: Ministério de Minas e Energia (MME), ELETROBRÁS (atua no Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL)) e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e além de todas essas instituições citadas, também é válido ressaltar o Decreto nº 20.466 e o Decreto nº 41.019, que originaram o horário de verão e a regulamentação dos serviços de energia, respectivamente (VIANA, 2012).

Com esse crescente desenvolvimento, a ANEEL criou o sistema tarifário, esse sistema define quatro diferentes tipos de consumo, que são: horário de ponta de carga, horário fora de ponta de carga, período úmido e período seco.

O horário de ponta de carga abrange três horas consecutivas que são definidas pela distribuidora, sendo geralmente das 18:00 às 20:59, entretanto, são exceções os sábados, domingos, terça-feira de Carnaval, Sexta-feira da Paixão, Corpus Christi e os feriados nacionais definidos pela legislação. O horário fora de ponta de carga abrange as horas consecutivas complementares às definidas no horário de ponta de carga, sendo das 00:00 às 17:59 e das 21:00 às 23:59. O período úmido abrange as leituras de consumo e demanda entre 1 de dezembro e 30 de abril. Por último, o período seco abrange as leituras de consumo e de demanda entre do dia 1 de maio e o dia 30 de novembro (MAMEDE, 2017).

Esses avanços também possibilitaram um melhor estudo na eficiência da energia elétrica, fazendo melhorias no consumo de energia e dentre todas as técnicas desenvolvidas que são utilizadas no mercado, uma delas é a correção do fator de potência. O fator de potência é o resultado da razão entre a energia elétrica ativa e a raiz quadrada da soma dos quadrados das energias das energias ativa e reativa (consumidas no mesmo período).

A técnica da correção do fator de potência é utilizada principalmente em consumidores que têm em sua estrutura cargas como motores e transformadores, como estas cargas solicitam energia reativa para criarem um fluxo magnético para entrarem em funcionamento, as ações que podem ser tomadas nesses casos são: instalação de banco de capacitores fixos ou automáticos, instalação de motores síncronos ou aumento do consumo de energia ativa. (VIANA, 2012).

Por fim, este trabalho se aplicou em um projeto de um banco de capacitores automático em uma base de distribuição de combustíveis para corrigir o fator de potência para dentro dos padrões regulamentados pela ANEEL.

1.1. OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho são:

- i. Aumentar o conhecimento prático e teórico no que se diz respeito a fator de potência e métodos atuais de corrigi-lo, visando acompanhar todas as etapas de um projeto, desde a análise financeira, cálculos e instalação;
- ii. Corrigir o fator de potência da base de operações de combustíveis para dentro dos padrões regulamentados e diminuir o valor da cobrança por excedente de energia reativa utilizando uma tecnologia mais atual para uma melhor eficiência.
- iii. Apresentar as mudanças após a instalação do banco de capacitores para verificação da eficácia da correção do fator de potência.
- iv. Documentação e apresentação do Trabalho de Graduação.

2. RELAÇÕES ENTRE POTÊNCIA ELÉTRICA E FATOR DE POTÊNCIA

É importante definir os tipos de potências elétricas existentes. As potências elétricas podem ser: Ativa, Reativa e Complexa ou Aparente. A correção do fator de potência é um tópico importante a ser abordado e que abrange diversos métodos para sua realização e que se faz necessário para enquadrar a instalação da unidade consumidora para dentro dos parâmetros estipulados pelos órgãos responsáveis. Outro tópico importante para se ressaltar é a condição de ressonância elétrica, esta condição pode provocar danos ao sistema da unidade consumidora e acontece a partir de uma frequência em que as reatâncias capacitivas e indutivas são iguais em módulo, o que resulta em uma impedância puramente resistiva (ALEXANDER, 2013).

2.1. DEFINIÇÕES DE POTÊNCIA ELÉTRICA

Pode-se definir como a potência aparente o módulo da potência complexa, denotado por $|S|$. Para a definição de potência aparente é necessário descrever o significado de potência ativa e potência reativa, portanto, a potência ativa (P) pode ser denotada pela Equação 1:

$$P = V_{ef} I_{ef} \cos \theta \quad [\text{W}] \quad (1)$$

Em que:

P = potência ativa [W];

V_{ef} = tensão eficaz [V];

I_{ef} = corrente eficaz [A];

$\cos \theta$ = cosseno do ângulo entre os fasores de tensão e corrente [adimensional].

A potência ativa também é chamada de potência útil, ou seja, é a potência que realiza trabalho diretamente (equipamentos como: chuveiros, lâmpadas incandescentes e ferros de passar roupa são cargas que consomem somente energia ativa). A potência reativa (Q) pode ser definida por meio da Equação 2:

$$Q = V_{ef} I_{ef} \sin \theta \quad [\text{VAr}] \quad (2)$$

Em que:

Q = potência reativa [VAr];

V_{ef} = tensão eficaz [V];

I_{ef} = corrente eficaz [A];

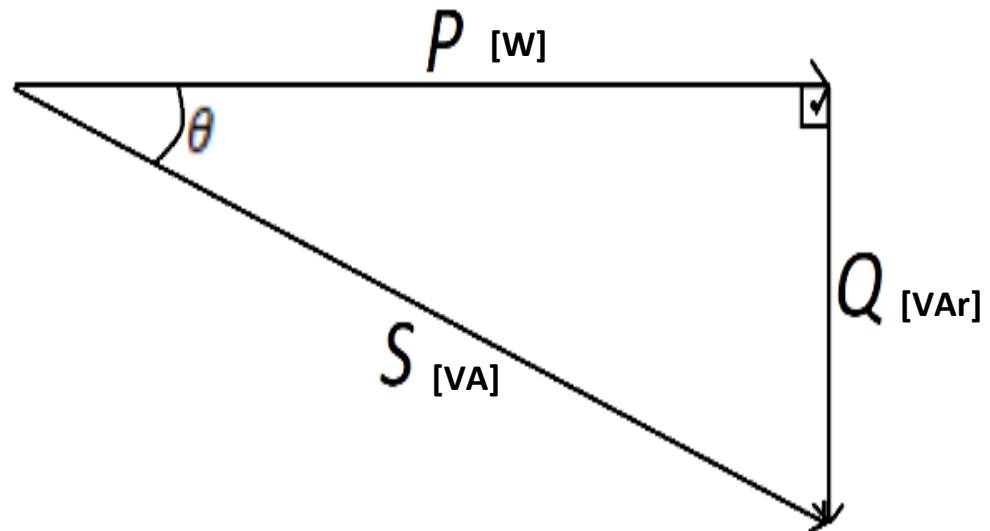
$\sin \theta$ = seno do ângulo entre os fasores de tensão e corrente [adimensional].

A potência reativa não realiza trabalho, entretanto, é muito importante para colocar os equipamentos em funcionamento, por exemplo, a potência reativa magnetiza e mantém o núcleo de um motor magnetizado, o que é essencial para seu funcionamento. Ela está presente em

cargas como: motores, transformadores e equipamentos que contém bobina em sua construção (MOURA, 2018).

Com estas informações é possível analisar o triângulo de potências, como mostra a Figura 1.

Figura 1: Triângulo de potências.



Fonte: Adaptado de MAMEDE (2017).

A Figura 1 representa a potência complexa pelo vetor \vec{S} , a potência ativa pelo vetor \vec{P} e a potência reativa pelo vetor \vec{Q} , assim, tratando-se de um triângulo retângulo, pode-se utilizar a fórmula de Pitágoras para definir a relação entre as potências, sendo ela representada pela Equação 3:

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad [\text{VA}] \quad (3)$$

Em que:

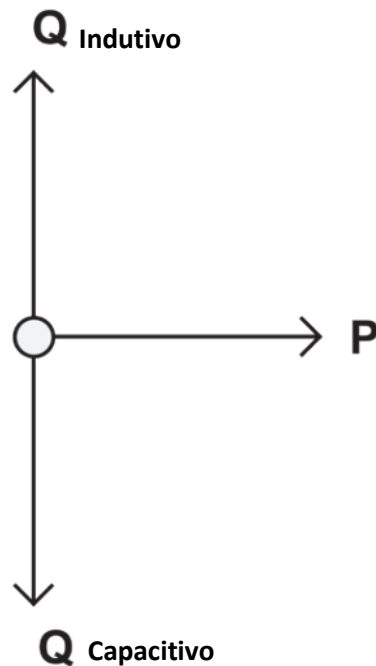
S = potência aparente [VA].

A potência complexa também pode ser calculada por meio da Equação 4 no sistema de coordenadas retangulares, em que P é a componente real e Q a componente imaginária.

$$S = P + jQ \quad [\text{VA}] \quad (4)$$

O operador “j” é utilizado para representar a parte complexa da potência. Pode-se ter uma potência reativa com valor positivo ou negativo, ou seja, ela pode variar de acordo com o tipo de carga, como se observa na Figura 2.

Figura 2: Potência reativa.



Fonte: Adaptado de Moura (2018).

Define-se que as potências reativas são absorvidas pelas cargas indutivas e geradas por cargas capacitivas (MOURA, 2018).

Pode-se definir o fator de potência como a relação entre o valor da potência ativa e o valor da potência aparente. Essa relação pode ser observada por meio da Equação 5:

$$fp = \frac{P}{S} \quad (5)$$

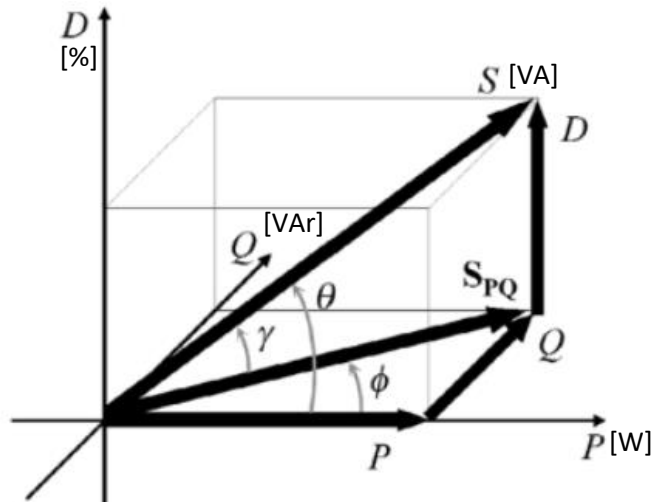
Em que:

fp = fator de potência [adimensional].

O fator de potência também pode ser definido como $\cos \theta$ do triângulo de potência conforme é observado na Figura 1. O fator de potência é adimensional, o ângulo θ é chamado de ângulo do fp . Em cargas puramente resistivas (corrente e tensão estão em fase) o ângulo θ é igual a zero, conseqüentemente, o fp é igual a 1. Pode-se definir um circuito RC (resistor e capacitor em série) se encontrando com um ângulo $-90^\circ < \theta < 0$ e um circuito RL (resistor e indutor em série) se encontrando com um ângulo $0^\circ < \theta < 90$. Para diferenciar os tipos de cargas, também se é referido como fp adiantado (fase da corrente adiantada em relação a tensão) para uma carga RC e fp atrasado (fase da corrente atrasada em relação a tensão) para uma carga RL (JOHNSON, 1993).

Vale ressaltar que a Figura 1 deve ser utilizada para cargas lineares, entretanto, nos casos em que cargas não-lineares estão presentes no sistema de forma significativa, deve-se utilizar o tetraedro das potências para uma melhor análise, como é apresentado na Figura 3.

Figura 3: Tetraedro das potências.



Fonte: Adaptado de Akagi (2017).

Nota-se que, em relação ao triângulo das potências, observa-se que existem quatro componentes novas, sendo elas: a distorção harmônica D , a potência aparente S_{PQ} , o ângulo θ (ângulo entre a potência ativa e a potência S_{PQ}) e o ângulo γ (ângulo entre a potência S_{PQ} e a potência S). O fato de que a maioria das instalações têm em sua composição cargas não-lineares que causam a presença de harmônicas e, conseqüentemente, uma distorção harmônica, possibilita a alteração do valor da potência aparente e o fator de potência. Para calcular os valores das potências e do fator de potência utiliza-se das Equações 6, 7 e 8:

$$S_{PQ}^2 = P^2 + Q^2 \quad [\text{VA}] \quad (6)$$

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad [\text{VA}] \quad (7)$$

$$fp = \cos \theta \quad (8)$$

Em que:

S_{PQ} = potência aparente (não considerando a distorção harmônica) [VA];

D = distorção harmônica [%].

2.2. CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

De acordo com o módulo 8 do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST, 2017), que trata sobre a qualidade do fornecimento de energia elétrica, o valor do fator de potência deve estar compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivo ou capacitivo, sendo válido somente para unidades consumidoras do Grupo A ou o ponto de

conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230 kV. Segundo o Art. 304 da ANEEL, a consequência para as unidades consumidoras que não respeitarem o valor estipulado do fator de potência será uma cobrança relativa ao excedente de energia reativa consumida (tanto no período de ponta quanto no período fora de ponta), esta cobrança é calculada conforme a Equação 9:

$$Custo_{excedente} = kWh_{medido} \times Valor_{tarifa} \times \left(\frac{f_R}{fp_{unidade}} - 1 \right) \quad [R\$] \quad (9)$$

Em que:

$Custo_{excedente}$ = valor cobrado devido ao consumo de energia reativa excedente [R\$];

kWh_{medido} = energia ativa consumida na medição [kWh];

$Valor_{tarifa}$ = valor da tarifa cobrada por kWh [R\$ x kWh];

f_R = fator de potência de referência (0,92) [adimensional];

$fp_{unidade}$ = fator de potência da unidade consumidora [adimensional].

Diante desse fato, as unidades consumidoras devem manter seu fator de potência dentro dos padrões estabelecidos e nos casos em que o fator de potência se encontra fora do padrão, deve-se utilizar métodos para corrigi-lo. Para instalações em que se tem 80% ou mais do total das cargas de origem linear, a correção do fator de potência pode ser feita considerando apenas os valores destas cargas, entretanto, se a instalação possuir 20% ou mais do total das cargas de origem não linear, deve-se analisar os efeitos dos componentes harmônicos para que a correção seja feita (MAMEDE, 2017).

O método de correção do fator de potência mais simples seria a modificação da rotina operacional da unidade consumidora, isso implicaria em impor que motores não funcionem a vazio (procurando mantê-los em plena carga) para não haver uma potência ativa baixa em relação a potência reativa e otimizar o uso da energia. Ações para que essa otimização aconteça podem ser: dimensionamento correto de motores e transformadores (a energia reativa para que motores e transformadores se magnetizem para entrar em funcionamento é a mesma para operarem com cargas pequenas ou cargas condizentes com sua potência, entretanto, assim como citado anteriormente, se a energia reativa for alta e a energia ativa for baixa causará um fator de potência baixo), evitar a utilização de reatores de lâmpadas com baixo fator de potência (reatores consomem potência reativa, portanto, recomenda-se reatores associados a capacitores para um alto fator de potência) e adequar a tensão aplicada em cargas indutivas (a energia reativa é diretamente proporcional ao quadrado da tensão aplicada em seus terminais, assim, uma tensão acima da adequada irá consumir mais energia reativa) (MERLIN, 2022).

Outro método de corrigir o fator de potência seria a instalação de motores síncronos. Pode-se superexcitar os motores síncronos e o resultado disso será uma corrente de excitação maior do que a necessária, portanto, ocorrerá um excedente de energia capacitiva que será injetada na rede (semelhante a função de um banco de capacitores), entretanto, esse método pode possuir um preço mais elevado do que os demais métodos, logo, não é usado com frequência (MAMEDE, 2017).

Por fim, o método de correção do fator de potência mais utilizado é a instalação de capacitores em derivação na rede, para se explicar isso pode-se utilizar da Equação 10:

$$Z = R + j.X \quad [\Omega] \quad (10)$$

Em que:

Z = impedância $[\Omega]$;

R = resistência $[\Omega]$;

X = reatância $[\Omega]$.

Sabendo-se que a impedância complexa X pode ser definida por meio das Equações 11, 12 e 13, tem-se:

$$X = X_L - X_C \quad [\Omega] \quad (11)$$

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad [\Omega] \quad (12)$$

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad [\Omega] \quad (13)$$

Em que:

X_L = reatância indutiva $[\Omega]$;

X_C = reatância capacitiva $[\Omega]$;

f = frequência da rede [Hz];

L = indutância [H];

C = capacitância [F].

É notável que cargas indutivas aumentam a parte complexa da impedância e cargas capacitivas diminuem a parte complexa da impedância, conseqüentemente, com mais cargas indutivas a potência reativa será maior e com mais cargas capacitivas a potência complexa será menor, logo, analisando a Figura 1 pode-se perceber que ao diminuir a potência reativa Q e manter a potência ativa P (algo sempre desejável em unidades consumidoras) a potência complexa S irá diminuir, portanto, considerando a Equação 5, tem-se um valor maior do fator de potência (será mais próximo de 1). Para esse método de correção do fator de potência, pode-se utilizar bancos de capacitores de duas maneiras, sendo a primeira utilizando capacitores

fixos, ou seja, utilizando um valor fixo de capacitância que será instalado na rede (utilizado em unidades que não têm uma variação de carga ao longo do dia). O valor do banco fixo de capacitores pode ser calculado pelo método analítico e pelo método tabular (MAMEDE, 2017). Considerando que a potência ativa deve ser mantida, o valor do banco de capacitores pelo método analítico é calculado pelas Equações 14 e 15:

$$Q_c = P \cdot (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad [\text{VAr}] \quad (14)$$

$$C = \frac{Q_c}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot V^2} \quad [\text{F}] \quad (15)$$

Em que:

Q_c = potência reativa desejada (após a correção) [VAr];

$\tan \theta_1$ = tangente do ângulo antes da correção [adimensional];

$\tan \theta_2$ = tangente do ângulo após a correção [adimensional];

V = tensão de entrada da unidade consumidora [V].

O método do cálculo do banco de capacitores por tabela é realizado considerando o fator de potência atual da unidade consumidora e o fator de potência desejado após a correção, assim, com esses dois valores já conhecidos, utiliza-se a tabela de fatores para correção do fator de potência (disposta no Anexo 1) como o valor “ Δtg ” (MAMEDE, 2017). A Equação 16 demonstra o cálculo utilizado neste método:

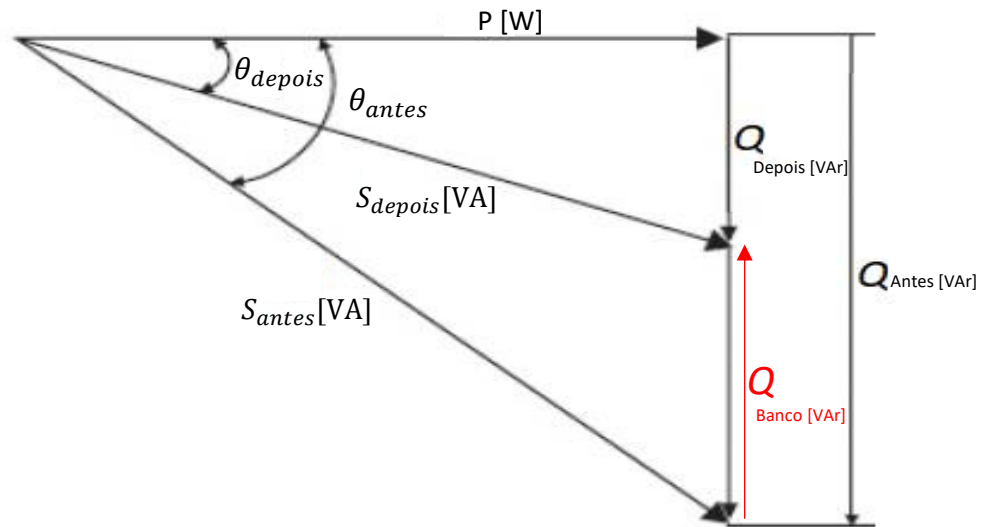
$$Q_c = P \cdot \Delta tg \quad [\text{VAr}] \quad (16)$$

Em que:

Δtg = valor da diferença entre as tangentes do ângulo original e o ângulo após a correção do fator de potência [adimensional].

A Figura 4 demonstra um triângulo de potências após uma correção do fator de potência, em que é possível verificar como se comporta a potência reativa, a potência aparente e o ângulo após a instalação de um banco de capacitores. Nota-se que a potência reativa foi diminuída, conseqüentemente, a potência aparente também foi diminuída o que resultou em um ângulo θ menor com relação ao ângulo antes da correção.

Figura 4: Exemplo de um triângulo de potências após a correção do fator de potência.



Fonte: Adaptado de MAMEDE (2017).

A segunda maneira de se utilizar um banco de capacitores para se corrigir o fator de potência é utilizando um banco de forma automática. Este método é recomendado para unidades consumidoras que tenham um consumo variável ao longo do dia ou possuam equipamentos que variam suas potências absorvidas e alteram o valor do fator de potência. Dentro deste método pode-se existir a compensação semiautomática, este é o método mais simples de implementação, se dá pela instalação de banco de capacitores que são ativados por *timers* (temporizadores) que são programados para atuar em determinada hora conectando ou desconectando o banco de capacitores da rede e são geralmente ativados por contadores (em casos que necessitam uma lógica mais complexa para a atuação dos bancos, podem ser utilizados CLP's (Controladores Lógicos Programáveis)).

Para correções do fator de potência em sistemas completamente automáticos utiliza-se um dispositivo chamado Controlador Digital Microprocessado, este dispositivo recebe entradas de dados como tensão e corrente (são utilizados TC's (Transformadores de Corrente) e TP's (transformadores de potencial)) e calcula-se a variação de energia ativa e reativa da unidade, a qual é computada para utilizar o banco de capacitores de forma segmentada, ou seja, este sistema pode fornecer quantidades variáveis de energia reativa para corrigir o fator de potência (TAMIETTI, 2007). Além disso, existem alguns tipos de ligações que os bancos de capacitores podem ser conectados nas instalações, seja da forma estrela isolada (sem aterramento do centro), estrela aterrada e triângulo.

Dentre os tipos de conexões existentes, cada uma tem sua vantagem e desvantagem, é interessante ressaltar a forma de se calcular a transformação de uma ligação triângulo para uma ligação estrela, a Equação 17 demonstra esta transformação (esta transformação vale para os outros dois capacitores da ligação, apenas mudando o valor do denominador de acordo com o capacitor de referência):

$$C_{1Y} = \frac{C_{1\Delta} \times C_{2\Delta} + C_{2\Delta} \times C_{3\Delta} + C_{1\Delta} \times C_{3\Delta}}{C_{1\Delta}} \quad [F] \quad (17)$$

Em um banco em que todos os capacitores possuem o mesmo valor, pode-se afirmar que a capacitância da ligação triângulo é três vezes menor, o que ocasiona uma reatância capacitiva três vezes maior, visto que são inversamente proporcionais (SANTANA, 2022).

Os valores dos segmentos dos bancos de capacitores são limitados a 25 kVAr em unidades com tensões 380/440 V e 15 kVAr para unidades com tensões 220 V, tais limites têm relação com a corrente de surto (correntes que podem chegar a 100 vezes a corrente nominal), estas correntes ocorrem durante a energização e podem afetar todo o sistema e provocar: atuação do fusível, queima do contato dos contadores, queima dos resistores de pré-carga e perda do capacitor, além disso, recomenda-se dimensionar um capacitor com valor igual a metade da potência máxima a ser manobrada para se ter um melhor ajuste fino da correção (TAMIETTI, 2007).

2.3. DISTORÇÕES HARMÔNICAS DE TENSÃO

Outro fator importante a se considerar durante a correção do fator de potência são as distorções harmônicas, as quais são causadas pela presença de cargas como: inversores de frequências, *soft-starters*, fornos a arco e outras cargas não-lineares. Estas cargas são responsáveis por distorcer a forma de onda senoidal fornecida pela rede, podendo apresentar deformação da forma de onda e piorar a qualidade da energia elétrica, além de reduzir a vida útil de equipamentos elétricos (GUIMARÃES, 2021). Deste modo, é importante calcular o valor da Distorção Harmônica Total (DHT), que pode ser calculado pela Equação 18:

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad [\%] \quad (18)$$

Em que:

V_n = tensão da n ésima harmônica [V];

V_1 = tensão fundamental [V].

O valor da DHT de tensão se torna importante quando a mesma passa a ser superior a 5% (os equipamentos não são prejudicados com distorções até este valor) (PAZINATTO,

2021). Além disso, segundo o PRODIST, as faixas aceitáveis de distorção harmônica podem ser vistas na Tabela 1:

Tabela 1: Faixas de distorção harmônica.

Tensão nominal do barramento [kV]	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
$VN \leq 1$	10
$1 < VN \leq 69$	8
$69 < VN < 230$	5

Fonte: PRODIST (2017).

Outro ponto que se deve dar atenção é a ressonância do sistema, isso porque as harmônicas podem ocasionar a condição de ressonância harmônica. Esta condição pode se dar por meio de uma ressonância série ou uma ressonância paralela. A ressonância pode ser definida como o ponto em que o valor da impedância capacitiva e a impedância indutiva se anulam, ou seja, a parte imaginária é zerada e somente resta a parte real da impedância (ALEXANDER, 2013). É possível de se observar por meio das Equações 19 e 20:

$$X_L - X_C = 0 \quad [\Omega] \quad (19)$$

$$2\pi f_0 L = \frac{1}{2\pi f_0 C} \quad [\Omega] \quad (20)$$

Em que:

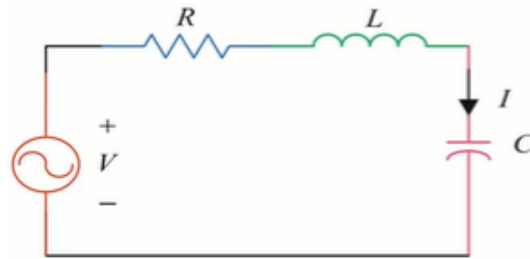
X_L : reatância indutiva [Ω];

X_C : reatância capacitiva [Ω];

f_0 : frequência de ressonância [Hz].

A ressonância harmônica pode ocasionar situações que comprometem a integridade do sistema, por exemplo: correntes maiores passando pelos indutores e capacitores, tensões maiores atuando nos indutores e capacitores e diminuição da vida útil de componentes. Para o caso da ressonância série, o circuito que representa esta condição pode ser visto na Figura 5 (EMANUELLI, 2018).

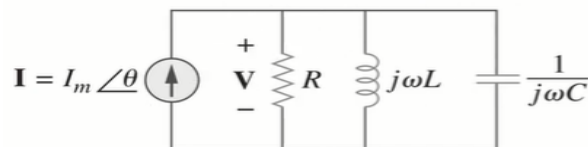
Figura 5: Circuito de ressonância série.



Fonte: Emanuelli (2018).

Neste caso, como o valor da impedância capacitiva e indutiva se anulam, o circuito enxerga a carga sendo puramente resistiva, assim, como a resistência acaba sendo bem mais baixa do que em uma situação normal, a corrente que passa pela impedância indutiva e impedância capacitiva é bem mais alta do que o normal, fazendo com que os componentes sejam danificados e perdendo sua vida útil (EMANUELLI, 2018). O segundo caso em que se pode ocorrer a ressonância harmônica é a paralela, neste caso, o circuito que representa esta condição é representado pela Figura 6.

Figura 6: Circuito de ressonância paralela.



Fonte: Emanuelli (2018).

Desta forma, como os valores da admitância indutiva e capacitiva se anulam, a fonte de corrente entende como um circuito aberto, ou seja, a corrente passará totalmente pela parte puramente resistiva, assim, a tensão sobre os terminais dos componentes capacitivos e indutivos será muito alta (visto que a tensão será a mesma para os três que estão em paralelo), logo, causará danos nos componentes por estar sendo exposto a tensões mais altas do que o normal (LOPES, 2021).

O cálculo da ordem harmônica da frequência de ressonância é dado pela Equação 21 (TEIXEIRA, 2009):

$$H_r = \sqrt{\frac{MV_{Asc}}{MV_{Ar_{cap}}}} \quad (21)$$

Em que:

H_r = ordem da harmônica ressonante [adimensional];

MVA_{sc} = potência de curto-circuito no ponto em que o banco está ligado [VA];

$MVA_{r_{cap}}$ = potência reativa do banco de capacitores [VAr].

Deve-se analisar a presença de harmônicas na instalação, pois as mesmas podem causar o efeito de ressonância. Caso o valor da frequência de ressonância seja próximo ao valor de alguma harmônica presente na instalação, a condição de ressonância pode ocorrer. Nos casos em que essa possibilidade de ressonância existe, recomenda-se instalar um indutor de dessintonia (este indutor é responsável por alterar a frequência de ressonância para valores que não apresentem risco de serem alcançados pelas harmônicas presentes no sistema) (HAFNER, 2020).

Portanto, pode-se concluir que existem vários métodos de correção do fator de potência e que se faz necessário um estudo de viabilidade para cada caso, seja financeira ou técnica. Isso porque cada unidade consumidora possui seu modo de operação, podendo variar drasticamente seu horário de funcionamento e sazonalidade. Além disso, devido as mais variadas cargas presentes nas unidades consumidoras que podem causar as distorções harmônicas, se faz necessário um estudo da carga da unidade consumidora em que se pretende fazer a correção do fator de potência. A necessidade deste estudo é devido a possibilidade de distorções harmônicas causarem ressonância, fazendo com que correntes e tensões altas sejam aplicadas as cargas, causando assim, danos ao sistema.

3. METODOLOGIA DA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Para este projeto, realizou-se as seguintes etapas de implementação: a análise de viabilidade financeira, análise da instalação elétrica, a definição dos valores do banco a ser implementado e a instalação do banco de capacitores. Para a análise financeira, fez-se um levantamento do histórico de gastos por consumo de energia reativa excedente para se ter uma estimativa de viabilidade. Para a análise da instalação elétrica, fez-se a necessidade da utilização de um equipamento de análise de energia elétrica e de dados fornecidos pela concessionária da unidade consumidora e da verificação do banco anteriormente instalado na unidade. As definições dos valores do banco foram baseadas nas leituras do equipamento de medição juntamente com as definições dos componentes para o quadro de comando. Por fim, fez-se a instalação em duas partes, primeiramente retirando-se o banco antigo e posteriormente iniciou-se a instalação do novo banco.

3.1. ANÁLISE DO CONSUMO

Primeiramente identificou-se que a unidade estava sendo cobrada por excedente de energia reativa através da conta de energia da concessionária, as Figuras 7 e 8 demonstram isso:

Figura 7: Conta de energia da unidade consumidora (outubro).

ATENDIMENTO CPFL		PN	SEU CÓDIGO		CONTA MÊS		VENCIMENTO	TOTAL A PAGAR					
0800 770 4140					OUT/2021		10/11/2021	19.243,74					
www.cpfempresas.com.br													
DISCRIMINAÇÃO DA OPERAÇÃO - RESERVADO AO FISCO													
Cod.	Descrição da Operação	Mês	Quant.	Quant.	Unid.	Tarifa com	Valor Total	Base Cálculo	Aliq.	ICMS	Base Cálculo	PIS	COFINS
115	Nº 909952217279	Ref.	Registrada	Faturada	Med.	Tributos R\$	Operação R\$	ICMS R\$	ICMS%	ICMS	PIS/COFINS	0,88%	4,06%
0805	Consumo Ponta [KWh] - TUSD	OUT/21	1.347,145	1.347,145	kWh	1,15082621	1.550,33	1.550,33	18,00	279,06	1.271,27	11,19	51,81
0805	Consumo Fora Ponta [KWh]-TUSD	OUT/21	19.909,608	19.909,608	kWh	0,11536943	2.296,96	2.296,96	18,00	413,45	1.883,51	16,57	76,47
0801	Cons Ponta - TE	OUT/21	1.347,145	1.347,145	kWh	0,58205308	784,11	784,11	18,00	141,14	642,97	5,66	26,10
0801	Cons FPonta TE	OUT/21	19.909,608	19.909,608	kWh	0,36122208	7.191,79	7.191,79	18,00	1.294,52	5.897,27	51,90	239,43
0801	Adicional Band Vermelha Ponta	OUT/21					245,40	245,40	18,00	44,17	201,23	1,77	8,17
0801	Adicional Band Vermelha FPonta	OUT/21					3.626,93	3.626,93	18,00	652,85	2.974,08	26,17	120,75
0801	Consumo Reativo Exc Ponta	OUT/21	56,776	56,776	KVr	0,37973126	21,56	21,56	18,00	3,88	17,68	0,16	0,72
0801	Consumo Reativo Exc Fora Ponta	OUT/21	2.047,978	2.047,978	KVr	0,37962311	777,46	777,46	18,00	139,94	637,52	5,81	25,88
0802	Demanda [kW] - TUSD	OUT/21	140,908	140,908	KW	17,20339681	2.424,11	2.424,11	18,00	436,34	1.987,77	17,49	80,70
0802	Demanda Ultrap [kW] - TUSD	OUT/21		8,908	KW	34,40630712	306,51	306,51	18,00	55,17	251,34	2,21	10,20
	Subtotal						19.225,16						
	Total Distribuidora						19.225,16						
0807	Contrib. Custeio IP-CIP Municipal	OUT/21					18,58						
	Total Devoluções/Ajustes						18,58						
	Total a Pagar						19.243,74						

Fonte: CPFL Energia (2021).

Figura 8: Destaque da conta de energia da unidade consumidora (outubro).

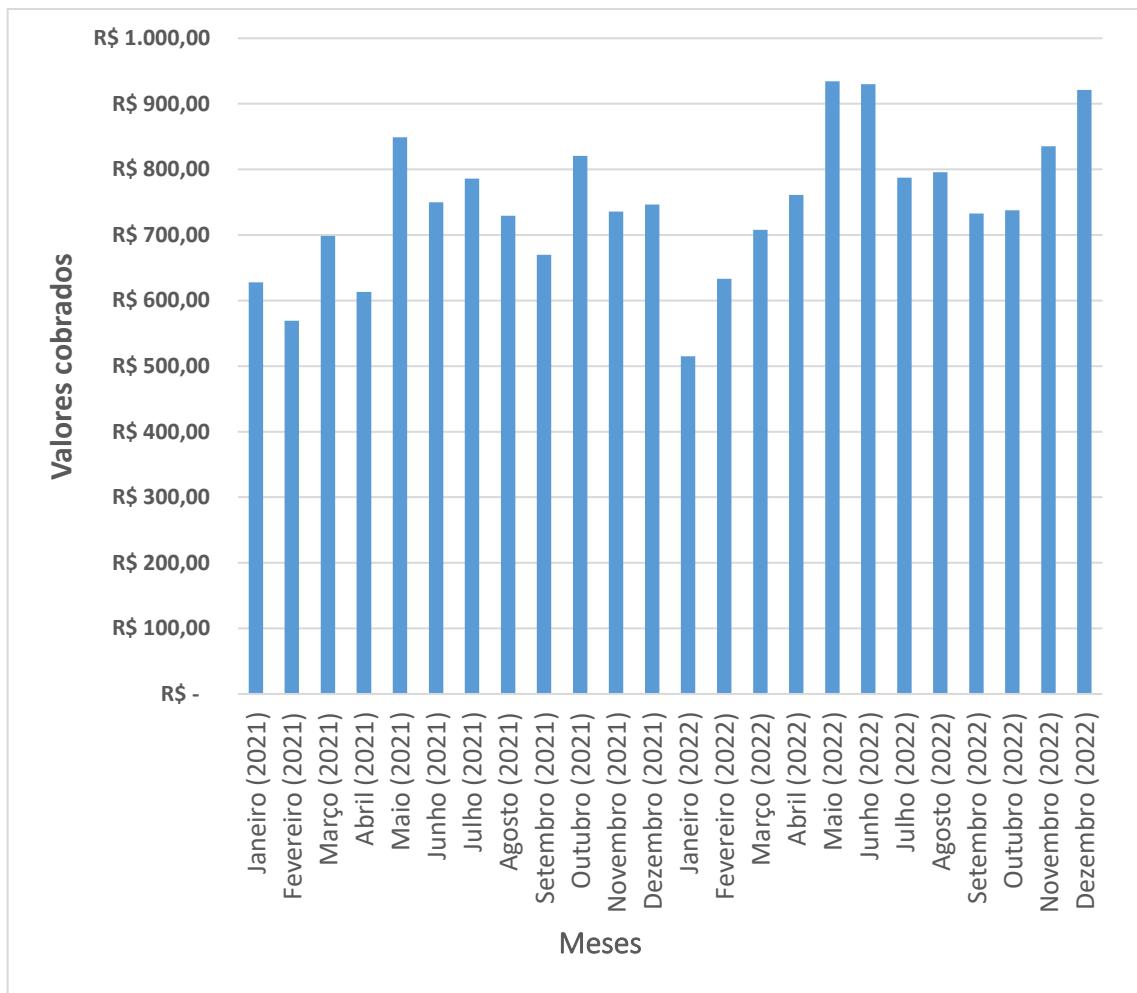
0801	Consumo Reativo Exc Ponta	OUT/21	56,776	56,776	KVr	0,37973126	21,58	21,58
0801	Consumo Reativo Exc Fora Ponta	OUT/21	2.047,978	2.047,978	KVr	0,37962311	777,46	777,46

Fonte: CPFL Energia (2021).

Percebe-se que a unidade estava sendo cobrada por excedente de energia reativa principalmente durante o horário fora de ponta, já que é possível observar que a parcela cobrada nesse período é significativamente maior.

Para se ter uma estimativa do valor gasto devido ao excedente de energia reativa, fez-se um levantamento utilizando as contas de energia do período de janeiro de 2021 e dezembro de 2022. A Figura 9 mostra os valores cobrados durante esse período.

Figura 9: Gráfico dos valores cobrados pelos excedentes de energia reativa.



Fonte: Próprio autor.

A partir do levantamento, constatou-se que o gasto durante o período estudado foi de R\$17.887,06. A média gasta por mês é de R\$745,29. Após este levantamento, fez-se um orçamento pela empresa responsável pela implementação deste projeto, chegando a um

valor de R\$21.280,00 e com este valor, realizou-se o cálculo de tempo de retorno financeiro, como se observa na Equação 22:

$$\text{Prazo de retorno do investimento} = \frac{\text{R\$21.280,00}}{\text{R\$754,50}} \cong 28,2 \quad [\text{meses}] \quad (22)$$

Portanto, caso o banco de capacitores eliminasse a cobrança por consumo de excedente de energia reativa, em aproximadamente 28,2 meses o valor investido no projeto seria recuperado. A Tabela 2 detalha os valores gastos devido ao excedente consumido.

Tabela 2: Gastos e média da taxa por excedente de reativo.

Mês	Valor cobrado por excedente de energia reativa (R\$)	Potências reativas excedentes (kVAr)
Janeiro (2021)	613,09	1.689,00
Fevereiro (2021)	560,87	1.523,65
Março (2021)	679,75	1.865,89
Abril (2021)	608,56	1.665,94
Mai (2021)	829,99	2.119,86
Junho (2021)	744,91	1.942,86
Julho (2021)	777,63	2.035,28
Agosto (2021)	725,48	1.882,63
Setembro (2021)	667,33	1.762,30
Outubro (2021)	799,02	2.104,75
Novembro (2021)	718,45	1.871,45
Dezembro (2021)	739,48	1.419,37
Janeiro (2022)	512,21	1.729,71
Fevereiro (2022)	624,21	1.846,65
Março (2022)	695,62	1.919,78
Abril (2022)	745,14	2.400,16
Mai (2022)	928,24	2.338,80
Junho (2022)	917,46	2.037,82
Julho (2022)	782,97	2.109,00
Agosto (2022)	794,03	1.916,76
Setembro (2022)	727,66	1.917,66
Outubro (2022)	728,83	2.185,66
Novembro (2022)	825,13	2.393,30
Dezembro (2022)	903,61	1.419,37
TOTAL GASTO	17.649,67	46.665,18
Média de gasto por mês	735,40	1.944,38

3.2. ANÁLISE DO ANTIGO BANCO DE CAPACITORES

Primeiramente, um dos prestadores de serviços relacionados com a parte elétrica da base de operações foi chamado para verificar a situação banco de capacitores que já estavam instalados. Durante a visita, notou-se que as duas células capacitivas instaladas (ambas de 12,5 kVAr) estavam queimadas. As Figuras 10, 11 e 12 apresentam as células instaladas com suas chaves de ligação e a verificação das mesmas.

Figura 10: Banco de capacitores instalado na base de operações.



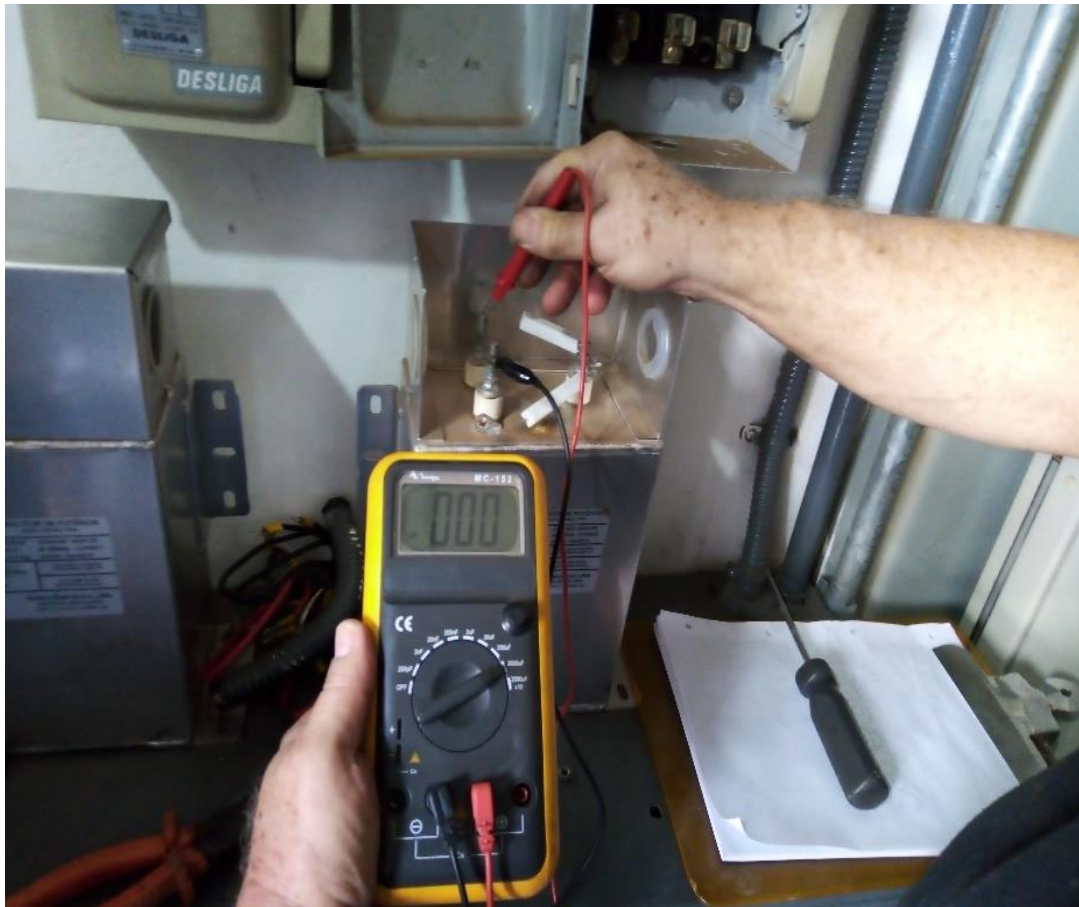
Fonte: Próprio autor.

Figura 11: Conjunto chave de ligação e banco de capacitores.



Fonte: Próprio autor.

Figura 12: Verificação do banco de capacitores antigo.



Fonte: Próprio autor.

Considerando que a instalação não estava com um banco de capacitores atuando em sua instalação, fez-se um primeiro levantamento de qual seria o fator de potência da base de operações, para isto, utilizou-se da Equação 9 (tendo como incógnita “ $f_{p_{unidade}}$ ”) e os resultados podem ser observados na Tabela 3. Para um estudo mais aprofundado do funcionamento e do consumo da base, foram solicitados estudos de memórias de massa, que consistem em documentos contendo dados de consumo, tais como energia ativa consumida, energia reativa consumida ou gerada, demanda ativa e reativa da base dos meses de janeiro/2022, março/2022, abril/2022 e dezembro/2022. A partir desses dados, observou-se o comportamento do consumo no mês de janeiro nas Figuras 13, 14, 15 e 16, em que representam, respectivamente, a energia ativa consumida, energia reativa indutiva consumida, energia reativa excedente e energia reativa capacitiva consumida.

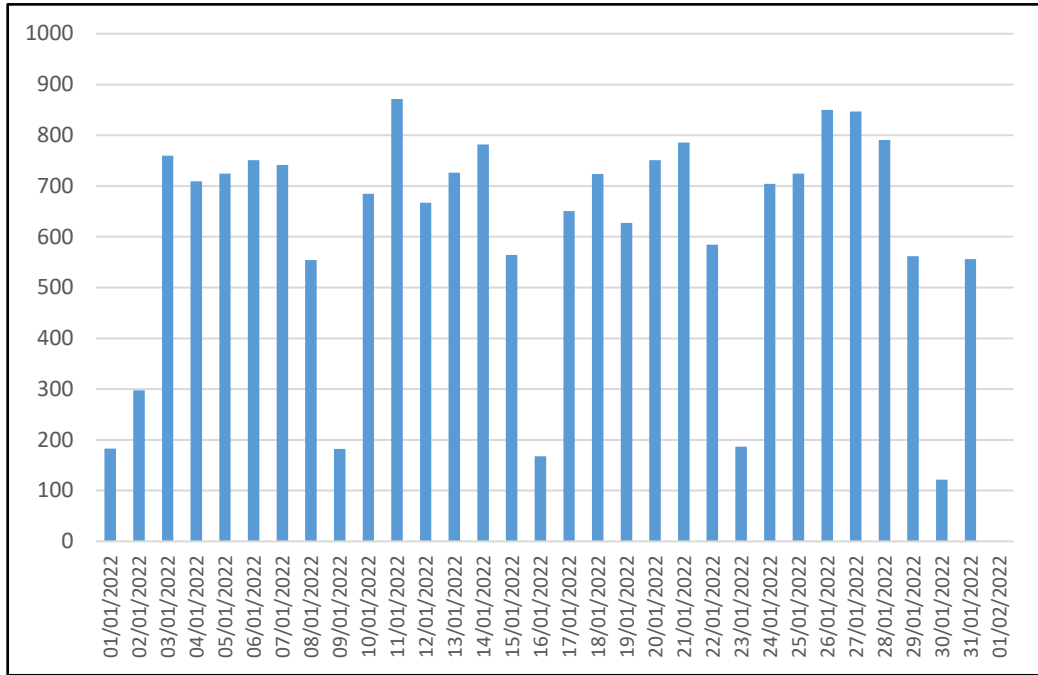
Tabela 3: Cálculo do fator de potência da base de operações.

Mês	Valor cobrado pelo reativo (R\$)	Valor da tarifa (R\$/kWh)	Energia ativa consumida (kWh)	<i>fp</i> referência	<i>fp</i> da unidade
Janeiro/21	613,09	0,1064125	20.947,54	0,92	0,72
Fevereiro /21	560,87	0,10791614	19.053,68	0,92	0,72
Março/21	679,75	0,10679855	20.690,82	0,92	0,70
Abril/21	608,56	0,10830819	18.417,17	0,92	0,70
Mai/21	829,99	0,11898596	18.080,03	0,92	0,66
Junho/21	744,91	0,11651878	16.700,66	0,92	0,67
Julho/21	777,63	0,11611302	16.819,73	0,92	0,66
Agosto/21	725,48	0,11711178	18.378,34	0,92	0,69
Setembro/21	667,33	0,11507955	18774,318	0,92	0,70
Outubro/21	799,02	0,11536943	19.909,61	0,92	0,68
Novembro/21	718,45	0,11667118	20.232,42	0,92	0,71
Dezembro/21	739,48	0,11310923	21.433,97	0,92	0,70
Janeiro*/22	512,21	0,10967096	18.665,74	0,92	0,74
Fevereiro/22	624,21	0,10967077	19.000,69	0,92	0,71
Março/22	695,62	0,11447847	21.756,76	0,92	0,72
Abril/22	745,14	0,13946851	20.340,94	0,92	0,73
Mai/22	928,24	0,14533062	20.140,77	0,92	0,70
Junho/22	917,46	0,12087807	19.143,51	0,92	0,66
Julho/22	782,97	0,11836103	18.999,24	0,92	0,68
Agosto/22	794,03	0,11596257	19.926,86	0,92	0,68
Setembro/22	727,66	0,11692598	19.745,31	0,92	0,70
Outubro/22	728,83	0,11706098	20.753,54	0,92	0,71
Novembro/22	825,13	0,11627757	20.763,68	0,92	0,69
Dezembro/22	903,61	0,11629021	24.247,61	0,92	0,70

* No mês de janeiro houve um bônus de redução de consumo (devido à redução de 10% de consumo em relação ao período de setembro a dezembro do ano de 2021).

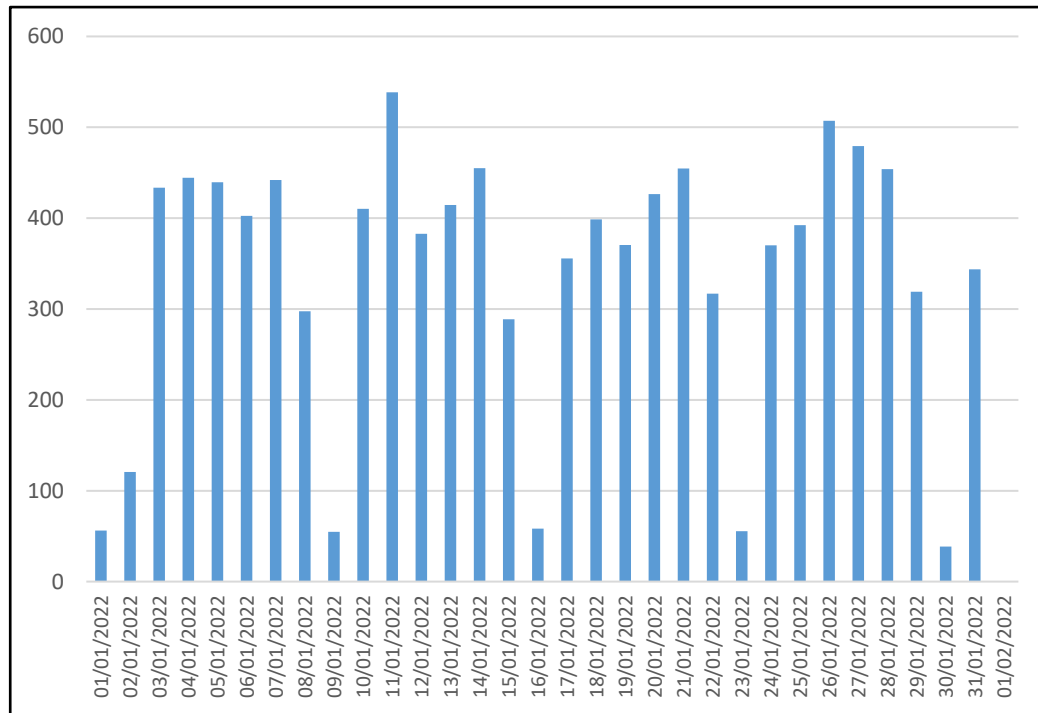
Fonte: Próprio autor.

Figura 13: Energia ativa consumida (janeiro).



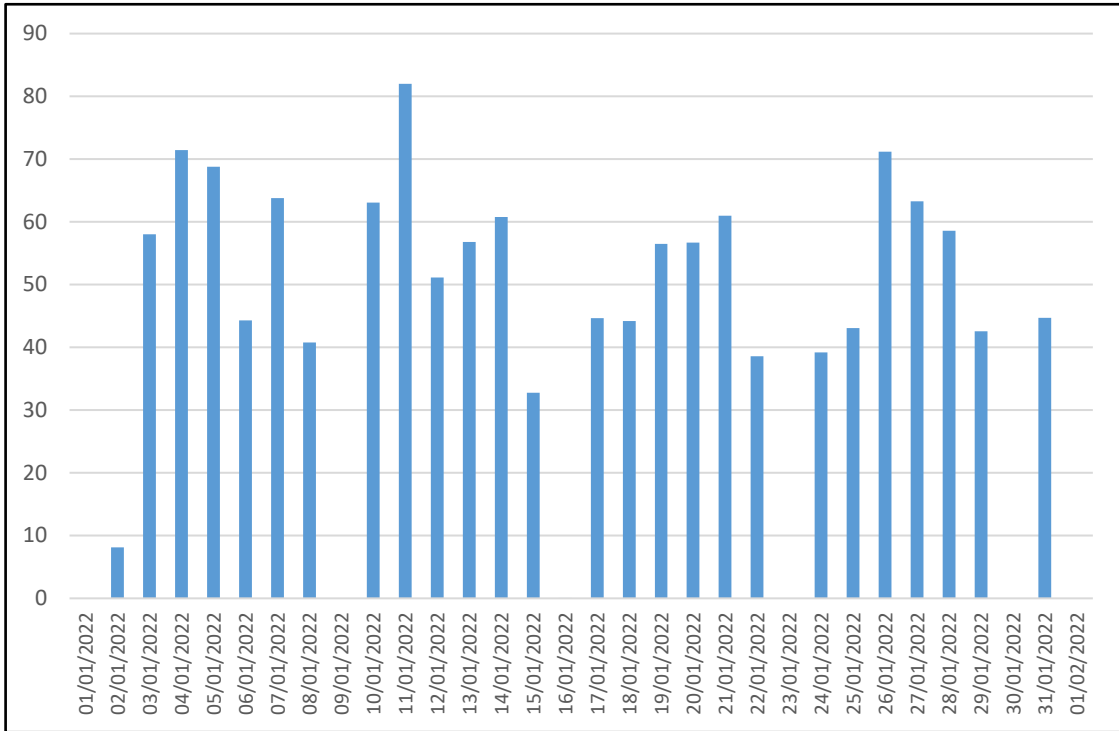
Fonte: CPFL Energia (2022).

Figura 14: Energia reativa indutiva consumida (janeiro).



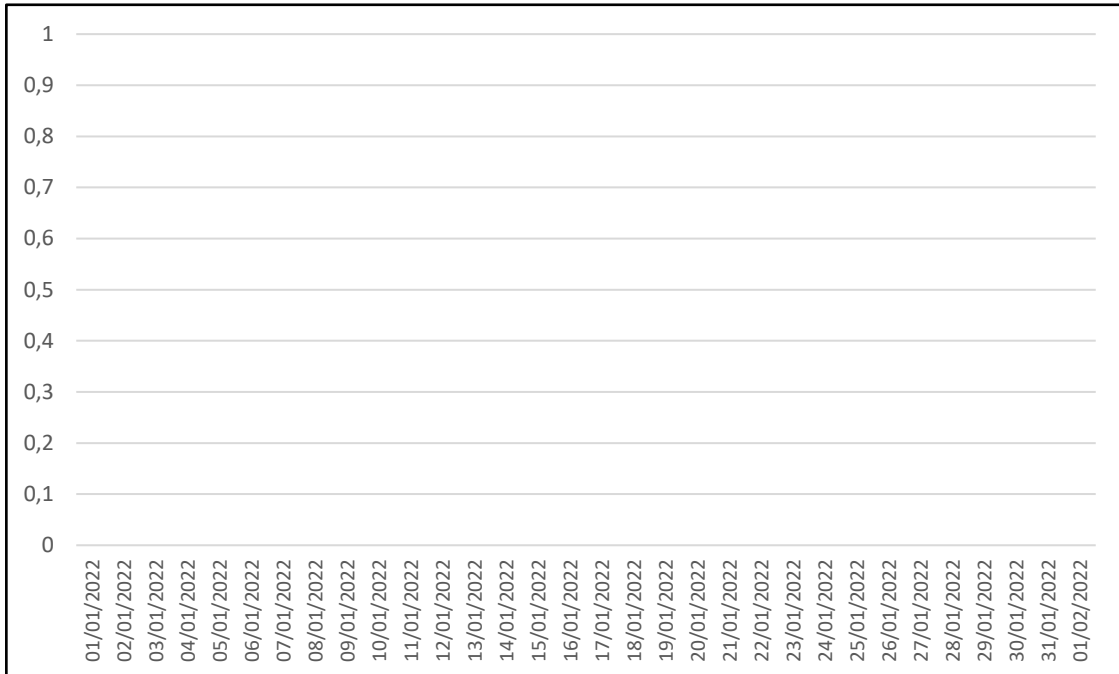
Fonte: CPFL Energia (2022).

Figura 15: Energia reativa excedente (janeiro).



Fonte: CPFL Energia (2022).

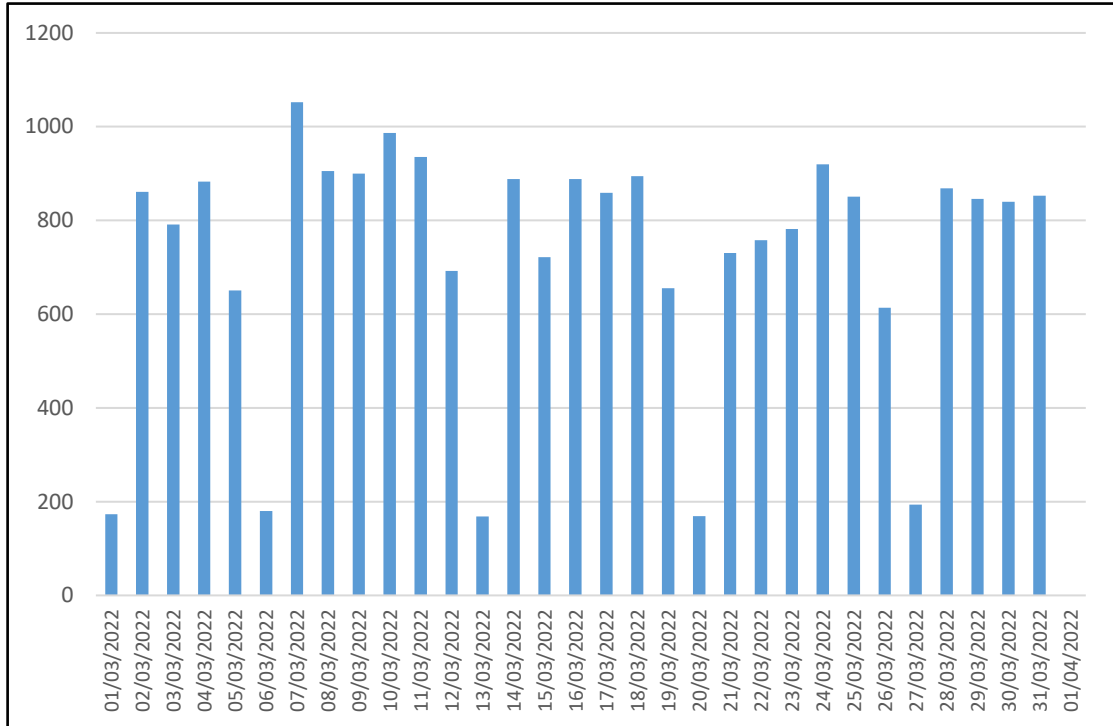
Figura 16: Energia reativa capacitiva consumida (janeiro).



Fonte: CPFL Energia (2022).

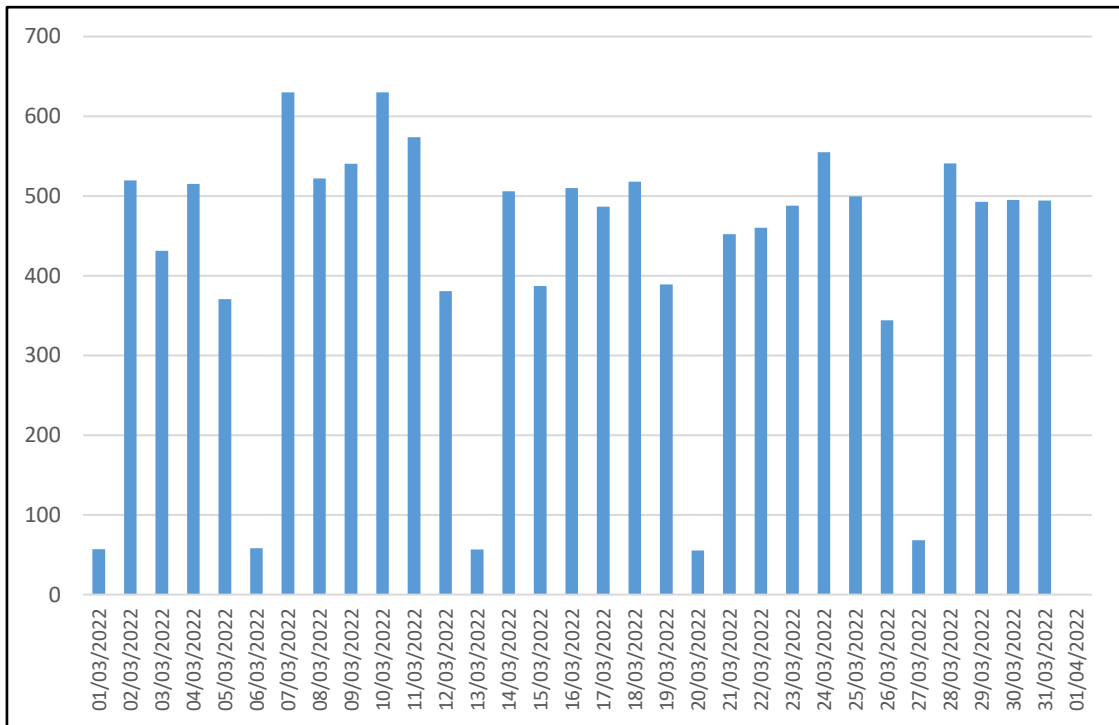
As Figuras 17, 18, 19 e 20, representam, respectivamente, a energia ativa consumida, energia reativa indutiva consumida, energia reativa excedente e energia reativa capacitiva consumida no mês de março de 2022.

Figura 17: Energia ativa consumida (março).



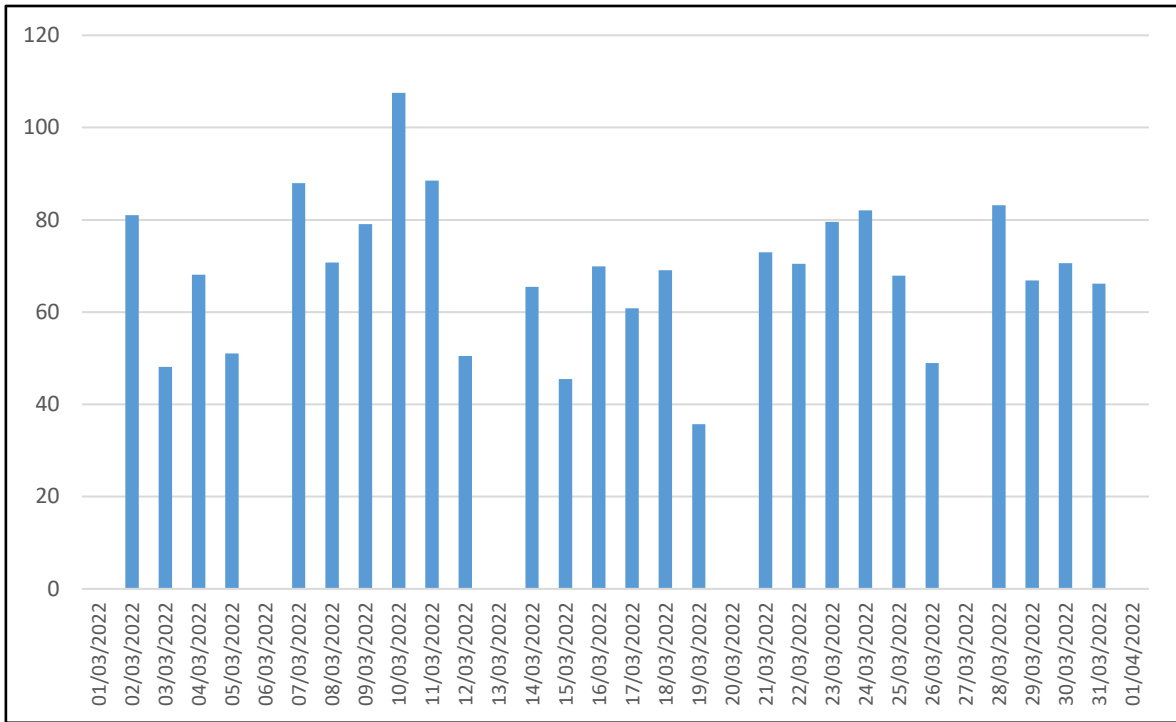
Fonte: CPFL Energia (2022).

Figura 18: Energia reativa indutiva consumida (março).



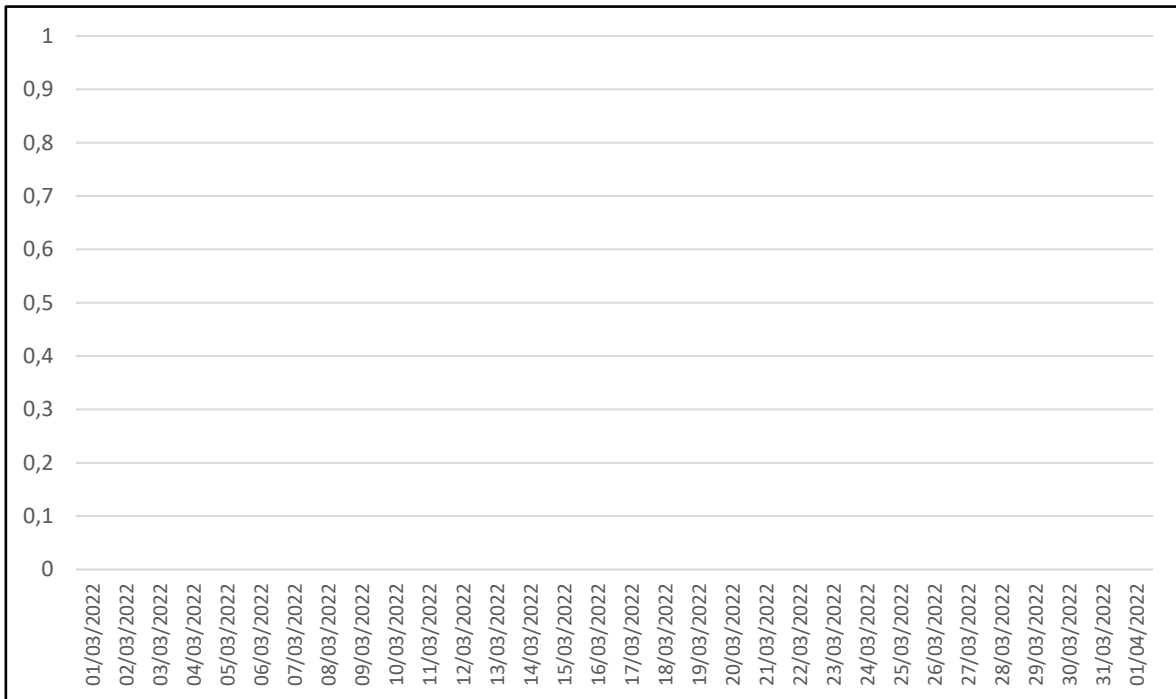
Fonte: CPFL Energia (2022).

Figura 19: Energia reativa excedente (março).



Fonte: CPFL Energia (2022).

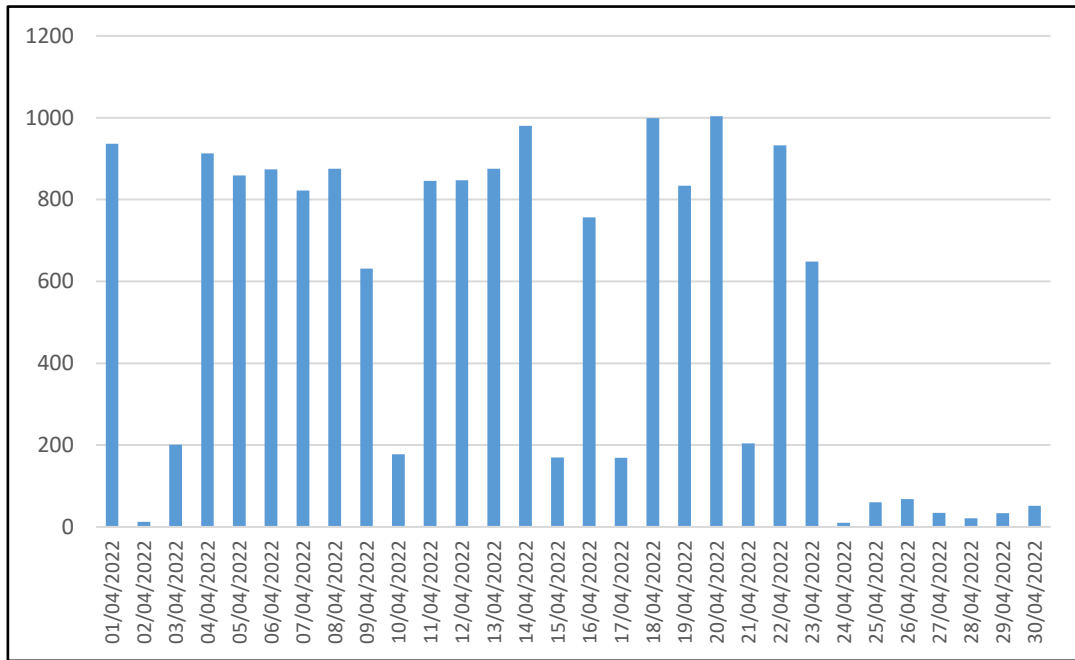
Figura 20: Energia reativa capacitiva consumida (março).



Fonte: CPFL Energia (2022).

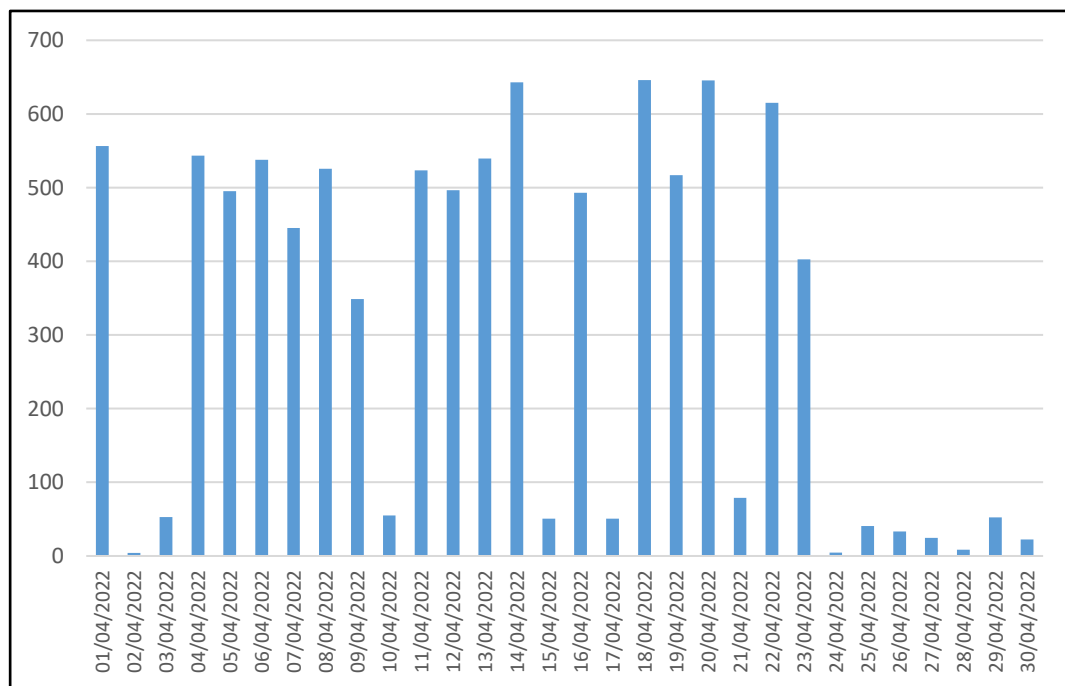
As Figuras 21, 22, 23 e 24 representam, respectivamente, a energia ativa consumida, energia reativa indutiva consumida, energia reativa excedente e energia reativa capacitiva consumida no mês de abril de 2022.

Figura 21: Energia ativa consumida (abril).



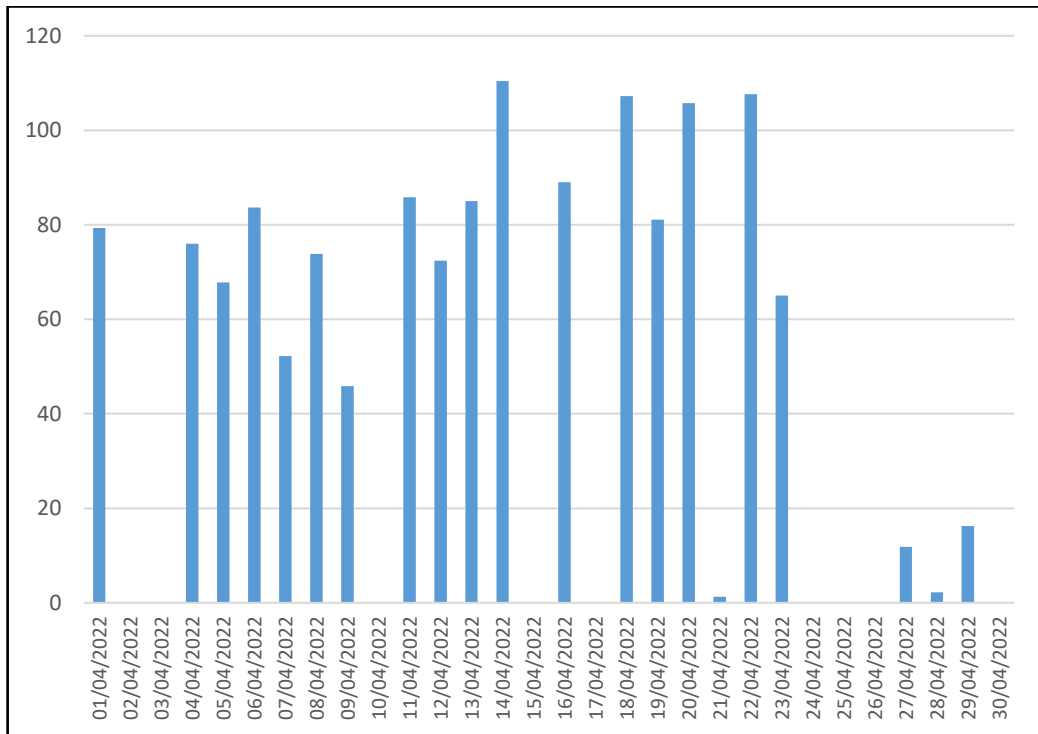
Fonte: CPFL Energia (2022).

Figura 22: Energia reativa indutiva consumida (abril).



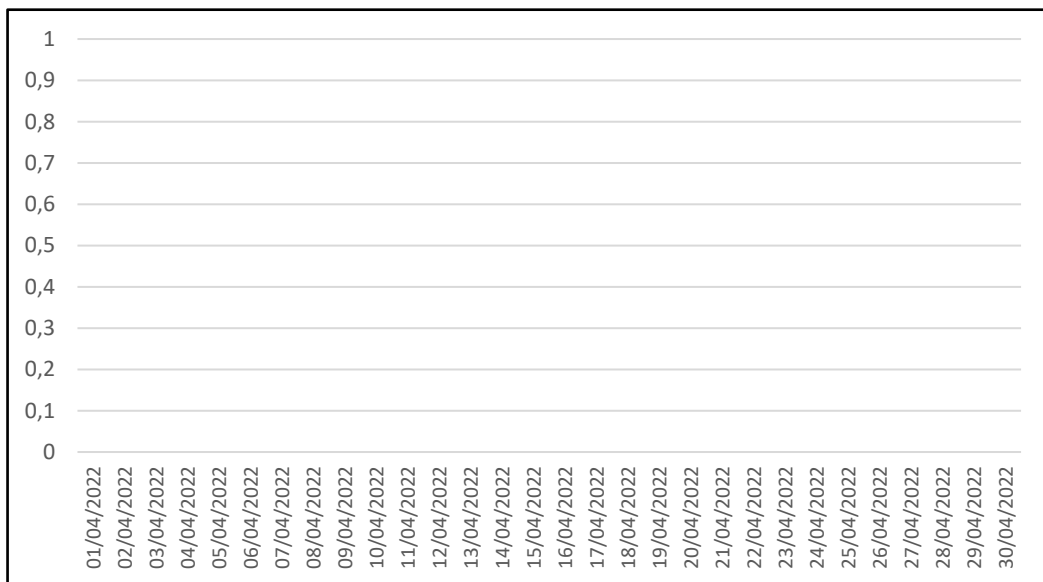
Fonte: CPFL Energia (2022).

Figura 23: Energia reativa excedente (abril).



Fonte: CPFL Energia (2022).

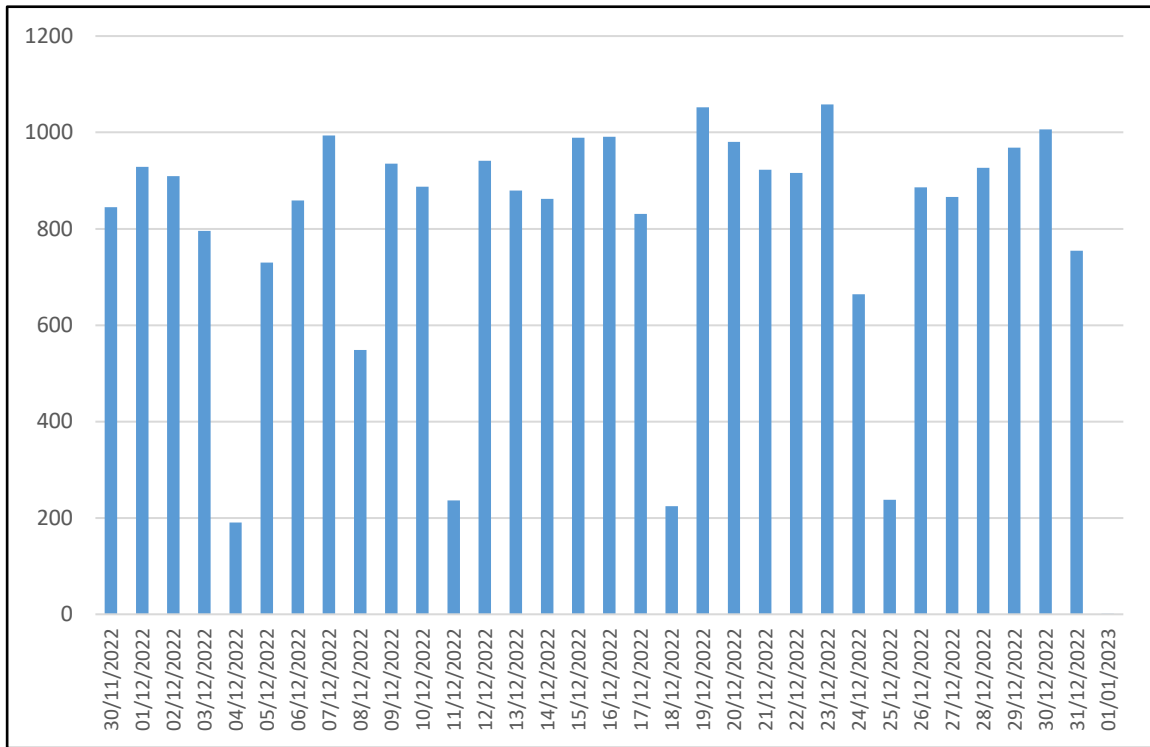
Figura 24: Energia reativa capacitiva consumida (abril).



Fonte: CPFL Energia (2022).

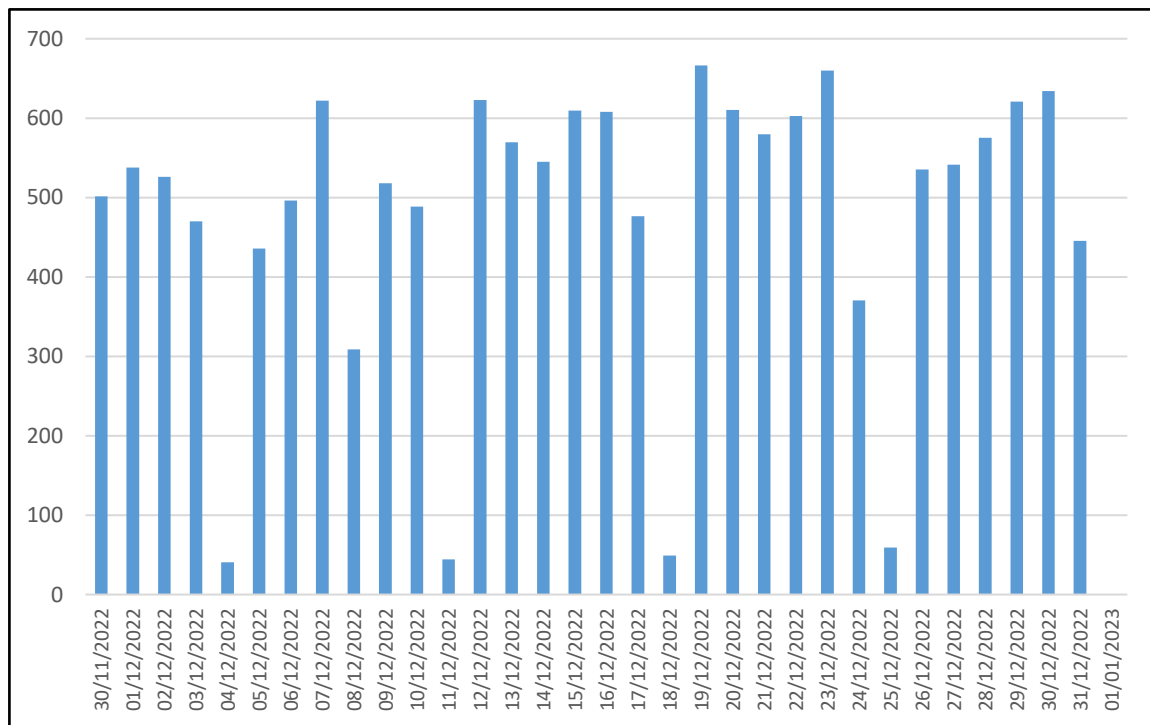
Por fim, as Figuras 25, 26, 27 e 28, representam, respectivamente, a energia ativa consumida, energia reativa indutiva consumida, energia reativa excedente e energia reativa capacitiva consumida no mês de dezembro de 2022.

Figura 25: Energia ativa consumida (dezembro).



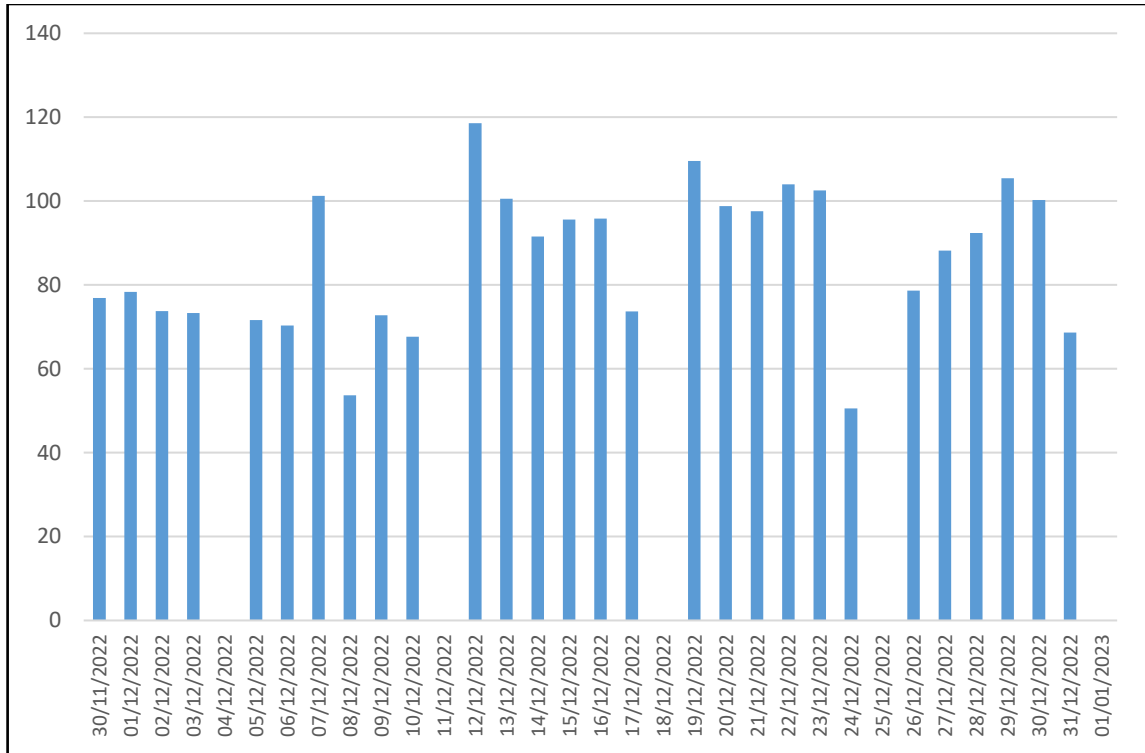
Fonte: CPFL Energia (2023).

Figura 26: Energia reativa indutiva consumida (dezembro).



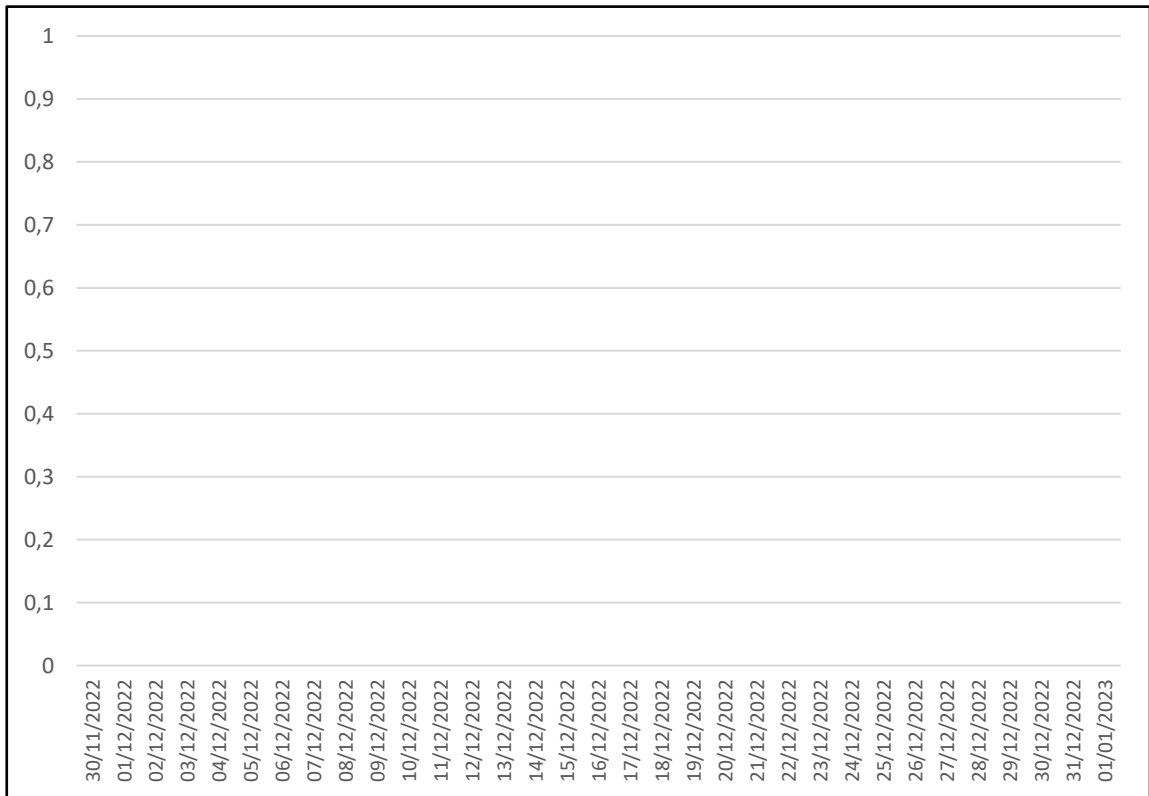
Fonte: CPFL Energia (2023).

Figura 27: Energia reativa excedente (dezembro).



Fonte: CPFL Energia (2023).

Figura 28: Energia reativa capacitiva consumida (dezembro).



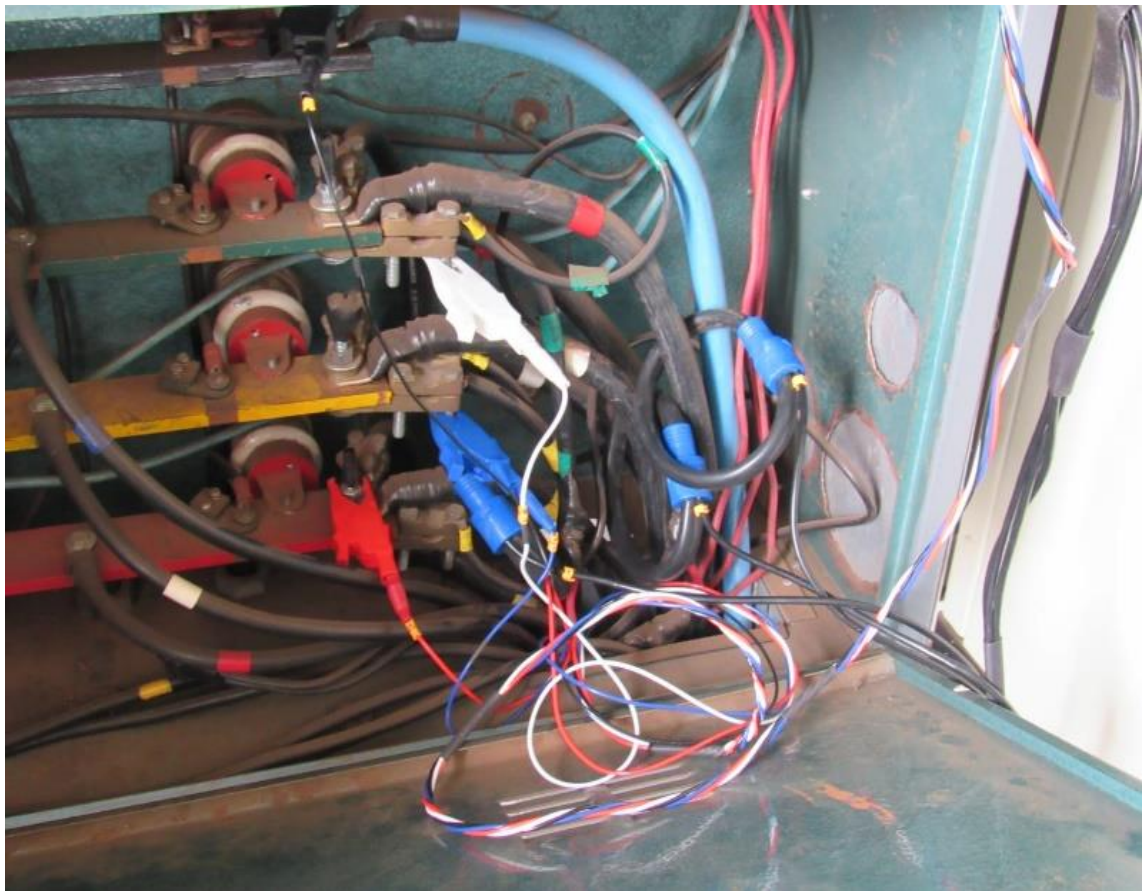
Fonte: CPFL Energia (2022).

Analisando os dados obtidos da concessionária de energia, conclui-se que o fp da unidade é indutivo. Essa afirmação se deve ao fato de que a instalação tem como suas principais cargas motores. Além disso, o horário de funcionamento da base é das 05h00 até às 19h00, portanto, o que coincide com o período cobrado pelo excedente de indutivo (período das 06h00 até às 24h00). Por fim, os gráficos de energia reativa capacitiva consumida se encontram zerados, confirmando a natureza da energia reativa cobrada.

3.3. ESTUDO UTILIZANDO UM ANALISADOR DE ENERGIA

Para uma melhor análise da instalação da base de combustíveis, solicitou-se uma leitura da energia utilizando um analisador de energia elétrica durante uma semana. O analisador foi configurado e ajustado para medir as correntes e tensões de cada fase, as distorções harmônicas e as potências ativas e reativas da instalação. Os dados foram armazenados em um pen drive para uma análise posterior. As Figuras 29, 30 e 31 demonstram a instalação do equipamento.

Figura 29: Instalação do analisador de energia.



Fonte: Próprio autor.

Figura 30: Configurando o analisador de energia.



Fonte: Próprio autor.

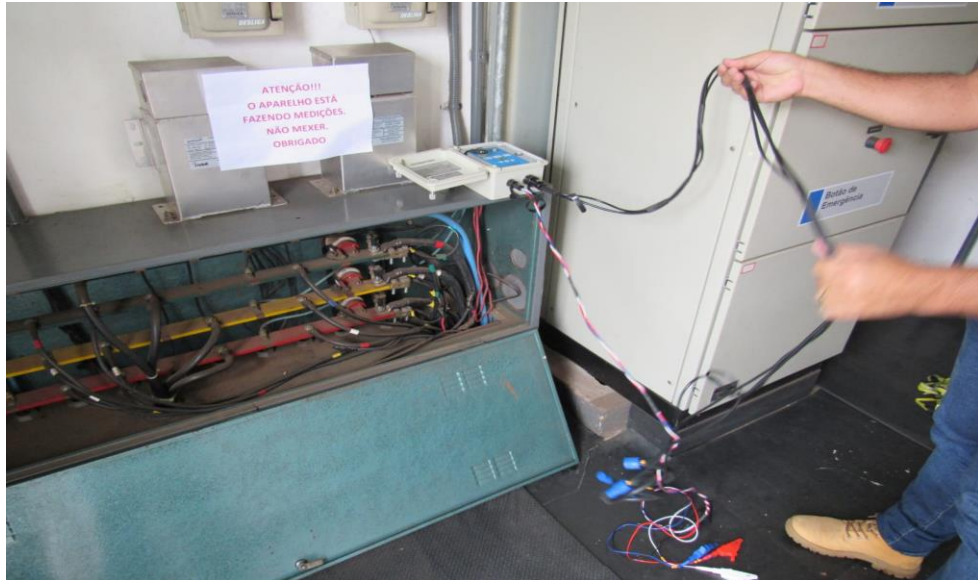
Figura 31: Analisador de energia sem erros para fazer as medições.



Fonte: Próprio autor.

Após os sete dias de leitura do analisador de energia, retirou-se o equipamento como se observa na Figura 32:

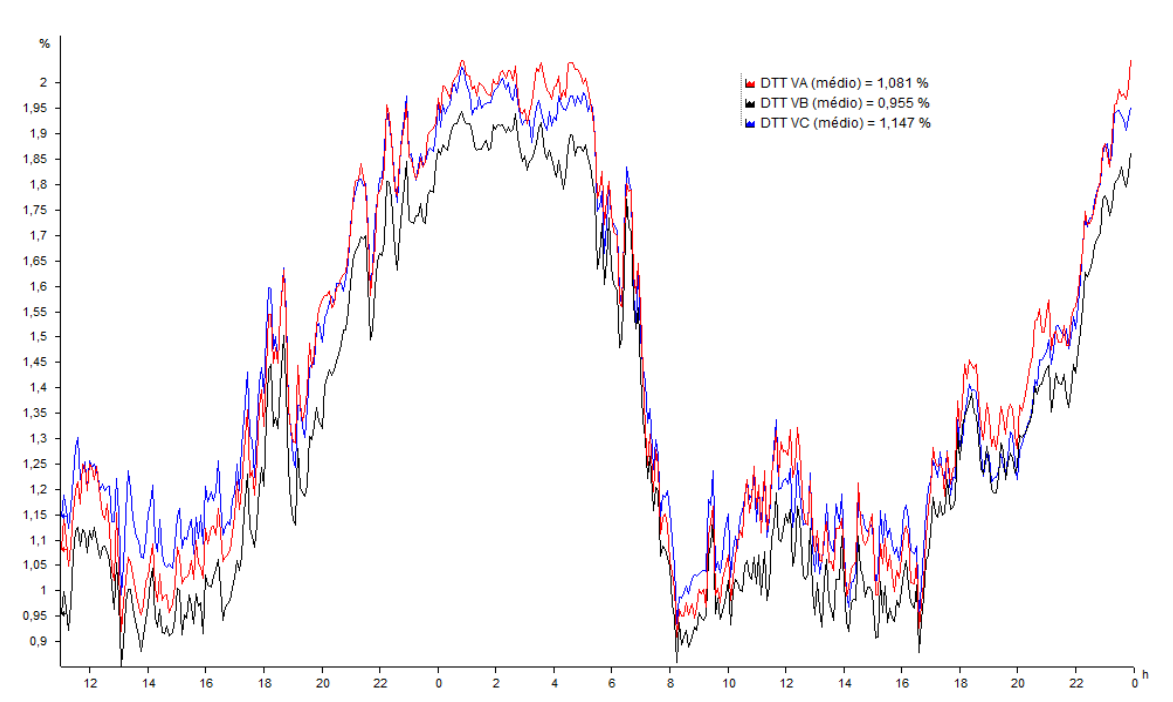
Figura 32: Retirada do analisador de energia.



Fonte: Próprio autor.

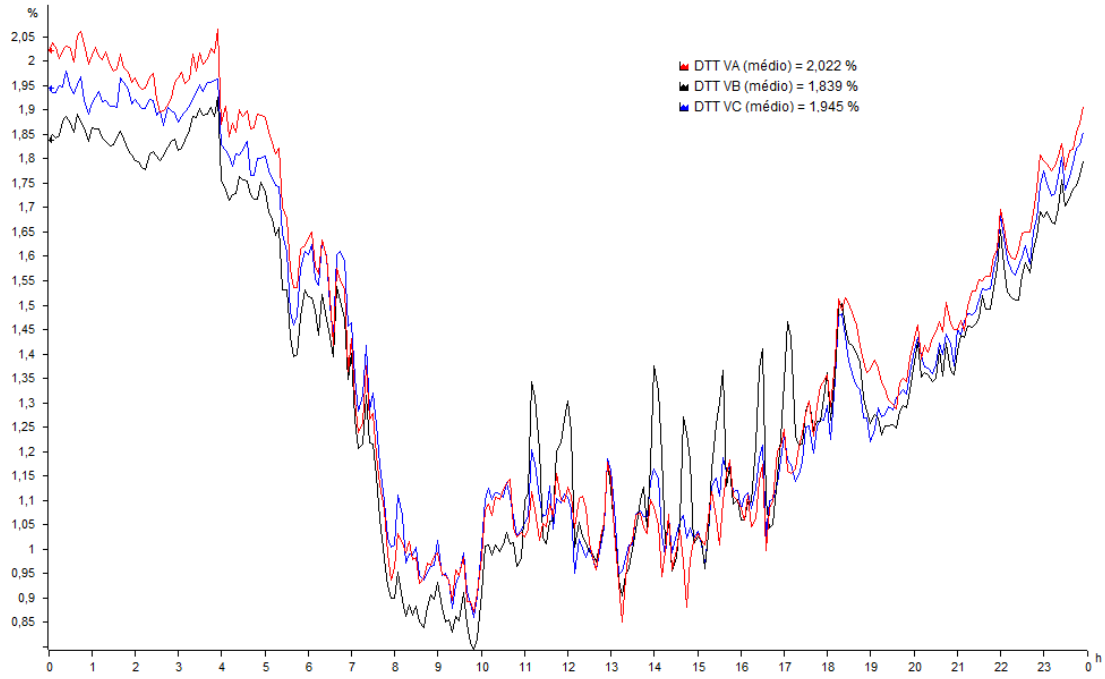
Os dados das leituras do analisador foram visualizados a partir do software Primata Eletrônica. Primeiramente fez-se uma análise da presença de harmônicas na rede. As Figuras 33, 34, 35, 36, 37, 38 e 39 demonstram os valores da DHT dos dias 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19 e 20 de fevereiro de 2023, respectivamente.

Figura 33: DHT dia 13/02 – 14/02.



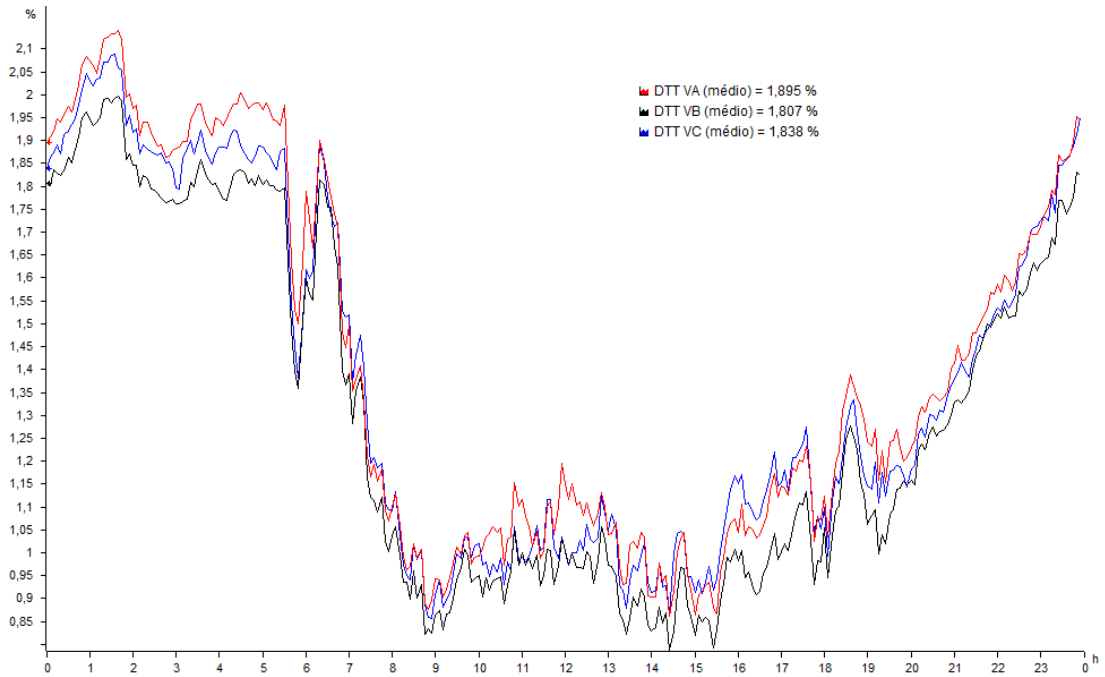
Fonte: Próprio autor.

Figura 34: DHT dia 15/02.



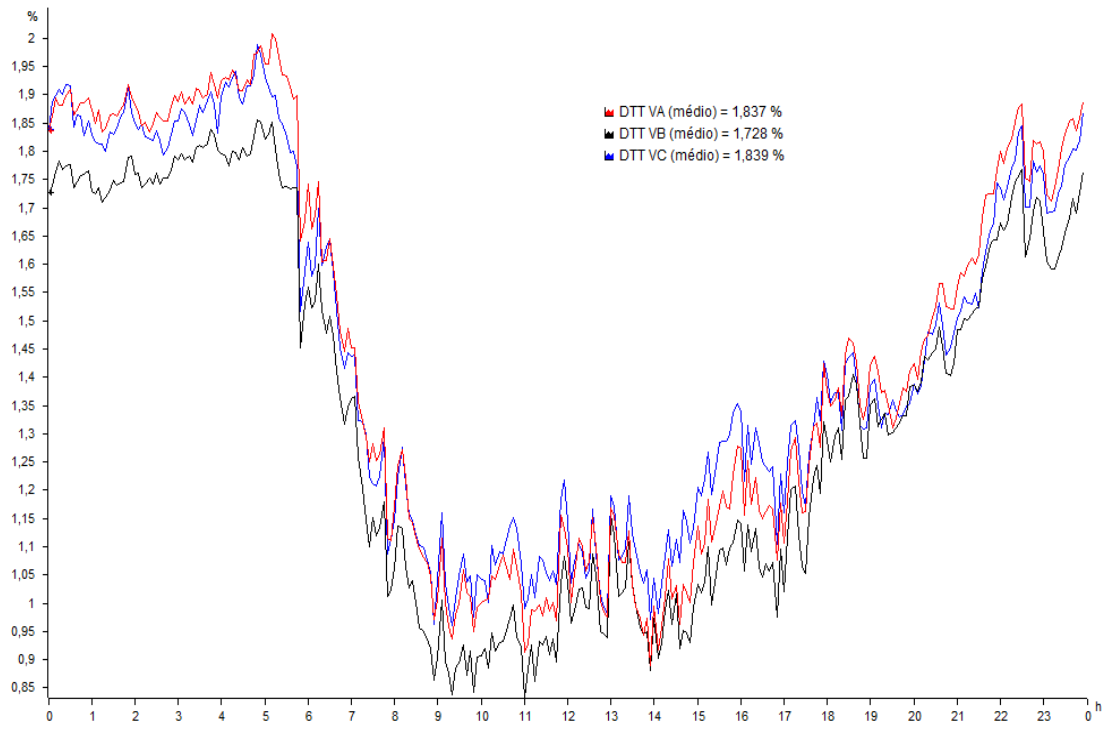
Fonte: Próprio autor.

Figura 35: DHT dia 16/02.



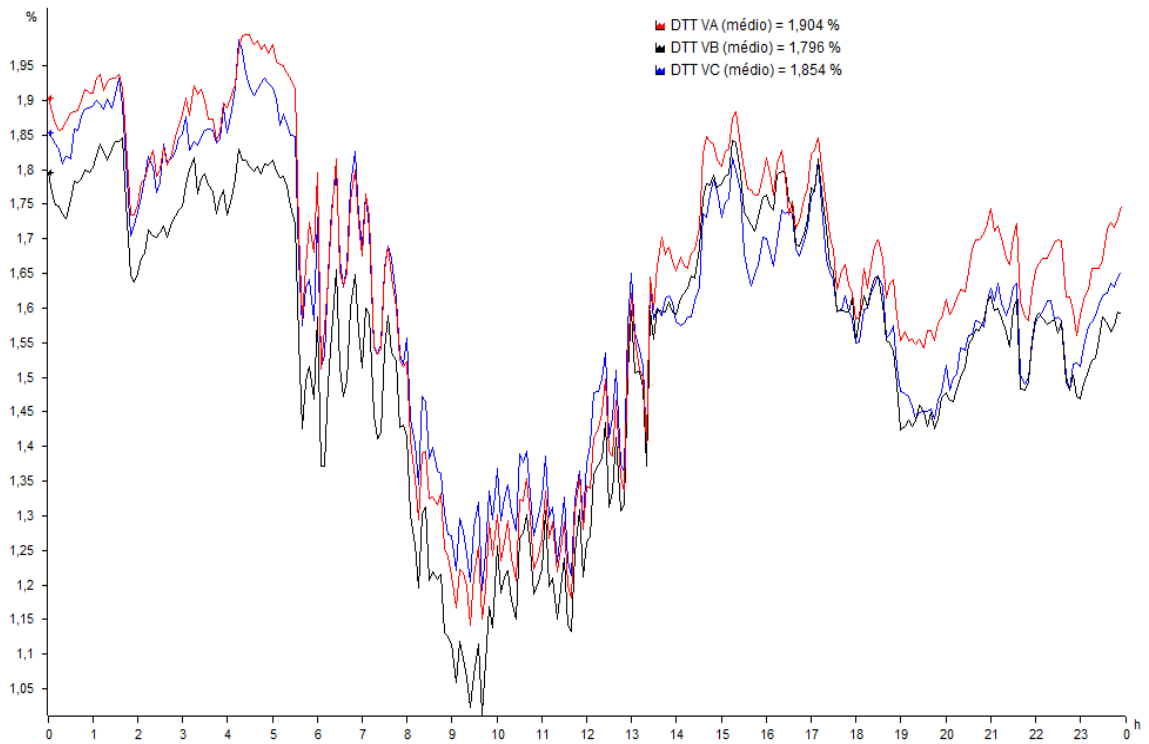
Fonte: Próprio autor.

Figura 36: DHT dia 17/02.



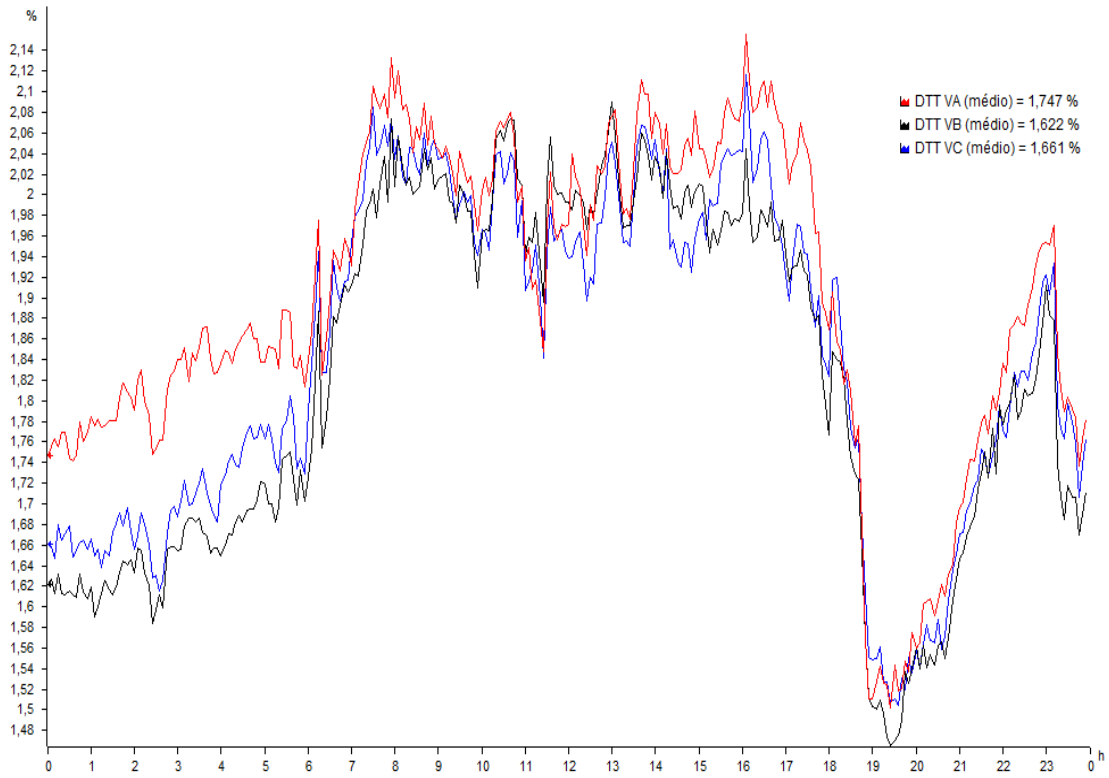
Fonte: Próprio autor.

Figura 37: DHT dia 18/02.



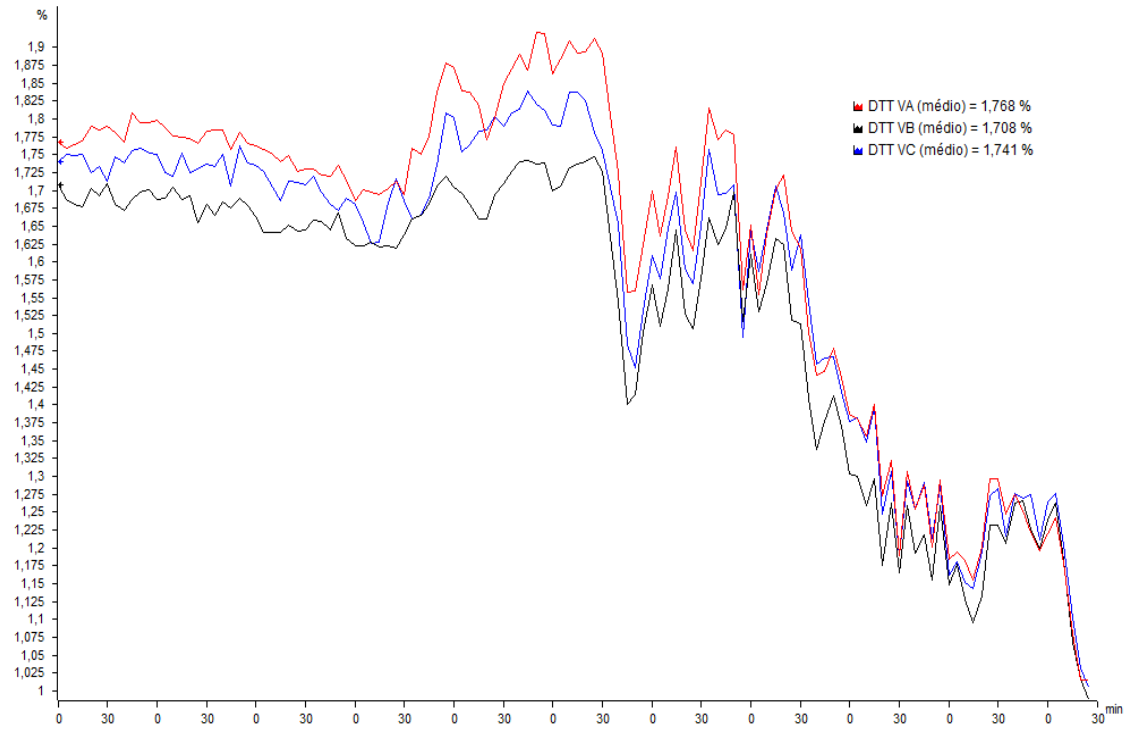
Fonte: Próprio autor.

Figura 38: DHT dia 19/02.



Fonte: Próprio autor.

Figura 39: DHT dia 20/02.

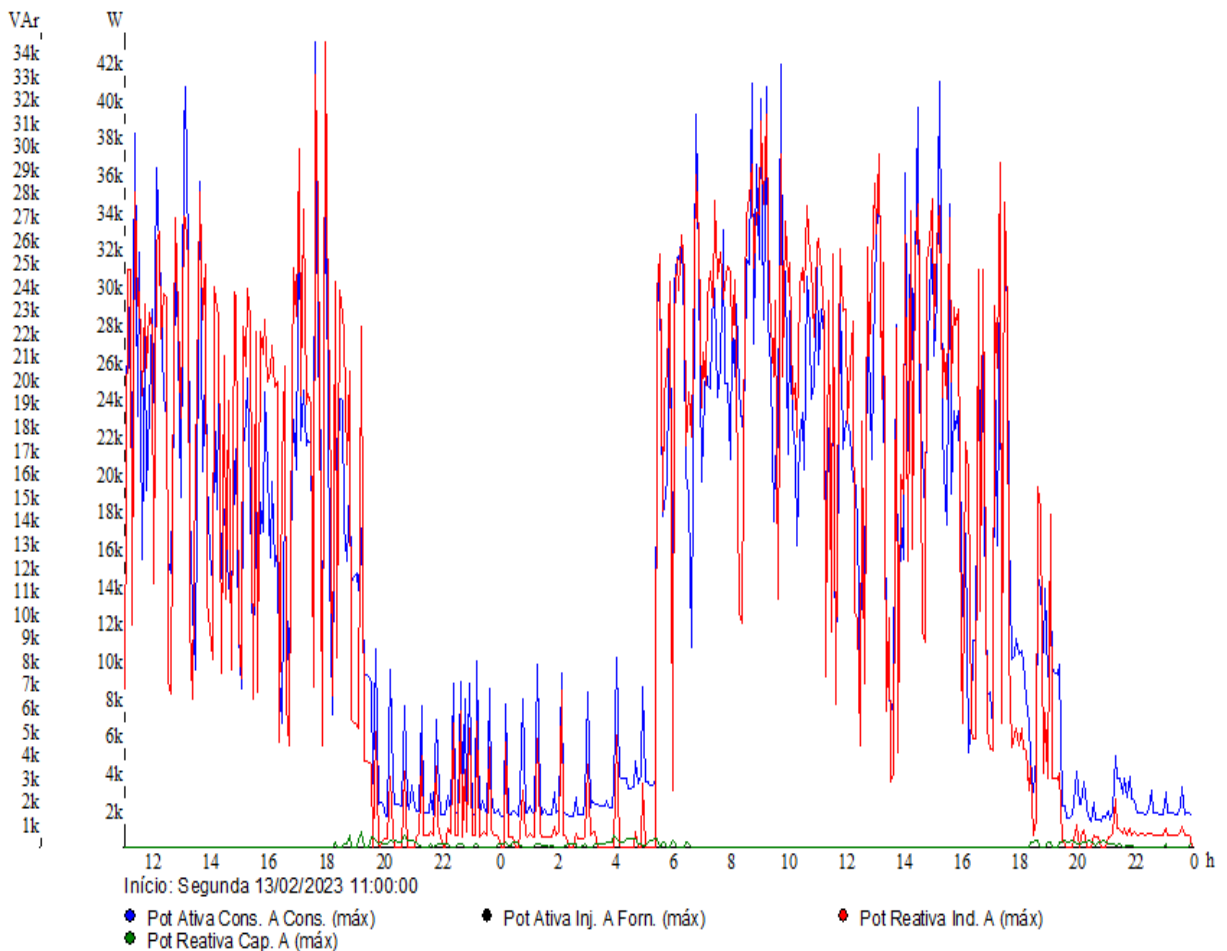


Fonte: Próprio autor.

Analisando os gráficos de todos os dias analisados, percebe-se que a taxa de distorção harmônica é baixa (não chegando a 3%). Portanto, de acordo com a Tabela 1, a unidade se enquadra dentro do limite de distorção harmônica para unidades com tensão nominal menor que 1kV, em que a tolerância é igual à 10%.

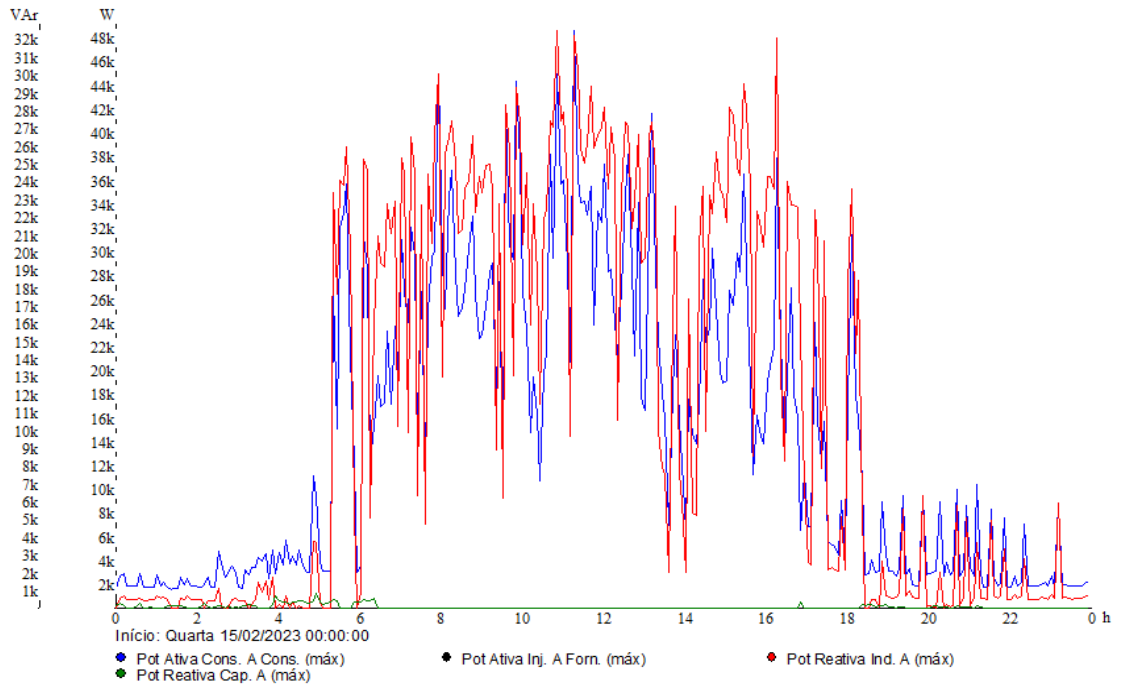
O analisador de energia também fez a leitura dos valores das potências ativa e reativa da instalação durante o período de sete dias. Estes dados foram utilizados para a determinação do valor do banco de capacitores a ser instalado. As Figuras 40, 41, 42, 43, 44, 45 e 46 representam os gráficos das potências ativa e reativa lidos da fase A da instalação (a fase mais crítica com relação às outras fases) em um intervalo de 5 minutos pelo analisador de energia entre os dias 13/02/23 e 19/02/23. A leitura foi iniciada no dia 13/02/23 às 11h00 e o desligamento ocorreu no dia 20/02/23 às 10h30.

Figura 40: Potências ativa e reativa da fase A (13/02/23 – 14/02/23).



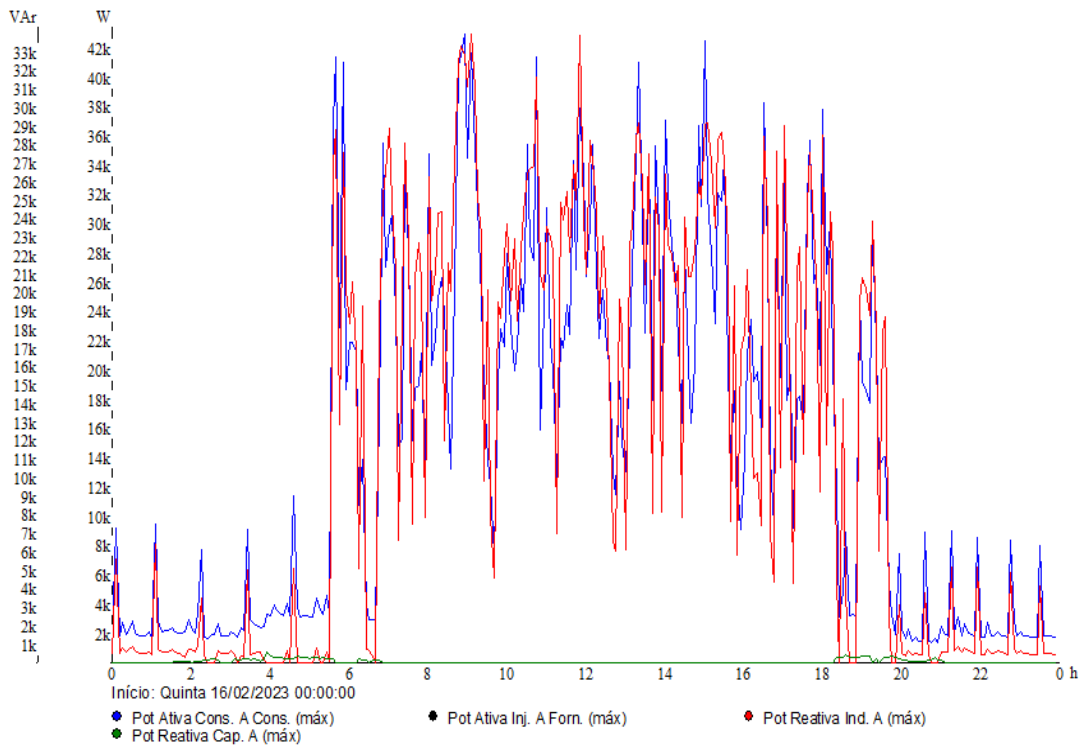
Fonte: Próprio autor.

Figura 41: Potências ativa e reativa da fase A (15/02/23).



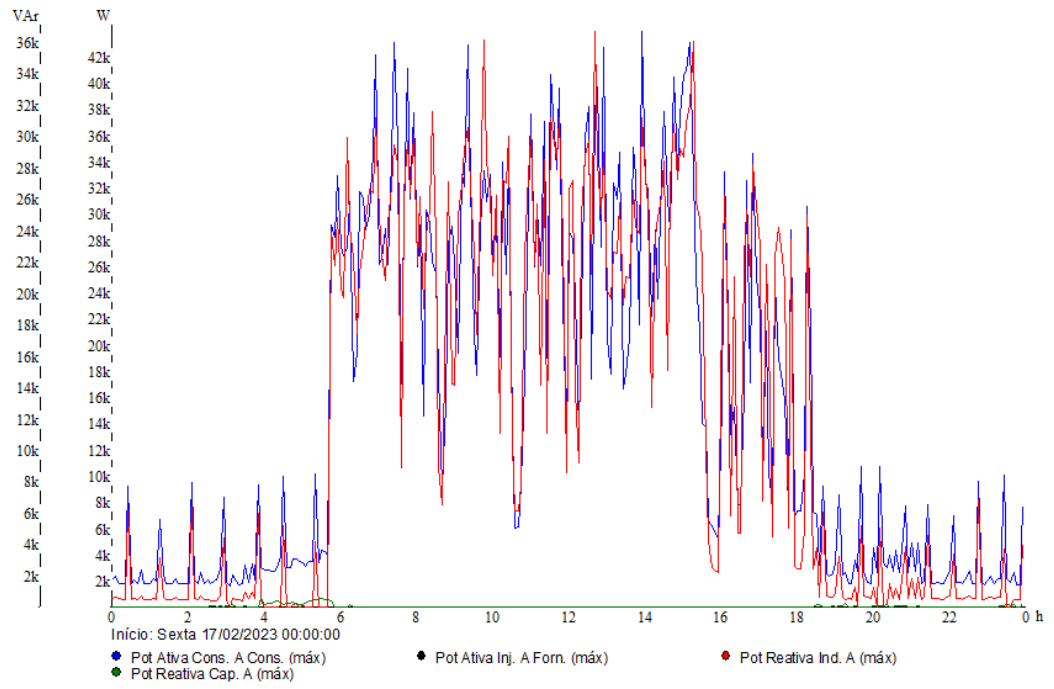
Fonte: Próprio autor.

Figura 42: Potências ativa e reativa da fase A (16/02/23).



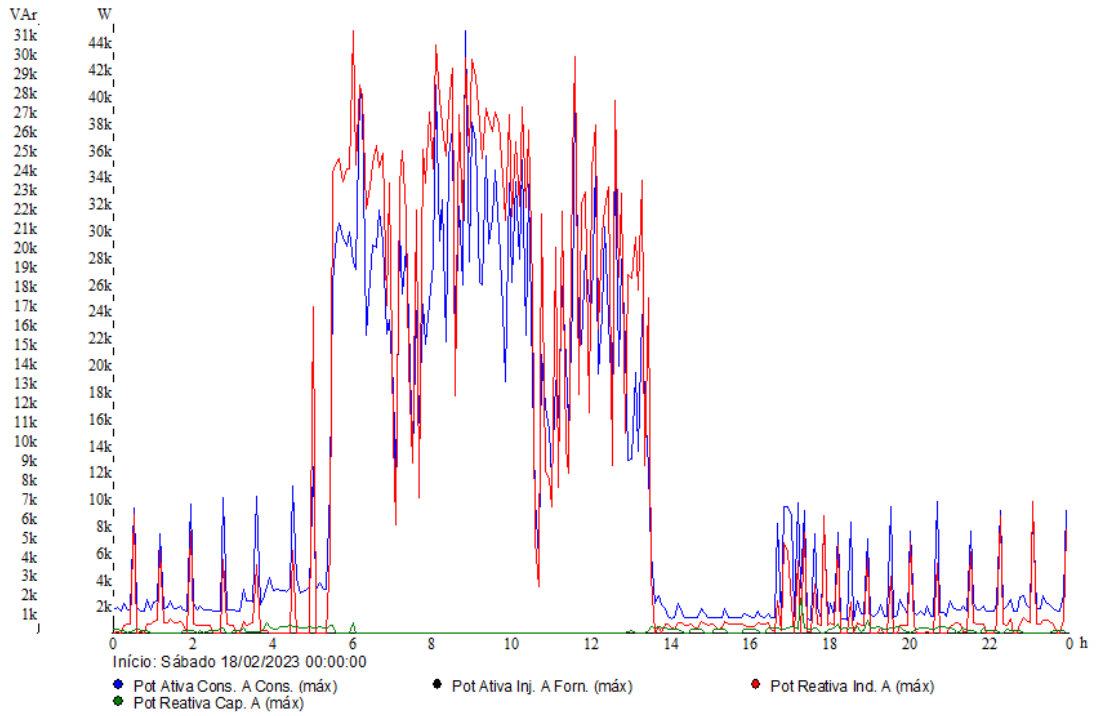
Fonte: Próprio autor.

Figura 43: Potências ativa e reativa da fase A (17/02/23).



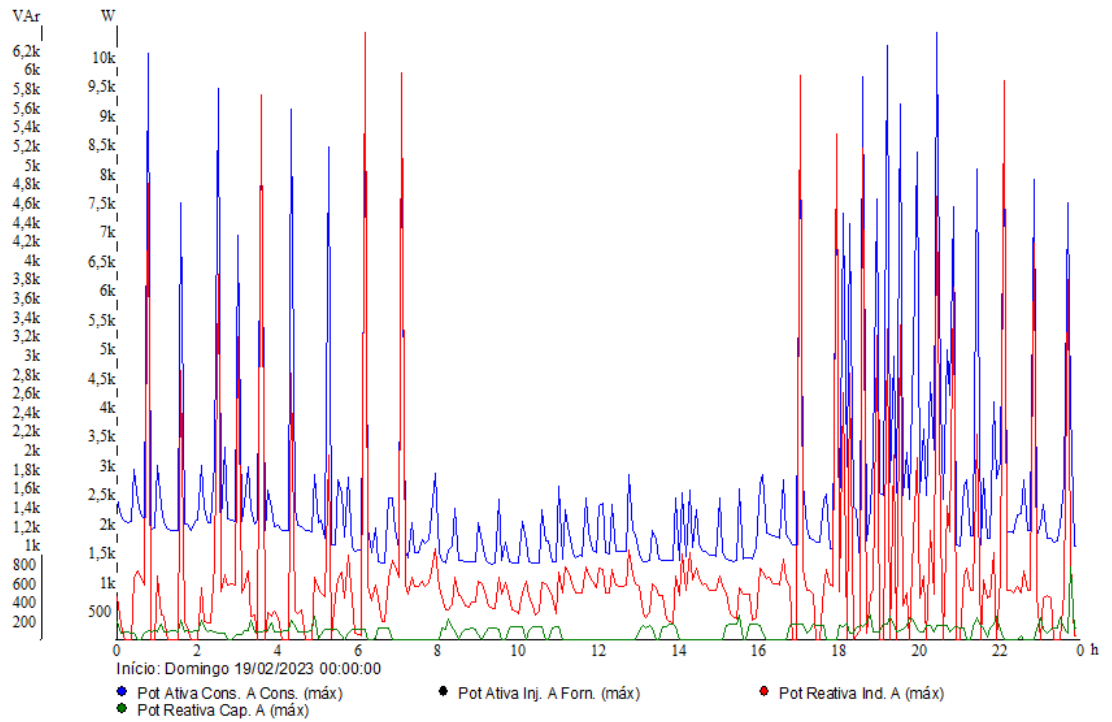
Fonte: Próprio autor.

Figura 44: Potências ativa e reativa da fase A (18/02/23).



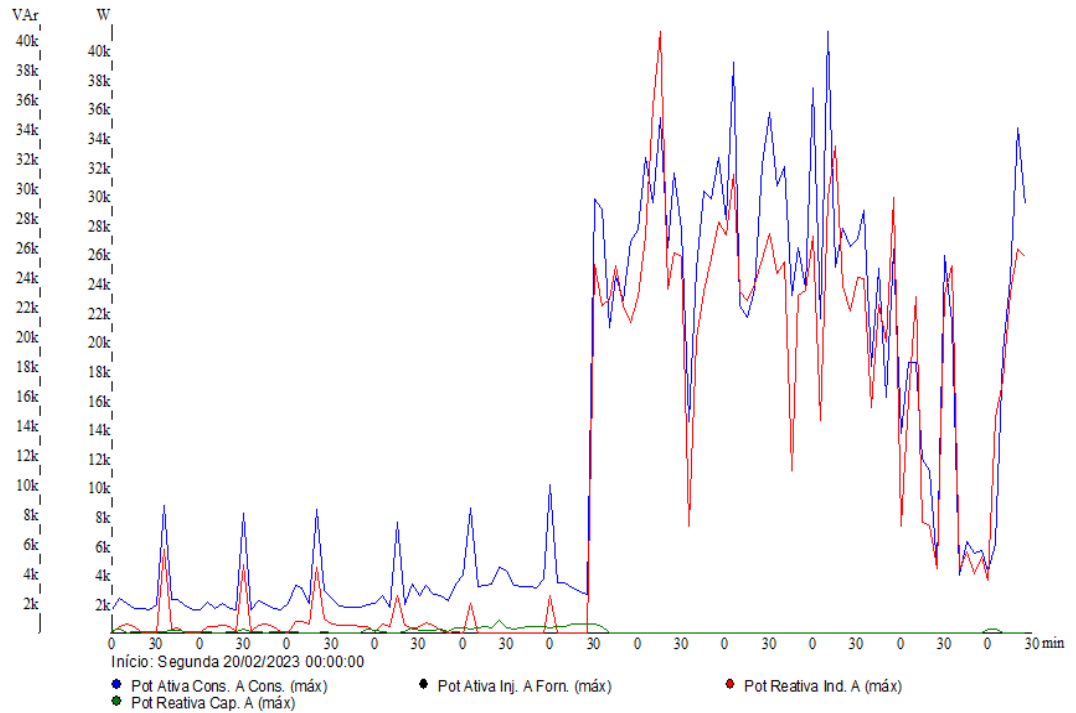
Fonte: Próprio autor.

Figura 45: Potências ativa e reativa da fase A (19/02/23).



Fonte: Próprio autor.

Figura 46: Potências ativa e reativa da fase A (20/02/23).



Fonte: Próprio autor.

Nota-se que, em média, os picos de potência reativa ficaram em torno de 30kVAr-37kVAr e os picos de potência ativa ficar em torno de 40kVAr-48kVAr, outro ponto observado foram os horários que apresentam maior consumo, que são os horários das 6h00 até às 19h00 de segunda-feira até sexta-feira e das 6h00 até 14h00 no sábado (horários de funcionamento da base de operações e predominantemente fora de ponta), as únicas exceções são os dias 19/02 (que se trata de um domingo, um dia que a base não opera) e o dia 20/02 (que as leituras foram feitas das 00h00 até às 10h30 somente).

3.4. DEFINIÇÃO DO BANCO DE CAPACITORES

Para a determinação do banco de capacitores, foram utilizados os picos de energia reativa (piores casos), além disso, considerou-se um valor de fator de potência desejado igual a 0,95 e não 0,92, isso porque na prática um fator de potência de 0,95 traz maior retorno financeiro, pois uma correção para um fator igual a 1,0 teria um custo maior (um outro fator é a margem de erro, que permite flutuações de cargas reativas) (LUCAS, 2013). Os cálculos dos bancos de capacitores necessários para cada pico (do dia 13/02/23 até o dia 20/02/23) são apresentados na Tabela 4:

Tabela 4: Valores dos bancos de capacitores.

Dias analisados	Pico de energia ativa (kW)	Pico de energia reativa (kVAr)	Potência reativa ideal para $fp = 0,95$ (kVAr)	Valor do banco necessário (kVAr)
13/02/23-14/02/23	42	34	13,11	20,89
15/02/23	48	32	14,99	17,01
16/02/23	42	33	13,11	19,89
17/02/25	42	36	13,11	22,89
18/02/23	44	31	13,74	17,26
19/02/23	10	7,5	3,12	4,38
20/02/23	40	40	12,49	27,51

Fonte: Próprio autor.

A partir destes dados, fez-se uma média do valor do banco de capacitores que supriria a necessidade mesmo nos casos de picos. O cálculo pode ser observado pela Equação 23.

$$\frac{(20,89+17,01+19,89+22,89+17,26+4,38+27,51)}{7} \cong 18,55 \text{ [kVAr]} \quad (23)$$

Apesar do valor aproximado do banco ser de 18,55 kVAr, a escolha do valor para o projeto foi de 30 kVAr (somando o valor de todas as células capacitivas). Essa escolha se deve ao fato de que não existe no mercado um valor de um banco que resultaria em um valor igual à 18,55 kVAr. Além disso, o domingo não corresponde a um dia comum e, conseqüentemente, a média é levada a um valor mais baixo. Um outro motivo para a escolha de um valor maior para o banco de capacitores é que isto possibilitará que a instalação comporte um aumento de carga no futuro e que ainda será contemplada pelo banco de capacitores. Por fim, escolhendo um valor maior da soma das células capacitivas evita-se que sempre as mesmas células sejam acionadas, evitando o desgaste do equipamento, pois possibilita mais de uma combinação para o mesmo valor solicitado pelo controlador.

Com o valor do banco já calculado, o próximo passo foi calcular as frequências de ressonâncias do banco de capacitores. A disposição escolhida para as células foi: 1 célula de 2,5 kVAr, 4 células de 5 kVAr e 1 célula de 7,5 kVAr. Esta disposição foi escolhida porque é possível de se obter aproximadamente os 18,55 kVAr de formas diferentes (como mencionado anteriormente, não existindo a necessidade de se acionar a mesma célula várias vezes, evitando o desgaste excessivo) e também porque o controlador de fator de potência tem 12 saídas, com esta disposição ainda restariam 6 saídas para um aumento de carga futura. O primeiro passo para calcular as frequências de ressonância foi verificar o valor da potência de curto-circuito do transformador, para isto, utilizou-se a Equação 24:

$$S_{cc} = \frac{P_{Tn}}{Z_{Tn}} \quad \text{[VA]} \quad (24)$$

S_{cc} = potência de curto-circuito do transformador [VA];

P_{Tn} = potência nominal do transformador [VA];

Z_{Tn} = porcentagem da impedância do transformador [%].

Constatou-se que o a potência nominal do transformador é de 225 kVA e a impedância é igual a 4,5%, como se observa na Figura 47.

Figura 47: Placa com as informações do transformador.



Fonte: Próprio autor.

A partir destes dados, calculou-se o valor da potência de curto-circuito do transformador por meio da Equação 25.

$$S_{cc} = \frac{225 \text{ kVA}}{4,5\%} = 5.000 \quad [\text{MVA}] \quad (25)$$

Com este dado, calculou-se a ordem harmônica da frequência de ressonância do banco. Utilizou-se a Equação 21 para cada estágio e estes valores são informados na Tabela 5:

Tabela 5: Cálculo das frequências de ressonância do banco de capacitores.

Valores (kVAr)	Ordem harmônica - Hr	Frequência de ressonância (Hz)
2,5	44,721	2683,28
5	31,623	1897,37
7,5	25,820	1549,19
10	22,361	1341,64
12,5	20,000	1200,00
15	18,257	1095,45
17,5	16,903	1014,19
20	15,811	948,68
22,5	14,907	894,43
25	14,142	848,53
27,5	13,484	809,04
30	12,910	774,60

Fonte: Próprio autor.

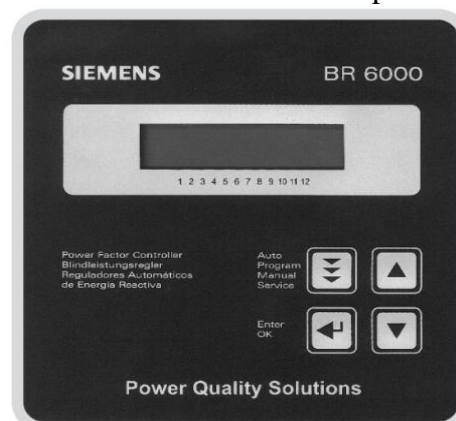
Apesar dos valores das frequências de ressonância serem calculados, não existe risco de ocorrer uma ressonância em qualquer estágio do banco de capacitores. A explicação para isso é que não há a presença de harmônicos na instalação, como observado pelo analisador de qualidade de energia anteriormente.

O controlador de fator de potência escolhido para este projeto foi o BR6000, da marca Siemens. O controlador escolhido possui 12 saídas (possibilitando acionar 12 células capacitivas), possui o modo de operação manual e automática, possibilita a configuração do valor do fator de potência desejado (seja capacitivo ou indutivo), permite a visualização das distorções harmônicas de tensão e possibilita a programação de tempo para acionar uma célula capacitiva novamente (tempo de descarga).

Para este projeto foram configurados os seguintes parâmetros: fator de potência para 0,95 indutivo, tempo de descarga 40 segundos (de acordo com o manual das células capacitivas, o tempo mínimo de descarga das células é igual a 30 segundos), a posição 1 da saída do controlador foi configurada para acionar 1 célula capacitiva de 2,5 kVAr, a posição 2 da saída do controlador foi configurada para acionar 1 célula capacitiva de 5,0 kVAr, a posição 3 da saída do controlador foi configurada para acionar 1 célula capacitiva de 5,0 kVAr, a posição 4 da saída do controlador foi configurada para acionar 1 célula capacitiva de 5,0 kVAr, a posição 5 da saída do controlador foi configurada para acionar 1 célula capacitiva de 5,0 kVAr e a posição 6 da saída do controlador foi configurada para acionar 1 célula capacitiva de 7,5 kVAr.

Após ser configurado, o controlador monitora de forma contínua (24 horas por dia) os valores de corrente e tensão, calcula a potência e verifica a natureza da mesma (indutiva ou capacitiva), calcula o valor do fator de potência e aciona ou retira as células capacitivas que são mais coerentes para o momento. A Figura 48 demonstra a interface do modelo do controlador escolhido para este projeto.

Figura 48: Controlador de fator de potência BR6000.



Fonte: Siemens (2017).

3.5. INSTALAÇÃO DO BANCO DE CAPACITORES AUTOMÁTICO

Para iniciar a instalação do banco de capacitores, primeiro precisou-se retirar os capacitores antigos (juntamente com as chaves de acionamento) e instalar a estrutura para este novo sistema. Em um primeiro momento, fez-se somente a instalação da estrutura do sistema, a ligação do sistema na rede elétrica foi realizada em um outro momento. A Figura 49 mostra a retirada das células capacitivas antigas, a Figura 50 mostra a retirada da chave de acionamento do banco antigo, a Figura 51 mostra o diagrama elétrico do quadro, a Figura 52 mostra a fixação das mãos francesas, a Figura 53 mostra as células fixadas no suporte e a Figura 54 mostra o layout do novo sistema.

Figura 49: Retirada das células capacitivas antigas.



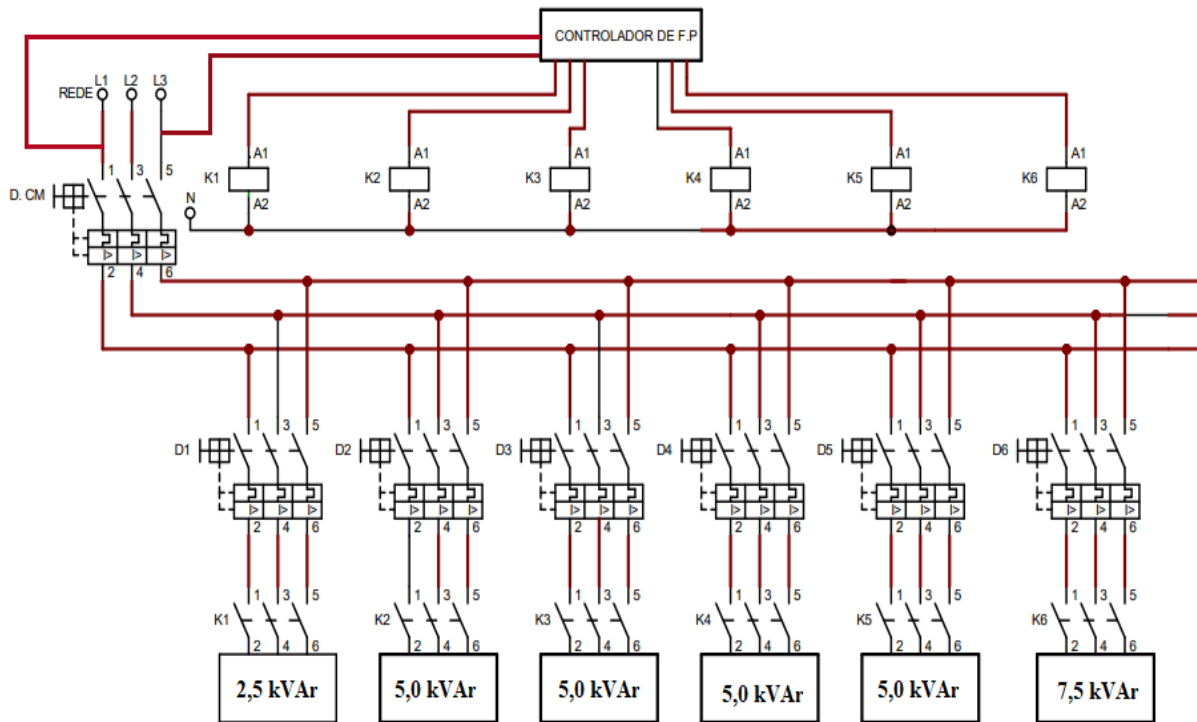
Fonte: Próprio autor.

Figura 50: Retirada das chaves de acionamento do banco antigo.



Fonte: Próprio autor.

Figura 51: Diagrama elétrico do quadro.



Fonte: Próprio autor.

Figura 52: Fixação da estrutura para comportar as células capacitivas.



Fonte: Próprio autor.

Figura 53: Células capacitivas fixadas.



Fonte: Próprio autor.

Figura 54: Estrutura do banco de capacitores instalada.



Fonte: Próprio autor.

A ligação do sistema na rede elétrica pode ser observada por meio das Figuras 55, 56, 57 e 58.

Figura 55: Desligamento da energia que chega ao transformador.



Fonte: Próprio autor.

Figura 56: Crimpagem de terminais nos cabos.



Fonte: Próprio autor.

Figura 57: Passagem dos cabos para alimentação e acionamento do banco.



Fonte: Próprio autor.

Figura 58: Cabos de alimentação do sistema de acionamento do banco passados.



Fonte: Próprio autor.

Devido a existência de um gerador a diesel que alimenta a base por inteiro e que é acionado automaticamente ao perceber a falta de energia, a alimentação do banco de capacitores foi feita a partir da saída do medidor da concessionária, isso porque não se é recomendado que o banco de capacitores seja acionado por um gerador. Apesar de se tratar de um banco automático que calcula continuamente o fator de potência, decidiu-se garantir que as células

capacitivas não fossem acionadas quando o gerador estivesse em operação, pois quando um gerador é submetido a cargas capacitivas que atravessam o limite de excitação mínima, o gerador pode superaquecer o rotor e causar perda de estabilidade (LIMA, 2002). A Figura 59 apresenta as informações do gerador.

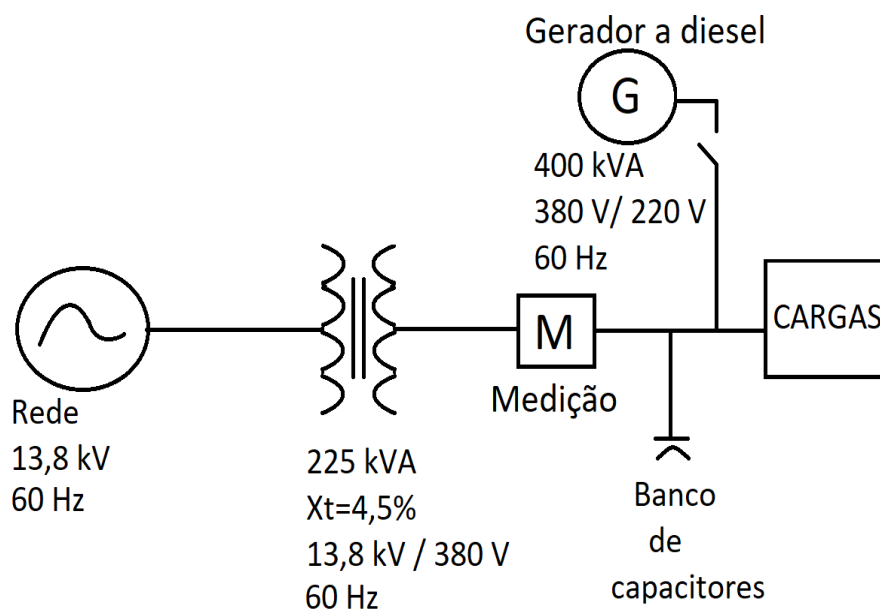
Figura 59: Informações do gerador a diesel.

N° SÉRIE:		TENSAO NOMINAL (V)	380/220
MOTOR N°:		POT NOMINAL (KVA)	400
GERADOR N°:		REGIME FUNCION	STANDBY
DATA MONT.:	5/2015	FREQUENCIA (HZ)	60
PESO (KG):	3646	ROTACAO (RPM)	1800
MODELO:	42n16i+	FATOR POTENCIA	0,8
		CORRENTE NOMINAL (A)	607

Fonte: Próprio autor.

As células capacitivas foram ligadas em triângulo, visto que as magnitudes das baixas tensões não interferem nos preços das células capacitivas, e que, a capacitância de um banco ligado em triângulo é três vezes menor em relação a um banco ligado em estrela (SANTANA, 2022). A Figura 60 apresenta o diagrama unifilar do sistema.

Figura 60: Diagrama unifilar do sistema.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 61 mostra a diferença da estrutura anterior de capacitores e a nova estrutura.

Figura 61: Comparação entre o banco antigo e o novo.



Fonte: Próprio autor.

Para a montagem do quadro de comando do banco foram utilizados: 6 disjuntores termomagnéticos trifásicos, 6 contadores trifásicos, 1 caixa de montagem de painel elétrico, 1 Controlador de fator de potência, 1 disjuntor monofásico, 1 disjuntor trifásico de caixa moldada, 1 ventilador para painel elétrico, 1 transformados de corrente, cabos de 2,5mm² e de 35mm² e 6 células capacitivas: 1 célula de 2,5 kVAr, 1 célula de 5 kVAr, 1 célula de 5 kVAr, 1 célula de 5 kVAr, 1 célula de 5 kVAr e 1 célula de 7,5 kVAr. Fez-se a instalação do banco de forma que respeitasse o espaço disponível, neste caso, as células não ficaram dentro do quadro, mas foram fixadas ao lado do quadro de comando. Todo o espaço foi aproveitado de modo que facilitasse a manutenção e possibilitasse a ampliação do número de células (visto que o controlador possui 12 estágios e foram utilizados apenas 6).

A instalação foi feita dentro de uma estrutura de alvenaria e fora das áreas de risco, ficando distante da plataforma de carregamento e da área de armazenagem de combustíveis, ou seja, a área de instalação não oferece riscos de explosões.

Após o controlador ser instalado, verificou-se se o fator de potência configurado estava de acordo com o valor mostrado no visor do aparelho. A Figura 62 demonstra que o controlador estava corrigindo conforme o programado.

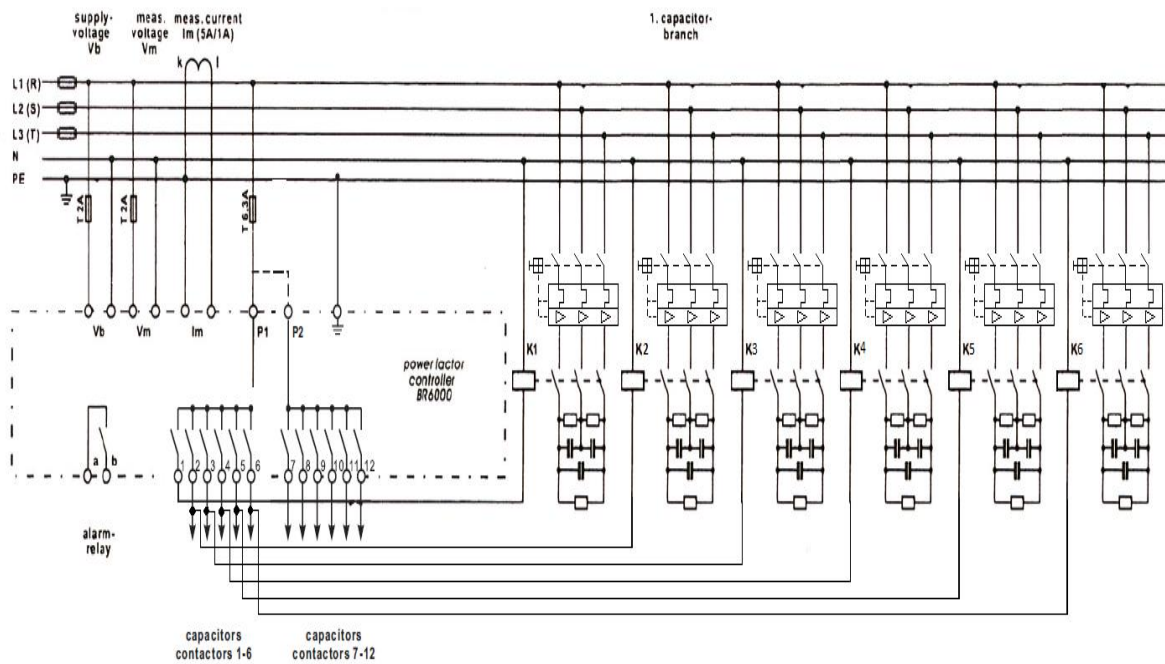
Figura 62: Verificação da correção do fator de potência pelo controlador.



Fonte: Próprio autor.

O diagrama multifilar do sistema instalado pode ser observado na Figura 63.

Figura 63: Diagrama multifilar do sistema instalado.



Fonte: Adaptado de Siemens (2017).

Os bancos foram instalados e operam de acordo com o guia IEEE Std 1036. A Tabela 5 mostra os limites de temperatura do ambiente em que o banco de capacitores deve ser instalado.

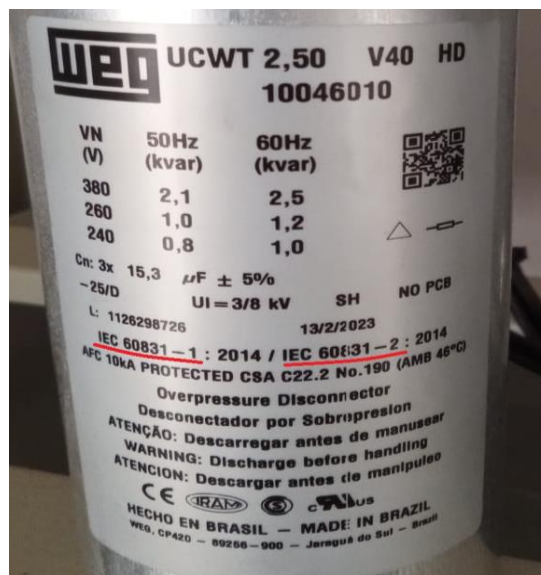
Tabela 6: Temperatura de operação das células capacitivas.

Arranjo de Montagem	Temperatura máxima do ar no ambiente (°C)
Capacitor isolado	46
Linha única de capacitores	46
Múltiplas linhas de capacitores	40
Envolto em metal ou alojado em equipamento	40

Fonte: Adaptado de IEEE (2011).

A temperatura do local em que o banco de capacitores foi instalado varia entre 30°C e 35°C, estando abaixo da temperatura de 46°C (linha única de capacitores). Outro ponto que deve ser respeitado de acordo com o guia IEEE Std 1036 é a altitude, que não pode exceder 1800m, o que também está conforme, visto que a altitude da cidade em que o banco foi instalado é de 489m (CIDADE-BRASIL, 2021). O guia IEEE Std 1036 também ressalta que a tensão aplicada no banco não deve ser maior do que a tensão nominal do equipamento, também estando conforme (o equipamento aceita a tensão de 380V). Outro requisito que consta no guia é que a tensão de impulso aplicada entre cada terminal não exceda a BIL (*Basic Insulation Level*), também estando de acordo, pois os capacitores foram produzidos de acordo com a norma IEC 60831-1/2 (norma que trata do desempenho e ensaios de capacitores), como se observa na Figura 64.

Figura 64: Célula capacitiva fabricada de acordo com a IEC 60831-1/2.



Fonte: Próprio autor.

As harmônicas no sistema também são levadas em conta para este guia, entretanto, como visto anteriormente, as porcentagens de harmônica no sistema são desprezíveis. Por fim, a frequência de operação do sistema também está de acordo com a frequência nominal do equipamento (60 Hz).

Conclui-se que, para uma primeira análise do consumo da unidade, é muito válido solicitar um estudo de memória de massa, pois o mesmo possibilita uma verificar informações importantes de carga, entretanto, para uma análise mais detalhada é importante utilizar um analisador de energia que fará uma leitura com mais detalhes e com informações complementares para um melhor estudo. Além disso, em unidades que possuem um banco de capacitores já instalado, é necessário verificar a integridade do mesmo, isso permitirá fazer um cálculo de projeto de um novo banco da forma correta. Outro ponto importante é a definição dos valores dos bancos, no caso deste projeto, foram considerados os piores casos (pontos de picos de energia reativa) durante o período de uma semana (para contemplar uma rotina operacional mais detalhada).

Também é importante ressaltar que a divisão da instalação do banco de capacitores em duas etapas possibilitou que o serviço fosse feito de forma mais organizada e com mais calma, sendo a primeira etapa a instalação da parte mecânica (desmontagem do banco antigo e instalação da estrutura mecânica do banco) e a segunda etapa as ligações elétricas (desligamento do transformador de entrada, instalação de TC para leitura do controlador, programação do controlador com parâmetros desejados, fixação dos componentes elétricos, ligações dos cabos nos componentes e na rede, teste de funcionamento e verificação dos parâmetros lidos).

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após a instalação do banco de capacitores, fez-se necessário a verificação dos resultados para comprovação dos cálculos feitos anteriormente. Para esta verificação, foram utilizadas as contas de energia anteriores e posteriores à instalação para comparação.

4.1. VERIFICAÇÃO DA EFICÁCIA DO BANCO DE CAPACITORES

A instalação do banco de capacitores foi finalizada no dia 27 de maio de 2023 e para a verificação da eficácia da instalação, fez-se uma leitura das contas de energia referentes aos meses posteriores para comparação com os meses anteriores à instalação. As Figuras 65 e 66 representam as contas de energia dos meses de maio e junho, respectivamente.

Figura: 65: Conta de energia da unidade consumidora (maio).

DISCRIMINAÇÃO DA OPERAÇÃO - RESERVADO AO FISCO									
Cod.	Descrição da Operação	Mês	Quant.	Quant.	Unid.	Tarifa com	Valor Total	Base Cálculo	A
115	Nº 903854088886	Ref.	Registrada	Faturada	Med.	Tributos R\$	Operação R\$	ICMS R\$	ICI
0605	Consumo Ponta [KWh] - TUSD	MAI/23	1.217,880	1.217,880	kWh	1,63189259	1.987,45	1.987,45	1
0605	Consumo Fora Ponta [KWh]-TUSD	MAI/23	22.673,574	22.673,574	kWh	0,14156745	3.209,84	3.209,84	1
0601	Cons Ponta - TE	MAI/23	1.217,880	1.217,880	kWh	0,62028259	755,43	755,43	1
0601	Cons FPonta TE	MAI/23	22.673,574	22.673,574	kWh	0,38766099	8.789,66	8.789,66	1
0601	Consumo Reativo Exc Ponta	MAI/23	9,807	9,807	KVr	0,40891016	4,01	4,01	1
0601	Consumo Reativo Exc Fora Ponta	MAI/23	1.824,511	1.824,511	KVr	0,40852040	745,35	745,35	1
0602	Demanda [kW] - TUSD	MAI/23	146,124	146,124	KW	21,34604857	3.119,17	3.119,17	1
0602	Demanda Ultrap [kW] - TUSD	MAI/23		14,124	KW	42,69187200	602,98	602,98	1
Subtotal							19.213,89		

Fonte: CPFL Energia (2023).

Figura 66: Conta de energia da unidade consumidora (junho).

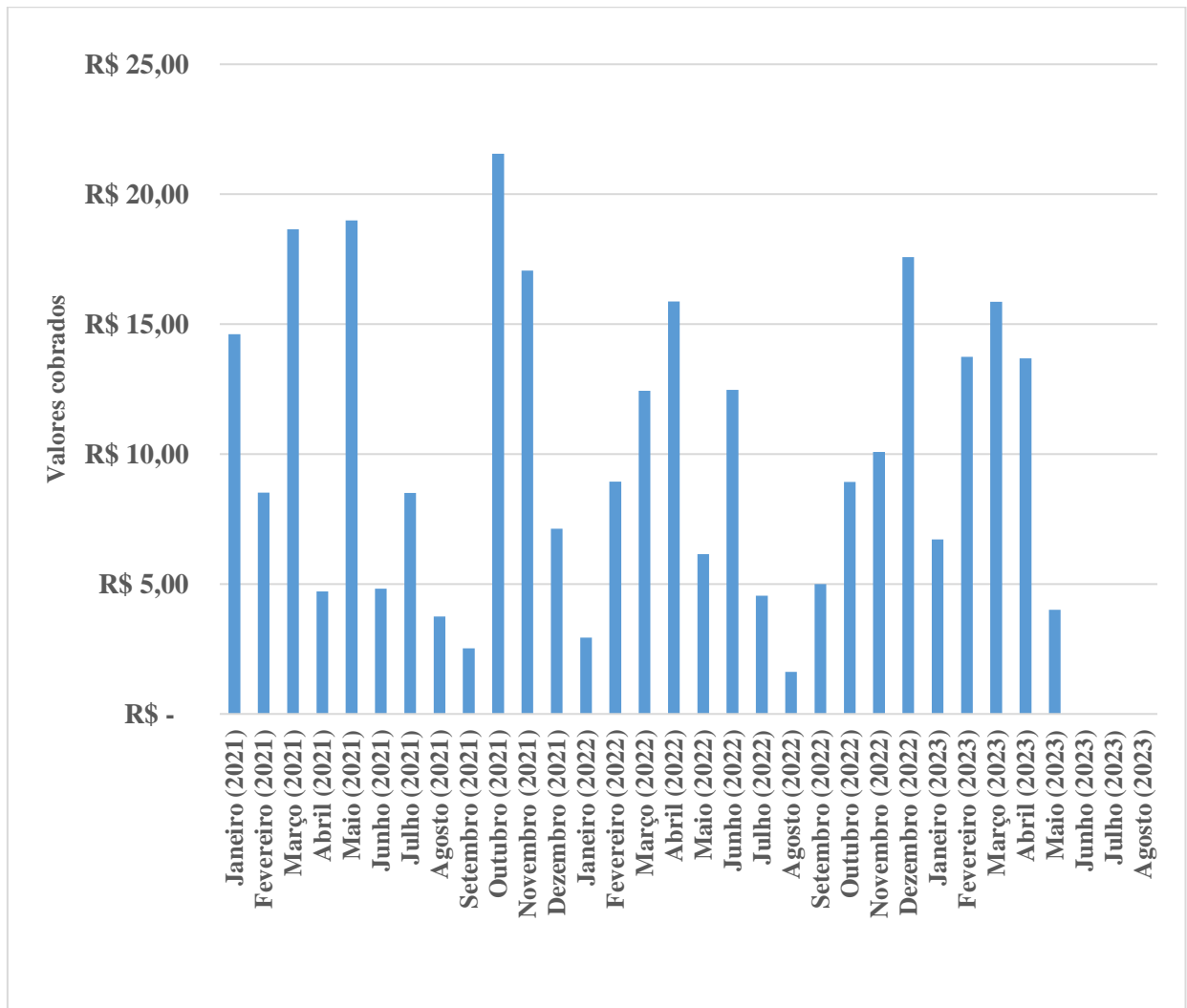
DISCRIMINAÇÃO DA OPERAÇÃO - RESERVADO AO FISCO									
Cod.	Descrição da Operação	Mês	Quant.	Quant.	Unid.	Tarifa com	Valor Total	Base Cálculo	A
115	Nº 905004058372	Ref.	Registrada	Faturada	Med.	Tributos R\$	Operação R\$	ICMS R\$	ICI
0605	Consumo Ponta [KWh] - TUSD	JUN/23	1.041,654	1.041,654	kWh	1,62487705	1.692,56	1.692,56	1
0605	Consumo Fora Ponta [KWh]-TUSD	JUN/23	21.109,481	21.109,481	kWh	0,14096083	2.975,61	2.975,61	1
0601	Cons Ponta - TE	JUN/23	1.041,654	1.041,654	kWh	0,61762340	643,35	643,35	1
0601	Cons FPonta TE	JUN/23	21.109,481	21.109,481	kWh	0,38599764	8.148,21	8.148,21	1
0601	Consumo Reativo Exc Fora Ponta	JUN/23	11,195	11,195	KVr	0,40733579	4,56	4,56	1
0602	Demanda [kW] - TUSD	JUN/23	126,608	126,608	KW	21,25442311	2.690,98	2.690,98	1
0602	Demanda [kW] - TUSD	JUN/23		5,392	KW	17,42767063	93,97		
Subtotal							16.249,24		

Fonte: CPFL Energia (2023).

Após a análise das duas contas de energia que foram posteriores a instalação, percebeu-se que a conta relativa ao mês de maio ainda constava uma cobrança significativa de excedente de energia reativa, isso se deve porque a instalação foi feita no fim do mês, logo, não houve tempo para uma diminuição significativa do excedente. Na leitura do mês de junho, pode-se verificar uma diminuição muito significativa, em que o consumo de energia reativa excedente na ponta foi zerado e o consumo de energia reativa excedente fora de ponta foi diminuída em aproximadamente 99,4% em relação ao mês de maio e aproximadamente 99,5% em relação ao mês de junho do ano anterior.

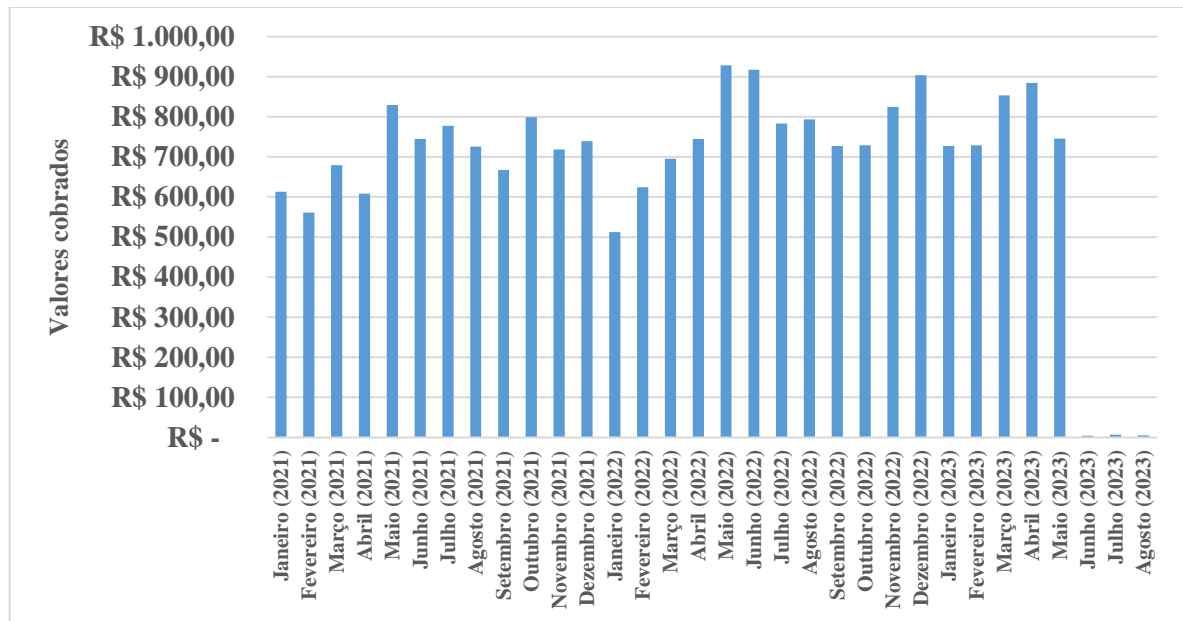
Os valores dos excedentes de energia reativa (ponta e fora de ponta) cobrados de janeiro de 2021 e agosto de 2023 podem ser observados nas Figuras 67 e 68.

Figura 67: Custos de excedente de energia reativa (ponta jan/21– ago/23)



Fonte: Próprio autor.

Figura 68: Custos de excedente de energia reativa (fora de ponta jan/21 – ago/23)



Fonte: Próprio autor.

Os custos dos itens e serviços utilizados neste projeto podem ser observados na Tabela

7.

Tabela 7: Custos do projeto.

Descrição de gastos	Valores
01 Caixa Metálica 1400/800	R\$ 11.200,00
01 Jogo Barramento Trifásico	
01 Controlador fator de potência ref. PF W03 – M08	
01 Disjuntor tripolar caixa moldada 125A	
04 Disjuntor tripolar DIN 32A	
01 Disjuntor tripolar DIN 40A	
01 Disjuntor tripolar DIN 10A	
06 Contatores p/capacitores Marca Weg 220V	
06 Células capacitivas trifásica // 1x2,5 // 4x05 // 1x7	
Miscelâneas diversas (trilho, parafusos, cabos, terminais, etiquetas identificação, canaletas, etc.)	
Mão de obra	R\$ 6.800,00
Estudo / Projeto Elétrico	R\$ 3.280,00
TOTAL	R\$ 21.280,00

Fonte: Próprio autor.

Analisando todos os dados após a instalação, pode-se verificar que os resultados esperados foram obtidos. O prazo de retorno do investimento do projeto também deve ser de acordo com o esperado.

5. CONCLUSÕES

Neste projeto, a escolha de um banco automático tornou a correção ainda mais precisa. Isso ocorre porque a possibilidade de se acionar a quantidade de energia reativa necessária para o momento calculado reduz o desgaste das células capacitivas. Além desse ponto, o banco automático traz comodidade para a equipe da base de operações, pois não é necessário ligar e desligar as células capacitivas de forma manual (como era feito antes da instalação do banco automático), em que havia a possibilidade do esquecimento do acionamento no início do dia (causando a cobrança de energia reativa indutiva excedente) ou mesmo esquecendo de desativar o banco ao final do dia (causando a cobrança de energia reativa capacitiva excedente).

Apesar do método escolhido para este projeto ter um custo mais elevado quando comparado a um banco de capacitores fixos ou mesmo a uma mudança de rotina operacional da unidade, esses outros dois métodos não possuem a precisão que um controlador do fator de potência possui, ainda assim, esses métodos podem ser viáveis em unidades consumidoras com um consumo de energia mais constante, mas ainda é necessária uma análise de custo e conveniência para determinar qual seria a melhor opção.

Verificou-se que a instalação do banco de capacitores automático pode resultar em um investimento muito positivo, pois após o tempo do retorno de investimento, o banco de capacitores começaria a gerar uma economia na conta de energia da base de operações enquanto estiver em operação.

Este projeto também pode ser aplicado em outras unidades consumidoras do Grupo A (unidades que são cobradas pelo consumo de energia reativa excedente), visto que a instalação de um banco automático prove uma flexibilidade, corrigindo o fator de potência em unidades com um consumo de energia bem variável, seja sazonal ou diário, pois o cálculo de energia reativa excedente é feito de forma constante.

Após todo o processo de verificação da viabilidade financeira do projeto, cálculos, instalação e verificação da eficácia, conclui-se que a correção do fator de potência utilizando o método da instalação de um banco de capacitores automático é bastante eficaz. Também se conclui que o projeto atingiu seus objetivos, fazendo com que a diminuição do valor cobrado por excedente de energia reativa chegue a aproximadamente 99%, demonstrando as mudanças após a instalação, além disso, adquiriu-se conhecimento a respeito de fator de potência e métodos de corrigi-lo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKAGI, Hirofumi; WATANABE, Edson Hirokazu; AREDES, Mauricio. Instantaneous power theory and applications to power conditioning. Editora: John Wiley & Sons, 2017.

CIDADE-BRASIL. Município de São José do Rio Preto. Disponível em: <<https://www.cidade-brasil.com.br/municipio-sao-jose-do-rio-preto.html>>. Acesso em: 23 de mai. 2023.

EMANUELLI, Luís Cesar. Ressonância em Circuitos Elétricos. 25 de janeiro de 2018. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=8kT_ZEVSQO0&t=326s>. Acesso em: 25 de jan. 2023.

GUIMARÃES, Pablo. O que são Harmônicas em Instalações Elétricas. 28 de abril de 2021. Disponível em: <<https://www.pabloguimaraes-professor.com.br/post/o-que-sao-harmonic-as-em-instalacoes-eletricas>>. Acesso em: 23 de jan. 2023.

HAFNER, Angelo. Indutor de Dessintonia Para Correção do Fator de Deslocamento na Presença de Harmônicos. 10 de fevereiro de 2020. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=HxIfPWzNcUM&ab_channel=AngeloHafner>. Acesso em: 26 de jan. 2023.

IEEE Guide for the Application of Shunt Power Capacitors, in *IEEE Std 1036-2010 (Revision of IEEE Std 1036-1992)*, vol., no., pp.1-88, 17 Jan. 2011.

JOHNSON, David E; HILBURN, John L; JOHNSON, Jhonny R. Fundamentos de análise de circuitos elétricos. Tradução de Onofre de Andrade Martins e Marco Antonio Moreira de Santis. Rio de Janeiro: Editora Prentice-Hall do Brasil LTDA, 1993.

LIMA, Júlio Cesar Marques. Aspectos de Proteção e Controle do Gerador Síncrono Subexcitado. 2002. Dissertação de Mestrado – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

LOPES, Guilherme. Circuitos Elétricos II – RESSONÂNCIA PARALELO – PARTE 1. 22 de abril de 2021. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=lhhuYP6Cm6Q>>. Acesso em: 25 de jan. 2023.

LUCAS, Felipe Richter. Correção do Fator de Potência de cargas industriais. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

MAMEDE, João Filho. Instalações elétricas industriais. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2017.

MERLIN, Victor Luiz. Generalidades sobre a correção do fator de potência. 24 de maio de 2022. Disponível em: <<https://www.engenheirosassociados.com.br/generalidades-sobre-correcao-do-fator-de-potencia/>>. Acesso em: 19 de jan. de 2023.

MOURA, Ailson P. de; MOURA, Adriano Aron F. de; ROCHA, Ednardo P. da. Análise de circuitos em corrente alternada para sistemas de potência. Editora Artliber, 2018.

PAZINATTO, Marcel Trombetta. OLIVEIRA, William Cambuhi de. Qualidade de Energia: As Distorções Harmônicas nas instalações com inversores fotovoltaicos. 08 de janeiro de 2021. Disponível em: <<https://celulaenergia.com/qualidade-de-energia-as-distorcoes-harmonicass-nas-instalacoes-com-inversores-fotovoltaicos/>>. Acesso em: 24 de jan. 2023.

PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) – Módulo 8 – Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica, 2017. Disponível em: <https://antigo.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo8_Revisao_8/9c78cfab-a7d7-4066-b6ba-cfbda3058d19>. Acesso em: 25 de jan. 2023.

ALEXANDER, C.; K; SADIKU, Matthew N. O. Fundamentos de Circuitos Elétricos. 5ª. Edição. Porto Alegre: Editora AMGH, 2013.

SANTANA, Eudemario de Souza. Os bancos capacitivos trifásicos devem ser conectados em estrela ou em triângulo? 27 de outubro de 2022. Disponível em: <<https://www.eudemario.com.br/post/os-bancos-capacitivos-trif%C3%AAsicos-devem-ser-conectados-em-estrela-ou-em-tri%C3%A2ngulo>>. Acesso em: 20 mai. 2023.

SIEMENS. Foto recortada de Manual do Controlador de Fator de Potência BR6000.2017. 1 fotografia. 180x182 pixels. Disponível em: <https://cache.industry.siemens.com/dl/files/207/109760207/att_960528/v1/Programao_BR6000.pdf>. Acesso em: 23 mai. 2023.

TAMIETTI, Ricardo Prado. Compensação reativa e a correção do fator de potência – Uma visão da engenharia de projetos. Belo Horizonte: Engeweb, 2007.

TEIXEIRA, Douglas Ângelo. Análise das Distorções Harmônicas – Estudos de Caso de um Sistema Industrial. 2009. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

VASCONCELOS, Filipe Matos de. Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A, 2017.

VIANA, Augusto; BORTONO, Edson; NOGUEIRA, Fábio; HADDAD, Jamil; NOGUEIRA, Luiz; VENTURINI, Osvaldo, YAMACHITA, Roberto. Eficiência Energética: Fundamentos e aplicações. Campinas, 2012.

ANEXO 1–FATORES PARA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA.

Fator de potência original (Fp ₁)	Fator de potência corrigido - Fp ₂											
	0,85	0,86	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96
0,50	1,11	1,14	1,16	1,19	1,22	1,25	1,27	1,30	1,33	1,37	1,40	1,43
0,51	1,07	1,09	1,12	1,14	1,17	1,20	1,23	1,26	1,29	1,32	1,36	1,39
0,52	1,02	1,05	1,07	1,10	1,13	1,16	1,19	1,22	1,25	1,28	1,31	1,34
0,53	0,98	1,03	1,03	1,06	1,08	1,11	1,14	1,17	1,20	1,23	1,27	1,30
0,54	0,94	0,96	0,99	1,02	1,04	1,07	1,10	1,13	1,16	1,19	1,23	1,26
0,55	0,89	0,92	0,95	0,98	1,00	1,03	1,06	1,09	1,12	1,15	1,19	1,22
0,56	0,86	0,89	0,91	0,94	0,96	0,99	1,02	1,05	1,08	1,12	1,15	1,18
0,57	0,82	0,85	0,87	0,90	0,92	0,96	0,98	1,01	1,05	1,08	1,11	1,14
0,58	0,78	0,81	0,84	0,86	0,89	0,92	0,95	0,98	1,01	1,04	1,07	1,10
0,59	0,75	0,77	0,80	0,83	0,85	0,88	0,91	0,94	0,97	1,00	1,04	1,07
0,60	0,71	0,74	0,76	0,79	0,82	0,85	0,88	0,91	0,94	0,97	1,00	1,03

0,61	0,68	0,70	0,73	0,74	0,78	0,81	0,84	0,87	0,90	0,93	0,97	1,
0,62	0,64	0,67	0,70	0,72	0,75	0,78	0,81	0,84	0,87	0,90	0,93	0,
0,63	0,61	0,64	0,66	0,69	0,72	0,75	0,77	0,81	0,84	0,87	0,90	0,
0,64	0,58	0,61	0,63	0,66	0,68	0,72	0,74	0,77	0,80	0,84	0,87	0,
0,65	0,55	0,57	0,60	0,63	0,65	0,68	0,71	0,74	0,77	0,80	0,84	0,
0,66	0,52	0,54	0,57	0,60	0,62	0,65	0,68	0,71	0,74	0,77	0,81	0,
0,67	0,49	0,51	0,54	0,57	0,60	0,62	0,65	0,68	0,71	0,74	0,78	0,
0,68	0,46	0,48	0,51	0,54	0,56	0,59	0,62	0,65	0,68	0,71	0,75	0,
0,69	0,43	0,45	0,48	0,51	0,53	0,56	0,59	0,62	0,65	0,68	0,72	0,
0,70	0,40	0,43	0,45	0,48	0,51	0,53	0,56	0,59	0,62	0,66	0,69	0,
0,71	0,37	0,40	0,42	0,45	0,48	0,51	0,53	0,56	0,60	0,63	0,66	0,
0,72	0,34	0,37	0,40	0,42	0,45	0,48	0,54	0,54	0,57	0,60	0,63	0,
0,73	0,31	0,34	0,37	0,39	0,42	0,45	0,48	0,51	0,54	0,57	0,60	0,
0,74	0,30	0,31	0,34	0,37	0,40	0,42	0,45	0,48	0,51	0,54	0,58	0,
0,75	0,26	0,29	0,31	0,34	0,37	0,40	0,42	0,45	0,48	0,52	0,55	0,
0,76	0,23	0,26	0,29	0,31	0,34	0,37	0,40	0,43	0,46	0,50	0,52	0,
0,77	0,21	0,23	0,26	0,29	0,31	0,34	0,37	0,40	0,43	0,46	0,50	0,
0,78	0,18	0,21	0,23	0,26	0,29	0,32	0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,

0,97	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,98	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,99	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

FONTE: MAMEDE, 2017.