

**INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
Goiano

**METODOLOGIA APIM PARA CORREÇÃO DO FATOR
DE POTÊNCIA EM SISTEMAS INDUSTRIAIS DE
BAIXA TENSÃO UTILIZANDO
BANCOS DE CAPACITORES**

Amanda Duarte Carvalho
Ana Karla Gomes Pereira
Weverton Pedro Coelho Oliveira

Instituto Federal Goiano
Campus Trindade
21 de janeiro de 2024

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO

PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS

NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- | | |
|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Tese (doutorado) | <input type="checkbox"/> Artigo científico |
| <input type="checkbox"/> Dissertação (mestrado) | <input type="checkbox"/> Capítulo de livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia (especialização) | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input checked="" type="checkbox"/> TCC (graduação) | <input type="checkbox"/> Trabalho apresentado em evento |

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Amanda D. Carvalho, Ana Karla G. Pereira e Weverton P. C. Oliveira

Matrícula:

[2019108202640] 052, 354 e 141

Título do trabalho:

Metodologia APIM para Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais de Baixa Tensão utilizando Bancos de Capacitores.

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 30 /01 /2024

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Trindade

Local

30 /01 /2024

Data

Amanda D. Carvalho Ana Karla G. Pereira Weverton

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)

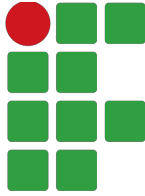
gov.br

Documento assinado digitalmente

JOSE ALBERTO GOBBES CARARO

Data: 15/01/2024 15:36:01-0300

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



**INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
Goiano

**METODOLOGIA APIM PARA CORREÇÃO DO FATOR
DE POTÊNCIA EM SISTEMAS INDUSTRIAIS DE
BAIXA TENSÃO UTILIZANDO
BANCOS DE CAPACITORES**

Amanda Duarte Carvalho
Ana Karla Gomes Pereira
Weverton Pedro Coelho Oliveira

Trabalho de Conclusão do Curso
de Graduação em Engenharia Elé-
trica, orientada pelo Me. José Al-
berto Gobbes Cararo.

Instituto Federal Goiano
Campus Trindade
21 de janeiro de 2024

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

CC331m Carvalho; Pereira; Oliveira, Amanda Duarte; Ana
Karla Gomes; Weverton Pedro Coelho
Metodologia APIM para Correção do Fator de
Potência em Sistemas Industriais de Baixa Tensão
utilizando Bancos de Capacitores / Amanda Duarte;
Ana Karla Gomes; Weverton Pedro Coelho Carvalho;
Pereira; Oliveira; orientador José Alberto Gobbes
Cararo. -- Trindade, 2023.
144 p.

TCC (Graduação em Engenharia Elétrica) --
Instituto Federal Goiano, Campus Trindade, 2023.

1. Eficiência Energética. 2. Fator de Potência.
3. Bancos de Capacitores. 4. Metodologia APIM. I.
Cararo, José Alberto Gobbes, orient. II. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 120/2023 - CE-TRI/GE-TRI/CMPTRI/IFGOIANO

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Ao(s) 19 dia(s) do mês de dezembro de 2023, às 19 horas, reuniu-se a banca examinadora composta pelos docentes: José Alberto Gobbes Cararo (orientador), Cleber Asmar Ganzaroli (membro), Rodrigo Rodrigues da Cunha Paiva (membro), para examinar o Trabalho de Curso intitulado “Metodologia APIM para Correção do Fator de Potência em Sistemas Industriais de Baixa Tensão utilizando Bancos de Capacitores” do(a) estudante Amanda Duarte Carvalho, Matrícula nº 2019108202640052, do(a) estudante Ana Karla Gomes Pereira, Matrícula nº 2019108202640354 e do(a) estudante Weverton Pedro Coelho Oliveira, Matrícula nº 2019108202640141 do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do IF Goiano – Campus Trindade. A palavra foi concedida aos estudantes para a apresentação oral do TC, houve arguição dos candidatos pelos membros da banca examinadora. Após tal etapa, a banca examinadora decidiu pela APROVAÇÃO dos estudantes. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que segue assinada pelos membros da Banca Examinadora.

(Assinado Eletronicamente)

José Alberto Gobbes Cararo

Orientador(a)

(Assinado Eletronicamente)

Cleber Asmar Ganzaroli

Membro

(Assinado Eletronicamente)

Rodrigo Rodrigues da Cunha Paiva

Membro

Documento assinado eletronicamente por:

- Cleber Asmar Ganzaroli, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 22/12/2023 10:53:51.
- Rodrigo Rodrigues da Cunha Paiva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 20/12/2023 21:33:00.
- Jose Alberto Gobbes Cararo, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 20/12/2023 17:54:47.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 19/12/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 559763

Código de Autenticação: 3d149b2d1c



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Trindade

Av. Wilton Monteiro da Rocha, S/N, Setor Cristina II, TRINDADE / GO, CEP 75380-000

(62) 3506-8000

“Feliz aquele que encontrou a Sabedoria, e que alcançou grande prudência.”

PROVÉRBIOS, 3:13

AGRADECIMENTOS

Amanda Duarte

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder a energia necessária para concluir esta etapa da minha vida. Sua infinita graça me iluminou e me concedeu força para superar cada desafio desta jornada.

Agradeço a minha mãe, Gisele Duarte, pelo amor e suporte que foram fundamentais para a realização deste sonho. Seu amor incondicional, apoio incansável e sabedoria foram luz no meu caminho.

Ao meu noivo e parceiro de vida, Weverton Pedro, agradeço por compartilhar cada um dos meus sonhos e projetos. Sua presença foi essencial em cada etapa desta jornada, tornando todos os momentos únicos e especiais.

À minha irmã e sobrinha, Nathalia Duarte e Sophia Emanuely, meu especial agradecimento por serem minha fonte constante de encorajamento. Vocês são a representação de amor e alegria em minha vida.

Por fim, a todos os amigos e familiares que estiveram ao meu lado, meu sincero agradecimento por fazerem parte da minha jornada.

Ana Karla

Agradeço primeiramente a Deus pela oportunidade de alcançar este marco em minha vida, por sempre me conceder saúde e disposição para chegar até aqui. Sua presença e constante amparo foram fundamentais para minha jornada, sendo a fonte inesgotável de esperança que iluminou meus caminhos até este momento de conquista.

Minha gratidão se estende à minha família, meu alicerce seguro. À minha avó, Divina, que sempre dedicou cuidado a mim em cada detalhe, e à minha mãe, Ana Paula, cujo apoio constante foi meu sustento. Agradeço a toda a minha família, no qual o apoio foi vital para alcançar este momento tão significativo.

Ao meu noivo, Pedro Otávio, expresso minha profunda gratidão. Seu constante incentivo, confiança em meu potencial e papel inspirador foram essenciais para minha jornada. Agradeço por ser uma fonte constante de inspiração e por seu acolhimento nos momentos em que mais precisei.

Ao Instituto Federal Goiano, Campus Trindade, minha sincera gratidão pela opor-

tunidade de cursar o bacharelado em engenharia elétrica. Aos professores, agradeço por sua presença marcante quando necessária e pelo apoio ao longo de toda essa jornada.

Por último, expresso meu reconhecimento a todos que contribuíram para minha formação de alguma forma. Aos colegas de trabalho, agradeço pelas vivências adquiridas, e a todos que, de alguma forma, estiveram presentes neste processo de aprendizado e crescimento. A cada um de vocês, meu sincero obrigado por fazerem parte desta trajetória que culmina nesta conquista acadêmica, resultando na realização de uma conclusão acadêmica de nível superior.

Weverton Pedro

Primeiramente, expresso minha gratidão a Deus, fonte de sabedoria e força, por iluminar meu caminho neste percurso desafiador e gratificante.

Um agradecimento carinhoso à minha família, em especial a minha mãe Maria Lucivane Oliveira, pelo amor incondicional, apoio e por sempre acreditar em mim, mesmo nos momentos mais desafiadores.

A minha noiva, Amanda Duarte Carvalho, por estar ao meu lado em cada passo deste caminho. Sua parceria, amor e apoio não apenas enriqueceram este trabalho, mas também tornaram toda a jornada mais agradável e transformadora.

Ao nosso orientador José Alberto Gobbes Cararo, pela paciência, sabedoria e incentivo. Seu apoio e orientação foram cruciais para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Instituto Federal Goiano - Campus Trindade, pela oportunidade de crescimento e aprendizado, e a todos os professores que contribuíram para minha formação, meu sincero obrigado.

Agradeço aos meus colegas de curso, pela troca de conhecimentos, experiências e pelos momentos de companheirismo que tornaram esta jornada ainda mais enriquecedora.

E, por fim, a todos que direta ou indiretamente fizeram parte desta jornada, meu sincero agradecimento.

RESUMO

Este trabalho investiga a correção do fator de potência no setor industrial, com foco na aplicação dos bancos de capacitores para aprimorar a eficiência energética e a qualidade da energia elétrica. Observa-se carência de metodologias simplificadas e atualizadas na literatura para a implementação deste tipo de solução. Desta forma, o objetivo deste estudo é desenvolver a metodologia descritiva para a Análise, Projeto, Instalação e Manutenção (APIM) de bancos de capacitores em sistemas elétricos industriais de baixa tensão, visando orientar de maneira eficaz a aplicação prática destes sistemas. A abordagem metodológica baseia-se na revisão bibliográfica, abrangendo publicações técnicas e consultas aos especialistas do setor. O resultado é o guia sequencial e didático para a implementação dos bancos de capacitores, sendo ferramenta educativa e prática para estudantes e profissionais do setor elétrico envolvidos na correção do fator de potência.

Palavras-chave: Eficiência Energética; Fator de Potência; Bancos de Capacitores; Metodologia APIM.

APIM METHODOLOGY FOR POWER FACTOR CORRECTION IN LOW VOLTAGE INDUSTRIAL SYSTEMS USING CAPACITOR BANKS

ABSTRACT

This work investigates power factor correction in the industrial sector, focusing on the application of capacitor banks to improve energy efficiency and the quality of electrical energy. There is a lack of simplified and updated methodologies in the literature for implementing this type of solution. Therefore, the objective of this study is to develop a descriptive methodology for the Analysis, Project, Installation and Maintenance (APIM) of capacitor banks in low voltage industrial electrical systems, aiming to effectively guide the practical application of these systems. The methodological approach is based on a bibliographical review, covering technical publications and consultations with sector experts. The result is the sequential and didactic guide for the implementation of capacitor banks, being an educational and practical tool for students and professionals in the electrical sector involved in power factor correction.

Keywords: Energy Efficiency. Power Factor. Capacitor Banks. APIM Methodology.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 Matriz de consumo interno de energia elétrica em 2022.	6
2.2 Matriz de consumo de energia na indústria.	7
2.3 Pesquisa de equipamentos e hábitos de uso no setor industrial.	7
3.1 Triângulo das potências.	13
3.2 Representações vetoriais das potências ativa e reativa como: (a) receptor de energia reativa e (b) fornecedor de energia reativa.	14
3.3 Tetraedro das potências.	15
3.4 Componentes harmônicos de 3°, 5° e 7° ordem.	17
3.5 Sinal resultante a partir do somatório dos harmônicos de 3°, 5° e 7° ordem.	17
3.6 Variação das perdas em condutores em função do FP.	20
3.7 Critérios horários do fator de potência segundo a ANEEL nº1000.	24
4.1 Símbolo gráfico do capacitor.	27
4.2 Capacitores ligados em série.	30
4.3 Capacitores ligados em paralelo.	30
4.4 Conexão delta.	31
4.5 Conexão estrela-isolada.	32
4.6 Conexão estrela-aterrada.	32
4.7 Conexão dupla estrela-isolada.	32
4.8 Conexão dupla estrela-aterrada.	33
4.9 Alternativas para localização de capacitores.	34
5.1 Fluxograma de construção da metodologia.	37
5.2 Fluxograma das etapas do método APIM.	38
5.3 Fluxograma das subetapas da Metodologia APIM.	40
5.4 Contator com resistor pré-carga incorporado.	58
6.1 Construção física do painel: (a) vista frontal externa e (b) vista frontal do controlador de fator de potência.	87
6.2 Construção física do painel: (a) vista frontal interna do painel e (b) vista interna da porta do painel.	88
6.3 Ensaio de tensão aplicada: (a) execução do ensaio e (b) equipamentos para ensaio.	90
B.1 Exemplo de diagrama unifilar para banco de capacitores.	101
B.2 Exemplo de diagrama de comando.	102

B.3	Exemplo de diagrama de força.	103
B.4	Diagrama construtivo: vista frontal externa do painel.	104
B.5	Diagrama construtivo: vista isométrica do painel.	105
C.1	Diagrama unifilar do projeto.	107
C.2	Diagrama de comando do projeto - Controlador de Fator de Potência. . .	108
C.3	Diagrama de comando do projeto.	109
C.4	Diagrama do circuito auxiliar.	110
C.5	Diagrama de força do projeto.	111
C.6	Diagrama construtivo: vista frontal externa do painel.	112
C.7	Diagrama construtivo: vista isométrica do painel.	113

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
3.1	Variação da potência do trafo em função do fator de potência. 21
3.2	Módulos e suas respectivas abordagens. 24
5.1	Especificações de capacitância do modelo. 54
5.2	Espaço reserva para painéis. 65
6.1	Caso 1: histórico do consumo de energia elétrica. 79
6.2	Caso 01: lançamentos da fatura em agosto/23. 80
6.3	Caso 02: histórico do consumo de energia elétrica. 80
6.4	Caso 02: lançamentos da fatura em outubro/23. 81
6.5	Caso 03: histórico do consumo de energia elétrica. 81
6.6	Caso 03: lançamentos da fatura em agosto/23. 82
6.7	Caso 01: fator de potência médio mensal. 83
6.8	Caso 02: fator de potência médio mensal. 83
6.9	Caso 03: fator de potência médio mensal. 83
6.10	Dimensionamento dos disjuntores. 85
6.11	Lista de materiais. 86
6.12	Resultados das verificações. 89
6.13	Resistências de isolação. 89
6.14	Resultados dos testes. 89
A.1	Fatores de multiplicação - parte I. 97
A.2	Fatores de multiplicação - parte II. 98
A.3	Fatores de multiplicação - parte III. 99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

5W2H	–	<i>What, Why, Where, When, Who, How, How Much</i>
5S	–	<i>Seiri, Seiton, Seiso, Seiketsu, Shitsuke</i>
AC	–	Corrente Alternada
ANEEL	–	Agência Nacional de Energia Elétrica
APIM	–	Análise, Projeto, Instalação, Manutenção
AP	–	Aprovado
BC	–	Banco(s) de Capacitores
BEN	–	Balanço Energético Nacional
CFP	–	Controlador de Fator de Potência
CREA	–	Conselho Regional de Engenharia e Agronomia
DNAEE	–	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
DMCR	–	Demanda Máxima Corrigida Registrada
ENADE	–	Exame Nacional de Desempenho dos Estudantes
EPE	–	Empresa de Pesquisa Energética
FP	–	Fator de Potência
HR	–	Horário reservado
IEEE	–	Instituto de Engenheiros Elétricos e Eletrônicos
INMETRO	–	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
LP	–	Lista de Pendências
MME	–	Ministério de Minas e Energia
NA	–	Não aplicável
PDCA	–	<i>Plan, Do, Check, Act</i>
PRODIST	–	Procedimentos de Distribuição
QTD	–	Quantidade
SDAT	–	Sistema de Distribuição de Alta Tensão
SDMT	–	Sistema de Distribuição de Média Tensão
SWOT	–	<i>Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats</i>
TIR	–	Taxa Interna de Retorno
TE HR	–	Tarifa de Energia no Horário Reservado
TE FP	–	Tarifa de Energia Fora de Ponta
TE P	–	Tarifa de Energia na Ponta
VPL	–	Valor Presente Líquido
UFER	–	Unidade de Faturamento Reativo Excedente
UFER FP	–	Unidade de Faturamento Reativo Excedente Fora de Ponta
UFER HR	–	Unidade de Faturamento Reativo Excedente Horário Reservado
UFER Ponta	–	Unidade de Faturamento Reativo Excedente na Ponta
UN	–	Unidade

LISTA DE SÍMBOLOS

A	–	Área da superfície
C	–	Capacitância
C_{eq}	–	Capacitância equivalente
C_{kVArhm}	–	Consumo de energia reativa mensal
C_{kWhm}	–	Consumo de energia ativa mensal
D	–	Potência de distorção
$D_{AF(p)}$	–	Demanda de potência ativa faturável em cada posto tarifário "p"
D_{AM_T}	–	Demanda de potência ativa medida no intervalo
D_{RE}	–	Demanda de potência reativa excedente no intervalo
E_{RE}	–	Energia elétrica reativa excedente
$EEAM_T$	–	Montante de energia elétrica ativa medida em cada intervalo de uma hora
f_r	–	Fator de potência de referência
f_t	–	Fator de potência da unidade consumidora
FC_T	–	Fluxo de caixa líquido
FP	–	Fator de potência
f_R	–	Frequência de ressonância
h	–	Altitude
I	–	Corrente elétrica eficaz
I_f	–	Corrente fundamental
I_{hi}	–	Componente da corrente de ordem i
I_h	–	Corrente contendo harmônicos
i	–	Corrente instantânea
$i(t)$	–	Corrente elétrica em relação ao tempo
I_n	–	Valor eficaz da corrente do n ésimo harmônico
IR	–	Investimento realizado
I_{rms}	–	Corrente eficaz
k	–	Coefficiente de transferência de calor
L	–	Indutância
MAX	–	Função que identifica o valor máximo da equação
n	–	Números de intervalos de integralização
n_r	–	Tempo de retorno
P	–	Potência ativa
P_c	–	Potência nominal do capacitor
p	–	Posto tarifário
$p(t)$	–	Potência instantânea em relação ao tempo
$p\%$	–	Fator de dessintonia
φ	–	Defasagem angular entre tensão e corrente
φ_n	–	Ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente do n ésimo harmônico
Q	–	Potência reativa
Q_{BC}	–	Potência reativa do banco de capacitores
RF	–	Retorno financeiro
S	–	Potência aparente
S_{kVArhm}	–	Somatório total do consumo de energia reativa mensal
S_{kWhm}	–	Somatório total do consumo de energia ativa mensal

T	–	Intervalo de tempo
T_{ext}	–	Temperatura externa ao painel
T_{int}	–	Temperatura interna do painel
THD	–	Distorção total de harmônicos
t	–	Tempo
t_0	–	Tempo inicial
U	–	Tensão elétrica eficaz
u	–	Tensão instantânea
$u(t)$	–	Tensão elétrica em relação ao tempo
U_{BCN}	–	Tensão nominal do banco de capacitores
U_{cap}	–	Tensão no capacitor
U_n	–	Valor eficaz da tensão do enésimo harmônico
V_n	–	Tensão eficaz
$VENT$	–	Volume de ar mínimo
VPL	–	Valor presente líquido
VR	–	Valor residual
VR_{DRE}	–	Valor de referência das tarifas de demandas de potência
VR_{ERE}	–	Valor de referência equivalente à tarifa de energia
w	–	Frequência angular
X_c	–	Reatância capacitiva
xi	–	Fator multiplicador do sistema
Z_C	–	Impedância do capacitor
Z_f	–	Impedância do filtro
Z_L	–	Impedância do reator
Δtg	–	Fator de multiplicação
Ω	–	Resistência
$v(t_0)$	–	Tensão no tempo inicial

SUMÁRIO

Pág.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	5
2.1 Definição	5
2.2 Histórico e evolução	5
2.3 Consumo de energia elétrica no Brasil	6
2.3.1 Consumo de energia elétrica na indústria	6
2.4 Benefícios da eficiência energética	8
2.5 Eficiência energética na indústria	8
2.6 Eficiência energética e fator de potência	9
2.7 Considerações finais	9
CAPÍTULO 3 FATOR DE POTÊNCIA	11
3.1 Abordagem Inicial	11
3.2 Fator de potência e potências elétricas	11
3.3 Impacto dos harmônicos no fator de potência	16
3.4 Causas e consequências do baixo fator de potência	19
3.5 Faturamento de energia reativa excedente	21
3.6 Métodos de compensação de reativos	25
3.7 Considerações finais	26
CAPÍTULO 4 BANCOS DE CAPACITORES	27
4.1 Características gerais dos capacitores	27
4.2 Tipos de ligação dos capacitores	29
4.3 Potência nominal dos capacitores	30
4.4 Banco de capacitores e suas funcionalidades	31
4.5 Ligações do banco de capacitores	31
4.6 Tipos de bancos de capacitores	33
4.7 Localizações dos bancos de capacitores	34
4.8 Análise da influência dos harmônicos	35

4.9	Ressonância devido aos harmônicos	35
4.10	Considerações finais	36
CAPÍTULO 5 METODOLOGIA		37
5.1	Metodologia APIM	37
5.2	Resolução normativa: ANEEL N° 1000	38
5.3	Características do método	39
5.4	Etapa A - Análise	41
5.4.1	Avaliação preliminar	41
5.4.1.1	Tipo de indústria	41
5.4.1.2	Histórico das faturas de energia	42
5.4.1.3	Levantamento de cargas	43
5.4.1.4	Visita técnica ao local	44
5.4.1.5	Revisão de plantas elétricas	44
5.4.2	Identificação de peculiaridades	45
5.4.3	Medição do fator de potência	47
5.4.3.1	Determinação estimada	47
5.4.3.2	Análise do consumo	47
5.4.3.3	Analisador de energia	48
5.4.3.4	Memória de massa	49
5.4.4	Estudo de harmônicos	49
5.4.5	Avaliação financeira	50
5.4.6	Relatório de análise	52
5.5	Etapa P - Projeto	52
5.5.1	Dimensionamento do banco de capacitores	53
5.5.1.1	Células capacitivas	54
5.5.1.2	Dispositivos de proteção	55
5.5.1.3	Dispositivos de manobra	56
5.5.1.4	Condutores	56
5.5.1.5	Resistores de pré-carga e descarga	57
5.5.1.6	Proteção contra harmônicos	59
5.5.1.7	Climatização	61
5.5.2	Especificação do comando e controle	61
5.5.3	Elaboração dos diagramas elétricos	63
5.5.3.1	Diagrama unifilar	64
5.5.3.2	Diagrama trifilar	64
5.5.3.3	Diagrama construtivo	64
5.5.4	Construção física do painel	65

5.5.5	Teste de Aceitação de Fábrica	66
5.6	Etapa I - Instalação	67
5.6.1	Preparação do local	68
5.6.1.1	Avaliação do ambiente	68
5.6.1.2	Condições da localização	68
5.6.1.3	Infraestrutura existente	69
5.6.1.4	Preparação física do local	69
5.6.1.5	Segurança no local	69
5.6.1.6	Acesso e logística	69
5.6.2	Procedimentos de instalação	70
5.6.2.1	Posicionamento	70
5.6.2.2	Infraestrutura elétrica	70
5.6.3	Segurança na instalação	71
5.6.4	Integração com sistemas	72
5.6.5	Testes e comissionamento	72
5.6.5.1	Inspeção visual	72
5.6.5.2	Testes pré-energização	73
5.6.5.3	Energização do painel	73
5.6.5.4	Testes de Aceitação em Campo	74
5.6.5.5	Ressonância harmônica	75
5.6.5.6	Consequências de instalações incorretas	75
5.6.6	Relatório de instalação	76
5.7	Etapa M - Manutenção	76
5.7.1	Manutenções mensais	77
5.7.2	Manutenções semestrais	77
5.8	Considerações finais	78
 CAPÍTULO 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES		79
6.1	Cobrança de reativos na fatura	79
6.2	Medição do fator de potência médio	82
6.3	Análise de caso: aplicação da etapa P	84
6.3.1	Dimensionamento do banco de capacitores	84
6.3.2	Especificação do comando e controle	87
6.3.3	Elaboração dos diagramas elétricos	87
6.3.4	Construção física do painel	87
6.3.5	Teste de Aceitação de Fábrica	88
6.4	Implementação da Metodologia	90
6.5	Discussões	92

CAPÍTULO 7 CONCLUSÃO	95
7.1 Trabalhos Futuros	95
APÊNDICE A Fatores de multiplicação para cálculo da potência re- ativa do BC	97
APÊNDICE B Exemplos de diagramas elétricos de Bancos de Ca- pacitores	101
APÊNDICE C Estudo de Caso: Diagramas do Banco de Capacitores	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A eficiência energética tem ganhado relevância no âmbito industrial, uma vez que possibilita a redução dos custos e o aumento da qualidade da energia elétrica fornecida (POLIQUEZI, 2016). O fator de potência (FP) avalia a eficiência com que a energia elétrica é empregada no sistema, indicando a proporção da potência elétrica de dado circuito que está sendo convertida em trabalho útil. Este é expresso por valor entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo de 1, mais eficiente é o uso da energia elétrica no sistema (MAMEDE, 2017).

Neste contexto, a correção do fator de potência emerge como estratégia vital para elevar a eficiência energética. Uma das soluções viáveis para tal correção é a implantação dos bancos de capacitores (BC) (CREDER, 2016). No entanto, é imperativo que esta seja executada de maneira adequada, adotando metodologia que considere as peculiaridades de cada sistema elétrico (COGO; SIQUEIRA, 2018).

Filho et al. (1995) desenvolvem estudo a respeito dos problemas e soluções decorrentes das instalações dos bancos de capacitores. Os autores fornecem abordagem abrangente através de base teórica para o entendimento adequado do assunto e apresentam metodologia para especificação básica dos filtros harmônicos.

Veloso e Camargo (2017) investigam a viabilidade econômica do emprego dos bancos de capacitores em unidade de armazenamento de grãos localizada em Brasília, Distrito Federal, com foco na minimização dos custos operacionais advindos do consumo de energia reativa. A análise engloba avaliação minuciosa da relação custo-benefício associada à implementação dos capacitores, evidenciando o retorno financeiro promissor. Os resultados indicam significativa rentabilidade do investimento, perceptível por Valor Presente Líquido (VPL) positivo, Taxa Interna de Retorno (TIR) excedendo a taxa mínima de atratividade e período de *payback* de três anos e quatro meses, reforçando a atratividade econômica desta iniciativa no contexto da eficiência energética industrial.

Rinaldi (2018), através do estudo de caso em empresa de comércio atacadista de matérias-primas agrícolas, identificou a utilização de equipamentos inadequados no painel do banco de capacitores, resultando em danos nas células capacitivas. Como consequência, houve a necessidade de investir em manutenções corretivas para reparar os danos e assegurar o bom funcionamento do painel.

Marchi et al. (2019) abordam a concepção e a análise da viabilidade do sistema de correção de fator de potência usando bancos de capacitores em indústria têxtil. A metodologia aplicada inclui avaliações técnicas e financeiras baseadas em dados do consumo, medições elétricas e informações das faturas. Embora o sistema proposto não tenha sido implementado devido à presença de solução similar em operação, a análise demonstrou a eficácia do sistema existente, que conseguiu elevar significativamente o fator de potência da indústria.

Sousa (2019) realiza estudo detalhado sobre a qualidade de energia no BC em indústria de refrigerantes, com foco na análise das distorções harmônicas, tensões e correntes eficazes e sua conformidade com a norma IEEE std 18-2012. Utilizando o analisador de qualidade de energia, o estudo avalia tensões, correntes, distorções harmônicas totais e frequência, concluindo que todos os parâmetros estão alinhados com as diretrizes normativas. Adicionalmente, a análise do fator de potência, monitorado pela concessionária, revela conformidade com o limite estabelecido de 0,92, garantindo assim a integridade e a eficiência do banco de capacitores.

A correção do fator de potência é atividade de suma importância nos sistemas elétricos industriais, pois a eficiência energética da instalação pode ser significativamente afetada pela presença das cargas que consomem energia reativa (POLIQUEZI, 2016). Este tipo de energia, que não é empregada para realizar trabalho útil, quando em excesso, pode resultar em perdas por sobrecarga, aumento no consumo de eletricidade e, até mesmo, penalidades devido ao custo adicional que impõem ao sistema elétrico (MAMEDE, 2019).

Diante desta questão, indústrias recorrem a empresas especializadas em engenharia e automação para desenvolver soluções que visem elevar o fator de potência. Um dos métodos mais recorrentes é a implantação dos bancos de capacitores (MAMEDE, 2017). Desenvolver tais soluções exige conhecimento técnico e prático aprofundado. A falta de tais competências em empresas contratadas pode comprometer a eficácia das soluções e, em situações específicas, levar a falhas na resolução dos problemas (COTRIM, 2009) .

Neste cenário, o projeto dos bancos de capacitores pode oferecer benefícios para as empresas de engenharia e, conseqüentemente, para o ambiente industrial. Adicionalmente, o método bem estruturado pode fomentar outros estudos e pesquisas na área, contribuindo para o avanço tecnológico e o desenvolvimento sustentável do setor.

Embora existam numerosos estudos sobre a utilização dos bancos de capacitores

para correção do FP, observa-se lacunas na literatura quanto à disponibilidade de metodologia simplificada e direta para a implementação destes sistemas nos ambientes industriais. Além disso, há necessidade de revisões bibliográficas atualizadas que integrem não apenas as principais obras sobre o tema, mas também aquelas que alinham-se com as normativas vigentes, superando a limitação das referências que ainda citam regulamentações desatualizadas. Outro diferencial é a adoção de linguagem clara e acessível, fundamental para facilitar o entendimento e o aprendizado de alunos e profissionais em formação. A integração destes elementos nas futuras pesquisas enriquecerá significativamente o campo de estudo.

Desta forma, é possível estabelecer a hipótese central deste estudo: se é viável desenvolver e implementar a metodologia descritiva para a instalação dos bancos de capacitores em sistemas elétricos industriais, então espera-se que tal método contribua como guia didático, capacitando alunos e profissionais a aprofundarem seus conhecimentos sobre eficiência energética no setor industrial, auxiliando na correção do fator de potência através da implementação de bancos de capacitores. Adicionalmente, ao disseminar este conhecimento, objetiva-se auxiliar as indústrias na adoção das práticas que elevam a eficiência energética, contribuindo para o uso mais eficiente e sustentável da energia em diversas áreas.

O objetivo geral deste trabalho é elaborar a metodologia descritiva para a análise, dimensionamento, projeto, teste, instalação e manutenção de bancos de capacitores para correção do fator de potência em sistemas elétricos industriais, especificamente na parte de baixa tensão. Desta forma, os objetivos específicos são: i) realizar revisão bibliográfica sobre fator de potência, suas implicações na eficiência energética e o papel dos bancos de capacitores para a sua correção; ii) analisar o processo necessário para instalar bancos de capacitores no setor industrial em baixa tensão, a fim de alcançar o fator de potência desejado e iii) estabelecer método que possibilite guiar empresas de engenharia em serviços de correção de reativos na indústria.

Este trabalho está estruturado em 7 capítulos. Os Capítulos 2, 3 e 4 apresentam a fundamentação teórica do trabalho, onde são discutidos termos importantes para a compreensão do objeto de estudo. O Capítulo 5 apresenta a metodologia desenvolvida. O Capítulo 6 apresenta os resultados obtidos, e por fim, no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões.

CAPÍTULO 2

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Neste capítulo, é abordada a temática da eficiência energética, elemento-chave para a compreensão do objeto de estudo deste trabalho. São explorados conceitos fundamentais que delineiam a eficiência energética, incluindo definição, histórico, evolução e benefícios, proporcionando visão clara do panorama atual do consumo de energia elétrica no Brasil, com enfoque particular no setor industrial. Por fim, é discutida a interrelação entre o fator de potência e a eficiência energética, destacando a importância da gestão eficaz para otimizar o consumo de energia em ambientes industriais.

2.1 Definição

À medida que a demanda por energia elétrica se eleva globalmente, a sociedade se preocupa progressivamente com a adoção de alternativas de uso racional das diversas formas de energia (MAMEDE, 2017). De acordo com Poliquezi (2016), a eficiência energética representa a qualidade com que a energia é utilizada para atender às necessidades da sociedade. A EPE (2023) complementa esta visão, explicando que os avanços em eficiência energética são alcançados quando se consegue manter ou melhorar os serviços energéticos com o uso de menos energia, sem comprometer o conforto.

2.2 Histórico e evolução

A consciência sobre a eficiência energética ganhou destaque durante as crises energéticas dos anos 70, onde a necessidade de conservar energia e utilizar recursos de maneira eficiente tornou-se evidente. Desde então, a eficiência energética tem sido área de foco crescente tanto para governos quanto para organizações privadas (MAMEDE, 2017).

Equipamentos e hábitos de consumo passaram a ser analisados também sob o ponto de vista da conservação da energia e demonstrou-se que muitas medidas na direção de maior eficiência energética eram economicamente interessantes, ou seja, o custo de sua implantação era menor que o custo da energia cujo consumo seria evitado (Ministério de Minas e Energia – MME, 2007).

2.3 Consumo de energia elétrica no Brasil

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) disponibiliza anualmente edições do Balanço Energético Nacional (BEN), documento fundamental para atividades de planejamento e acompanhamento do setor energético brasileiro. O BEN de 2023 (ano base 2022) apresenta os segmentos que utilizam eletricidade com as participações ilustrada na Figura 2.1, adaptada de EPE (2023).

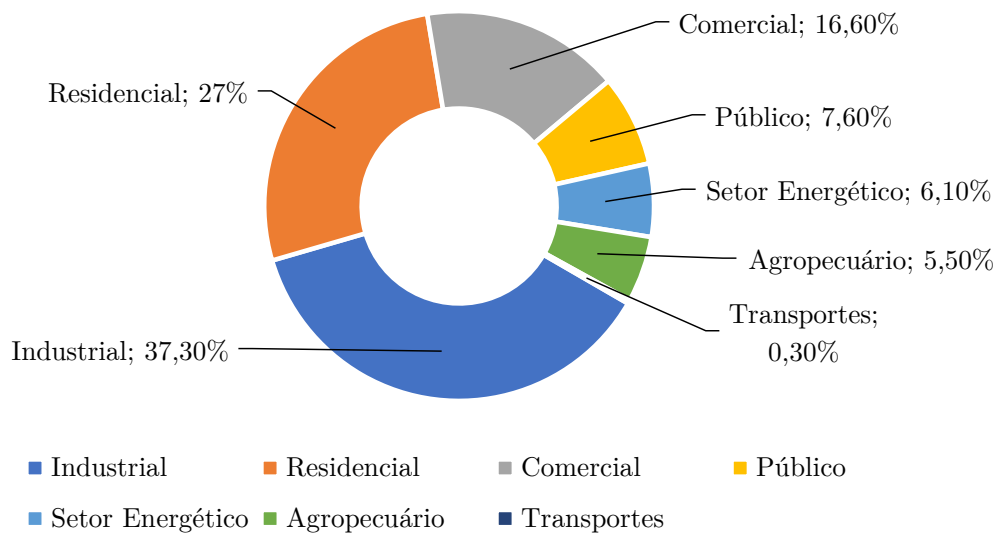


Figura 2.1 - Matriz de consumo interno de energia elétrica em 2022.

Em 2022, o setor industrial representou 37,3% do consumo total de eletricidade no país, seguido pelo setor residencial com 27% de consumo. Estes dados demonstram a relevância na busca de soluções que elevem a eficiência energética no âmbito industrial.

2.3.1 Consumo de energia elétrica na indústria

A Figura 2.2, adaptada de Barros et al. (2015), delinea a matriz de consumo de energia na indústria, destacando as diversas fontes de energia utilizadas, tais como eletricidade, bagaço de cana, gás natural, óleo combustível, carvão mineral, entre outros. A representação gráfica ajuda a compreender a distribuição do consumo entre estas fontes. A Figura 2.3, adaptada de Barros et al. (2015), ilustra como

os motores elétricos correspondem à parcela mais significativa da energia elétrica consumida pela indústria.

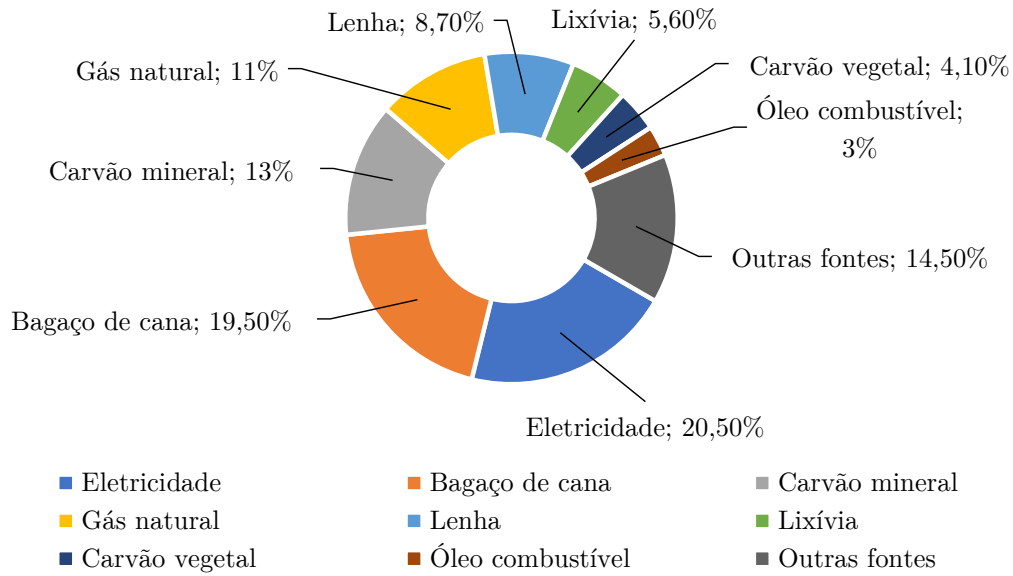


Figura 2.2 - Matriz de consumo de energia na indústria.

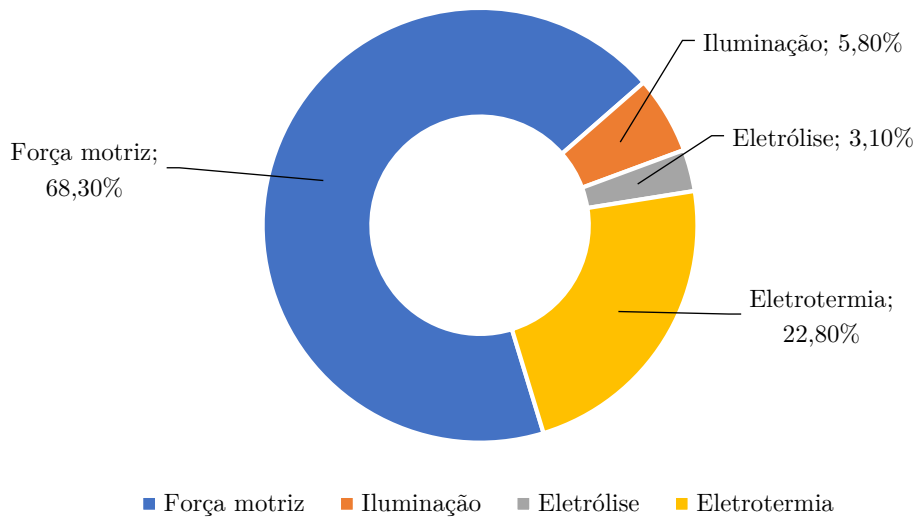


Figura 2.3 - Pesquisa de equipamentos e hábitos de uso no setor industrial.

Na indústria, a energia elétrica é majoritariamente utilizada em motores de indução trifásico, representando parte substancial do consumo elétrico. Desta forma, a diminuição do consumo energético vinculado à motores emerge como pilares centrais para promover a eficiência energética nas instalações industriais (GASPAR, 2004).

2.4 Benefícios da eficiência energética

A eficiência energética proporciona benefícios variados, incluindo economia em energia, elevação da renda familiar e da produtividade empresarial, maior robustez no setor elétrico, adiamento de investimentos em expansão, criação de empregos, diminuição das emissões dos gases de efeito estufa e poluentes locais (EPE, 2023).

A indústria mais eficiente reduz seus custos com energia, atinge ganhos de produtividade e maior competitividade, pode melhorar a qualidade dos produtos, aumentar a interação entre áreas através da gestão de energia e melhorar a imagem institucional (EPE, 2020).

Contudo, apesar das vantagens, existem obstáculos que impedem a disseminação da eficiência energética, como: i) baixa priorização de projetos de eficiência; ii) falta de conhecimento sobre o potencial e medidas; iii) escassez de informações e dados; iv) desconfiança sobre custos e benefícios das ações; v) resistência às mudanças e vi) outros (EPE, 2023).

2.5 Eficiência energética na indústria

Para conduzir o estudo de eficiência energética nas instalações industriais, é essencial interagir com os diversos tipos de cargas, com o objetivo de avaliar o potencial de desperdício. Para Mamede (2017), além das cargas, devem ser implementadas certas ações, que podem resultar na racionalização do uso de energia e na consequente economia na fatura mensal de energia elétrica. Estas ações devem ser implementadas nos seguintes segmentos de consumo: i) iluminação; ii) condutores elétricos; iii) fator de potência; iv) motores elétricos; v) consumo de água; vi) climatização; vii) ventilação natural; viii) refrigeração; ix) aquecimento de água; x) elevadores e escadas rolantes; xi) ar comprimido; xii) carregamento de transformadores; xiii) instalação elétrica; xiv) administração do consumo de energia elétrica e xv) controle de demanda.

O foco deste estudo centra-se no fator de potência, área importante para a eficiência energética na indústria. A proposta é aprofundar a compreensão sobre como a correção do fator de potência, por meio da instalação de bancos de capacitores em

sistemas industriais, pode contribuir para a otimização do consumo de energia.

2.6 Eficiência energética e fator de potência

O fator de potência (FP) é utilizado como métrica para avaliar a eficiência energética, indicando a eficácia com que a energia é convertida em trabalho no sistema elétrico (MAMEDE, 2017). A correção do fator de potência é estratégia importante para melhorar a eficiência energética. Ao otimizá-lo, é possível reduzir a demanda de energia reativa, minimizando as perdas e melhorando a eficiência da instalação (CREDER, 2016). A instalação dos bancos de capacitores é uma das técnicas comumente utilizadas para corrigir o fator de potência, compensando a energia reativa indutiva com energia reativa capacitiva (MAMEDE, 2017). A correção pode resultar em benefícios financeiros significativos. Conforme destacado por Cotrim (2009), as concessionárias de energia elétrica impõem penalidades para fatores de potência abaixo de 0,92.

2.7 Considerações finais

Neste capítulo é delineada a importância da eficiência energética no contexto industrial, destacando a evolução da consciência sobre o uso racional da energia. Aborda-se o cenário do consumo de energia elétrica no Brasil, enfatizando a relevância do setor industrial e as oportunidades para otimização energética através da gestão eficaz dos diferentes segmentos de consumo. A discussão aprofunda-se no tópico do fator de potência, apresentando a correção deste como estratégia importante para promover a eficiência energética, reduzindo custos operacionais e contribuindo para a sustentabilidade ambiental. No próximo capítulo, será aprofundada a temática sobre fator de potência.

CAPÍTULO 3

FATOR DE POTÊNCIA

Neste capítulo, são abordados temas como energia ativa, reativa, fator de potência e potência elétrica em sistemas industriais. Inicia-se destacando a presença de energia reativa em máquinas como motores e transformadores, ressaltando como cargas indutivas afetam negativamente o fator de potência. A correção do fator de potência envolve diversas estratégias, sendo uma delas a utilização dos bancos de capacitores. Exploram-se os conceitos de potência ativa, reativa e aparente, enfatizando a relação com o fator de potência e sua importância na qualidade da energia.

3.1 Abordagem Inicial

Conforme indicado por Creder (2016), equipamentos como motores de indução, transformadores de potência, reatores eletromagnéticos em lâmpadas fluorescentes e retificadores são comumente associados ao baixo fator de potência. Mamede (2017) complementa esta perspectiva, enfatizando que os equipamentos industriais são, em grande parte, consumidores parciais de energia reativa indutiva. Embora esta forma de energia não seja diretamente utilizada na realização de trabalho útil, ela é fundamental na geração dos campos magnéticos necessários para o funcionamento eficiente destes equipamentos. A presença de energia reativa indutiva é, portanto, elemento essencial para o desempenho adequado de várias máquinas e dispositivos industriais, porém, seu excesso pode levar a diversos desafios técnicos e financeiros (POLIQUEZI, 2016).

3.2 Fator de potência e potências elétricas

O sistema elétrico é organizado em quatro componentes básicas: geração, transmissão, distribuição e consumo de energia (SILVA, 2019). No aspecto do consumo, as cargas elétricas referem-se aos dispositivos e equipamentos que demandam e utilizam energia elétrica em suas operações. Em instalações alimentadas por corrente alternada, a energia elétrica consumida pela carga se divide em energia ativa e energia reativa (COTRIM, 2009).

A energia ativa e a energia reativa são conceitos essenciais na análise de sistemas elétricos. A energia ativa, conforme definido por Cotrim (2009), é a integral da potência elétrica ativa consumida em um período específico e é quantificada em kWh. Esta é a energia que realiza trabalho útil. Por outro lado, a energia reativa é específica para a excitação magnética em dispositivos indutivos, como motores e

transformadores. Ela não realiza trabalho útil, mas é essencial para o funcionamento adequado destes dispositivos.

A execução de movimentos ou a geração de calor, luz e radiação requerem a aplicação de energia. A potência, conforme definido por Creder (2016), representa a taxa de consumo ou aplicação desta energia em um dado intervalo de tempo. A equação 3.1 representa a potência instantânea (p) absorvida pela carga. Ela é quantificada em watts [W] e resulta do produto entre tensão (u) e corrente (i).

$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (3.1)$$

Em circuitos de corrente alternada, as grandezas u e i podem ser representadas conforme as equações 3.2 e 3.3, respectivamente:

$$u = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin(\omega t) \quad (3.2)$$

$$i = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\omega t - \phi) \quad (3.3)$$

em que u é a tensão instantânea, em volts [V]; i é a corrente instantânea, em amperes [A]; U é o valor eficaz da tensão elétrica, em volts [V]; I é o valor eficaz da corrente elétrica, em amperes [A]; ω é a frequência angular da tensão alternada [rad/s]; t é o tempo, em segundos [s] e ϕ é a defasagem angular entre a onda senoidal de tensão u e a onda senoidal de corrente i , em radianos [rad].

A partir de manipulações algébricas utilizando as expressões 3.2 e 3.3, obtém-se as expressões 3.4 e 3.5.

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\phi) \quad (3.4)$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin(\phi) \quad (3.5)$$

Em que a grandeza P representa a potência ativa utilizada pela carga elétrica; Q denota a potência que transita da fonte para a carga sem ser efetivamente consu-

mida. Em vez disso, esta energia é compartilhada entre os componentes indutivos e capacitivos do circuito, mantendo o valor médio nulo, apesar de ser caracterizada pelo seu pico, Q , que é a máxima potência reativa assimilada pela carga (CREDER, 2016).

O fasor da potência aparente S , em VA, pode ser expresso pela equação 3.6.

$$\dot{S} = P + jQ = S\angle\phi \quad (3.6)$$

O sistema elétrico possui três categorias fundamentais de potência: ativa, reativa e aparente. A potência aparente surge através da decomposição vetorial das potências ativa e reativa (CREDER, 2016). No circuito de corrente alternada (CA), o triângulo das potências oferece a representação gráfica precisa das três principais formas de potência mencionadas, conforme ilustrado na Figura 3.1.

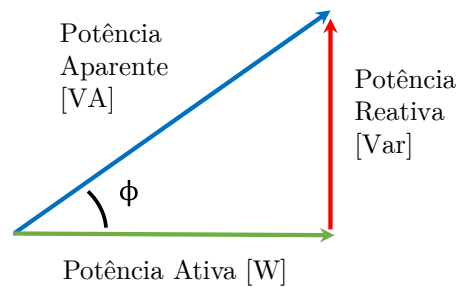


Figura 3.1 - Triângulo das potências.

Para Cotrim (2009), em circuitos de corrente alternada, a potência ativa é considerada a componente real da potência aparente, enquanto a potência reativa é vista como a componente imaginária. Adicionalmente, ao analisar o triângulo das potências, é possível obter as relações matemáticas 3.7, 3.8 e 3.9.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.7)$$

$$P = S \cdot \cos(\phi) \quad (3.8)$$

$$Q = S \cdot \sin(\phi) \quad (3.9)$$

Em termos vetoriais, é possível representar a potência reativa com o deslocamento de 90 graus em relação à potência ativa. Esta diferença de fase indica se o sistema está atrasado, atuando como um receptor de energia reativa, ou adiantado, atuando como um fornecedor de energia reativa, conforme ilustrado na Figura 3.2 (CREDER, 2016).

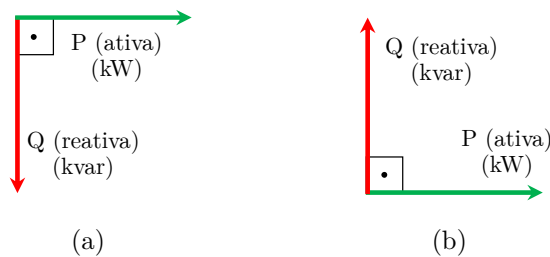


Figura 3.2 - Representações vetoriais das potências ativa e reativa como: (a) receptor de energia reativa e (b) fornecedor de energia reativa.

Com base no exposto, é possível definir o fator de potência (FP) e suas características. De acordo com Mamede (2017) e Cotrim (2009), no âmbito matemático, o fator de potência pode ser definido como a relação entre a potência ativa e a potência aparente, sendo uma grandeza adimensional. Esta relação pode ser representada pela equação 3.10.

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{S \cdot \cos(\phi)}{S} = \cos(\phi) \quad (3.10)$$

O fator de potência representa o indicador da eficácia com que a energia é utilizada. Assim, o fator de potência elevado sinaliza alta eficiência no uso da energia, enquanto o valor baixo sugere eficiência energética reduzida (WEG, 2009).

De acordo com Cotrim (2009), em contextos em que as cargas são lineares e não há componentes harmônicos, é possível decompor a potência aparente em potências ativa e reativa. No entanto, nas instalações atuais, a prevalência de cargas não lineares faz com que a representação utilizando apenas S, P e Q não seja precisa. Isto leva a corrente eficaz no circuito que excede a corrente fundamental, resultando

na potência aparente elevada.

A corrente eficaz considerando os componentes harmônicos no circuito é expressa pela equação 3.11.

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (I_{hi})^2} \quad (3.11)$$

Em que I_{rms} é a corrente eficaz e I_{hi} é a componente da corrente de ordem i .

Em circuitos com distorções causadas por harmônicos, a representação tradicional do triângulo das potências evolui para o tetraedro das potências, incorporando dimensão adicional devido a potência de distorção (D), conforme ilustra a Figura 3.3 (ISONI, 2009).

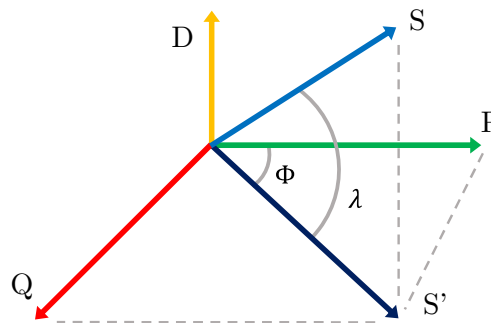


Figura 3.3 - Tetraedro das potências.

Considerando a dimensão adicional, a relação entre as variáveis passa a ser representadas de acordo com as equações 3.12 e 3.13 (COTRIM, 2009).

$$S' = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.12)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (3.13)$$

Levando em consideração a potência de distorção (D), tem-se:

$$P = S' \cos(\phi) \quad (3.14)$$

$$S = \frac{S'}{\cos(\lambda)} \quad (3.15)$$

$$FP = \frac{S' \cos(\phi)}{\frac{S'}{\cos(\lambda)}} = \cos(\phi) \cos(\lambda) \quad (3.16)$$

Quando a carga não linear é adicionada ao sistema elétrico, o fator de potência, que é originalmente determinado pelo cosseno do ângulo ϕ , sofre alteração, passando a ser o produto entre cossenos de diferentes ângulos, ϕ e λ . Como resultado desta multiplicação, o fator de potência torna-se menor do que seria no sistema puramente linear. Portanto, a presença de cargas não lineares reduz o fator de potência do sistema (COTRIM, 2009).

3.3 Impacto dos harmônicos no fator de potência

Harmônicos são componentes de onda que ocorrem em frequências que são múltiplos inteiros da frequência base, conhecida como frequência fundamental. Quando se observa corrente ou tensão com forma de onda que se desvia da forma senoidal pura, esta onda complexa pode ser decomposta em várias ondas senoidais, cada uma operando em frequência distinta (COGO; SIQUEIRA, 2018). A Figura 3.4, ilustra o gráfico que contém a onda fundamental e os componentes harmônicos isolados de 3°, 5° e 7°, adaptada de Silva e Rezende (2021).

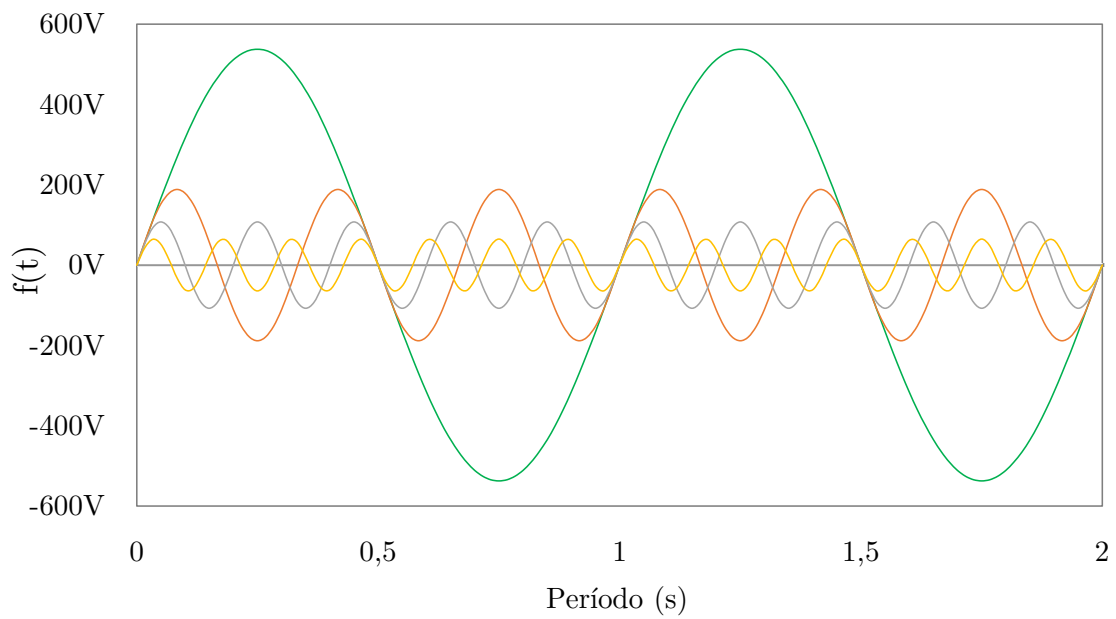


Figura 3.4 - Componentes harmônicos de 3°, 5° e 7° ordem.

Somando-se algebricamente em cada instante as ondas ilustrada na Figura 3.4 tem-se a forma de onda ilustrada na Figura 3.5, adaptada de [Silva e Rezende \(2021\)](#).

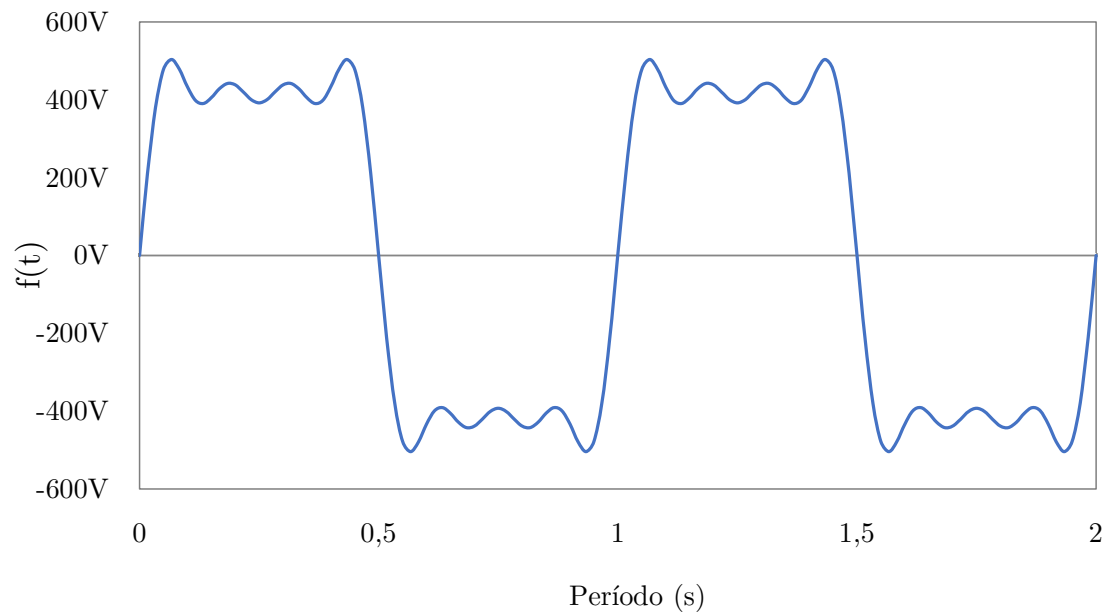


Figura 3.5 - Sinal resultante a partir do somatório dos harmônicos de 3°, 5° e 7° ordem.

Cargas não lineares possuem a característica de consumir corrente em padrão que difere da forma de onda da tensão de entrada. Estas cargas, ao serem conectadas à rede elétrica, são responsáveis pela geração de correntes distorcidas (harmônicos). Tais correntes, ao fluírem pelo sistema elétrico, atravessam as diversas impedâncias presentes na rede, como as dos transformadores e cabos. Este trânsito causa a indução de tensões que se superpõem à tensão fundamental, resultando na distorção da forma de onda da tensão de alimentação original (PROCEL, 2009).

Para Mamede (2017), os componentes harmônicos surgem na instalação através de três diferentes tipos de cargas não lineares: i) cargas operadas por arcos voltaicos; ii) cargas operadas com núcleo magnético saturado e iii) cargas operadas por fontes chaveadas. Segundo Cogo e Siqueira (2018), a presença de harmônicos de corrente na rede elétrica pode resultar em efeitos adversos, tais como: i) incremento na demanda de potência reativa levando a redução do fator de potência e intensificação das quedas de tensão na rede; ii) distorções na tensão que afetam negativamente os sistemas de alimentação das pontes conversoras; iii) ocorrência de sobretensões e sobrecargas decorrentes dos fenômenos de ressonância no sistema elétrico; iv) acréscimo das perdas e elevação do aquecimento em dispositivos como capacitores e equipamentos elétricos conectados à mesma rede de alimentação e v) geração de interferências que podem impactar o funcionamento de outros aparelhos e sistemas.

A avaliação do fator de potência, na presença de harmônicos, pode ser realizada utilizando a equação 3.17, que leva em conta tanto a medição da corrente fundamental (60 Hz) quanto os componentes harmônicos de múltiplas ordens (MAMEDE, 2017).

$$FP = \frac{I_f \cos(\phi)}{\sqrt{I_f^2 + \sum_{n=1}^N (I_{h_n})^2}} \quad (3.17)$$

Em que I_f é a corrente fundamental, valor eficaz em amperes [A], I_h são as correntes contendo harmônicos, valor eficaz em amperes [A] de diferentes ordens e N é o número de harmônicas consideradas na análise.

O fator de potência também pode ser determinado quando se conhece a distorção devido aos harmônicos da instalação, através das expressões 3.18 e 3.19.

$$FP = \frac{\cos(\phi)}{\sqrt{\left(\frac{THD}{100}\right)^2 + 1}} \quad (3.18)$$

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^N I_h^2}}{I_f} \cdot 100 \quad (3.19)$$

Em que THD corresponde a distorção total em % da componente fundamental.

As situações acima correspondem a casos em que a fonte de tensão é senoidal e as cargas são não lineares. Para locais que possuem fontes de tensão não senoidais e suprem cargas não lineares, o fator de potência é dado a partir da equação 3.20 (COGO; SIQUEIRA, 2018).

$$FP = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} (U_n \cdot I_n \cdot \cos \Phi_n)}{\sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} (U_n)^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} (I_n)^2}} \quad (3.20)$$

Em que U_n é o valor eficaz da tensão do n ésimo harmônico, I_n é o valor eficaz da corrente do n ésimo harmônico e ϕ_n é o ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente do n ésimo harmônico.

As perturbações nas ondas de tensão e corrente causadas pelos harmônicos demandam a instalação de dispositivos que atenuem tais distorções no sistema elétrico. Diversas abordagens são empregadas para mitigar estas distorções, incluindo o uso de filtros passivos, neutralização por meio de fluxo magnético, filtros ativos, incremento na quantidade de pulsos em conversores estáticos e a técnica de injeção de *ripple*. Entre as opções disponíveis, os filtros passivos são frequentemente escolhidos por sua eficácia e aplicabilidade (COGO; SIQUEIRA, 2018).

3.4 Causas e consequências do baixo fator de potência

O fator de potência subdimensionado pode surgir quando há predominância da potência reativa, levando a potência aparente significativamente elevada em comparação com a potência ativa. Tal cenário pode resultar em perdas na rede elétrica e indicar eficiência energética reduzida. WEG (2009) aponta que as principais causas do fator de potência baixo são encontradas em unidades que consomem energia de natureza indutiva.

Mamede (2017) e Cotrim (2009) apontam várias circunstâncias que podem contribuir para o fator de potência reduzido: i) motores de indução operando sem carga

ou em estado de sobrecarga; ii) transformadores funcionando sem carga ou com cargas mínimas; iii) motores dimensionados além da necessidade das máquinas a eles conectadas; iv) lâmpadas de descarga; v) tensão superior à nominal; vi) mal dimensionamento ou mal funcionamento de sistemas e vii) equipamentos eletrônicos.

Os efeitos de tais condições no sistema elétrico podem ser severos. Além das perdas de energia, outros problemas incluem quedas de tensão e subutilização da capacidade instalada (WEG, 2009). A Figura 3.6, adaptada de CODI (2004), ilustra as perdas percentuais de energia em condutores associadas a variações no fator de potência.

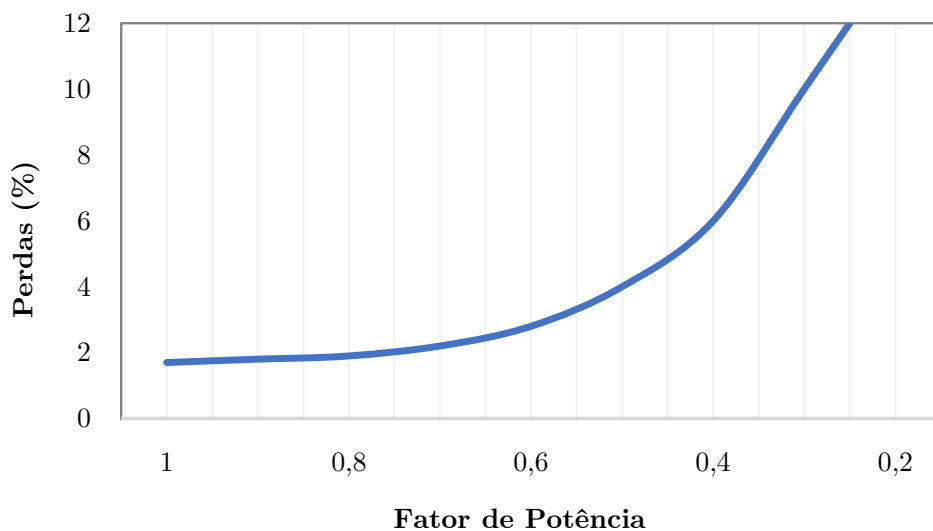


Figura 3.6 - Variação das perdas em condutores em função do FP.

A queda de tensão, gerada pelo fator de potência baixo, é influenciada pela combinação de resistência e reatância, formando a impedância nas linhas de transmissão. Este aumento de corrente pode intensificar a queda, comprometendo a operação de dispositivos conectados à rede (MARCHI et al., 2019).

Outro efeito negativo é a subutilização da capacidade instalada. Este fenômeno ocorre quando o excesso de energia reativa restringe a inclusão de novas cargas. Se o fator de potência fosse mais elevado, o espaço atualmente ocupado pela energia reativa poderia ser aproveitado para incorporar cargas adicionais (WEG, 2009). A Tabela 3.1, adaptada de (WEG, 2009), apresenta a potência total necessária para um transformador atender a uma carga útil de 800 kW, considerando diferentes valores de fator de potência crescente.

Tabela 3.1 - Variação da potência do trafo em função do fator de potência.

Potência útil absorvida – kW	Fator de Potência	Potência do Trafo - kVA
800	0,50	1.600
	0,80	1.000
	1,00	800

Na Tabela 3.1, percebe-se a ineficiência decorrente do baixo fator de potência ao se comparar as diversas potências necessárias para atender a mesma carga ativa, que varia conforme o fator de potência.

3.5 Faturamento de energia reativa excedente

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é o órgão regulador responsável por estabelecer o conjunto de regras e diretrizes que determina como os consumidores serão tarifados pela utilização de energia elétrica. De acordo com a ANEEL (2021), a estrutura tarifária é fundamentalmente dividida em grupos e subgrupos que contempla as unidades consumidoras pertencentes ao sistema elétrico.

Devido aos excessos de energia reativa no sistema elétrico, tornou-se necessário estabelecer normas e regulamentações para o consumo de energia. Assim, foi estipulado o padrão de qualidade, considerando que as cargas reativas consomem parcela significativa da capacidade do sistema elétrico, impactando sua eficiência e estabilidade.

A regulamentação do fator de potência no Brasil teve início em 1966 com o Decreto nº 59.414. Este estabeleceu padrões de 0,90 para consumidores ligados ao serviço de transmissão e 0,85 para os demais. No entanto, estas diretrizes foram posteriormente unificadas em 1968 e 1975 pelos Decretos nº 62.724 e nº 75.887, respectivamente, determinando o fator de potência padrão de 0,85 para todos os consumidores (MARCHI et al., 2019). Em 1992, a Portaria nº 85 do DNAEE (atual ANEEL) definiu o limite mínimo do fator de potência como 0,92 e estabeleceu alguns critérios para a medição e faturamento da energia elétrica (MARCHI et al., 2019).

Outra legislação importante, que perdurou bastante tempo, foi a Resolução 414 de 09/10/2010, alterada pela Resolução 569 de 23/07/2013. Esta disciplinava os limites do fator de potência, a aplicação da cobrança pelo excedente de energia reativa, os intervalos horários a serem considerados, os tipos de avaliações, entre outros critérios.

Atualmente, a legislação que vigora em relação ao faturamento de energia reativa no Brasil é a Resolução Normativa da ANEEL nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021. Para ANEEL (2022), esta nova resolução consolida as principais regras da Agência na prestação do serviço público de distribuição de energia elétrica, onde estão dispostos os direitos e deveres dos consumidores. No que se refere ao excedente reativo, esta estabelece as diretrizes claras sobre o gerenciamento e a cobrança do fator de potência e do consumo de energia reativa para diferentes grupos de consumidores. De acordo com esta regulamentação, o valor mínimo para o fator de potência de referência continua sendo 0,92, tanto para condições indutivas quanto capacitivas, aplicável especificamente aos consumidores do grupo A (ANEEL, 2022).

A norma assegura que os consumidores do grupo B, que tipicamente são de menor porte e cuja medição do fator de potência não é obrigatória, não sejam sobrecarregados com cobranças por consumo excessivo de energia reativa. Isto protege consumidores menores de custos adicionais não previstos.

Por outro lado, os consumidores do grupo A estão sujeitos à cobrança de energia reativa e demanda de potência reativa excedentes. A ANEEL (2021) define as condições sob as quais estas cobranças são aplicadas e estipula as equações específicas para o cálculo destes valores excedentes. Mesmo as unidades consumidoras do grupo A que são faturadas com tarifas do grupo B devem atender a estes requisitos e estão sujeitas às mesmas regras de cobrança por excesso de reativo. As expressões 3.21 e 3.22 determinam como é calculada o montante de energia reativa excedente:

$$E_{RE} = \sum_{T=1}^n \left[EEAM_T \left(\frac{f_R}{f_T} - 1 \right) \right] VR_{ERE} \quad (3.21)$$

$$D_{RE}(p) = \left[\max_{T=1}^n \left(DAM_T \cdot \frac{f_R}{f_T} \right) - DAF(p) \right] VR_{DRE} \quad (3.22)$$

em que E_{RE} é o 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\$]; $EEAM_T$ é o montante de energia elétrica ativa medida em cada intervalo [T] de uma hora, durante o período de faturamento, em megawatt-hora [MWh]; f_R é o fator de potência de referência igual a 0,92; f_T é o fator de potência da unidade consumidora, calculado em cada intervalo [T] de uma hora, durante o período de faturamento; VR_{ERE} é o valor de referência equivalente à tarifa de energia [TE] da bandeira verde aplicável ao subgrupo B1, em reais por megawatt-hora

[R\$/MWh]; $D_{RE}(p)$ é o 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 é a demanda de potência ativa medida no intervalo de integralização de uma hora [T], durante o período de faturamento, em quilowatt [kW]; $DAF(p)$ é a demanda de potência ativa faturável, em cada posto tarifário [p] no período de faturamento, em quilowatt [kW]; VR_{DRE} é o 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 é a função que identifica o valor máximo da equação, dentro dos parênteses correspondentes, em cada posto tarifário [p]; T é o intervalo de uma hora, no período de faturamento; p é o posto tarifário ponta ou fora de ponta para as modalidades tarifárias horárias; n é o número de intervalos de integralização [T], por posto tarifário [p], no período de faturamento (ANEEL, 2021, p. 128,129).

Conforme estabelecido pela ANEEL (2021, p. 129), para a determinação dos Excedentes de Reativos (ERE) e Demanda Reativa Excedente (DRE), certos critérios devem ser seguidos: i) entre as 23h30 e as 6h30, no período de 6 horas consecutivas definido pela distribuidora, apenas os fatores de potência [f_T] menores que 0,92 capacitivo, verificados a cada intervalo de uma hora [T], devem ser considerados; ii) no restante do dia, apenas os fatores de potência [f_T] menores que 0,92 indutivo, verificados em cada intervalo de uma hora T, devem ser levados em consideração; iii) a distribuidora é obrigada a informar o consumidor sobre o período de 6 horas estabelecido com antecedência de pelo menos um ciclo de faturamento completo e iv) na cobrança da demanda de potência reativa excedente, se o Valor de Referência da Demanda Reativa Excedente (VR_{DRE}) for nulo, deve-se usar o valor correspondente ao nível de tensão imediatamente inferior.

A Figura 3.7, adaptada de Cogo e Siqueira (2018) ilustra o diagrama com os critérios horários do fator de potência.

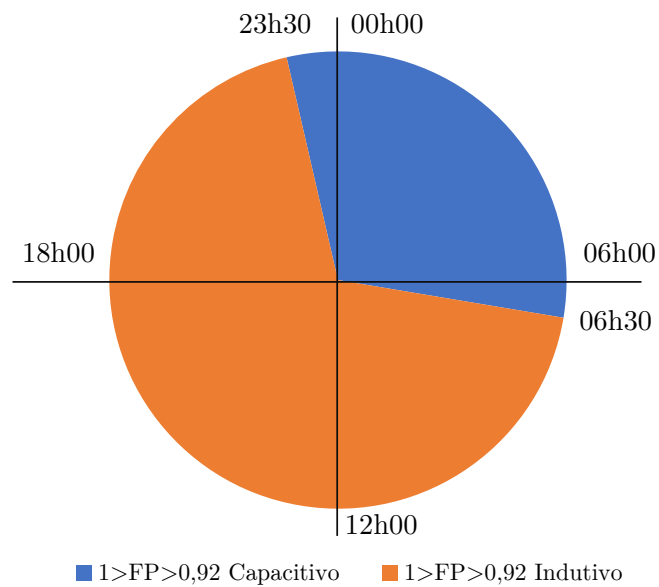


Figura 3.7 - Critérios horários do fator de potência segundo a ANEEL n°1000.

Os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) são documentos normativos elaborados e mantidos pela ANEEL. Estes estabelecem as regras e diretrizes para as atividades de distribuição de energia elétrica, assegurando que estas atividades sejam realizadas de maneira coordenada, segura e adequada (ANEEL, 2022). O PRODIST contém vários módulos que abordam diversos aspectos das operações de distribuição, incluindo informações relevantes sobre faturamento de energia reativa e fator de potência. A Tabela 3.2 dispõe quais são os módulos que compõem o PRODIST.

Tabela 3.2 - Módulos e suas respectivas abordagens.

Módulo	Abordagem
1	Glossário de Termos Técnicos do Prodist
2	Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição
3	Conexão ao Sistema de Distribuição de Energia Elétrica
4	Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição
5	Sistemas de Medição e Procedimentos de Leitura
6	Informações Requeridas e Obrigações
7	Cálculo de Perdas na Distribuição
8	Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica
9	Ressarcimento de Danos Elétricos
10	Sistema de Informação Geográfica Regulatório
11	Fatura de Energia Elétrica e Informações Suplementares

O módulo do PRODIST que aborda o fator de potência, incluindo aspectos como medição, faturamento e penalidades associadas à baixa eficiência do fator de potência, é o Módulo 8. Neste módulo, a ANEEL (2022, p. 8) normatiza que:

39. O controle do fator de potência deve ser efetuado por medição permanente e obrigatória, no caso de unidades consumidoras atendidas pelo Sistema de Distribuição de Média Tensão – SDMT e pelo Sistema de Distribuição de Alta Tensão – SDAT e nas conexões entre distribuidoras, observando o disposto em regulamentação;
40. A distribuidora deve manter, em meio eletrônico, o resultado das medições de fator de potência, pelo período mínimo de 10 anos;
41. Para unidade consumidora do Grupo A ou ponto de conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230 kV, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivo, ou 1,00 e 0,92 capacitivo, de acordo com as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica;
42. Para central geradora, o fator de potência deve estar compreendido entre os valores estabelecidos nos Procedimentos de Rede.

A utilização de normativas atuais é importante para garantir que as discussões e análises estejam alinhadas com as diretrizes e práticas regulatórias mais recentes, assegurando precisão e relevância.

3.6 Métodos de compensação de reativos

A compensação de energia reativa pode trazer avanços notáveis ao sistema elétrico. Entre os benefícios deste método de compensação estão a otimização da tensão, diminuição das perdas, redução nos custos de energia elétrica, ampliação da eficiência energética e prolongamento da capacidade e durabilidade dos equipamentos (WEG, 2009).

Para aprimorar o fator de potência e administrar a energia com maior eficácia, é fundamental empregar sistemas que reduzam a prevalência de energia reativa desnecessária. Conforme salientado por Lucas (2013), existem três métodos predominantes para esta finalidade: i) maximização da energia ativa por meio da otimização operacional e da escolha de equipamentos mais eficientes, além de possíveis ajustes nos processos industriais. Embora esta estratégia seja eficaz, ela pode implicar custos adicionais, variando conforme a extensão das mudanças implementadas; ii) utilização de motores síncronos superexcitados para correção do fator de potência também é eficaz, mas deve ser economicamente viável, assegurando que as melhorias na eficiência energética compensem os custos de implementação; iii) implementação de bancos de capacitores para armazenar e liberar eletricidade conforme necessário, facilitando um equilíbrio mais harmonioso entre as energias ativa e reativa. É a

solução amplamente adotada devido à sua eficácia e custo-benefício relativo.

Para Creder (2016), o método mais difundido para correção de fator de potência consiste na instalação de bancos de capacitores em paralelo com a rede elétrica, devido ao seu menor custo de implantação e por serem equipamentos estáticos de baixo custo de manutenção.

Segundo WEG (2009), a correção do fator de potência, focada na economia de energia e custo-benefício, pode ser realizada através de quatro métodos distintos com a utilização de capacitores: i) na entrada de alta tensão, que, apesar de seu alto custo, corrige o fator de potência da perspectiva da concessionária, mas não alivia os problemas internos; ii) na entrada de baixa tensão, frequentemente empregando bancos automáticos de capacitores em sistemas com diversas cargas, embora não alivie significativamente os alimentadores individuais; iii) por grupos de cargas, onde os capacitores são instalados para corrigir setores específicos ou conjuntos de máquinas menores, sem, contudo, reduzir a corrente nos circuitos de alimentação individuais; iv) correção localizada, considerada a solução técnica ideal, pois reduz as perdas em toda a instalação, diminui a carga nos circuitos de alimentação, permite um sistema unificado de acionamento e gera potência reativa apenas onde é necessário.

A compensação de energia reativa compõe papel importante na gestão da eficiência do sistema elétrico. A escolha do método de compensação, irá depender das características de cada instalação elétrica e de sua demanda energética.

3.7 Considerações finais

O Capítulo 3 aborda a importância do fator de potência no sistema elétrico, destacando o papel de máquinas elétricas como motores de indução e transformadores. Este enfatiza a necessidade da correção do fator de potência para melhorar a eficiência energética. São apresentados os conceitos de potências elétricas e suas interações. A legislação brasileira sobre consumo de energia é discutida, ressaltando o papel da ANEEL. Por fim, o capítulo sugere métodos de compensação de energia reativa, como bancos de capacitores, para otimizar o sistema elétrico. O próximo capítulo abordará com maior ênfase o tema bancos de capacitores.

CAPÍTULO 4

BANCOS DE CAPACITORES

Neste capítulo, aborda-se sobre bancos de capacitores (BC), cujo foco principal deste trabalho é o desenvolvimento da metodologia para implantação destas soluções. Para isto, torna-se necessário a abordagem de conceitos importantes, como a definição de capacitores, as funcionalidades do BC, as estratégias de localização e a análise dos principais tipos empregados nos sistemas elétricos industriais. Além disso, este capítulo dedica-se à avaliação técnica relacionada aos projetos, instalação e manutenção, bem como a consideração dos seus impactos.

4.1 Características gerais dos capacitores

Capacitores são dispositivos com a capacidade de armazenar carga elétrica. Eles consistem essencialmente em duas placas condutoras posicionadas de forma paralela, com material isolante entre elas, que pode ser ar, papel, plástico, ou outro material similar (MAMEDE, 2017). Segundo Boylestad e Nascimento (2004), capacitância é a medida da quantidade de carga que o capacitor pode armazenar em suas placas, em outras palavras, é sua capacidade de armazenamento. De acordo com Riedel e Nilsson (2015), a capacitância é o parâmetro do circuito representado pela letra C , medido em farads [F], e seu símbolo gráfico, ilustrado na Figura 4.1, são duas placas condutoras curtas e paralelas.

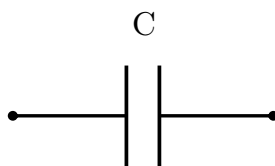


Figura 4.1 - Símbolo gráfico do capacitor.

O símbolo representativo do capacitor é sugestivo da sua função essencial: armazenamento de carga em condutores separados por isolante, conhecido como dielétrico. Isso implica que o capacitor não permite a passagem de carga elétrica diretamente através dele. Quando a tensão é aplicada aos seus terminais, não ocorre condução de carga através do dielétrico, mas sim o leve movimento de cargas dentro do dispositivo, configurando o fenômeno de armazenamento de energia elétrica no campo

elétrico formado (RIEDEL; NILSSON, 2015).

À medida que a capacitância aumenta, a quantidade de carga armazenada nas placas para a tensão aplicada equivalente também aumenta (BOYLESTAD; NASCIMENTO, 2004). A corrente que flui através do capacitor é determinada pela taxa de mudança da tensão ao longo do tempo e a capacitância do próprio capacitor $[C]$, conforme definido na equação 4.1.

$$i = C \frac{dv}{dt} \quad (4.1)$$

Desta forma, nota-se que a tensão no capacitor não pode mudar instantaneamente sem gerar corrente infinita, o que é impraticável. Além disso, quando a tensão é estável, não há corrente no capacitor, já que o dielétrico impede o fluxo de corrente contínua, permitindo apenas a corrente de deslocamento por variações de tensão (RIEDEL; NILSSON, 2015). A equação 4.2 corresponde a tensão em função da corrente que flui através do capacitor ao longo do tempo. Ela é obtida a partir de manipulações matemáticas utilizando a equação 4.1:

$$v(t) = \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau + v(t_0) \quad (4.2)$$

no qual C é a capacitância medida em farads [F], $i(\tau)$ é a corrente que passa pelo capacitor medida em amperes [A], t_0 é o tempo inicial em segundos [s] e $v(t_0)$ é a tensão no capacitor no tempo inicial t_0 medida em volts [V].

Quando a tensão é aplicada aos terminais do capacitor, ocorre o fluxo de corrente de carga interna, permitindo que o dispositivo acumule energia em seu campo elétrico. A quantidade de energia que o capacitor consegue armazenar durante um quarto de ciclo é expressa pela equação 4.3 (MAMEDE, 2017):

$$E = \frac{1}{2} C V_m^2 \quad (4.3)$$

no qual E é a energia armazenada medida em joules [J], C é a capacitância do capacitor medida em farads [F] e V_m é a tensão de pico aplicada, medida em volts [V].

Por fim, a reatância capacitiva é a medida da oposição que o capacitor oferece ao

fluxo de corrente alternada (AC). No capacitor, a reatância X_c , expressa pela equação 4.4, surge devido a capacidade de armazenamento de cargas, de modo que a tensão entre suas placas não atinja o valor máximo instantaneamente. Como consequência, a reatância capacitiva adianta a corrente em relação a tensão (MARKUS et al., 2018).

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (4.4)$$

Portanto, as equações relacionadas aos capacitores são fundamentais para entender como estes componentes operam em circuitos eletrônicos. Conhecendo estas relações, é possível projetar e analisar circuitos com maior precisão e eficiência, garantindo o desempenho adequado dos sistemas que dependem da capacidade dos capacitores de armazenar e liberar energia de forma controlada.

4.2 Tipos de ligação dos capacitores

A configuração de ligação dos capacitores exerce influência direta sobre o comportamento do circuito ao qual estão conectados, determinando características específicas dependendo da configuração adotada (MARKUS et al., 2018). Segundo Riedel e Nilsson (2015), para capacitores ligados em série o inverso da capacitância equivalente é igual à soma dos inversos das capacitâncias individuais, enquanto a capacitância equivalente de capacitores ligados em paralelo é simplesmente a soma das capacitâncias dos capacitores individuais. As equações 4.5 e 4.6 representam a capacitância para capacitores ligados em série e em paralelo, respectivamente.

$$\frac{1}{C_{\text{eq}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} \quad (4.5)$$

$$C_{\text{eq}} = C_1 + C_2 + \dots + C_n \quad (4.6)$$

As Figuras 4.2 e 4.3 ilustram a ligação de capacitores em série e em paralelo, respectivamente.

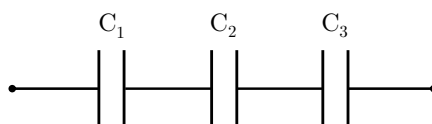


Figura 4.2 - Capacitores ligados em série.

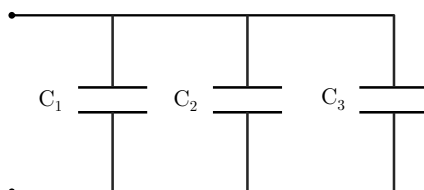


Figura 4.3 - Capacitores ligados em paralelo.

Os capacitores podem ser implantados em paralelo com cargas diversas, com o propósito de modificar suas características, que podem variar desde motores simples até plantas industriais de grande porte. Esta instalação pode ser realizada na entrada do sistema elétrico, com o objetivo de equilibrar a corrente magnetizante do fornecedor de energia, ou próxima às cargas para reduzir as perdas, expandir a capacidade disponível do sistema e aprimorar os níveis de tensão (SAMED, 2017).

4.3 Potência nominal dos capacitores

De acordo com Mamede (2017), os capacitores geralmente são identificados pela sua potência nominal reativa, diferente de outros dispositivos, cuja característica predominante é a potência nominal aparente. O valor da potência nominal do capacitor pode ser calculado em função da sua capacitância, expressa pela equação 4.7:

$$P_c = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_n^2 \cdot C}{1000} \quad (4.7)$$

no qual P_c é a potência nominal do capacitor [kVAr], f é a frequência nominal [Hz], V_n é a tensão eficaz aplicada no capacitor [kV] e C é a capacitância [μ F].

4.4 Banco de capacitores e suas funcionalidades

De acordo com Creder (2016), o procedimento mais utilizado para correção do fator de potência envolve a instalação de bancos de capacitores em paralelo com o sistema elétrico, principalmente devido à economia e por serem dispositivos que demandam manutenção de baixo custo. Para Cotrim (2009), os capacitores são amplamente empregados em instalações industriais, sendo geralmente a utilização mais econômica e versátil na correção do fator de potência. O uso apropriado de capacitores no sistema elétrico resulta na melhoria da qualidade da energia fornecida às cargas, acarretando impactos significativos na produtividade, aumento da capacidade, redução das perdas elétricas e economia nos investimentos em infraestrutura (COGO; SIQUEIRA, 2018).

4.5 Ligações do banco de capacitores

Segundo Mamede (2017), os capacitores podem ser ligados em várias configurações, formando bancos, sendo o número de unidades limitados em função de determinados critérios. Cogo e Siqueira (2018), cita que os tipos de conexões dos bancos de capacitores basicamente podem ser: i) conexão em triângulo (delta); ii) conexão em estrela não aterrada (isolada); iii) conexão em estrela aterrada; iv) dupla estrela com neutro único isolado e v) dupla estrela com neutro único aterrado. As Figuras 4.4, 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8 representam estes tipos de conexões, respectivamente.

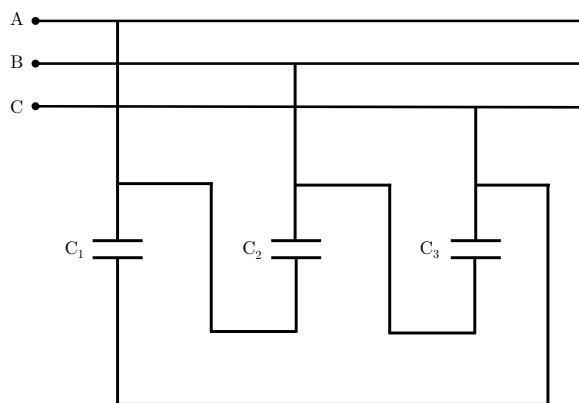


Figura 4.4 - Conexão delta.

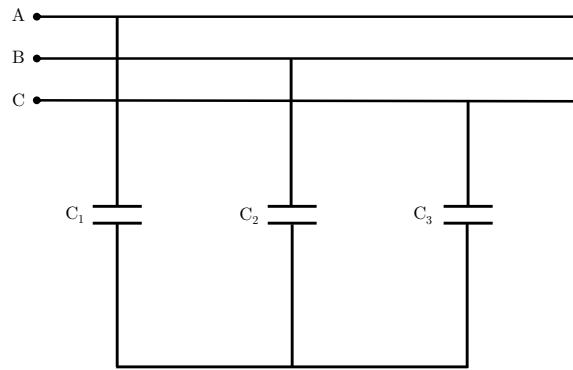


Figura 4.5 - Conexão estrela-isolada.

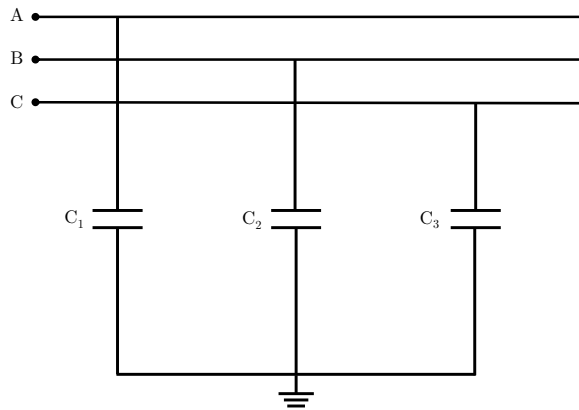


Figura 4.6 - Conexão estrela-aterrada.

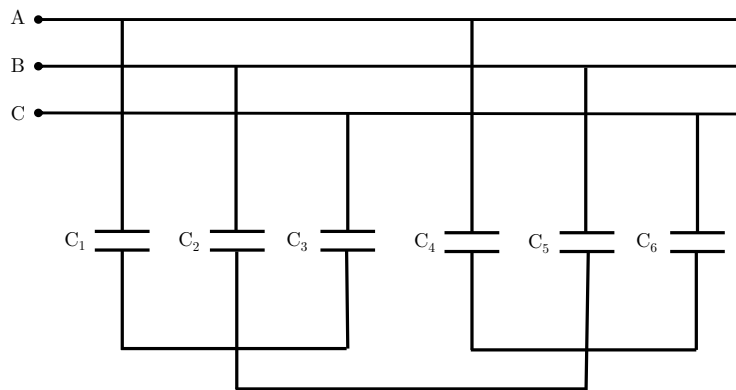


Figura 4.7 - Conexão dupla estrela-isolada.

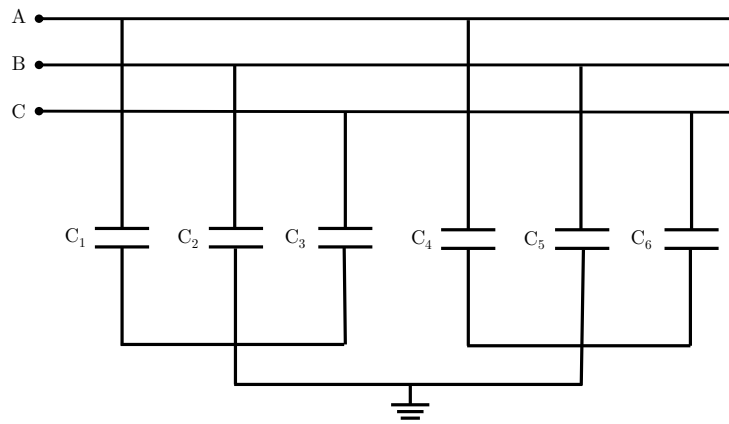


Figura 4.8 - Conexão dupla estrela-aterrada.

A decisão sobre como conectar os bancos de capacitores é influenciada primordialmente pela configuração do sistema elétrico, especificamente se ele é aterrado ou não. Contudo, esta escolha pode ser modificada por várias considerações, incluindo a presença de harmônicos na rede, interferências induzidas, o comportamento de fusíveis durante a operação, a classificação do isolamento, as estratégias de proteção adotadas e a possibilidade de ocorrer ressonância no sistema (COGO; SIQUEIRA, 2018). Nas instalações industriais de baixa tensão, é comum que os bancos de capacitores sejam conectados na configuração triângulo, utilizando unidades trifásicas para esta finalidade (MAMEDE, 2017).

4.6 Tipos de bancos de capacitores

Os bancos de capacitores podem ser projetados com dimensionamento para operação fixa ou controlada. Os capacitores de operação fixa são empregados em situações que a carga industrial se mantém praticamente constante ao longo do ciclo diário. Já os capacitores de operação automática são empregados em instalações onde ocorre significativa flutuação na curva de carga reativa diária ou quando é necessário manter o fator de potência dentro de faixa muito estreita de variação (MAMEDE, 2019).

A terceira categoria de BC é o semiautomático. Este representa solução híbrida avançada que combina as funcionalidades dos sistemas manuais e automáticos de compensação do fator de potência. Esta configuração flexível concede ao operador a liberdade de alternar entre o controle manual e automático conforme a necessidade operacional. No modo manual, o operador tem a prerrogativa de estabelecer a configuração estática do banco, determinando quantos capacitores estarão ativos. Em

contrapartida, no modo automático, a gestão do banco de capacitores é delegada ao controlador inteligente, que avalia as condições em tempo real e ajusta dinamicamente a quantidade de capacitores em serviço para otimizar a eficiência do sistema elétrico. Esta abordagem semiautomática assegura adaptabilidade robusta aos variáveis perfis de carga, maximizando os benefícios da correção do fator de potência e otimizando o desempenho energético da instalação (COGO; SIQUEIRA, 2018).

4.7 Localizações dos bancos de capacitores

De acordo com Creder (2016), os capacitores podem ser instalados: i) no lado de alta tensão dos transformadores (A); ii) nos barramentos secundários dos transformadores (B); iii) nos barramentos secundários dos transformadores com acúmulo de cargas indutivas (C); iv) em motores individuais (D) e v) junto a grandes cargas indutivas (E). A Figura 4.9 ilustra as possibilidades de localização dos capacitores no sistema elétrico industrial.

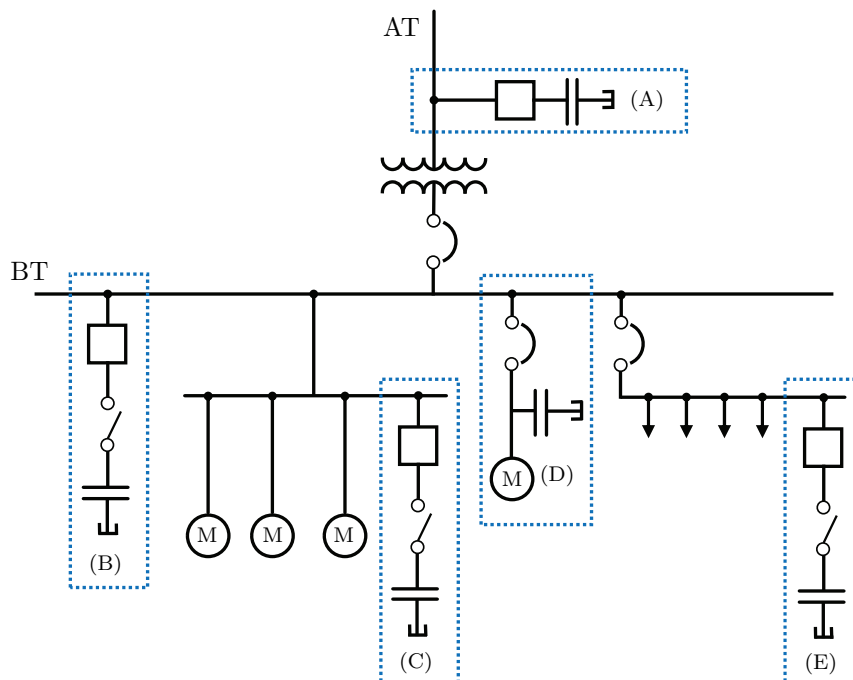


Figura 4.9 - Alternativas para localização de capacitores.

SAMED (2017) sublinha que a estratégia de alocação dos capacitores é influenciada por multiplicidade de fatores técnicos. Tais fatores abrangem a configuração dos

circuitos de instalação, as variações na demanda de carga e a natureza dos motores empregados. A escolha do posicionamento ótimo dos capacitores é normalmente realizada sob dois enfoques distintos de correção: i) a correção localizada e ii) a correção por grupos. Na correção localizada, a atenção é direcionada para ajustes pontuais, como nos alimentadores principais, em circuitos específicos destinados a motores ou junto aos próprios motores e seus conjuntos. Por outro lado, a correção por grupos contempla intervenções em escala mais ampla, realizadas no ponto primário ou secundário dos transformadores ou, de forma mais extensiva, em determinadas seções da planta industrial. De acordo com Creder (2016), sempre que for possível, é recomendável posicionar os capacitores próximos das cargas, a fim de assegurar que os benefícios da sua instalação repercutam de forma eficaz por toda a rede elétrica.

4.8 Análise da influência dos harmônicos

Diversas indústrias utilizam cargas não lineares que elevam a presença de harmônicos no sistema elétrico. No entanto, a eficácia da operação dos bancos de capacitores está diretamente associada a quantidade de harmônicos presentes no sistema e as suas respectivas ordens. Mamede (2013) destaca que a durabilidade dos capacitores é influenciada pelos efeitos dos componentes harmônicos em várias partes do sistema. A reatância do capacitor é inversamente proporcional a frequência. Sendo assim, quando o capacitor é submetido a tensão com frequência superior à nominal (como no caso dos harmônicos) ele tende a conduzir correntes elevadas, devido a sua baixa reatância.

Além disso, os harmônicos provocam perdas significativas nos capacitores, o que resulta em sobrecargas. Se estas sobrecargas excederem 35% do valor nominal dos capacitores, podem causar danos a eles. Estas também são responsáveis pelo aquecimento de condutores e barramentos devido ao efeito pelicular, em que a corrente tende a circular pela superfície dos condutores em frequências mais elevadas (MAMEDE, 2013).

4.9 Ressonância devido aos harmônicos

Creder (2016) define que a ressonância é a condição especial de qualquer circuito elétrico, que ocorre sempre que a reatância capacitiva se iguala à reatância indutiva em dada frequência particular, conhecida como frequência de ressonância. A equação 4.8 representa a frequência natural de ressonância do circuito:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (4.8)$$

no qual L é a indutância do circuito, medida em henry [H] e C é a capacitância, medida em farads [F].

Na ausência dos bancos de capacitores, a maioria dos circuitos elétricos possuem frequência de ressonância situada na faixa dos quilohertz [kHz]. Como normalmente não existem fontes de corrente com frequência tão elevada, a ressonância não constitui problema. No entanto, quando se adiciona banco de capacitores para elevar o fator de potência em circuitos com cargas não lineares, a frequência de ressonância diminui. Esta redução pode levar ao fenômeno onde as correntes harmônicas, que são frequências múltiplas da frequência principal e geradas por estas cargas não lineares, coincidem com a nova frequência de ressonância, gerando amplificação destas correntes e potenciais problemas no sistema (CREDER, 2016).

Caso a frequência de ressonância, originada pela combinação das impedâncias da rede e dos capacitores, se aproxime da frequência de algum dos componentes harmônicos típicos do espectro da carga, ocorrerá o fenômeno da ressonância. Como resultado deste fenômeno, correntes distorcidas passarão através dos capacitores, causando elevação na corrente da fonte de alimentação e sobretensões (COTRIM, 2009).

Cotrim (2009) destaca que na condição de ressonância, todos os elementos do sistema elétrico (fonte, carga e bancos de capacitores) podem sofrer danos permanentes. Quando os capacitores são desconectados do circuito, seja por meio do acionamento dos dispositivos de proteção ou devido à falha nos próprios capacitores, danos podem ser minimizados.

4.10 Considerações finais

Este capítulo discorreu sobre bancos de capacitores, destacando a relevância da implantação destes dispositivos nos sistemas elétricos industriais. Foram abordados os aspectos técnicos para a implantação eficaz do BC, com base em conceitos essenciais para o tema. Além disso, foi realizada análise técnica englobando a presença de cargas não lineares e os efeitos da ressonância. A compreensão destes elementos é fundamental para a implementação dos bancos de capacitores. O próximo capítulo trata sobre a metodologia do trabalho.

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA

Este capítulo detalha a metodologia desenvolvida para a correção do fator de potência em sistemas industriais de baixa tensão. Ela é fundamentada em quatro etapas principais: i) Análise, ii) Projeto, iii) Instalação e iv) Manutenção. Cada etapa é organizada de forma ordenada, integrando informações e revisões de diversas bibliografias e empresas do setor elétrico. Apresenta-se a estrutura detalhada da metodologia APIM, oferecendo visão holística das etapas e subetapas envolvidas, realçando sua relevância e aplicabilidade em contextos acadêmicos, empresariais e industriais.

5.1 Metodologia APIM

A metodologia proposta neste estudo é baseada em manuais, catálogos e documentações de fabricantes de equipamentos elétricos. Além disso, incorpora *insights* de literaturas especializadas e artigos sobre o tema, bem como *feedbacks* e discussões com empresas no setor de painéis elétricos e automação. A Figura 5.1 representa o fluxograma de como as informações foram coletadas para o desenvolvimento da metodologia.

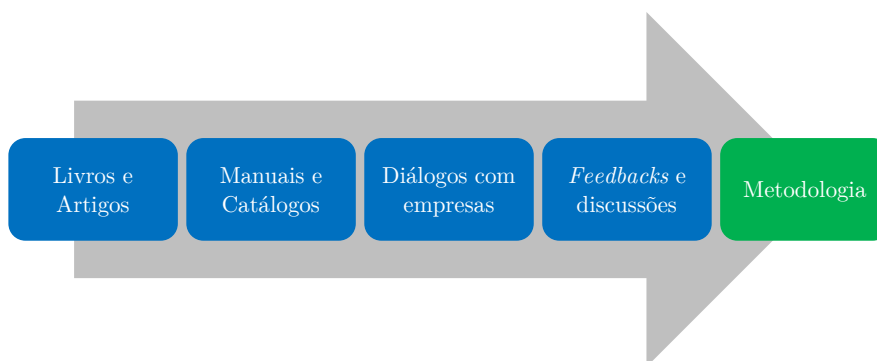


Figura 5.1 - Fluxograma de construção da metodologia.

APIM é o acrônimo que se refere às etapas de Análise, Projeto, Instalação e Manutenção. Esta abordagem oferece o roteiro claro e sequencial para tratar e gerenciar projetos de correção do fator de potência em sistemas industriais, mais especificamente na baixa tensão. Cada letra do acrônimo representa uma fase do processo, garantindo que todas as etapas sejam abordadas de forma sistemática e abrangente.

A Figura 5.2 representa o fluxograma da metodologia APIM.



Figura 5.2 - Fluxograma das etapas do método APIM.

O método é orientado para elucidar os intrincados conceitos de correção do fator de potência através de bancos de capacitores em ambientes industriais. Seu propósito central é ser ferramenta educativa, proporcionando clareza teórica e prática a indivíduos e corporações, permitindo-lhes aprofundar seu entendimento sobre o tema e otimizar suas práticas operacionais. No entanto, é essencial reconhecer que cada projeto, especialmente aqueles que envolvem painéis elétricos e equipamentos customizados, possui suas singularidades. Assim, enquanto a metodologia oferece interessante arcabouço teórico, sua aplicação prática pode necessitar de ajustes específicos para atender às nuances de cada sistema, garantindo a máxima eficácia.

5.2 Resolução normativa: ANEEL N° 1000

Durante a fase de revisão bibliográfica para a formulação da metodologia, identificou-se o desafio recorrente relacionado à citação de normativas desatualizadas da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) acerca do faturamento de energia reativa. A Resolução Normativa ANEEL N° 1.000, datada de 07 de dezembro de 2021, estabeleceu novas diretrizes para o serviço público de distribuição de energia elétrica, revogando as resoluções anteriores (n° 414 de 2010, n° 470 de 2011 e n° 901 de 2020). Observou-se que muitas fontes bibliográficas ainda referenciam as normativas anteriores, inclusive em revisões realizadas após a publicação da norma vigente. Esta situação pode resultar em inconsistências e imprecisões em pesquisas que utilizam tais referências.

As alterações mais notáveis introduzidas pela nova resolução incluem: i) a isenção de cobrança por excedente de reativos para unidades do grupo B devido ao baixo fator de potência e ii) a obrigatoriedade de cobrança de energia elétrica e demanda de potência reativa excedente para unidades consumidoras do grupo A, incluindo aquelas que optam pelo faturamento com tarifa do grupo B, conforme detalhado nas equações 3.21 e 3.22.

Este estudo adota a normativa mais recente, contribuindo para futuras pesquisas no setor ao fundamentar-se em resoluções atualizadas, minimizando o risco de interpretações equivocadas e referências a práticas de faturamento obsoletas. Além disso, ao alinhar-se com as diretrizes mais recentes da ANEEL, o estudo garante maior relevância e aplicabilidade dos resultados no contexto atual do setor elétrico.

5.3 Características do método

A concepção inicial deste estudo visava estabelecer a metodologia com onze etapas, envolvendo: i) avaliação do sistema elétrico; ii) dimensionamento dos capacitores e dispositivos correlatos; iii) seleção do local da instalação; iv) escolha do equipamento de controle; v) elaboração do projeto do banco de capacitores; vi) construção do painel; vii) realização dos testes pré-instalação; viii) instalação efetiva dos capacitores; ix) verificação e ajuste do fator de potência; x) execução dos testes pós-instalação e xi) implementação de manutenção preventiva e corretiva.

Contudo, a partir de análise comparativa com metodologias popularmente conhecidas, como 5W2H, 5S, AIDA, SWOT e PDCA, indicou a necessidade de abordagem mais estruturada. Em resposta, o método foi revisado para incluir fases adicionais, organizadas segundo as principais filosofias das etapas: Análise, Projeto, Instalação e Manutenção, culminando na criação do método APIM. Este modelo se destaca pela facilidade de memorização e pela clareza na identificação das etapas, proporcionando o entendimento intuitivo do processo de implantação dos bancos de capacitores nos sistemas industriais.

Outro detalhe é a seleção das cores para cada etapa. Esta distinção foi intencional e contribui para facilitar o entendimento. O azul utilizado na etapa da Análise simboliza clareza e profundidade, remetendo à precisão e à minuciosidade necessárias nesta fase. O verde escolhido para a etapa do Projeto evoca crescimento e inovação, refletindo a criatividade e o desenvolvimento das soluções. Na fase da Instalação, o laranja é empregado para representar energia e dinamismo, características importantes para a execução prática e ativa dos planos. Por fim, o cinza utilizado na Manutenção transmite estabilidade e confiabilidade, elementos para a sustentação e eficiência a longo prazo dos sistemas implementados. Esta paleta de cores não apenas distingue cada etapa visualmente, mas também reforça a essência e os objetivos de cada fase.

O método APIM apresenta aplicabilidade em três esferas distintas: acadêmica, empresarial e industrial. No âmbito acadêmico, o método pode ser integrado a ementa

para facilitar o entendimento dos alunos sobre o tema, servindo também como base para avaliações teóricas. Os educadores podem encorajar os alunos a aplicar o método, realizando cálculos e elaborando projetos de forma teórica. No contexto empresarial, é observado que as empresas frequentemente focam em fases específicas do método, como Análise ou Projeto, em vez de empregar todas as quatro etapas. O entendimento completo do método é útil para formar parcerias efetivas com outras empresas especializadas, contribuindo para a resolução dos problemas de maneira eficiente e agregando valor aos serviços prestados aos clientes. No setor industrial, a adoção do método APIM é benéfica para desenvolver soluções que visam a correção do fator de potência e aumentar a conscientização sobre os desafios associados ao baixo fator de potência. Esta abordagem permite a identificação e implementação de estratégias otimizadas para melhorar a eficiência energética nas operações industriais. A Figura 5.3 ilustra as subetapas que constituem a metodologia APIM.

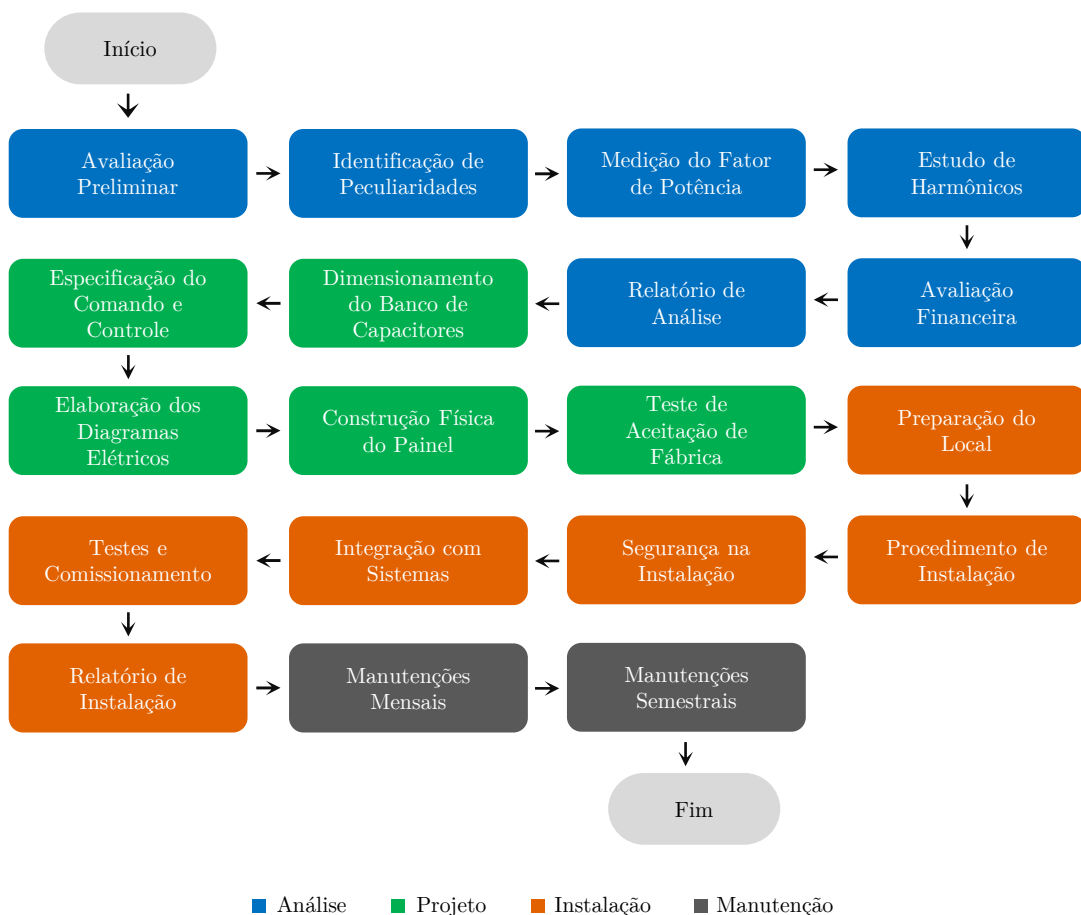


Figura 5.3 - Fluxograma das subetapas da Metodologia APIM.

5.4 Etapa A - Análise

No método APIM, a etapa inicial, representada pela letra A, refere-se à Análise. Esta fase é caracterizada por investigação aprofundada do sistema elétrico em foco. A fase da análise envolve as seguintes atividades: i) avaliações preliminares; ii) identificação de peculiaridades; iii) medições do fator de potência; iv) estudo de harmônicas; v) avaliação financeira e vi) geração do relatório de análise.

5.4.1 Avaliação preliminar

A seção da avaliação preliminar é dividida em cinco fases: i) tipo de indústria; ii) histórico das faturas de energia; iii) levantamento de cargas; iv) visita técnica ao local e v) revisão de plantas elétricas.

5.4.1.1 Tipo de indústria

Em diálogos com engenheiros de duas empresas do setor de painéis elétricos, foi obtido o consenso que projetos de correção do fator de potência ocorrem, na maioria dos casos, em quatro tipos de indústrias: i) indústrias que pagam adicional de reativos; ii) indústrias novas ou expansões internas; iii) indústrias atualizando ou modernizando equipamentos e iv) indústrias visando eficiência energética.

O primeiro tipo são empresas que já operam e perceberam que estão sendo penalizadas em suas faturas de energia devido ao fator de potência abaixo de 0,92, conforme a legislação vigente. O segundo são empresas que estão iniciando ou expandindo suas operações e realizaram levantamento de cargas. A análise prévia pode indicar a necessidade de bancos de capacitores para otimizar o fator de potência desde o início. O terceiro inclui empresas que estão no processo de substituição e/ou adição de novos equipamentos. Este processo pode resultar na mudança do perfil de consumo de potência reativa, tornando necessária a reavaliação da correção do fator de potência. Por fim, o quarto tipo são indústrias que buscam otimizar seu consumo de energia, reduzir custos e minimizar o impacto ambiental.

Outro aspecto importante que refere-se ao tipo de indústria é a variação do consumo de energia elétrica ao longo do tempo. Esta variação pode ser influenciada por diversos fatores, e compreendê-la adequadamente pode levar a soluções eficientes e econômicas (COTRIM, 2009). Em muitas indústrias e estabelecimentos, o consumo de energia pode variar sazonalmente. Por exemplo, indústrias que dependem de matérias-primas agrícolas podem ter picos de produção em determinadas épocas do ano, levando à elevação no consumo de energia.

Outro fator a ser considerado é o clima. Estabelecimentos que dependem fortemente de sistemas de aquecimento ou refrigeração podem experimentar picos de consumo durante os meses mais frios ou quentes, respectivamente. Ao analisar a variação do consumo ao longo dos meses, é possível identificar padrões e tendências que ajudam no dimensionamento adequado do banco de capacitores. Por exemplo, se a empresa possui pico de consumo em determinados meses devido a fatores sazonais, ela pode optar por bancos de capacitores com capacidade de ajuste, permitindo a correção eficaz do fator de potência durante estes períodos (CREDER, 2016).

5.4.1.2 Histórico das faturas de energia

Muitos consumidores, desconhecendo o potencial de geração própria de energia reativa, frequentemente consideram o faturamento desta como despesa ordinária, similar ao da energia ativa, sem reconhecer a viabilidade de produzi-la internamente por meio da implementação dos capacitores. Ademais, existe parcela de consumidores que, por equívocos em sua compreensão tecnológica, absorvem passivamente estes custos, subestimando ou desconhecendo as soluções existentes para a adequação do fator de potência e compensação reativa em suas instalações. Esta falta de informação é agravada pelo fato de nem todas as concessionárias de energia elétrica desempenham papel ativo em alertar e orientar seus consumidores sobre as estratégias disponíveis para evitar cobranças adicionais, enquanto simultaneamente obtêm benefícios técnicos (COTRIM, 2009).

A análise do histórico das faturas de energia constitui etapa relevante no processo de avaliação da unidade, particularmente para identificar encargos relacionados a excedentes reativos. Esta investigação proporciona aos engenheiros e gestores a capacidade de verificar a aplicação de penalidades por fatores de potência abaixo do permitido e avaliar a extensão deste problema. O exame das faturas passadas oferece informações sobre a regularidade e o volume de tais cobranças, fundamentando a elaboração de estratégias para ajuste do fator de potência.

Além disso, a análise dos dados de faturamento históricos é útil para identificar padrões do consumo e ineficiências, possibilitando a implementação de medidas corretivas para reduzir ou eliminar futuras penalidades. Ao entender a estrutura de tarifação e os critérios de cobrança, a instalação pode ajustar seu consumo de forma a alinhar-se às melhores práticas de eficiência energética. Esta abordagem não apenas reduz os custos com energia, mas também contribui para a sustentabilidade operacional, reduzindo o impacto ambiental através do uso eficiente dos recursos energéticos.

5.4.1.3 Levantamento de cargas

Ao verificar a incidência das cobranças por consumo de energia reativa nas faturas, é imperativo proceder com investigação detalhada do sistema elétrico, visando a obtenção de informações adicionais e precisas. Mamede (2017) descreve que ao elaborar projetos elétricos para pequenas indústrias, confronta-se com o desafio significativo de obter informações precisas sobre os aspectos técnicos e o funcionamento operacional da planta com grau satisfatório de confiança. Os pontos de incerteza incluem: i) frequência de operação, seja diária, semanal, mensal ou anual; ii) nível de utilização dos motores; iii) nível de utilização dos transformadores e iv) agenda de crescimento das atividades produtivas.

Estes dados são úteis para que se possa determinar o fator de potência médio presumido da instalação e prever os meios necessários para sua correção, caso se justifique. Por isso, em plantas deste perfil é importante buscar o máximo de informações possíveis, inclusive ampliações que estão sendo monitoradas para implementação futura.

No contexto das plantas industriais de maior porte, é importante planejamento para garantir a eficiência operacional e a gestão adequada dos recursos energéticos. Mamede (2017) cita que o bom levantamento de cargas é essencial para este planejamento, e destaca vários itens importantes que devem ser considerados, como: motores, transformadores, cargas resistivas, fornos, máquinas de solda e sistemas de iluminação.

Em relação aos motores, é vital identificar o tipo, seja de indução, rotor bobinado ou síncrono, bem como a potência expressa em cavalo-vapor [cv], o fator de potência, o número de fases, o número de polos e a frequência operacional. Quanto aos transformadores, a potência nominal deve ser conhecida, bem como as tensões primárias e secundárias, a impedância percentual e a corrente de magnetização.

As cargas resistivas também são aspecto importante, com foco na potência nominal e na potência de operação, ambas expressas em kilowatts [kW], além do número de fases que operam. No caso dos fornos, é necessário conhecer o tipo, seja de indução eletromagnética ou arco, além do número de fases e do fator de potência associado. As máquinas de solda também necessitam de análise, identificando o tipo, seja transformadora, motogeradora ou transformadora retificadora, o número de fases e o fator de potência, que é determinado através de testes de bancada.

Por fim, a iluminação é outro componente a ser considerado no levantamento de

carga, onde o tipo de lâmpadas, seja incandescente, fluorescente, vapor de mercúrio ou vapor de sódio, deve ser identificado, junto com o tipo de reator utilizado, seja de alto ou baixo fator de potência. Estes detalhes fornecem visão abrangente das demandas energéticas da planta e são importantes para o desenvolvimento de estratégias eficazes de gestão de energia, contribuindo para a operacionalidade sustentável e economicamente eficiente da instalação industrial.

A WEG (2009) complementa que, durante o levantamento das cargas, é necessário que se identifique a presença e a capacidade das cargas não lineares na instalação para futuras avaliações dos efeitos harmônicos na possível implementação do banco de capacitores. A não consideração, em alguns casos, pode provocar diversos problemas de funcionamento e diminuição da vida útil dos equipamentos.

5.4.1.4 Visita técnica ao local

A visita técnica permite a avaliação *in loco* das condições reais do sistema elétrico, indo além das medições e dados previamente coletados. A presença física no local oferece informações que não podem ser obtidas remotamente ou por meio de registros fotográficos. A visita também proporciona diálogo com os operadores e técnicos locais. Estas conversas podem revelar aspectos práticos do funcionamento diário do sistema, bem como desafios operacionais que podem afetar o fator de potência.

Além disso, a inspeção visual das condições dos equipamentos e do ambiente pode indicar a necessidade de manutenção ou atualizações que podem influenciar a eficiência da solução. Ademais, permite verificar a conformidade com as normas técnicas e regulamentações vigentes. A avaliação *in loco* pode identificar discrepâncias entre a prática e o padrão requerido, direcionando as ações de correção de forma mais precisa. Portanto, a presença no local é de suma importância para validar as informações coletadas, possibilitando a confirmação das hipóteses e a verificação da exatidão dos registros existentes. Esta etapa de validação é fundamental para assegurar que o projeto seja baseado em informações precisas e atualizadas, garantindo assim a eficácia e a relevância das soluções propostas.

5.4.1.5 Revisão de plantas elétricas

A revisão de plantas elétricas envolve o exame detalhado dos diagramas elétricos, *layouts* da instalação e especificações dos equipamentos em uso. Ao analisar as plantas elétricas, os engenheiros podem identificar os componentes críticos que influenciam o fator de potência, como motores, transformadores e equipamentos de ilumi-

nação. Além disso, esta revisão permite compreensão abrangente da distribuição de carga e do fluxo de energia através do sistema, fornecendo mapeamento claro das áreas que requerem atenção especial.

Adicionalmente, o exame das plantas facilita a identificação de possíveis deficiências no projeto original ou alterações subsequentes que possam ter impactado negativamente a eficiência energética. Isto inclui a localização de possíveis pontos de perdas elétricas, a adequação da infraestrutura existente e a conformidade com as normativas atuais. A partir desta análise, é possível desenvolver o plano de ação para implementar bancos de capacitores e outras medidas de correção de forma efetiva. Este plano deve ser integrado e harmonizado com a configuração existente do sistema, assegurando solução que não apenas melhore o fator de potência, mas também sustente a operacionalidade e a segurança do sistema elétrico em sua totalidade.

5.4.2 Identificação de peculiaridades

A etapa da identificação de peculiaridades envolve a busca por possíveis características do sistema que podem influenciar a eficiência dos bancos de capacitores. Por isso, é importante identificar tais situações para evitar especificações e dimensionamentos que não considerem todas as singularidades do sistema elétrico em análise. Algumas destas peculiaridades incluem: i) presença de outros bancos de capacitores na rede; ii) local de compensação; iii) variação de carga e demanda; iv) expansão de carga futura e v) opções alternativas. Estas e outras informações devem ser coletadas e organizadas para constar no relatório de análise.

Ao energizar o banco de capacitores no momento exato do chaveamento, a baixa impedância característica do banco induz o surgimento de corrente de ligamento, também referida como corrente de *inrush*. Esta corrente se destaca por sua elevada frequência e magnitude. A complexidade desta situação é acentuada quando o banco de capacitores é acionado enquanto outros bancos estão operando simultaneamente em paralelo no sistema. Neste contexto, a corrente de *inrush* pode gerar condições adversas, potencializando a necessidade da implementação de reatores de amortecimento. Estes reatores fornecem proteção adequada aos dispositivos de chaveamento, como chaves e disjuntores, mitigando os efeitos da corrente de energização (CREDER, 2016). Logo, identificar outros bancos de capacitores se faz necessário para realizar análise crítica no momento do desenvolvimento da solução.

Outra particularidade é o local de compensação. A investigação criteriosa do local envolve a avaliação das condições de carga existentes, as características da rede

elétrica, e as metas específicas de eficiência. Segundo Cogo e Siqueira (2018), os locais de compensação mais comuns são: i) em motores de indução trifásicos; ii) em transformadores; iii) em grupos de motores e iv) em grupos de lâmpadas. Estas instalações podem trazer diversos benefícios, além da correção do FP, como por exemplo: i) liberação da capacidade do sistema; ii) melhoria da tensão e iii) redução das perdas.

A análise detalhada das variações de carga e demanda emerge como outro aspecto a ser listado, exercendo influência na seleção do tipo apropriado do banco de capacitores, sejam eles fixos, automáticos ou semiautomáticos. Conforme Mamede (2013), os bancos de capacitores fixos são apropriados para cenários onde a carga industrial apresenta mínima flutuação ao longo do dia. Em contrapartida, os bancos automáticos são preferíveis em ambientes onde se observa uma variação substancial na curva diária de carga reativa, ou em situações que demandam a manutenção do fator de potência dentro de um intervalo muito restrito de variação. Já os semiautomáticos são solução híbrida entre os dois tipos. Esta distinção é útil para assegurar que a solução de compensação seja não apenas eficiente, mas também alinhada às dinâmicas específicas da carga da instalação.

A avaliação da potencial expansão de cargas futuras constitui outro critério no desenvolvimento da solução. A antecipação deste aumento de demanda é fundamental para garantir que a solução escolhida seja capaz de se adaptar às necessidades futuras. Isto implica na seleção criteriosa dos dispositivos com base na capacidade técnica de suportar o crescimento previsto, assim como na alocação de espaço reserva e na estruturação do sistema com capacidade de escalabilidade.

Em certas circunstâncias, após análise fundamentada, emerge que a implementação dos bancos de capacitores pode não ser a solução mais apropriada. Alternativas como a reorganização das operações para otimizar o uso diário de energia podem aprimorar o fator de potência e diminuir a demanda por compensação reativa. Adicionalmente, substituir equipamentos obsoletos ou menos eficientes por modelos de maior eficiência energética e fator de potência superior pode ser mais vantajoso. Estas abordagens não apenas melhoram o fator de potência, mas também oferecem benefícios como redução no consumo de energia, menores custos operacionais e impacto ambiental atenuado. Portanto, a decisão sobre a adoção dos bancos de capacitores requer avaliação holística, considerando eficácia, relação custo-benefício e impactos a longo prazo das alternativas disponíveis (COTRIM, 2009).

5.4.3 Medição do fator de potência

Mamede (2017) discorre que o método de medição do fator de potência deverá ser escolhido baseado nos dados disponíveis ou na precisão dos resultados. As principais formas de mensurar o FP são: i) determinação estimada; ii) análise do consumo; iii) analisador de energia e iv) memória de massa.

5.4.3.1 Determinação estimada

As instalações industriais que possuem atividades produtivas bem definidas, a previsão do fator de potência beneficia-se significativamente com o planejamento mensal que antecipa os padrões de consumo de energia ativa e reativa ao longo dos períodos operacionais diários. Este procedimento é preferencialmente aplicado em contextos nos quais os dias efetivos de produção podem ser claramente delineados ao longo do mês comercial, possibilitando boa estimativa do fator de potência (MAMEDE, 2017).

Baseado nesta definição, é possível traçar o fluxo de ação para estimar o FP na instalação industrial. Inicialmente, é necessária a coleta de dados do consumo de energia ativa e reativa durante o ciclo operacional representativo. Após a coleta, deve-se realizar análise detalhada dos padrões de operação, considerando o uso do maquinário, sistemas de climatização, iluminação e outros dispositivos elétricos. Com estas informações, calcula-se o consumo médio diário de energia. Este valor diário é então multiplicado pelo número dos dias úteis no mês para projeção do consumo mensal. Para determinar o fator de potência, divide-se a soma mensal da energia ativa pelo resultado da raiz quadrada da soma dos quadrados da energia ativa e reativa, conforme a equação 5.1: (MAMEDE, 2017).

$$FP = \frac{S_{kWhm}}{\sqrt{S_{kWhm}^2 + S_{kVArh}^2}} \quad (5.1)$$

no qual S_{kWhm} corresponde a soma total projetada do consumo de energia ativa mensal e S_{kVArh} é a soma total projetada do consumo de energia reativa mensal.

5.4.3.2 Análise do consumo

Este método consiste em coletar as últimas faturas de energia elétrica e avaliar o consumo de potência ativa [kWh] e reativa [kVArh] mensal. A partir destas informações, é possível calcular o fator de potência médio mensal pela equação 5.2.

$$FP = \frac{C_{\text{kWhm}}}{\sqrt{C_{\text{kWhm}}^2 + C_{\text{kVArhm}}^2}} \quad (5.2)$$

no qual C_{kWhm} corresponde ao consumo de energia ativa mensal e C_{kVArhm} é o consumo de energia reativa mensal. Caso a unidade consumidora possua sazonalidade no consumo, é interessante realizar o levantamento com o histórico de no mínimo 12 meses para garantir a melhor análise e projeção. A análise baseada exclusivamente no fator de potência médio pode levar, em muitas situações, a escolha inadequada da solução ou a interpretação equivocada dos dados. A complexidade do perfil de carga, que varia com o tempo e as condições operacionais, exige abordagem criteriosa para garantir a eficácia das estratégias de compensação implementadas (COTRIM, 2009).

5.4.3.3 Analisador de energia

O analisador de energia é responsável por medir o fluxo de cargas, grandezas e potências no sistema elétrico. Este equipamento permite que diversos parâmetros técnicos sejam identificados, tais como: i) valores máximo e mínimo das tensões de fase; ii) valores máximo e mínimo das tensões de linha; iii) distorção harmônica de tensão; iv) distorção harmônica de corrente; v) desbalanceamento de tensão; vi) desbalanceamento de corrente; vii) nível do carregamento de circuitos; viii) potência ativa por fase; ix) potência ativa total; x) potência aparente por fase; xi) fator de potência trifásico; xii) fator de potência por fase e xiii) frequência.

Conforme Cogo e Siqueira (2018), a medição com analisador de energia deve ser realizada por período de uma semana, no mínimo, desde que a empresa não esteja operando com carga sazonal. A partir dos dados obtidos, é possível calcular a potência reativa necessária (Q_{BC}), conforme a equação 5.3:

$$Q_{\text{BC}} = P \cdot \{\tan(\arccos(FP_{\text{atual}})) - \tan(\arccos(FP_{\text{desejado}}))\} \quad (5.3)$$

no qual P corresponde a potência ativa, FP_{atual} é o fator de potência atual medido e FP_{desejado} é o fator de potência desejado.

Os resultados obtidos pela medição dos parâmetros podem ser exibidos em planilha, permitindo a criação de gráficos e tabelas. Utilizando estes dados é possível traçar com maior precisão o perfil de consumo de energia da instalação, identificando tendências, picos de demanda e períodos de uso intensivo de energia. Além disso, a

visualização dos dados em gráficos facilita a identificação de padrões anormais ou comportamentos atípicos nos sistemas elétricos, como flutuações inesperadas na demanda ou na qualidade da energia, que podem indicar problemas subjacentes ou a necessidade de manutenção. Estes dados também podem ser utilizados para modelar o impacto financeiro do consumo de energia, ajudando na criação de estratégias para reduzir custos operacionais. A análise de longo prazo dos dados permite às empresas planejar melhorias de infraestrutura e atualizações de equipamentos com base em informações concretas, maximizando o retorno sobre o investimento.

5.4.3.4 Memória de massa

A memória de massa dentro dos medidores é a funcionalidade que armazena, em intervalos pré-definidos, variedade de grandezas elétricas medidas ou calculadas, conforme estabelecido pela Portaria Inmetro nº 587, de 2012 (INMETRO, 2012). Estes dados, que tipicamente incluem tensão, potência ativa, potência reativa e fator de potência, são armazenados para acesso posterior, geralmente disponibilizados em formato de planilhas eletrônicas para análise do usuário. O processo de registro destas métricas ocorre normalmente a cada 15 minutos, alinhando-se com os períodos de medição da demanda. A potência reativa necessária também pode ser calculada utilizando a equação 5.3 (COGO; SIQUEIRA, 2018).

5.4.4 Estudo de harmônicos

Conforme a WEG (2009), caso 20% da carga total for não linear (inversores, retificadores, certos tipos de iluminação), faz-se necessário realizar medição harmônica e avaliar os efeitos destas distorções. Realizada a medição com distorção harmônica total de tensão (THD) inferior a 5%, espectro individual inferior a 3% e impedância da rede baixa, é pouco provável a ocorrência de ressonância. Caso contrário, isto é, mais de 20% da carga total for não linear e/ou limites de distorções superiores aos mencionados é preciso realizar estudo aprofundado e discutir a utilização de indutores anti-harmônicos ou filtros RLC aplicados às fontes harmônicas.

Para este estudo, podem ser utilizados analisadores de energia ou osciloscópios voltados às instalações industriais. Estes equipamentos fornecem visão detalhada das condições de qualidade de energia na unidade, incluindo a presença e intensidade de harmônicos. Cada tipo de equipamento podem apresentar características e aplicações específicas, como: i) capacidade de medição; ii) dados detalhados; iii) integração com outras ferramentas; iv) facilidade de uso e v) análise específica. Por isso, é importante avaliar cada caso baseado na análise preliminar para selecionar a ferramenta

mais adequada.

5.4.5 Avaliação financeira

A decisão de prosseguir com o projeto requer análise criteriosa baseada em fundamentos técnicos e financeiros, especialmente no que refere-se à avaliação do retorno do investimento. Esta análise envolve a comparação entre o investimento inicial e os fluxos de caixa projetados ao longo do tempo. Dentre as ferramentas analíticas empregadas neste contexto estão: i) o *payback* simples, que calcula o período necessário para recuperar o investimento inicial; ii) o *payback* descontado, que mede o tempo necessário para recuperar o investimento inicial com os fluxos de caixa futuros; iii) o Valor Presente Líquido (VPL), que desconta os fluxos de caixa futuros para o presente, proporcionando uma visão do valor agregado pelo projeto e iv) a Taxa Interna de Retorno (TIR), que determina a taxa de desconto que iguala o valor presente dos fluxos de caixa ao investimento inicial, servindo como um indicador da rentabilidade do projeto (BORDEAUX-REGO, 2015).

O *payback* simples pode ser expresso pela equação 5.4:

$$n_R = \frac{IR}{RF} \quad (5.4)$$

no qual n_R corresponde ao tempo de retorno, IR é o investimento realizado em reais [R\$] e RF é o retorno financeiro proporcionado na mesma base temporal de n em reais [R\$].

O método do *payback* descontado é similar ao anterior, exceto pelo fato de considerar taxa de atratividade ou de desconto. Ao adicionar o custo de capital da empresa ao método do *payback* simples, está considerando o valor do dinheiro no tempo.

Segundo Bordeaux-Rego (2015), o *payback* e o *payback* descontado podem ser mais úteis quando usados: i) para desempatar situações com VPL parecidos, em que a recuperação mais rápida de caixa se torne relevante; ii) como segundo filtro de análise, sendo medida de risco de liquidez ou, generalizando, como grau de risco do projeto e iii) para análise dos projetos sem maior significado financeiro para o investidor.

O cálculo do VPL é expresso pela equação 5.5.

$$VPL = -IR + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+r)^t} + \frac{VR}{(1+r)^n} \quad (5.5)$$

no qual FC_t é o fluxo de caixa líquido no período t em reais [R\$], r é o custo de capital definido pela empresa em reais [R\$] e VR é o valor residual do projeto ao final do período de análise (enésimo período) em reais [R\$].

A metodologia do VPL oferece abordagem direta para a tomada de decisões de investimento, conforme delineado por [Bordeaux-Rego \(2015\)](#). Quando o VPL é positivo, indicando que o valor atual dos retornos futuros excede o investimento inicial, o projeto é considerado financeiramente viável. Nas situações onde o VPL é igual a zero, a decisão de investir torna-se neutra, uma vez que isso implica que os retornos apenas igualam o custo inicial.

Por fim, o TIR representa a taxa de desconto que iguala o valor presente líquido (VPL) dos fluxos de caixa futuros do investimento ao seu custo inicial. Este cálculo é realizado utilizando a equação 5.6.

$$VPL = -IR + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} + \frac{VR}{(1+TIR)^n} = 0 \quad (5.6)$$

Para obter o valor correspondente ao TIR podem ser utilizados *softwares* de cálculos financeiros, planilhas eletrônicas ou, manualmente, pelo método de iteração. Quando a TIR excede o custo de capital, o projeto é considerado atraente, refletindo o VPL positivo e, portanto, retorno superior ao custo do investimento. Se a TIR for igual ao custo de capital, a decisão torna-se neutra; o investimento traz retorno que apenas compensa o custo do capital, resultando no VPL zero. Por outro lado, se o custo de capital for superior à TIR, o projeto é visto como financeiramente inviável, indicando o VPL negativo e, conseqüentemente, retorno insuficiente para justificar o investimento ([BORDEAUX-REGO, 2015](#)).

A avaliação financeira é essencial ao considerar a implementação do banco de capacitores no sistema industrial. Esta análise permite uma compreensão dos custos iniciais, dos benefícios a longo prazo e dos impactos operacionais associados. Ao empregar estes métodos, é possível quantificar a viabilidade econômica do projeto, assegurando que o investimento traga retornos adequados em relação aos custos envolvidos.

5.4.6 Relatório de análise

O relatório de análise é o documento que compila todas as informações coletadas, medidas e calculadas referentes ao sistema elétrico em estudo. Dentre os tópicos que precisam ser pontuados, incluem: i) finalidade das medições; ii) metodologia de análise; iii) período de medição; iv) informações gerais sobre eficiência energética e qualidade de energia; v) dados das medições de tensão e corrente; vi) dados das potências ativa, reativa e aparente; viii) dados do fator de potência; ix) distorções harmônicas presentes; x) gráficos das medições; xi) fotos; xii) análise técnica e financeira e xiii) conclusões sobre o sistema.

O relatório de análise proporciona visão abrangente do desempenho e da eficácia do sistema elétrico em questão. As informações compiladas no relatório ajudam a identificar pontos críticos, como ineficiências energéticas e problemas de qualidade de energia. A seção dedicada à finalidade das medições esclarece os objetivos específicos da análise, enquanto a metodologia descreve os procedimentos e as ferramentas utilizadas para coletar e processar os dados. A delimitação do período de medição é relevante, pois define o contexto temporal para a interpretação dos dados coletados.

Além disso, o relatório oferece análise detalhada dos dados medidos, incluindo tensão, corrente, potências ativa, reativa e aparente, além de enfatizar a importância do fator de potência e a presença das distorções harmônicas. Estes elementos são fundamentais para avaliar a eficiência e a qualidade da energia fornecida. Gráficos e visualizações de dados são utilizados para apresentar as informações de maneira clara e compreensível, facilitando a identificação de tendências, padrões e anomalias. Fotografias e imagens do sistema e dos equipamentos podem ser incluídas para oferecer contexto visual das condições operacionais. Finalmente, o relatório conclui com análise das informações coletadas, fornecendo recomendações para melhorias do sistema, otimização dos processos e medidas de manutenção preventiva. Ao final desta etapa de Análise, a indústria terá compreensão clara do fator de potência atual, as principais causas dos desvios e as implicações financeiras e técnicas associadas. Isto fornecerá base sólida para as próximas etapas do método APIM.

5.5 Etapa P - Projeto

A segunda etapa do método APIM corresponde a letra P, que é relativa a parte do Projeto. Esta fase é subdividida em cinco etapas: i) dimensionamento do banco de capacitores; ii) especificação do comando e controle; iii) elaboração dos diagramas elétricos; iv) construção física do painel e v) Teste de Aceitação de Fábrica - TAF.

5.5.1 Dimensionamento do banco de capacitores

O processo de dimensionamento do banco de capacitores inicia com o cálculo da potência reativa indutiva, que se baseia no relatório de análise obtido na fase anterior. Este cálculo é importante para ajustar o fator de potência ao valor almejado. Segundo Cogo e Siqueira (2018), existem duas abordagens para determinar a potência reativa do BC: i) o método analítico, que utiliza fórmulas e cálculos matemáticos para obter o valor necessário e ii) o método tabular, que se baseia na utilização de tabelas predefinidas para identificar a potência reativa requerida.

A equação 5.3 expressa o cálculo da potência reativa por meio do método analítico. No método tabular, são utilizadas as tabelas dispostas nos Apêndices A.1, A.2 e A.3 para encontrar o fator de multiplicação. Conforme Mamede (2017), o fator de multiplicação encontrado é calculado em conformidade com a equação 5.7:

$$Q_{BC} = P \times \Delta tg \quad (5.7)$$

no qual Q_{BC} é a potência reativa do banco em kVAr, P é a potência ativa em kW e Δtg é o fator de multiplicação encontrado nas tabelas.

De acordo com Cogo e Siqueira (2018), os bancos de capacitores são sensíveis às tensões e podem facilmente ser danificados ou ter sua vida útil comprometida, logo, é recomendado especificar os bancos de capacitores com tensão acima da nominal do sistema onde será instalado. Para calcular a tensão nominal do banco de capacitores, recomenda-se utilizar a expressão 5.8:

$$U_{BCN} = U_N \cdot \xi \quad (5.8)$$

no qual U_N é a tensão nominal da rede em volts [V] e ξ é o fator multiplicador baseado no sistema (adimensional). Sistemas onde as cargas não lineares representam no máximo 20% da potência total instalada deve utilizar o fator multiplicador de 1,05 a 1,1. Para sistemas que possuem as cargas não lineares significativas (acima de 20%) é recomendado utilizar o fator de 1,1 a 1,4. Assim, para definir a potência reativa nominal do banco de capacitores em relação à tensão efetiva utiliza-se a expressão 5.9:

$$Q_{BCalc} = Q_{BC} \cdot \left(\frac{U_{BCN}}{U_N} \right)^2 \quad (5.9)$$

no qual Q_{BC} é a potência reativa do banco em kVAr, U_{BCN} é tensão nominal do banco de capacitores em volts [V] e U_N é a tensão nominal do sistema onde o BC será instalado em volts [V]. Nem sempre o Q_{BCalc} encontrado coincide com a potência reativa padrão dos capacitores, por isso, a potência reativa nominal do banco deve ser dada pela inequação 5.10:

$$Q_{BCN} \geq Q_{BCalc} \quad (5.10)$$

Uma vez estabelecida a potência reativa necessária, pode-se prosseguir com o dimensionamento dos componentes. Estes incluem: i) células capacitivas, responsáveis pela provisão da capacidade reativa; ii) dispositivos de proteção, que asseguram a operação segura do sistema; iii) dispositivos de manobra, utilizados para controlar o funcionamento do banco de capacitores; iv) condutores, para a conexão elétrica dos componentes; v) resistores de pré-carga, empregados para manejar condições iniciais de carga; vi) resistores de descarga, que facilitam a descarga segura de energia do sistema; e vii) indutores anti-harmônicos, destinados a mitigar os efeitos dos harmônicos no sistema.

5.5.1.1 Células capacitivas

De acordo com Cotrim (2009), os capacitores são produzidos tanto em configurações monofásicas quanto trifásicas e são projetados para operar em regimes de alta e baixa tensão. Estes dispositivos possuem especificações padronizadas em termos de potência, tensão e frequência. Geralmente, são configurados internamente em conexão delta e, no contexto de baixa tensão, são capazes de fornecer potências reativas de até 50 kVar. A Tabela 5.1 dispõe de alguns dados retirados da parte frontal do capacitor da EPCOS - *Power Quality Solutions*, modelo MKP400-D-10.0.

Tabela 5.1 - Especificações de capacitância do modelo.

U_N	$Q_N/50\text{Hz}$	$Q_N/60\text{Hz}$
400 V	10,0 kVar	12,0 kVar
380 V	9,1 kVar	10,9 kVar
240 V	3,6 kVar	4,3 kVar
230 V	3,3 kVar	4,0 kVar

Para a determinação da capacitância necessária que resulta na geração da potência reativa desejada no sistema, a expressão 5.11 pode ser empregada:

$$C = \frac{Q_{BC}}{V^2 \cdot 2\pi f} \quad (5.11)$$

no qual Q_{BC} é a potência reativa do banco em volt-ampere reativo [VAr], V é a tensão nominal em volts [V] e f é a frequência nominal em hertz [Hz].

Na determinação da quantidade de células capacitivas nos bancos de capacitores, tanto manuais quanto automáticos, a orientação da WEG (2009) sugere a divisão da capacidade total em estágios, com limite de 25 kVAr para sistemas de 380/440V e 15 kVAr para aqueles de 220V. Para sistemas automáticos, recomenda-se que o estágio seja configurado com a capacidade equivalente a 50% do maior estágio. Esta abordagem é adotada para aprimorar o ajuste fino do fator de potência. Controladores modernos, que operam com leitura por varredura, utilizam esta configuração para otimizar a seleção dos estágios de capacitores, adaptando-se às variações de carga do sistema. Nos bancos de capacitores manuais, a divisão da capacidade total em estágios múltiplos também é eficiente. Esta configuração facilita o ajuste manual do fator de potência, permitindo a ativação ou desativação seletiva dos estágios. Tal abordagem assegura a eficiência operacional do sistema e proporciona a flexibilidade necessária para ajustes em resposta a alterações futuras nas cargas.

5.5.1.2 Dispositivos de proteção

Na proteção do banco de capacitores, tanto para a salvaguarda geral do sistema quanto para a proteção individual da célula capacitiva, os dispositivos mais utilizados são fusíveis e disjuntores termomagnéticos. Conforme Cogo e Siqueira (2018), a boa proteção deve ser segura, rápida e sempre isolar ao máximo a unidade capacitiva defeituosa, assegurando a continuidade do serviço.

A filosofia fundamental por trás do uso dos fusíveis em bancos de capacitores visa assegurar que, na ocorrência de falha interna, as unidades capacitivas sejam desativadas imediatamente. Para bancos de capacitores monofásicos ou trifásicos de baixa tensão, recomenda-se a utilização de fusíveis com alta capacidade de ruptura, do tipo NH ou diazed. O dimensionamento dos fusíveis deve corresponder a 1,65 vezes a corrente nominal da unidade capacitiva, garantindo proteção efetiva sem comprometer o funcionamento do sistema. Normalmente, as unidades capacitivas individuais em bancos de baixa tensão são equipadas com fusíveis internos para

assegurar sua integridade operacional (COGO; SIQUEIRA, 2018).

Os disjuntores são dispositivos empregados tanto para manobra quanto para proteção em sistemas elétricos. Sua função primordial é conduzir correntes sob condições normais de carga e interromper correntes em situações de sobrecarga e curto-circuito. Ao implementar disjuntores para proteção dos bancos de capacitores, é necessário considerar o fator de proteção equivalente a 1,5 vezes a corrente nominal de cada célula capacitiva. Para a proteção geral do sistema, o fator de proteção também deve ser de 1,5 vezes, mas aplicado à soma das correntes nominais de todas as células capacitivas (CREDER, 2016).

5.5.1.3 Dispositivos de manobra

De acordo com Cogo e Siqueira (2018), os bancos de capacitores podem ser manobrados por três dispositivos: i) contator; ii) disjuntor termomagnético e iii) chave seccionadora. Os contadores são dispositivos acionados magneticamente, projetados para alimentar e interromper circuitos energizados. A principal característica é o elevado número de manobras que eles podem efetuar, sem que seja exigida a revisão ou substituição das partes mecânicas. O disjuntor termomagnético é destinado para a manobra de circuitos energizados e tem a capacidade de interromper automaticamente correntes de sobrecarga e de curto-circuito. As chaves seccionadoras, por sua vez, são utilizadas para garantir manutenções seguras, mas geralmente não são utilizadas para abertura com o sistema energizado.

Segundo Creder (2016), os dispositivos de manobra (disjuntores, contadoras e chaves) devem ser dimensionados para 150% da corrente nominal do capacitor. No caso das chaves seccionadoras para operação em carga e dos fusíveis, recomenda-se que este percentual seja 165% da corrente nominal do capacitor. Os fusíveis devem ser preferencialmente do tipo NH e os disjuntores podem ser do tipo caixa moldada.

5.5.1.4 Condutores

Conforme Niskier (2018), os condutores empregados nos bancos de capacitores devem apresentar capacidade de condução mínima correspondente a 135% da corrente nominal dos capacitores, além dos fatores de agrupamento e correção de temperatura. A determinação correta da seção transversal mínima dos condutores exige consulta às normas técnicas atualizadas, como a NBR 5410. O fator de 1,35 aplica-se especificamente aos condutores que conectam diretamente às células capacitivas. Para os condutores usados nos circuitos de comando, auxiliares e de controle au-

tomático do conjunto, a seleção deve estar em conformidade com as especificações normativas. Este procedimento garante o dimensionamento adequado de todos os condutores, contribuindo para a operação segura e eficiente do sistema e minimizando riscos de falhas decorrentes de inadequações na capacidade de condução dos condutores.

5.5.1.5 Resistores de pré-carga e descarga

Como abordado anteriormente, é recomendável dividir a capacidade total do banco em estágios. A restrição da potência capacitiva chaveada visa minimizar as correntes *inrush*, que são geradas durante a energização das células capacitivas individuais ou grupos de células. Estas correntes podem exceder mais de 100 vezes a corrente nominal do capacitor, levando a consequências indesejáveis como a queima dos fusíveis e danos aos contatos dos contatores (MAMEDE, 2017).

De acordo com Cogo e Siqueira (2018), na energização do banco de capacitores configurados em único estágio, o emprego dos limitadores de corrente geralmente não é necessário. A razão para isto é que a reatância intrínseca do sistema elétrico tende a atenuar os efeitos transitórios da energização, minimizando impactos adversos. Contudo, é importante ressaltar que esta abordagem depende das características específicas do sistema, como a reatância e a capacidade do banco de capacitores. Em bancos de múltiplos estágios é recomendável limitar ou reduzir o valor da corrente de energização utilizando bobinas antissurto ou resistores de pré-carga. A partir dos testes e simulações das perdas de energia no uso dos limitadores de corrente realizado pelos autores, foi concluído que o uso de resistores para amortecer transitórios prevalecem em sistemas de baixa tensão (amortece rapidamente), enquanto que na alta tensão os indutores são mais indicados.

A instalação dos resistores de pré-carga é realizada antes das células capacitivas para assegurar uma operação eficiente do sistema. Estes resistores são disponíveis para comercialização tanto em módulos independentes, quanto integrados aos contatores de potência. Diversos fabricantes de equipamentos elétricos contam com catálogo de contatores projetados especificamente para bancos de capacitores, que incluem resistores de pré-carga incorporados. A Figura 5.4 exemplifica modelo deste tipo de contator. O resistor de pré-carga e o contator em único dispositivo otimiza a eficiência do conjunto, além de proporcionar o ganho de espaço útil no compartimento onde serão instalados.

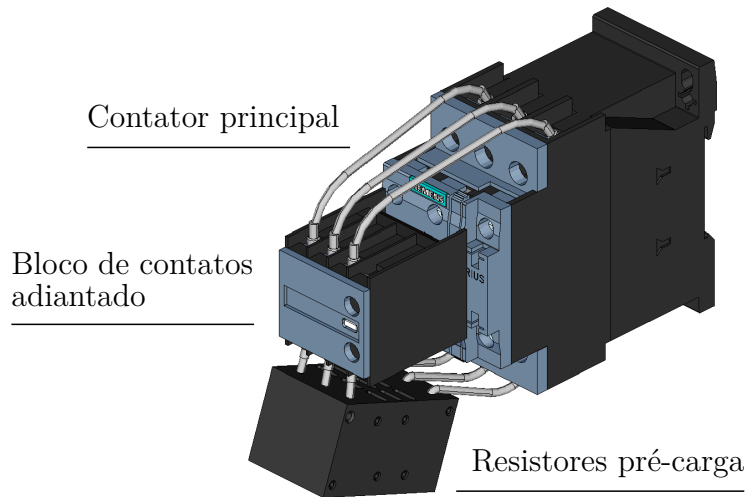


Figura 5.4 - Contator com resistor pré-carga incorporado.

Para contatores desprovidos da proteção integrada, o dimensionamento dos resistores de pré-carga requer referência aos catálogos técnicos fornecidos pelos fabricantes. Estes catálogos contêm dados pertinentes aos diversos modelos e suas respectivas aplicações, fornecendo parâmetros necessários para a seleção adequada do componente. A aderência às especificações técnicas nos documentos é relevante para assegurar a compatibilidade dos resistores com as características operacionais do contator.

Outro momento que requer atenção é na desconexão do banco de capacitores. Após a desenergização dos capacitores, é necessário drenar a carga elétrica residual para reduzir a tensão nos terminais a níveis seguros. A inserção do resistor entre os terminais serve para converter a energia elétrica retida no dielétrico em calor, através do efeito joule. Este dispositivo de descarga é tipicamente incorporado de fábrica na configuração interna da unidade capacitiva, prática adotada para facilitar a gestão da energia e a segurança (MAMEDE, 2017).

Adicionalmente aos dispositivos internos, existem módulos de descarga externos, que englobam variantes desenvolvidas especificamente para descargas rápidas. Em sistemas de controle de fator de potência, é necessário aguardar o tempo de descarga antes de reconectar o capacitor ou módulo à rede. Se a operação do sistema requer chaveamentos mais ágeis, o emprego dos módulos de descarga rápida torna-se solução viável. Estes módulos permitem o religamento acelerado dos capacitores, encurtando o período de descarga. Tal prática pode resultar na eliminação das resistências de descarga tradicionais, o que por sua vez reduz as perdas inerentes.

Ademais, a utilização dos módulos de descarga rápida aprimora a segurança, pois diminui consideravelmente o tempo necessário para a descarga completa dos capacitores, mitigando o risco de choques elétricos (SIEMENS, 2021).

Cogo e Siqueira (2018) alertam que não deve existir dispositivo de manobra ou proteção entre a unidade capacitiva e o dispositivo de descarga. A presença destes dispositivos neste ponto do circuito poderia impedir a descarga adequada do capacitor, mantendo a carga elétrica e potencialmente criando situação de risco. Além disso, os autores citam que a existência do resistor de descarga não elimina a necessidade de curto-circuitar os terminais entre si e o terra antes de qualquer manutenção.

5.5.1.6 Proteção contra harmônicos

A presença de distorções na forma de onda da tensão em instalações elétricas, causadas por cargas não lineares como inversores, retificadores, fornos de indução e iluminação com reatores, pode resultar em vulnerabilidades a fenômenos de ressonância quando capacitores são empregados para correção do fator de potência. Segundo Cotrim (2009), para mitigar estas vulnerabilidades, a estratégia eficaz é a inserção dos reatores anti-ressonantes em série com os capacitores, aumentando a impedância do circuito e, conseqüentemente, alterando as condições de ressonância do sistema. Alternativamente, filtros sintonizados em frequências específicas podem ser aplicados para atenuar harmônicos particulares.

A técnica anti-ressonância ou dessintonia é empregada com a escolha do reator a ser instalado em série com o capacitor, de forma que a impedância total do próprio conjunto LC e a rede em paralelo apresentem comportamento que não venha a ser alterado pela presença dos harmônicos. A convenção adotada para dimensionamento do reator é relacionar a impedância do reator à do capacitor, em que ele será conectado em série. A relação das duas impedâncias, em valores percentuais, definirá a especificação do reator (COTRIM, 2009). A equação 5.12 expressa esta relação:

$$p\% = \frac{Z_L}{Z_C} = \omega^2 \cdot LC \quad (5.12)$$

no qual $p\%$ corresponde ao fator de dessintonia, Z_L é a impedância do reator em ohms $[\Omega]$, Z_C é a impedância do capacitor em ohms $[\Omega]$, ω é a frequência angular em $[\text{rad/s}]$, L é a indutância em henry $[\text{H}]$ e C é a capacitância em farad $[\text{F}]$.

Além disso, deve-se atentar para a elevação da tensão no capacitor quando associado em série com o reator. Desta forma, os capacitores deverão ser sobredimensionados em tensão conforme a equação 5.13:

$$U_{\text{cap}} \geq \frac{U_{\text{rede}}}{1 - p\%} \quad (5.13)$$

Dado que as cargas industriais geralmente apresentam espectro harmônico característico, é viável a especificação dos reatores para diferentes tipos de instalações sem a necessidade de calcular reatores customizados, o que implicaria em custos adicionais nos sistemas de compensação. Conseqüentemente, os fabricantes tendem a padronizar a impedância dos reatores com base nos capacitores aos quais serão conectados, facilitando a seleção e aplicação destes componentes nos sistemas de energia elétrica.

Outra possibilidade de aplicação para mitigar o fenômeno da ressonância é o uso dos filtros passivos sintonizados em determinadas frequências. O filtro sintonizado é constituído por circuito RLC série, sintonizado para dada frequência harmônica (NISKIER; MACINTYRE, 2014). A sua impedância é definida pela expressão 5.14:

$$Z_f = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (5.14)$$

no qual R é a resistência em ohms $[\Omega]$, ω é a frequência angular em $[\text{rad/s}]$, L é a indutância em henry $[\text{H}]$ e C é a capacitância em farad $[\text{F}]$.

Os fabricantes adotam metodologias específicas para o dimensionamento dos filtros de harmônicas, com o objetivo comum de direcionar porção significativa, embora não total, das correntes harmônicas através do filtro (NISKIER, 2018). Geralmente, a frequência de ressonância dos filtros sintonizados é definida ligeiramente abaixo da frequência harmônica alvo; por exemplo, filtros destinados à 5^a harmônica são frequentemente sintonizados para frequências de 4,7 ou 4,8. Esta prática leva em consideração fatores como imprecisões na modelagem do sistema, tolerâncias na fabricação dos componentes do filtro, e variações na capacitância devido as alterações de temperatura (NISKIER; MACINTYRE, 2014).

Durante o processo do dimensionamento dos dispositivos destinados à proteção contra harmônicas, é fundamental a avaliação criteriosa do relatório elaborado na primeira fase da metodologia (5.4). Este documento é a compilação dos dados principais

do sistema, incluindo a identificação das frequências harmônicas predominantes, a magnitude das correntes e as tensões harmônicas, bem como a origem potencial destas distorções no sistema elétrico. A análise destes parâmetros é relevante para a seleção efetiva dos dispositivos de proteção, assegurando que sejam adequadamente dimensionados.

5.5.1.7 Climatização

Segundo a [ABNT \(2008\)](#), os painéis podem ser equipados com sistemas de refrigeração natural ou ativa, como ventilação forçada, climatização interna ou trocadores de calor. Nas situações onde a temperatura permanece dentro dos limites estabelecidos para a boa operação de cada componente do conjunto, a ventilação forçada pode não ser necessária. Contudo, caso a temperatura ultrapasse os limites definidos pelos fabricantes, torna-se necessário instalar a ventilação ou refrigeração adequada.

O sistema de ventilação forçada deve ser dimensionado de forma a manter a temperatura interna do painel dentro de parâmetros seguros, assegurando o bom funcionamento do conjunto e a vida útil dos componentes a ele associados. Segundo [Eletropoll \(2023\)](#), o modelo matemático resumido para sistemas de ventilação é expressa pela equação 5.15:

$$VENT = h \cdot \left[\frac{P_{\text{dis}} - kA(T_{\text{int}} - T_{\text{ext}})}{T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}} \right] \quad (5.15)$$

no qual $VENT$ é o volume do ar mínimo necessário em $[\text{m}^3/\text{h}]$, h é a altitude da operação em metros $[\text{m}]$, P_{dis} é a potência nominal dissipada em watts $[\text{W}]$, k é o coeficiente de transferência de calor, A é a área da superfície efetiva do painel que irradia calor em metros quadrados $[\text{m}^2]$, T_{int} é a temperatura interna do painel em $[\text{°C}]$ e T_{ext} é a temperatura do ambiente externo em $[\text{°C}]$. Após realizar o cálculo, determina-se o volume de ar requerido em metros cúbicos por hora $[\text{m}^3/\text{h}]$. Esta métrica deve ser alinhada aos modelos de ventilação comercialmente disponíveis, visando selecionar o sistema adequado para o painel.

5.5.2 Especificação do comando e controle

Após o dimensionamento dos componentes para o banco de capacitores, a etapa seguinte envolve a especificação dos dispositivos de comando. Estes permitem a operação dos bancos de capacitores em modo fixo, automático ou semiautomático. Nas instalações onde a operação é previsível e sem grandes variações de carga, o

modo fixo se mostra eficaz. Por outro lado, para a compensação dos reativos diante de grandes variações na carga, a utilização do comando automático é a abordagem comumente utilizada (CREDER, 2016).

Segundo WEG (2009), os contatores são amplamente empregados nos bancos de capacitores, tanto para controle manual, quanto para operação dos estágios em bancos automáticos. O controle pode ser realizado de duas formas: i) utilizando conjunto de botoeiras para operação manual ou ii) empregando controlador de fator de potência para operação automática. A operação manual requer a presença do operador para selecionar os estágios a serem ativados, mantendo as células capacitivas em funcionamento contínuo, independentemente da demanda por energia reativa capacitiva. Em contrapartida, o controlador automático ativa os estágios apenas quando necessário, baseando-se nos parâmetros pré-estabelecidos. Quando o sistema está fora de operação ou não há necessidade de energia capacitiva, o controlador desativa o banco de forma autônoma. Nos dois cenários descritos, o dispositivo de comando escolhido ativa a bobina dos contatores vinculados ao estágio específico que pretende operar. Conseqüentemente, os contatores fecham seus contatos de potência, permitindo a condução da alimentação elétrica até as células capacitivas.

Nas instalações onde o banco de capacitores opera em modo fixo durante as horas de atividade diária, mas requer desativação ao final do dia, a utilização do sistema de operação automática é uma solução eficiente para eliminar a necessidade de intervenção manual para desligar o sistema. Contudo, devido à natureza fixa da operação do banco, a implementação dos controladores de fator de potência pode resultar em solução economicamente inviável. Para estes casos, é interessante instalar dispositivos de controle que desligam os capacitores após o encerramento das atividades diárias. Conforme destacado por Cotrim (2009), na ausência destes dispositivos, a instalação está sujeita a experimentar sobretensões indesejadas e a incidência de cobranças por consumo reativo capacitivo durante períodos noturnos.

As estratégias para o controle automático divergem conforme os modelos dos controladores automáticos disponibilizados pelos diferentes fabricantes. Estes controladores apresentam recursos e funcionalidades que são exclusivos a cada modelo. De acordo com Cogo e Siqueira (2018), é usual que os controladores disponham de 6 a 12 estágios de saída, sendo a combinação dos estágios o determinante para a correção adequada do fator de potência. Em contextos industriais, a seleção de técnicas específicas para a compensação automática do fator de potência depende das necessidades e configurações da instalação. As abordagens utilizadas incluem: i)

controle automático com base em medições e ii) controle automático com base em temporização.

No controle automático baseado em medições, dispositivos de medição são utilizados para monitorar em tempo real os principais parâmetros da rede elétrica, como tensão, corrente e fator de potência. Estas informações são direcionadas ao controlador de fator de potência e permitem resposta dinâmica e precisa à demanda de reativos do sistema. Quando os parâmetros monitorados desviam de valores pré-determinados, o controlador ativa ou desativa estágios dos bancos de capacitores para manter o equilíbrio e a eficiência da rede. Este método é eficaz em ambientes com cargas variáveis e imprevisíveis, onde a demanda de reativos podem mudar rapidamente.

O controle automático com base na temporização opera segundo cronograma pré-definido, ajustando a operação do banco de capacitores de acordo com padrões de carga antecipados. Este método é geralmente programado com base em dados históricos e padrões de consumo, ativando ou desativando os bancos de capacitores em momentos específicos do dia ou em resposta a eventos programados. Este método é eficiente em sistemas com padrões de carga relativamente estáveis e previsíveis, onde as variações na demanda de reativos são bem conhecidas e consistentes ao longo do tempo.

5.5.3 Elaboração dos diagramas elétricos

Após a especificação do comando e controle, a próxima etapa envolve a elaboração dos diagramas elétricos e dimensionais, precedendo a implementação física do BC. Estes diagramas desempenham papel relevante na verificação da conformidade da construção, contribuindo para a redução de inconsistências e defeitos no processo. Além disso, permitem a análise prévia da disposição dos componentes, facilitando a montagem eficiente do painel.

Entre as ferramentas disponíveis para o desenvolvimento dos diagramas, cita-se o *software* EPLAN *Electric* P8, plataforma para o desenvolvimento dos diagramas elétricos e construtivos para variedade de sistemas, incluindo banco de capacitores. A funcionalidade de inserção dos dados de projeto no EPLAN automatiza a documentação, oferecendo não somente suporte na criação de desenhos e diagramas elétricos detalhados, mas também na gestão dos projetos de engenharia elétrica.

5.5.3.1 Diagrama unifilar

O diagrama elétrico unifilar é a representação gráfica simplificada do sistema elétrico, em que apenas o condutor ou caminho da corrente é mostrado (COTRIM, 2009). Para aplicações com bancos de capacitores, é necessário que o diagrama unifilar contenha as principais informações sobre o conjunto que está sendo projetado. Estas informações incluem: i) potência nominal do banco; ii) tensão nominal; iii) fator de potência; iv) proteção geral e v) localização. Este tipo de diagrama pode ser fixado na estrutura interna ou externa do invólucro onde o banco será construído, para facilitar o entendimento do operador acerca das principais informações do sistema. O Apêndice B.1 ilustra exemplo de diagrama unifilar do banco de capacitores instalado no barramento secundário do transformador.

5.5.3.2 Diagrama trifilar

O diagrama trifilar é a representação gráfica detalhada do sistema elétrico, onde são especificados todos os detalhes e características das ligações elétricas (COTRIM, 2009). Além das ligações, este diagrama deve conter os detalhes técnicos a respeito dos componentes que serão integrados no sistema, bem como suas particularidades. Esta etapa é indispensável na concepção e implementação do banco de capacitores, servindo como guia detalhado para a sua construção, operação e manutenção. Além disso, minimiza os erros e garante a ligação dos componentes a ele associado. Neste diagrama, dois aspectos principais devem ser destacados: i) o comando e ii) a força.

No comando, o diagrama deve detalhar os dispositivos destinados a operação manual ou o controlador do fator de potência, além dos outros acessórios relevantes para o sistema. O Apêndice B.2 ilustra o diagrama de comando de um banco de capacitor semiautomático.

A seção de força concentra-se nas conexões físicas e na distribuição da energia dentro do sistema. Neste caso, o esquema de ligação dos componentes de comando e proteção, como disjuntores, contadores e células capacitivas devem ser detalhados. O Apêndice B.3 ilustra o diagrama de força para o banco de capacitores semiautomático.

5.5.3.3 Diagrama construtivo

Após desenvolver os diagramas elétricos, o terceiro recurso que auxilia e otimiza tempo na construção do banco de capacitores é o diagrama construtivo. Este diagrama proporciona visualização antecipada da disposição de todos os componentes

do conjunto, permitindo a montagem eficiente e menor probabilidade de erros. É necessário incluir no diagrama a disposição de todos os elementos associados às seções de comando e força e suas respectivas legendas. Os apêndices B.4 e B.5 ilustram o exemplo de diagrama construtivo para banco de capacitores semiautomático.

5.5.4 Construção física do painel

A próxima fase do projeto envolve a construção física do banco de capacitores. Após a definição dos componentes que compõem o banco, é necessário estabelecer a estrutura que estes elementos serão instalados. O painel elétrico é compreendido como o conjunto dos equipamentos com suas respectivas interligações elétricas instalados dentro da estrutura (MAMEDE, 2013). De acordo com a ABNT (2017), existem dez categorias de estruturas para a montagem dos painéis elétricos. Na construção do banco de capacitores, os conjuntos para sobrepôr na parede e os conjuntos tipo armários apresentam-se como as opções mais adequadas, considerando as características dos componentes a serem incorporados. No entanto, a seleção pode diferir conforme os detalhes específicos de cada sistema. Independente da categoria escolhida, a seleção da estrutura deve atender a critérios de segurança relacionados à reserva de espaço para prevenir a lotação excessiva do painel, assegurar adequada ventilação interna e permitir futuras expansões. A ABNT (2008) especifica a proporção do espaço reserva obrigatório em painéis para ampliações futuras, baseando-se no número de circuitos instalados, conforme detalhado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Espaço reserva para painéis.

Quantidade de circuitos efetivamente disponível N	Espaço mínimo destinado a reserva (em número de circuitos)
até 6	2
7 a 12	3
13 a 30	4
N > 30	0,15 N

Com base neste critério e na quantidade dos componentes necessários para o banco, é possível determinar o tipo e as dimensões físicas adequadas para a estrutura onde o banco de capacitores será instalado. A montagem do banco de capacitores deve abranger as seguintes fases: i) montagem do *layout*; ii) passagem dos cabos; iii) identificação e iv) acabamento. Na fase de montagem do *layout*, todos os componentes projetados são fixados dentro do painel elétrico, estabelecendo o posicionamento e

a disposição física de cada item. Após a fixação dos componentes, a próxima etapa envolve a instalação dos cabos, que estabelece a conexão elétrica entre os dispositivos. A precisão do diagrama trifilar é de grande relevância para esta fase, orientando de forma efetiva a montagem. A etapa seguinte refere-se a identificação dos componentes e cabos, fase necessária para a funcionalidade do painel, pois facilita a identificação e o manuseio por parte dos operadores. A última fase do processo é o acabamento, que inclui a organização dos cabos e acessórios, garantindo a apresentação visual adequada. Todos os critérios obrigatórios definidos por normas técnicas (NBR 5410 e NBR 61439-1) devem ser considerados para a montagem dos bancos de capacitores.

Entretanto, além destes critérios, há práticas recomendadas por fabricantes dos equipamentos elétricos que contribuem significativamente para a construção. WEG (2009) especifica alguns requisitos para a instalação dos componentes do conjunto, dentre eles: i) a montagem das células capacitivas preferencialmente na posição vertical; ii) manter o espaçamento entre as células de no mínimo 20 mm; iii) garantir que as células estejam devidamente aterradas; iv) não realizar ligações paralelas diretamente nos terminais das células capacitivas; v) instalar as células em locais que permitam dissipação de calor eficiente; vi) não realizar soldas nos terminais das células capacitivas e vii) observar e respeitar a temperatura máxima permitida para todos os componentes.

5.5.5 Teste de Aceitação de Fábrica

O Teste de Aceitação de Fábrica (TAF) representa a última etapa da fase do projeto. É o processo de verificação e avaliação realizado no banco de capacitores antes da sua instalação em campo. Durante o TAF, todos os componentes do conjunto são submetidos a série de testes e inspeções para assegurar que estão de acordo com as especificações técnicas e que atendem aos padrões de segurança necessários. A ABNT (2008) estabelece alguns ensaios que são aplicáveis para bancos de capacitores, tais como: i) continuidade dos condutores de proteção; ii) resistência de isolamento; iii) ensaio de tensão aplicada e iv) ensaio de funcionamento.

O teste de continuidade tem a finalidade de assegurar que não existem interrupções indesejadas nos cabos, além de verificar se todos os circuitos foram ligados corretamente durante o processo da montagem do painel. O teste de resistência de isolamento avalia a qualidade da isolamento dos componentes, fator necessário para evitar curtos circuitos e garantir a segurança do conjunto. O ensaio de tensão aplicada verifica a capacidade do banco de capacitores de operar sem falhas com tensões

superiores a nominal. Este teste simula condições específicas do sistema e define a qualidade da isolação do conjunto. O ensaio de funcionamento deve ser realizado para verificar se os sistemas de comando e controle do BC estão operando de acordo com as especificações projetadas. Este ensaio inclui a avaliação do funcionamento adequado do contator para certificar a comutação dos contatos, o acionamento dos sinalizadores, a alimentação correta do controlador de fator de potência, entre outras verificações pertinentes.

Cada testes deve ser realizados seguindo os padrões técnicos estabelecidos por norma, assegurando que o banco de capacitores estará pronto para ser instalado e operado com confiabilidade e segurança. A ABNT (2008) enfatiza que, em situações de não conformidade nos ensaios, estes devem ser refeitos após a resolução do problema identificado, em conjunto com todos os testes anteriores que possam ter sido afetados.

Além dos testes e ensaios estabelecidos pela norma técnica, é aconselhável realizar verificações adicionais para assegurar a qualidade do painel. Estas incluem: i) inspeção visual do BC; ii) reaperto de todas as conexões; iii) verificação do aterramento em todas as partes aplicáveis e iv) avaliação da integridade dos cabos e componentes. Identificar problemas durante a fase da produção do painel elétrico é prática relevante, dada a maior viabilidade e eficácia das correções neste estágio, em comparação à intervenção após a instalação do painel no local de uso.

Conforme estabelecido pela ABNT (2008), as inspeções devem ser conduzidas por profissionais com qualificação adequada, experiência e competência na área de atuação. Os procedimentos de verificação, bem como os resultados obtidos, devem ser devidamente documentados em relatório formal. É importante que o relatório de inspeção, acompanhado das instruções de operação, das especificações técnicas dos componentes e de outros documentos pertinentes ao banco de capacitores, seja fornecido ao proprietário do conjunto após o término do projeto.

5.6 Etapa I - Instalação

Em terceiro lugar, está a etapa I, que aborda a fase da Instalação. Esta fase envolve a integração adequada do banco de capacitores na planta industrial. Como se trata de método sistemático, é importante que as etapas da análise e projeto estejam em conformidade, uma vez que o processo da instalação será diretamente influenciado por elas. A metodologia aplicada nesta etapa é fundamentada, principalmente, nos procedimentos estabelecidos por duas empresas de referência. A etapa da instalação

pode ser subdividida em cinco fases: i) preparação do local; ii) procedimentos de instalação; iii) integração com sistemas; iv) testes e comissionamento e v) relatório técnico de instalação.

5.6.1 Preparação do local

A preparação do local representa a etapa inicial do processo de instalação, influenciando a eficiência e a segurança do sistema. Este procedimento requer análise detalhada, abrangendo a avaliação das características específicas do local, condições ambientais, infraestrutura elétrica existente, adequação física do espaço, conformidade com normas de segurança e planejamento do acesso e logística.

5.6.1.1 Avaliação do ambiente

A avaliação do local para a instalação do BC requer a verificação da adequação do espaço em relação ao tamanho do painel. Esta análise inclui tanto a adequação espacial quanto o acesso ao local, fatores relevantes para a instalação e para manutenções futuras. É necessário garantir que o painel caiba no espaço designado, sem obstruir passagens ou outras instalações. A proximidade do painel às cargas alimentadas é fator a ser considerado para eficiência na distribuição de energia e minimização do uso de cabos longos. Se o painel projetado não se adequar ao espaço existente, o relatório detalhado deve ser elaborado para documentar a situação e avaliar soluções alternativas, situação comum em instalações antigas com espaço limitado.

5.6.1.2 Condições da localização

Baseado nas operações das empresas de engenharia consultadas, a seleção de local seco e ventilado para a instalação do painel é requisito para a proteção dos componentes contra umidade e temperaturas elevadas, o que auxilia na prevenção de danos e na manutenção do desempenho do equipamento. Áreas sujeitas à umidade ou exposição a substâncias corrosivas devem ser evitadas para preservar a integridade e durabilidade dos componentes. O monitoramento das condições ambientais no local do painel deve ser realizado de forma regular, assegurando ventilação adequada e ausência de acúmulo de água. Em locais com variações climáticas notáveis, pode ser necessário implementar sistemas de climatização ou isolamento térmico para manter a estabilidade ambiental e assegurar a operação do painel dentro dos parâmetros adequados. [Cogo e Siqueira \(2018\)](#) complementa que alguns cuidados na instalação dos bancos de capacitores são: i) evitar proximidade de equipamentos com temperaturas elevadas; ii) não bloquear a entrada e saída de ar dos quadros elétricos e iii)

evitar instalação de capacitores próximos ao teto das edificações.

5.6.1.3 Infraestrutura existente

A avaliação da infraestrutura elétrica existente é a etapa necessária para determinar se a mesma pode suportar a instalação do novo painel e a carga projetada. Esta avaliação inclui verificar a capacidade do circuito existente para alimentar o painel e a viabilidade de adicionar novas cargas. É igualmente relevante analisar a adequação dos transformadores, painéis de distribuição e o sistema de aterramento, com o objetivo de garantir que eles possam atender às novas demandas sem comprometer a segurança e a eficiência do sistema.

5.6.1.4 Preparação física do local

Inicia-se a preparação do local com limpeza completa da área, removendo detritos, poeira e materiais que possam interferir na instalação ou operação do painel. Assegurar que o solo esteja nivelado evita instabilidades, facilita o posicionamento e mitiga o acúmulo de água nas proximidades do painel. Além disso, em alguns casos, pode ocorrer a necessidade de realizar o reforço estrutural no local, especialmente se o terreno apresentar características que possam comprometer a estabilidade. Nestas situações, torna-se necessário construir fundações ou bases de concreto para proporcionar suporte adicional.

5.6.1.5 Segurança no local

A implementação de sinalizações adequadas é medida de segurança durante a instalação dos bancos de capacitores. Conforme estabelecido pelo [Ministério do Trabalho e Emprego \(2019\)](#), a Norma Regulamentadora N°10 (NR-10) que trata da segurança em instalações e serviços em eletricidade, deve ser adotada sinalização adequada de segurança, destinada à advertência e à identificação. O ambiente deve ser demarcado com sinalizações de advertência, alertando sobre os riscos, delimitando as áreas de operação, sinalizando restrições e impedimentos de acesso. Além disso, sinalizações específicas relacionadas às características operacionais e de segurança do painel são recomendadas para informar e proteger os trabalhadores envolvidos.

5.6.1.6 Acesso e logística

O planejamento logístico para o transporte do painel até o local de instalação é etapa que requer análise detalhada das características físicas do equipamento. Dependendo das dimensões e do peso do painel, o uso de equipamentos especializados

para elevação e movimentação pode ser necessário. Além disso, é importante assegurar rota desobstruída até o local de instalação, visando facilitar a chegada do painel de forma segura. Considerações sobre o acesso para manutenção futura e ajustes no sistema também são relevantes, focando na sustentabilidade e funcionalidade do sistema elétrico a longo prazo.

5.6.2 Procedimentos de instalação

A segunda etapa do processo de implementação do banco de capacitores (BC) é caracterizada pelos procedimentos de instalação. Esta fase compreende: i) posicionamento do painel, assegurando sua localização ótima para operação e manutenção; ii) elaboração da infraestrutura elétrica necessária, que envolve o estabelecimento de suportes e conexões adequadas; iii) conexão do painel à rede elétrica e às cargas especificadas; iv) realização do aterramento, relevante para a segurança operacional e v) atenção rigorosa aos aspectos de segurança, seguindo as normativas vigentes.

5.6.2.1 Posicionamento

O posicionamento do painel refere-se à disposição estratégica do equipamento no local designado, levando em consideração fatores como acesso, proximidade a fontes de energia, e condições ambientais favoráveis. Seguindo o projeto, o banco de capacitores deve ser colocado no local previamente preparado, com especial atenção ao alinhamento e nivelamento para garantir a estabilidade e a adequada operação do sistema. O uso de equipamentos de elevação, observando as normas de segurança, pode ser necessário em casos onde o painel possui dimensões ou peso significativos que impedem o manuseio manual seguro. Segundo [Cogo e Siqueira \(2018\)](#) e [WEG \(2009\)](#), recomenda-se manter o banco de capacitores afastado de fontes de calor e áreas com poeira ou óleo no ar. A instalação ideal é em locais afastados do teto e com boa circulação de ar, para favorecer a dissipação de calor e minimizar riscos de proximidade com quadros elétricos.

5.6.2.2 Infraestrutura elétrica

Uma vez posicionado o painel de bancos de capacitores, a etapa subsequente envolve estabelecer a infraestrutura adequada para conectar o painel às cargas designadas. Esta seleção depende da análise cuidadosa do projeto e das condições locais. Em situações com infraestruturas pré-existentes ou limitações estruturais, adaptações podem ser necessárias. Em tais casos, o uso de calhas ou eletrocalhas pode oferecer solução prática para a organização dos cabos. Para novas instalações, onde a infra-

estrutura interna é viável, eletrodutos subterrâneos oferecem proteção e preservam a estética do ambiente. A escolha do material para os eletrodutos deve atender a requisitos específicos do projeto. De acordo com as recomendações da WEG (2009), a instalação dos cabos de comando em tubulações blindadas é aconselhável, particularmente em contextos que envolvem dispositivos de comunicação em rede, como controladores automáticos do fator de potência e medidores de energia. Em ambientes onde a comunicação em rede é prevalente, a blindagem dos cabos é medida técnica para reduzir a interferência eletromagnética, garantindo assim a transmissão eficiente e segura de dados entre os dispositivos.

5.6.3 Segurança na instalação

Para garantir a segurança durante a instalação do banco de capacitores, é necessário adotar o conjunto de normas de segurança e práticas recomendadas. Esta abordagem integra treinamento técnico, uso de Equipamentos de Proteção Individual (EPI) e Coletiva (EPC), e a observância das normas regulamentadoras, especialmente as relacionadas ao trabalho com instalações elétricas. A qualificação e experiência dos profissionais envolvidos são importantes para a execução segura do trabalho, proporcionando conhecimento técnico adequado para identificar riscos e implementar as medidas de precaução necessárias. O treinamento conforme a NR-10, que aborda a segurança em serviços com eletricidade, é requisito.

No que se refere aos EPI, a legislação determina que os trabalhadores utilizem luvas isolantes, óculos de proteção, capacete, roupas com proteção contra chamas e incêndios e calçados de segurança. Além disso, a Norma Regulamentadora N°06 (NR-06), que trata do uso adequado dos EPI, orienta os profissionais a avaliar o ambiente de trabalho para determinar a necessidade de equipamentos adicionais de proteção. A implementação de EPC, como dispositivos de bloqueio para prevenir a energização acidental do sistema, contribui para a segurança do ambiente de trabalho.

A condição física e mental dos profissionais é aspecto relevante, considerando que o trabalho com instalações elétricas exige foco, precisão e vigilância constante. Portanto, é necessário que os profissionais estejam em condições adequadas de saúde e bem-estar para realizar tarefas que demandam alta concentração. O monitoramento das condições de trabalho também desempenha papel significativo na manutenção da segurança. O local de trabalho deve ser mantido limpo, organizado e livre de obstruções que possam representar risco, com iluminação adequada para garantir visibilidade e reduzir a probabilidade de acidentes.

5.6.4 Integração com sistemas

Nos bancos de capacitores automáticos, alguns modelos de Controladores de Fator de Potência (CFP) possuem soluções que permitem a integração com sistemas de gerenciamento de energia (MAMEDE, 2019). Equipamentos que possuem interfaces USB e Ethernet, por exemplo, oferecem a possibilidade de comunicação e controle avançados. Esta capacidade viabiliza a coleta detalhada dos dados sobre o consumo e a qualidade da energia, importante para análises e tomadas de decisão direcionadas à otimização do fator de potência. A integração destes controladores com sistemas mais amplos facilita a parametrização remota e a análise das medições, além de permitir o monitoramento contínuo das potências ativa, reativa e aparente, bem como das harmônicas. Outro exemplo de comunicação empregada nos CFP é a *ModBus*, utilizando o *software OPC Server*, que permite a integração a sistemas supervisórios ou CLPs. Esta comunicação habilita o acesso e controle remoto de qualquer ponto da rede, ampliando significativamente o alcance e a eficácia do monitoramento e gestão do sistema elétrico.

5.6.5 Testes e comissionamento

Após a instalação do painel na planta industrial, é necessário realizar a validação para verificar se a operação está em conformidade com o projeto. Esta validação envolve a execução de série de testes destinados a confirmar que o desempenho do painel atende às especificações técnicas estabelecidas. De acordo com a ABNT (2008), a Norma Brasileira 5410 (NBR 5410) estabelece que qualquer nova instalação, assim como a ampliação ou modificação de instalação existente, deve ser submetida a inspeção após a sua conclusão e antes de entrar em operação, a fim de assegurar que esteja em conformidade com as diretrizes estabelecidas pela norma.

5.6.5.1 Inspeção visual

A inspeção visual constitui o passo inicial no processo de avaliação do painel, conforme delineado pela ABNT (2008). Esta inspeção deve ser realizada antes de quaisquer testes e, idealmente, com a instalação desenergizada para promover a segurança durante a operação. O objetivo é verificar a conformidade de todos os componentes da instalação fixa permanente com as normas pertinentes, assegurando que foram selecionados e instalados de acordo com as diretrizes da norma e que estão livres de danos visíveis que possam afetar a operação ou a segurança do sistema.

Durante a inspeção visual, é importante examinar vários aspectos críticos. Estes

incluem a avaliação das medidas de proteção contra choques elétricos e efeitos térmicos, a análise da seleção e instalação das linhas elétricas, a avaliação dos dispositivos de proteção quanto à seleção, ajuste e localização, e a verificação da adequação dos componentes às condições de influências externas. A identificação correta dos componentes é também aspecto relevante a ser verificado cuidadosamente durante a inspeção. Este procedimento detalhado contribui para a manutenção da integridade e segurança da instalação elétrica.

5.6.5.2 Testes pré-energização

Esta fase inclui testes de continuidade e isolamento, que objetivam avaliar a solidez das conexões e os isolamentos em cada componente, contribuindo para a segurança operacional. De acordo com a [ABNT \(2008\)](#), é necessário aplicar o conjunto de ensaios nas instalações elétricas, adaptados às características de cada sistema. Estes ensaios incluem a verificação da continuidade dos condutores de proteção e equipotencializações. A norma permite o uso de técnicas alternativas para os ensaios, desde que os métodos produzam resultados equivalentes aos padrões estabelecidos. Essa abordagem facilita a incorporação de tecnologias avançadas, mantendo a confiabilidade dos resultados.

É importante verificar os dispositivos de segurança, como disjuntores e fusíveis, para garantir operação correta e a capacidade de desligar os circuitos adequadamente. Outros testes específicos incluem o de polaridade, relevante para sistemas com componentes sensíveis a este aspecto, e o de resistência de aterramento, que verifica a eficácia do sistema de aterramento. Além disso, a inspeção de integridade mecânica examina a segurança dos componentes mecânicos, como parafusos e suportes, para garantir sua fixação adequada.

5.6.5.3 Energização do painel

Após a implementação das medidas de segurança e a realização dos testes necessários para verificar a integridade dos instaladores e dos componentes do painel, procede-se à etapa de energização do painel. Esta fase exige cautela e inicia-se com revisão final das conexões e configurações para garantir sua correção. A energização é efetuada de forma progressiva e controlada, permitindo o monitoramento atento para identificação de possíveis anormalidades no sistema. O processo é realizado em etapas planejadas, possibilitando acompanhamento preciso e a monitoramento de parâmetros técnicos, como tensão e corrente, para confirmar que estão dentro dos limites estabelecidos. Uma vez que o painel esteja energizado, inicia-se os testes para

validar o funcionamento adequado de todos os componentes, incluindo disjuntores, relés e controles. Realizam-se também medições elétricas em vários pontos do painel para assegurar que os parâmetros estejam conforme as especificações técnicas. Após a conclusão satisfatória, o painel é considerado apto para operação regular e segura, em alinhamento com as diretrizes da NBR 5410.

5.6.5.4 Testes de Aceitação em Campo

O Teste de Aceitação em Campo (TAC), conforme definido pela ABNT (2019), deve ser executado após a entrega e a instalação do sistema. Este teste tem como objetivo verificar se as instalações estão em conformidade com as especificações técnicas pré-estabelecidas. O TAC é o passo preliminar que permite validar a eficiência operacional da solução. A NBR IEC 62381, aborda com profundidade este teste, com foco em sistemas de automação, porém, alguns critérios podem ser adaptados para a implementação do banco de capacitores.

Conforme a ABNT (2008), o planejamento do TAC inclui as etapas: i) reunião inicial para revisão da documentação e definição de cronogramas; ii) verificação da documentação do fornecedor quanto à conformidade dos documentos; iii) inventário de hardware e software para avaliar integridade e completude; iv) inspeção mecânica, incluindo sistemas de aterramento, alimentação e conexões; v) diagnósticos iniciais, que englobam a energização e inicialização dos sistemas, comissionamento de controladores e dispositivos, bem como a verificação de diagnósticos e vi) *download* do *software*.

Na aplicação do TAC a bancos de capacitores, conforme a ABNT (2008), certas etapas são relevantes. Inicialmente, a reunião para revisão de documentação e planejamento de cronogramas é realizada para estabelecer os procedimentos do teste. Segue-se a verificação da documentação do fornecedor, etapa necessária para assegurar a conformidade dos componentes do banco de capacitores com as especificações técnicas. A terceira etapa, envolve o inventário do *hardware*, tem como objetivo avaliar a integridade e completude dos componentes físicos. A inspeção mecânica, incluindo a avaliação dos sistemas de aterramento, alimentação e conexões, é realizada para verificar a segurança e funcionalidade do sistema. Os diagnósticos iniciais, que incluem a energização e inicialização do sistema, são efetuados para verificar a operação adequada dos capacitores e identificar possíveis falhas. Embora o *download* de *software* seja mais comum em sistemas de automação, a configuração e calibração de dispositivos de controle ou monitoramento associados ao banco podem ser consideradas.

5.6.5.5 Ressonância harmônica

Após a instalação do BC, a ocorrência da ressonância harmônica pode ser desafio técnico, independentemente da conclusão da análise, do projeto e dos procedimentos de instalação e testes. Duas variantes da ressonância podem ser observadas em sistemas elétricos: a ressonância série e a ressonância paralela. Na ressonância série, a combinação do transformador com o banco de capacitores cria circuito que sintoniza com frequências harmônicas geradas por fontes presentes no sistema. Este arranjo estabelece via de baixa impedância para a condução de correntes harmônicas específicas. Por outro lado, a ressonância paralela ocorre quando a indutância intrínseca do sistema fornecedor, como a rede da concessionária, e o banco de capacitores localizado na instalação do consumidor, entram em ressonância em frequência próxima àquela gerada por fontes harmônicas. Esta configuração resulta em caminho de alta impedância para a circulação da corrente harmônica em questão. Este fenômeno reflete a interação dinâmica entre componentes indutivos e capacitivos do sistema elétrico e as fontes de harmônicas, exigindo atenção cuidadosa para evitar impactos adversos na qualidade da energia elétrica (CREDER, 2016).

Ao identificar a presença de ressonância em frequência coincidente com a corrente harmônica na instalação, Creder (2016) sugere a implementação de alguma das seguintes estratégias: i) primeiramente, considerar a realocação parcial ou total do banco de capacitores para outra localização no sistema, visando alterar a dinâmica da ressonância; ii) alternativamente, a inserção do reator de dessintonia em série com o capacitor pode ser eficaz. Esta última abordagem tem como objetivo reduzir a frequência de ressonância do circuito para valor abaixo da frequência da corrente harmônica disruptiva. Ambas as soluções visam mitigar a ressonância harmônica, assegurando a integridade e a estabilidade do sistema.

5.6.5.6 Consequências de instalações incorretas

A instalação incorreta do BC, conforme WEG (2009) pode provocar a queima prematura dos capacitores ou de seus componentes de proteção e chaveamento associados. As principais consequências da instalação incorreta são: i) queima dos fusíveis; ii) expansão da unidade capacitiva; iii) corrente especificada abaixo da normal; iv) aquecimento nos terminais da unidade capacitiva; v) tensão acima da nominal e vi) corrente acima da nominal.

A queima dos fusíveis em sistemas com bancos de capacitores pode ser atribuída a diversos fatores, incluindo a utilização de capacitores de alta potência, *design* ina-

dequado do sistema, presença de harmônicos na rede de energia, desequilíbrios de tensão e a aplicação de tensão em capacitores previamente carregados. A expansão das unidades capacitivas pode ocorrer devido a variações no contator, altas temperaturas, tensão elevada, descargas atmosféricas, aquecimento causado por harmônicos e ultrapassagem da vida útil prevista dos componentes. Em cenários onde a corrente medida é inferior à nominal, é prudente considerar fatores como a tensão no capacitor, a presença de células danificadas ou a perda de capacitância interna. O aquecimento nos terminais da unidade capacitiva pode ser indicativo de mau contato nos terminais de conexão, erros na instalação ou calor excessivo no local de instalação. Além disso, a ocorrência de tensão acima da nominal pode resultar da ressonância paralela entre os capacitores e a carga na presença de harmônicos. Em situações com corrente acima da nominal, é importante avaliar possíveis causas, como o efeito de ressonância série entre os capacitores e o transformador, tensão elevada nos terminais do capacitor ou a presença de harmônicos no sistema (COGO; SIQUEIRA, 2018).

5.6.6 Relatório de instalação

Ao finalizar os procedimentos relacionados à instalação, é apropriado desenvolver o relatório final que detalhe todas as fases e informações coletadas durante o processo. Este relatório deve incluir a descrição das etapas desde a preparação inicial do local até a verificação dos testes realizados. O documento deve registrar de forma objetiva cada etapa do procedimento. Além disso, é recomendável incluir o registro fotográfico para fornecer referência visual das diferentes fases. Este elemento visual auxilia nas futuras atividades de manutenção, proporcionando compreensão clara dos procedimentos executados. O relatório deve detalhar a preparação do local, os procedimentos de instalação, a integração com o sistema de monitoramento, os resultados dos testes e o comissionamento. Este registro serve como recurso informativo para a manutenção e operações futuras do sistema de capacitores (COGO; SIQUEIRA, 2018).

5.7 Etapa M - Manutenção

Por último, a etapa representada pela letra M, refere-se à Manutenção. O termo é caracterizado como série de ações e intervenções técnicas que visam assegurar o desempenho ótimo e a funcionalidade de máquinas, equipamentos, componentes, moldes e ferramentas. Estas ações englobam não apenas a preservação das condições operacionais, mas também abrangem a execução de reparos e substituições necessárias para a extensão da vida útil e a garantia da segurança e eficiência no processo

produtivo (ALMEIDA, 2018).

Do ponto de vista dos bancos de capacitores esta prática envolve a inspeção regular, o teste de desempenho e a substituição ou reparo dos componentes defeituosos, assegurando que os bancos de capacitores funcionem de maneira eficiente por longos períodos. A fase da manutenção envolve as seguintes atividades: i) medidas mensais e ii) medidas semestrais.

5.7.1 Manutenções mensais

A WEG (2009) estabelece alguns critérios de inspeção: i) verificar visualmente todas as unidades capacitivas; ii) verificar a atuação do dispositivo de segurança interno, indicado pela expansão da caneca de alumínio no sentido longitudinal, verificando a necessidade de substituição por outra com a mesma potência; iii) verificar se há fusíveis queimados, procurando identificar a causa antes da troca; iv) verificar o funcionamento adequado dos contadores; v) nos bancos com ventilação forçada, comprovar o funcionamento do termostato e do ventilador; vi) medir a temperatura interna (máxima de 450°C); vii) medir a tensão e a corrente das unidades capacitivas; viii) verificar o aperto das conexões dos capacitores; ix) medir a tensão do barramento onde se encontram os capacitores e x) verificar possíveis pontos quentes, onde normalmente aparece uma crosta verde.

5.7.2 Manutenções semestrais

Com relação as medidas semestrais, Cogo e Siqueira (2018) e WEG (2009) sugerem: i) efetuar limpeza completa do armário metálico interna e externamente, usando álcool isopropílico; ii) reapertar todos os parafusos dos contatos elétricos e mecânicos; iii) medir a temperatura dos cabos conectados ao contator; iv) verificar o estado de conservação das vedações contra a entrada de insetos e outros objetos e v) realizar todos os procedimentos mensais periodicamente.

A adesão rigorosa a estes critérios de inspeção estabelecidos pela WEG (2009) e Cogo e Siqueira (2018) é importante para garantir a operação eficiente e segura dos bancos de capacitores. Realizar inspeções meticulosas e regulares conforme estas diretrizes não só asseguram a integridade dos componentes e a confiabilidade do sistema, mas também minimizam riscos de falhas, aumenta a vida útil dos equipamentos e contribui para a manutenção da qualidade da energia na rede. Além disso, a identificação proativa dos problemas potenciais através destas verificações permitem intervenções oportunas, evitando despesas maiores com reparos ou subs-

tituições inesperadas. Portanto, a conformidade com estes critérios não é apenas questão de manutenção preventiva, mas também uma estratégia essencial para otimização do desempenho e sustentabilidade operacional a longo prazo dos sistemas de compensação capacitiva.

5.8 Considerações finais

Este capítulo descreve a metodologia APIM (Análise, Projeto, Instalação e Manutenção) aplicada à correção do fator de potência em sistemas elétricos industriais, mais especificamente em baixa tensão. A metodologia seguiu abordagem integrada e metódica para o gerenciamento dos projetos com bancos de capacitores. Foi destacada a necessidade da análise detalhada em cada sistema, o planejamento adequado dos projetos, a realização das instalações com segurança e a prática das manutenções para garantir a eficiência e longevidade dos sistemas. O capítulo seguinte focará na apresentação dos Resultados e Discussões relacionados a esta abordagem.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, apresentam-se os resultados decorrentes da metodologia proposta. Inicialmente, são exploradas duas questões amplamente discutidas em relação à análise do fator de potência: a identificação das cobranças e a avaliação do fator de potência médio. Posteriormente, propõe-se a aplicação da etapa de Projeto (P) em cenário real. O capítulo é encerrado com discussões sobre a aplicabilidade e implicações do método no contexto da gestão de energia.

6.1 Cobrança de reativos na fatura

Na fase da Análise, é fundamental realizar o levantamento detalhado das faturas de energia elétrica da instalação, com foco particular na identificação das cobranças relativas à energia reativa. Frequentemente, este faturamento é interpretado erroneamente pelos consumidores como tarifa regular, em parte devido à forma como as cobranças são representadas nas faturas. Esta interpretação resulta em percepção equivocada da cobrança de energia reativa excedente como despesa comum, levando ao pagamento inquestionável das faturas sem análise criteriosa. Portanto, é necessário examinar atentamente para distinguir entre o consumo regular e as penalidades aplicadas por exceder os limites de energia reativa, garantindo a compreensão adequada do faturamento energético.

Para auxiliar na identificação, foram coletados dados de três unidades consumidoras pertencentes ao grupo A. A Tabela 6.1 dispõe dos dados de consumo de energia ativa [kWh] e reativa [kVArh] do primeiro caso, em que HR é a abreviatura de Horário Reservado e UFER é a sigla para Unidade de Faturamento Reativo Excedente.

Tabela 6.1 - Caso 1: histórico do consumo de energia elétrica.

Período	Consumo Lido (kWh)			UFER Lida (kVArh)		
	Ponta	Fora Ponta	HR	Ponta	Fora Ponta	HR
Ago/23	2809,51	27885,60	4341,60	2058,26	19656,00	0,00
Jul/23	2126,73	24710,40	4125,60	1279,36	15012,00	0,00
Jun/23	2047,89	26179,20	4492,80	928,36	13392,00	0,00
Mai/23	2000,16	26395,20	4039,20	946,51	13824,00	0,00
Abr/23	3139,99	31471,20	4665,60	1426,03	14580,00	0,00
Mar/23	1523,88	19224,00	3585,60	706,53	7689,60	0,00

A partir desta tabela, é perceptível que a instalação está consumindo Unidade de Faturamento Reativo Excedente (UFER). A Tabela 6.2 representa os lançamentos da unidade consumidora no mês de agosto de 2023, no qual DMCR é a demanda máxima corrigida registrada, TE FP é a tarifa de energia fora de ponta, TE HR é a tarifa de energia em horário reservado, TE P é a tarifa de energia na ponta, UFER FP é a unidade de faturamento reativo excedente fora de ponta, UFER P é a unidade do faturamento reativo excedente na ponta e IR LEI 9430 corresponde ao desconto do imposto de renda aplicado.

Tabela 6.2 - Caso 01: lançamentos da fatura em agosto/23.

Produto	Quantidade	Tarifa	Valor
Consumo Fora Ponta	27.885,60	0,175404	4.891,25
Consumo HR	4.341,60	0,175404	761,53
Consumo Ponta	2.809,51	1,855328	5.212,56
Demanda	242,78	28,879355	7.011,45
Demanda Ultrapassagem	42,76	57,758711	2.469,99
DMCR	53,57	28,879355	1.547,07
Parcela TE FP	27.885,60	0,343454	9.577,42
Parcela TE HR	4.341,60	0,343454	1.491,14
Parcela TE P	2.809,51	0,550155	1.545,67
UFER FP	19.656,00	0,360689	7.089,70
UFER P	2.058,26	0,360689	742,39
IR LEI 9430(-)			-849,46
Total			41.490,71

Os lançamentos UFER FP e UFER P confirmam a cobrança dos reativos. Estes valores correspondem a 18,87% do preço total da fatura. O segundo caso é referente a uma indústria situada no estado de Goiás. A Tabela 6.3, dispõe dos dados de consumo de energia ativa [kWh] e reativa [kVArh] da unidade.

Tabela 6.3 - Caso 02: histórico do consumo de energia elétrica.

Período	Consumo Lido (kWh)			UFER Lida (kVArh)		
	Ponta	Fora Ponta	HR	Ponta	Fora Ponta	HR
Out/23	5180,57	43134,00	13347,60	602,95	8576,40	0,00
Set/23	5524,80	48073,20	12209,40	666,37	5535,60	0,00
Ago/23	3183,81	22293,60	7442,40	400,17	2814,00	0,00
Jul/23	233,64	1377,60	667,80	46,74	512,40	0,00
Jun/23	3254,83	23465,40	8639,40	272,66	2444,40	0,00
Mai/23	1303,93	6980,40	2461,20	289,93	2486,40	0,00

Novamente, nota-se o consumo de UFER no histórico. A Tabela 6.4, representa os lançamentos da unidade consumidora no mês de outubro de 2023, no qual Parc. TE é abreviatura para Parcela da Tarifa de Energia.

Tabela 6.4 - Caso 02: lançamentos da fatura em outubro/23.

Produto	Quantidade	Tarifa	Valor
Energia Ativa Fornecida Fora Ponta	43.134,00	0,174300	7.518,26
Energia Ativa Fornecida HR	13.347,60	0,174300	2.326,49
Energia Ativa Fornecida Ponta	5.180,57	1,843655	9.551,18
Demanda	225,0000	28,697670	6.456,98
Energia Injetada Fora Ponta	310,80	0,341294	-106,07
Energia Injetada Fora Ponta	310,80	0,174300	-54,17
Energia Ativa Fornecida Fora Ponta - Parc. TE	43.134,00	0,341294	14.721,38
Energia Ativa Fornecida HR - Parc. TE	13.347,60	0,341294	4.555,46
Energia Ativa Fornecida Ponta - Parc. TE	5.180,57	0,546694	2.832,19
UFER FP	8.576,40	0,358420	3.073,95
UFER P	602,95	0,358420	216,11
Contribuição Iluminação Pública - Municipal			-13,06
Total			51.078,70

Analisando a tabela percebe-se cobrança de UFER, porém, menor que no primeiro caso. Esta cobrança corresponde a 6,44% do valor da fatura total. Por fim, o último caso é específico de um irrigante. A Tabela 6.5 dispõe dos dados de consumo de energia ativa [kWh] e reativa [kVArh] da unidade.

Tabela 6.5 - Caso 03: histórico do consumo de energia elétrica.

Período	Consumo Lido (kWh)			UFER Lida (kVArh)		
	Ponta	Fora Ponta	HR	Ponta	Fora Ponta	HR
Ago/23	1561,60	59288,05	55602,15	429,72	5830,20	1088,55
Jul/23	1967,30	53244,65	31996,40	533,67	5471,45	727,75
Jun/23	853,33	45829,80	30504,00	423,77	3355,85	444,85
Mai/23	117,64	16346,70	8607,95	258,25	2179,15	684,70
Abr/23	61,15	305,45	1,3120	313,62	1449,35	291,10
Mar/23	25,78	180,40	108,65	124,04	744,15	155,80

Novamente é mostrado o consumo de UFER no histórico. A Tabela 6.6 representa os lançamentos da unidade consumidora no mês de agosto de 2023, no qual UFER

HR é a unidade de faturamento reativo excedente no horário reservado e UFER P é a unidade do faturamento reativo excedente na ponta. Os descontos mencionados nos lançamentos estão relacionados aos benefícios concedidos a esta unidade, uma vez que trata-se de consumidor exclusivamente rural de irrigação, de acordo com o disposto no artigo 186º, inciso II da Resolução 1000/2021 da ANEEL (ANEEL, 2021).

Tabela 6.6 - Caso 03: lançamentos da fatura em agosto/23.

Produto	Quantidade	Tarifa	Valor
Consumo Fora Ponta c/ Desconto 2%	59.288,05	0,142672	8.458,74
Consumo HR c/ Desconto 80%	55.602,15	0,029117	1.618,97
Consumo Ponta c/ Desconto 2%	1.561,60	1,509123	2.356,65
Demanda c/ Desconto 2%	274,7000	23,490467	6.452,83
Demanda Ultrapassagem	119,700	47,939730	5.738,39
DMCR	9,08	23,969865	217,68
Parcela TE FP c/ Desconto 2%	59.288,05	0,317460	18.821,58
Parcela TE HR c/ Desconto 80%	55.602,15	0,064788	3.602,35
Parcela TE P c/ Desconto 2%	1.561,60	0,508517	794,10
UFER FP	5.830,20	0,340195	1.983,40
UFER HR	1.088,55	0,340195	370,32
UFER P	429,72	0,340195	146,19
Benefício Tarifário Bruto			21.638,13
Benefício Tarifário Líquido			-19.007,62
Total			53.191,71

Entre os casos mencionados é perceptível que esta unidade possui cobrança de UFER bem menor que nas demais faturas. Esta cobrança corresponde a 4,69% do valor da fatura total. A análise dos três casos evidencia a apresentação típica da cobrança por energia reativa excedente nas faturas de energia elétrica. Esta análise destaca a complexidade na interpretação destas cobranças, principalmente para indivíduos não familiarizados com o assunto. A identificação da cobrança como penalidade não é óbvia, o que ressalta a necessidade de estratégias eficazes para mitigar o impacto financeiro decorrente do consumo excessivo de energia reativa.

6.2 Medição do fator de potência médio

No contexto da análise do fator de potência para a implementação do banco de capacitores, surge frequentemente a questão sobre a viabilidade de determinar o fator de potência médio da instalação utilizando informações disponíveis nas faturas

de energia. Esta abordagem é considerada por algumas empresas como alternativa para reduzir os custos associados ao processo de avaliação. A partir das Tabelas 6.1, 6.3 e 6.5 calcula-se o fator de potência médio mensal destas unidades ao longo dos meses, representadas nas Tabelas 6.7, 6.8 e 6.9, respectivamente.

Tabela 6.7 - Caso 01: fator de potência médio mensal.

Mês	FP Médio
Ago/23	0,850
Jul/23	0,885
Jun/23	0,916
Mai/23	0,910
Abr/23	0,926
Mar/23	0,945

Tabela 6.8 - Caso 02: fator de potência médio mensal.

Mês	FP Médio
Out/23	0,989
Set/23	0,996
Ago/23	0,995
Jul/23	0,971
Jun/23	0,997
Mai/23	0,997

Tabela 6.9 - Caso 03: fator de potência médio mensal.

Mês	FP Médio
Ago/23	0,998
Jul/23	0,997
Jun/23	0,999
Mai/23	0,992
Abr/23	0,276
Mar/23	0,499

Há dois aspectos críticos identificados na análise média das faturas de energia se-

lecionadas. Primeiramente, a potência reativa utilizada nos cálculos corresponde ao UFER, que representa a potência faturada abaixo do fator estipulado pela ANEEL. Este dado não reflete a totalidade da potência reativa consumida no mês. Em segundo lugar, o cálculo do fator médio não considera as variações do consumo de energia ao longo do mês. Assim, a aplicação direta dos dados presentes na fatura, sem análise crítica, pode resultar em interpretações imprecisas do sistema em questão. É necessário exame detalhado destes aspectos para avaliação precisa do consumo energético.

Segundo Cotrim (2009), a seleção do método e do projeto para compensação de energia reativa requer avaliação detalhada do perfil de carga da instalação, uma vez que a análise baseada unicamente no fator de potência médio pode levar à escolha de solução não adequada. Esta observação é corroborada pelos dados observados nos casos 02 e 03. No caso 02, apesar do fator de potência médio ter mantido acima de 0,92 em todos os meses, registrou-se cobrança de energia reativa na fatura de outubro de 2023. Tal cobrança ocorreu devido à avaliação horária do fator de potência, que indicou a injeção de reativos acima do limite em certos períodos do ciclo de faturamento. No caso 03, a situação foi semelhante no mês de agosto, onde, apesar do fator de potência médio elevado, houve incidência de cobrança de UFER. Adicionalmente, a unidade 03 apresentou baixos valores de fator de potência em abril e março de 2023, atribuídos a problemas de medição ocorridos nestes meses.

6.3 Análise de caso: aplicação da etapa P

No desenvolvimento da metodologia APIM, identificaram-se obstáculos que limitaram a sua execução integral, discutidos na seção 6.4. Para ilustrar parte da sua aplicabilidade, optou-se pela realização da etapa P em contexto real, especificamente no projeto do banco de capacitores para uma indústria avícola localizada em Goiás. A fase da Análise, realizada por empresa terceirizada, indicou a necessidade do banco de capacitores semiautomático de 55 kVAr para sistema 380 V. Portanto, propõe-se a execução completa da etapa Projeto para construir o painel requisitado.

6.3.1 Dimensionamento do banco de capacitores

A configuração inicial do dimensionamento envolve a determinação do número de estágios. No banco de capacitores automático, conforme as orientações técnicas, os estágios foram estabelecidos da seguinte forma: i) 1º estágio com 3 kVAr; ii) 2º estágio com 6 kVAr; iii) 3º estágio com 9 kVAr; iv) 4º estágio com 12 kVAr e v) 5º estágio com 25 kVAr. Esta divisão facilita o ajuste fino do fator de potência, considerando

o estágio de 25 kVAr como o valor máximo. Para a seleção dos capacitores, optou-se por modelos de 440 V, seguindo a recomendação na escolha de equipamentos com tensão superior à nominal do sistema. Nesta situação, não houve necessidade de converter a potência reativa em capacitância, haja vista que os modelos dos capacitores já foram catalogados em potência reativa.

Os dispositivos de proteção, tanto para proteção geral quanto para a proteção individual dos capacitores, foram disjuntores termomagnéticos. Utilizando o fator de segurança de 1,5 vezes, a Tabela 6.10 dispõe dos dados dos disjuntores individuais, no qual I_n corresponde a corrente nominal. A soma das correntes nominais dos capacitores resulta em 71,8 A. Conseqüentemente, o disjuntor destinado à proteção geral do painel é especificado para 108 A. Entretanto, não há disponibilidade comercial de disjuntores com este valor exato de ajuste de sobrecarga. Por isso, selecionou-se o disjuntor com faixa de regulagem entre 88 a 125 A, permitindo o ajuste manual para adequar-se às necessidades específicas do sistema.

Tabela 6.10 - Dimensionamento dos disjuntores.

Capacitor	I_n do Capacitor (A)	I_n do Disjuntor (A)
Trifásico 25 kVAr 440V	32,5	50
Trifásico 12 kVAr 440V	15,8	25
Trifásico 9 kVAr 440V	11,8	20
Trifásico 6 kVAr 440V	7,8	13
Trifásico 3 kVAr 440V	3,9	6

Neste projeto, os dispositivos de manobra selecionados foram contatores. De acordo com as especificações do fabricante, os modelos dos contatores são determinados com base na capacidade de cada capacitor, sem a necessidade de fazer o dimensionamento manual. Os contatores escolhidos já vêm equipados com resistores pré-carga. Os condutores foram especificados em conformidade com a NBR 5410. Para os condutores do circuito de força, aplicou-se o fator de segurança de 1,35. A seção dos condutores podem ser identificados nos esquemas dos circuitos de comando e força ilustrados nas Figuras C.2, C.3, C.4 e C.5.

Baseado nas informações fornecidas pelo cliente, não houve necessidade de projetar proteções contra harmônicas no banco de capacitores, devido a baixa probabilidade de ocorrer ressonância no sistema. Com relação a climatização, o cliente forneceu as informações das condições de instalação e operação do painel. Desta forma, foi

definido que o sistema de ventilação deveria ser o ventilador com vazão de 480 m³/h em conjunto com o exaustor.

Desta forma, a lista de materiais selecionados está disposta na Tabela 6.11, no qual QTD é abreviatura para quantidade e UN é abreviatura para unidade. O Transformador de Corrente (TC) é empregado para transmitir dados da corrente na fase R do circuito ao controlador de fator de potência. Esta informação é apresentada na interface do controlador e serve como parâmetro necessário para a execução de cálculos de outras unidades do sistema elétrico.

Tabela 6.11 - Lista de materiais.

ITEM	DESCRIÇÃO	QTD	UN
1	Quadro de Sobrepor 1200x800x300mm	1	PÇ
2	Disjuntor de Caixa Moldada 88-125A	1	PÇ
3	Bloco de Distribuição 125A	1	PÇ
4	Minidisjuntor 1P 2A 3kA	4	PÇ
5	Minidisjuntor 1P 10A 3kA	1	PÇ
6	Minidisjuntor 3P 6A 15kA	1	PÇ
7	Minidisjuntor 3P 13A 15kA	1	PÇ
8	Minidisjuntor 3P 20A 15kA	1	PÇ
9	Minidisjuntor 3P 25A 15kA	1	PÇ
10	Minidisjuntor 3P 50A 15kA	1	PÇ
11	Contator para Capacitor 0-14kVAr	4	PÇ
12	Contator para Capacitor 8,7-30kVAr	1	PÇ
13	Capacitor Trifásico 3kVAr 440V	1	PÇ
14	Capacitor Trifásico 6kVAr 440V	1	PÇ
15	Capacitor Trifásico 9kVAr 440V	1	PÇ
16	Capacitor Trifásico 12kVAr 440V	1	PÇ
17	Capacitor Trifásico 25kVAr 440V	1	PÇ
18	Controlador de Fator de Potência BR6000	1	PÇ
19	Transformador de Corrente 150/5A	1	PÇ
20	Comutador 3 posições	5	PÇ
21	Sinaleiro LED Azul 220V	5	PÇ
22	Lâmpada para Pannel 5W 220V	1	PÇ
23	Ventilador para Pannel 480 [m ³ /h]	1	PÇ
24	Exaustor para Pannel 480 [m ³ /h]	1	PÇ
25	Chave de Aferição	1	PÇ

6.3.2 Especificação do comando e controle

No contexto da especificação para comando e controle, o banco de capacitores em questão é categorizado como semiautomático. O controle será realizado pelo Controlador de Fator de Potência de seis estágios. O *design* do controlador permite a comutação dos estágios de capacitores com precisão, visando a otimização do fator de potência. A escolha do referido controlador baseou-se em sua habilidade de responder às variações de carga da instalação e na sua compatibilidade com a infraestrutura pré-existente.

6.3.3 Elaboração dos diagramas elétricos

A partir dos dispositivos selecionados, inicia-se o desenvolvimento dos diagramas elétricos para representar o circuito unifilar, multifilar e construtivo do painel. As Figuras C.1, C.2, C.3, C.4, C.5, C.6 e C.7 ilustram os diagramas projetados no *software* EPLAN *Electric* P8.

6.3.4 Construção física do painel

O processo da construção do painel seguiu todos os procedimentos estabelecidos na subetapa 5.5.4, dentre elas: i) consideração do espaço reserva para 2 circuitos; ii) montagem do *layout*; iii) passagem dos cabos; iv) identificação e v) acabamento. As Figuras 6.1 e 6.2 ilustram o painel finalizado.

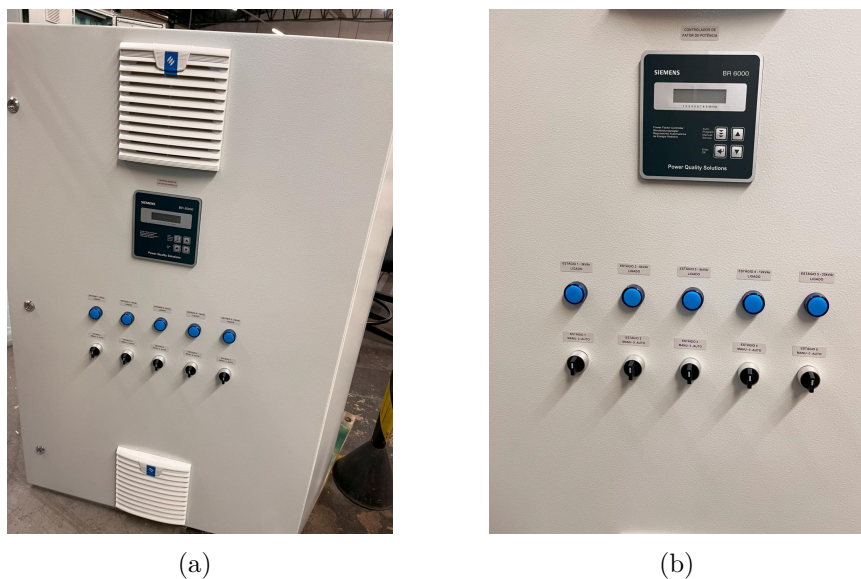


Figura 6.1 - Construção física do painel: (a) vista frontal externa e (b) vista frontal do controlador de fator de potência.

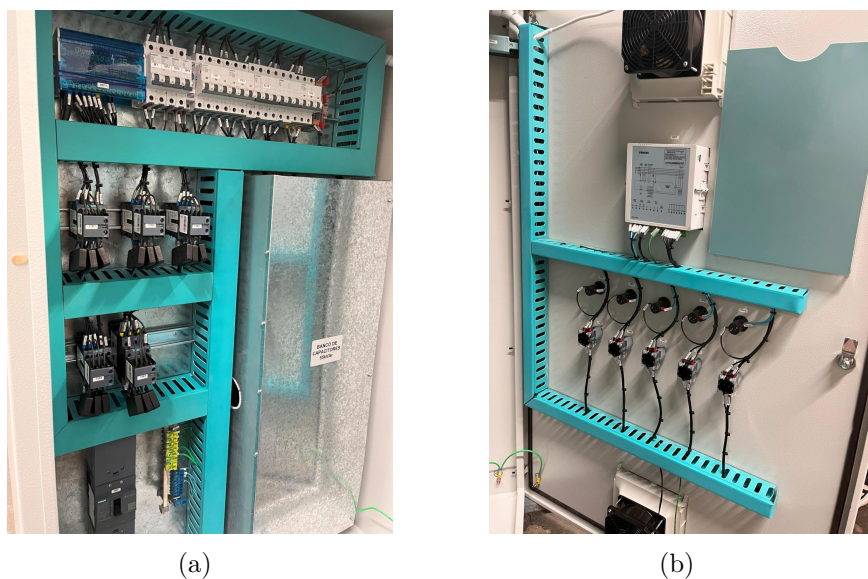


Figura 6.2 - Construção física do painel: (a) vista frontal interna do painel e (b) vista interna da porta do painel.

6.3.5 Teste de Aceitação de Fábrica

No painel, foram realizados todos os testes listados na metodologia APIM, tais como: i) continuidade dos condutores de proteção; ii) resistência de isolamento; iii) ensaio de tensão aplicada; iv) ensaio de funcionamento; v) inspeção visual e vi) reaperto das conexões. As Tabelas 6.12, 6.13 e 6.14, dispõem os resultados das verificações, valores da resistência de isolamento e testes, respectivamente, no qual AP é abreviatura para aprovado, LP é lista de pendências e NA é não aplicável. A Figura 6.3 ilustra a execução do ensaio de tensão aplicada.

Tabela 6.12 - Resultados das verificações.

Descrição das Verificações	AP	LP	NA
Aspecto geral do painel elétrico	X		
Dimensional e pintura	X		
Presença de todos os componentes citados no diagrama elétrico	X		
Presença de etiquetas e identificações	X		
Presença de identificação de bornes e cabos conforme diagrama	X		
Presença do esquema elétrico no porta desenhos	X		
Presença de catálogos dos principais componentes do painel			X
Presença de fusíveis funcionais (quando usados)			X
Presença de fusíveis reserva			X
Presença de chave na porta		X	
Aterramento de todas as partes metálicas do quadro	X		
Verificação das seções mínimas adotadas para cabos	X		
Verificação das cores especificadas para a cablagem	X		
Presença do adesivos e especificações do painel	X		

Tabela 6.13 - Resistências de isolamento.

Descrição dos Ensaios	Medição
Valor da resistência de isolamento entre fase R e fase S	485 M Ω
Valor da resistência de isolamento entre fase R e fase T	390 M Ω
Valor da resistência de isolamento entre fase S e fase T	530 M Ω
Valor da resistência de isolamento entre fase R e terra	340 M Ω
Valor da resistência de isolamento entre fase S e terra	295 M Ω
Valor da resistência de isolamento entre fase T e terra	280 M Ω

Tabela 6.14 - Resultados dos testes.

Descrição dos Testes	AP	LP	NA
Sequência de fases - R,S,T com uso do fasímetro			X
Teste de continuidade geral	X		
Teste de funcionamento	X		
Simulação com instrumentos de medição (multímetro)	X		
Ajuste de todos os disjuntores conforme dados do esquema elétrico	X		
Verificação do circuito de iluminação interna do painel		X	
Verificação do circuito de desumidificação do painel			X
Verificação do circuito do condicionador de ar			X
Verificação do circuito de ventilação do painel	X		
Tensão aplicada (1,5 kV/1 min.) entre as fases e entre fases e terra	X		
Tensão aplicada (2,0 kV/1 min.) entre as fases e entre fases e terra	X		
Verificação do nível de isolamento com o megômetro	X		



(a)



(b)

Figura 6.3 - Ensaio de tensão aplicada: (a) execução do ensaio e (b) equipamentos para ensaio.

Durante a análise do Teste de Aceitação de Fábrica (TAF), dois problemas foram encontrados: i) ausência da chave na porta do painel e ii) falha no circuito de iluminação interna. A chave em questão não foi encontrada, o que levou à necessidade de aquisição de substituta. Quanto ao circuito de iluminação, a inspeção revelou falha na chave fim de curso, cuja substituição foi suficiente para corrigir o defeito. Ademais, os valores mensurados para a resistência de isolamento estão em alinhamento com os requisitos estipulados pela NBR 5410. Conclui-se a etapa do Projeto com a entrega do banco de capacitores de acordo com as especificações requeridas. Foram elaborados e fornecidos os diagramas dos circuitos, a montagem do painel foi realizada em conformidade com as diretrizes técnicas aplicáveis e os testes conduzidos, seguindo os padrões estabelecidos, validando o desempenho do sistema.

6.4 Implementação da Metodologia

A metodologia APIM não foi integralmente implementada em estudo de caso, devido a fatores específicos. Estes incluem: i) ausência de método comparável; ii) restrições temporais para a implementação completa; iii) disponibilidade de estudos centrados em análises de casos; iv) desafios na formação de parcerias e v) a complexidade envolvendo múltiplos setores.

Através das revisões bibliográficas realizadas, não foi encontrado conteúdo que englobasse integralmente todo o processo de implantação de bancos de capacitores no setor industrial. Isto demandou pesquisa detalhada sobre o tema, envolvendo a coleta de literatura, artigos, manuais e outras fontes, com o objetivo de desenvolver o método que abarcasse todas as etapas necessárias. Se houvessem pesquisas similares existentes, o tempo dedicado ao desenvolvimento poderia ter sido reduzido, tornando a aplicação prática mais ágil. Além disso, este trabalho pode servir como ponto de partida para pesquisas subseqüentes relacionadas ao fator de potência, permitindo que outros estudantes e profissionais proponham estudos para aplicar a metodologia em contextos específicos, avaliando sua eficácia e desempenho. Com base nos resultados obtidos, tais estudos podem sugerir melhorias e refinamentos para tornar o método ainda mais confiável e eficiente.

O processo de correção do fator de potência é atividade que demanda período considerável de tempo, variando de acordo com as características específicas do sistema. As fases da Análise e Instalação tendem a ser relativamente rápidas, enquanto a etapa de Projeto pode estender-se por meses, dependendo da complexidade da solução. Isso se deve, em parte, à necessidade de aquisição de materiais que compõem o banco de capacitores, muitos dos quais podem ser importados, envolvendo considerações logísticas. Além disso, a Manutenção implica em ações regulares, tanto mensais quanto semestrais, resultando em período prolongado para coleta e avaliação dos resultados desta fase.

Durante a revisão da literatura, observou-se a existência de diversos trabalhos de pesquisa que abordaram análises de casos relacionadas à correção do fator de potência no contexto industrial, indicando o interesse crescente na abordagem prática deste tema. Entretanto, muitos destes trabalhos não adotaram estrutura sistemática para conduzir suas análises, o que pode dificultar a compreensão abrangente devido à complexidade intrínseca desta área. Neste contexto, o desenvolvimento do método APIM oferece contribuição relevante ao fornecer estrutura metodológica que pode servir como base para futuras pesquisas.

Devido à natureza inovadora do método desenvolvido, enfrentou-se desafios na identificação de organizações e indivíduos dispostos a aplicar a metodologia. Com a disseminação deste estudo em diversas plataformas, incluindo sites acadêmicos, ambientes educacionais, artigos científicos e setores industriais, espera-se que surjam oportunidades para conduzir avaliações do conjunto de procedimentos propostos, validando assim a confiabilidade da metodologia e possibilitando a formulação de

melhorias.

Diante da complexidade e da necessidade de coordenação entre múltiplos setores, é comum que empresas façam escolhas estratégicas ao direcionar seus esforços para fases específicas da metodologia, como análise ou projeto, em detrimento da implementação integral de todas as etapas. Tal abordagem visa otimizar a alocação de recursos e concentrar-se nas áreas de especialidade de cada organização. Consequentemente, a implementação completa do método pode se revelar desafiadora, sobretudo quando múltiplas empresas precisam colaborar para concluir todas as etapas do processo.

Com base nos elementos previamente mencionados e na análise abrangente conduzida neste estudo, a metodologia APIM se apresenta como o principal resultado desta pesquisa. Sua relevância é ampla, dada a capacidade de fornecer abordagem sistemática e eficaz para abordar desafios críticos no âmbito da engenharia elétrica, mais especificamente relacionados à correção do fator de potência em ambientes industriais. O impacto potencial da metodologia transcende os limites deste estudo, uma vez que tem o potencial de influenciar de maneira positiva tanto o campo acadêmico quanto a prática industrial. Portanto, a metodologia APIM não apenas representa a culminação deste trabalho de pesquisa, mas também aponta para direções promissoras para futuras investigações e aplicações.

6.5 Discussões

A pesquisa revelou que a presença de potência reativa é característica comum nas indústrias, principalmente devido à utilização generalizada dos equipamentos que demandam energia para a excitação dos indutores. Esta demanda de energia reativa frequentemente resulta em consumo excessivo, refletido nas faturas de energia das indústrias, acarretando penalidades financeiras devido ao baixo fator de potência. A metodologia APIM, desenvolvida neste estudo, foi concebida como abordagem sistemática para elucidar conceitos pertinentes, estruturar o processo de solução, melhorar a eficiência energética e corrigir o fator de potência nos ambientes industriais por meio da implementação dos bancos de capacitores.

É importante observar que, embora o método APIM não tenha sido implementado em estudo de caso completo, os conceitos por ele abordados são sustentados por referências práticas e teóricas sólidas. A fundamentação prática é derivada dos procedimentos utilizados por empresas atuantes no setor elétrico, as quais forneceram informações relevantes sobre suas operações. Quanto à base teórica, esta provém

de conceitos extraídos de literatura acadêmica confiável, incluindo livros, artigos e manuais, com foco no setor elétrico industrial, citados nas referências.

Ao revisar a literatura, observou-se abundância de estudos focados em análises de casos sobre a correção do fator de potência em vários segmentos industriais. Contudo, identificou-se lacuna no desenvolvimento de metodologia que orientasse especialistas no processo de correção do fator de potência. Esta constatação sublinha a relevância do estudo que não apenas compila informações pertinentes, mas também propõe o método estruturado para orientar estas intervenções.

Outra questão é a coleta das faturas de energia do sistema potencial para obter dados iniciais e analisar possíveis irregularidades. Estes dados fornecem o panorama dos padrões de consumo, permitindo avaliação preliminar das características energéticas da instalação. Ao examinar as faturas, é possível identificar aspectos como a frequência e a severidade de picos de demanda, a proporção de energia reativa consumida em relação à energia ativa e a presença de cobranças adicionais relacionadas com estes fatores.

No que tange ao fator de potência médio, é imprescindível adotar abordagem criteriosa, não o considerando como a única métrica da avaliação, mas integrando-o a estudo mais amplo. É aconselhável incluir o levantamento detalhado das cargas do sistema. Para avaliação com maior precisão, recomenda-se o uso de analisadores de energia ou a consulta à memória de massa, que oferece dados detalhados sobre o fator de potência. Em consultas com especialistas do setor de painéis elétricos, alcançou-se o consenso sobre a relevância de efetuar boas análises para resolver questões associadas ao consumo de energia reativa. Foi enfatizado que, em certos casos, o enfrentamento destes problemas pode demandar investimentos de alto custo. Por isso, a avaliação rigorosa é essencial para evitar custos adicionais devido à instalação de dispositivos que não estejam corretamente dimensionados, os quais poderiam ser ineficazes na redução das penalidades financeiras resultantes.

A importância contemporânea do tema na engenharia é evidenciada pela prova de redação do concurso para analista de fiscalização do Conselho Regional de Engenharia e Agronomia (CREA) de Goiás em 2023. O tema proposto foi "A planta industrial sob a ótica de um engenheiro responsável técnico", abordando: i) energia elétrica reativa e fator de potência, ii) três causas do baixo fator de potência e seus efeitos nas instalações elétricas industriais, e iii) três abordagens para correção do baixo fator de potência. Similarmente, na prova do Exame Nacional de Desempenho dos Estudantes (ENADE) para Engenharia Elétrica de 2023, uma questão

abordou especificamente a correção do fator de potência por meio dos bancos de capacitores. Estes exemplos ilustram a necessidade do conhecimento aprofundado sobre o assunto, destacando-se como tópico pertinente nas avaliações profissionais para engenheiros.

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

Este estudo buscou desenvolver a metodologia para correção do fator de potência em sistemas elétricos industriais, implementando bancos de capacitores. Para isto, realizou-se revisão bibliográfica abrangente, incluindo livros, artigos, manuais e catálogos técnicos. O resultado final foi a formulação do método APIM, que estabelece critérios estruturados para a Análise, Projeto, Instalação e Manutenção dos bancos de capacitores em baixa tensão.

A metodologia é composta por quatro etapas, que inicia com a análise detalhada do ambiente operacional e das demandas energéticas, incluindo avaliações preliminares e inspeções técnicas. Esta etapa destacou as dificuldades envolvidas na medição do fator de potência, identificando as limitações das avaliações baseadas exclusivamente em faturas de energia e enfatizando a necessidade de métodos precisos. Na fase do projeto, focou-se no dimensionamento dos componentes, elaboração dos diagramas elétricos, construção física do painel e realização dos testes para assegurar a conformidade com padrões de segurança e eficiência. A instalação é marcada por procedimentos de segurança e testes práticos, visando garantir a operacionalidade da solução. Por fim, estabeleceu-se o regime de manutenção regular para manter a confiabilidade do sistema, essencial para a prevenção das falhas e otimização contínua do desempenho.

O desenvolvimento metodológico adotado neste trabalho revelou a complexidade inerente à correção do fator de potência, destacando que cada sistema apresenta características únicas que exigem consideração cuidadosa. Esta abordagem não apenas elucidou as nuances específicas de cada sistema, mas também adotou perspectiva didática, simplificando conceitos complexos para facilitar a compreensão. Esta combinação de profundidade técnica e clareza expositiva contribuiu significativamente para a compreensão e aplicação prática no campo da correção do fator de potência.

7.1 Trabalhos Futuros

- 01) Implementar de forma integral a metodologia APIM em análises de caso na indústria, avaliando a efetividade da ferramenta;
- 02) Desenvolver automações para potencializar a metodologia APIM, buscando acelerar o processo;

- 03) Incrementar etapas no método APIM para ampliar a aplicabilidade e alcance;
- 04) Avaliar o uso da metodologia APIM como recurso pedagógico em ambientes educacionais.

APÊNDICE A

Fatores de multiplicação para cálculo da potência reativa do BC

Tabela A.1 - Fatores de multiplicação - parte I.

FP ATUAL	FP DESEJADO							
	0.85	0.86	0.87	0.88	0.89	0.90	0.91	0.92
0.5	1.112	1.139	1.165	1.192	1.220	1.248	1.276	1.306
0.51	1.067	1.093	1.120	1.147	1.174	1.202	1.231	1.261
0.52	1.023	1.049	1.076	1.103	1.130	1.158	1.187	1.217
0.53	0.980	1.007	1.033	1.060	1.088	1.116	1.144	1.174
0.54	0.939	0.965	0.992	1.019	1.046	1.074	1.103	1.133
0.55	0.899	0.925	0.952	0.979	1.006	1.034	1.063	1.092
0.56	0.860	0.886	0.913	0.940	0.967	0.995	1.024	1.053
0.57	0.822	0.848	0.875	0.902	0.929	0.957	0.986	1.015
0.58	0.785	0.811	0.838	0.865	0.892	0.920	0.949	0.979
0.59	0.749	0.775	0.802	0.829	0.856	0.884	0.913	0.942
0.6	0.714	0.740	0.767	0.794	0.821	0.849	0.878	0.907
0.61	0.679	0.706	0.732	0.759	0.787	0.815	0.843	0.873
0.62	0.646	0.672	0.699	0.726	0.753	0.781	0.810	0.839
0.63	0.613	0.639	0.666	0.693	0.720	0.748	0.777	0.807
0.64	0.581	0.607	0.634	0.661	0.688	0.716	0.745	0.775
0.65	0.549	0.576	0.602	0.629	0.657	0.685	0.714	0.743
0.66	0.519	0.545	0.572	0.599	0.626	0.654	0.683	0.712
0.67	0.488	0.515	0.541	0.568	0.596	0.624	0.652	0.682
0.68	0.459	0.485	0.512	0.539	0.566	0.594	0.623	0.652
0.69	0.429	0.456	0.482	0.509	0.537	0.565	0.593	0.623
0.7	0.400	0.427	0.453	0.480	0.508	0.536	0.565	0.594
0.71	0.372	0.398	0.425	0.452	0.480	0.508	0.536	0.566
0.72	0.344	0.370	0.397	0.424	0.452	0.480	0.508	0.538
0.73	0.316	0.343	0.370	0.396	0.424	0.452	0.481	0.510
0.74	0.289	0.316	0.342	0.369	0.397	0.425	0.453	0.483
0.75	0.262	0.289	0.315	0.342	0.370	0.398	0.426	0.456
0.76	0.235	0.262	0.288	0.315	0.343	0.371	0.400	0.429
0.77	0.209	0.235	0.262	0.289	0.316	0.344	0.373	0.403
0.78	0.183	0.209	0.236	0.263	0.290	0.318	0.347	0.376
0.79	0.156	0.183	0.209	0.236	0.264	0.292	0.320	0.350
0.8	0.130	0.157	0.183	0.210	0.238	0.266	0.294	0.324
0.81	0.104	0.131	0.157	0.184	0.212	0.240	0.268	0.298
0.82	0.078	0.105	0.131	0.158	0.186	0.214	0.242	0.272
0.83	0.052	0.079	0.105	0.132	0.160	0.188	0.216	0.246
0.84	0.026	0.053	0.079	0.106	0.134	0.162	0.190	0.220
0.85	0.000	0.026	0.053	0.080	0.107	0.135	0.164	0.194
0.86		0.000	0.027	0.054	0.081	0.109	0.138	0.167
0.87			0.000	0.027	0.054	0.082	0.111	0.141
0.88				0.000	0.027	0.055	0.084	0.114
0.89					0.000	0.028	0.057	0.086
0.9						0.000	0.029	0.058
0.91							0.000	0.030
0.92								0.000

Tabela A.2 - Fatores de multiplicação - parte II.

FP ATUAL	FP DESEJADO							
	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00
0.5	1.337	1.369	1.403	1.440	1.481	1.529	1.590	1.732
0.51	1.291	1.324	1.358	1.395	1.436	1.484	1.544	1.687
0.52	1.247	1.280	1.314	1.351	1.392	1.440	1.500	1.643
0.53	1.205	1.237	1.271	1.308	1.349	1.397	1.458	1.600
0.54	1.163	1.196	1.230	1.267	1.308	1.356	1.416	1.559
0.55	1.123	1.156	1.190	1.227	1.268	1.315	1.376	1.518
0.56	1.084	1.116	1.151	1.188	1.229	1.276	1.337	1.479
0.57	1.046	1.079	1.113	1.150	1.191	1.238	1.299	1.441
0.58	1.009	1.042	1.076	1.113	1.154	1.201	1.262	1.405
0.59	0.973	1.006	1.040	1.077	1.118	1.165	1.226	1.368
0.6	0.938	0.970	1.005	1.042	1.083	1.130	1.191	1.333
0.61	0.904	0.936	0.970	1.007	1.048	1.096	1.157	1.299
0.62	0.870	0.903	0.937	0.974	1.015	1.062	1.123	1.265
0.63	0.837	0.870	0.904	0.941	0.982	1.030	1.090	1.233
0.64	0.805	0.838	0.872	0.909	0.950	0.998	1.058	1.201
0.65	0.774	0.806	0.840	0.877	0.919	0.966	1.027	1.169
0.66	0.743	0.775	0.810	0.847	0.888	0.935	0.996	1.138
0.67	0.713	0.745	0.779	0.816	0.857	0.905	0.966	1.108
0.68	0.683	0.715	0.750	0.787	0.828	0.875	0.936	1.078
0.69	0.654	0.686	0.720	0.757	0.798	0.846	0.907	1.049
0.7	0.625	0.657	0.692	0.729	0.770	0.817	0.878	1.020
0.71	0.597	0.629	0.663	0.700	0.741	0.789	0.849	0.992
0.72	0.569	0.601	0.635	0.672	0.713	0.761	0.821	0.964
0.73	0.541	0.573	0.608	0.645	0.686	0.733	0.794	0.936
0.74	0.514	0.546	0.580	0.617	0.658	0.706	0.766	0.909
0.75	0.487	0.519	0.553	0.590	0.631	0.679	0.739	0.882
0.76	0.460	0.492	0.526	0.563	0.605	0.652	0.713	0.855
0.77	0.433	0.466	0.500	0.537	0.578	0.626	0.686	0.829
0.78	0.407	0.439	0.474	0.511	0.552	0.599	0.660	0.802
0.79	0.381	0.413	0.447	0.484	0.525	0.573	0.634	0.776
0.8	0.355	0.387	0.421	0.458	0.499	0.547	0.608	0.750
0.81	0.329	0.361	0.395	0.432	0.473	0.521	0.581	0.724
0.82	0.303	0.335	0.369	0.406	0.447	0.495	0.556	0.698
0.83	0.277	0.309	0.343	0.380	0.421	0.469	0.530	0.672
0.84	0.251	0.283	0.317	0.354	0.395	0.443	0.503	0.646
0.85	0.225	0.257	0.291	0.328	0.369	0.417	0.477	0.620
0.86	0.198	0.230	0.265	0.302	0.343	0.390	0.451	0.593
0.87	0.172	0.204	0.238	0.275	0.316	0.364	0.424	0.567
0.88	0.145	0.177	0.211	0.248	0.289	0.337	0.397	0.540
0.89	0.117	0.149	0.184	0.221	0.262	0.309	0.370	0.512
0.9	0.089	0.121	0.156	0.193	0.234	0.281	0.342	0.484
0.91	0.060	0.093	0.127	0.164	0.205	0.253	0.313	0.456
0.92	0.031	0.063	0.097	0.134	0.175	0.223	0.284	0.426

Tabela A.3 - Fatores de multiplicação - parte III.

FP ATUAL	FP DESEJADO							
	0.93	0.94	0.95	0.96	0.97	0.98	0.99	1.00
0.93	0.000	0.032	0.067	0.104	0.145	0.192	0.253	0.395
0.94		0.000	0.034	0.071	0.112	0.160	0.220	0.363
0.95			0.000	0.037	0.078	0.126	0.186	0.329
0.96				0.000	0.041	0.089	0.149	0.292
0.97					0.000	0.048	0.108	0.251
0.98						0.000	0.061	0.203
0.99							0.000	0.142
1.00								0.000

APÊNDICE B

Exemplos de diagramas elétricos de Bancos de Capacitores

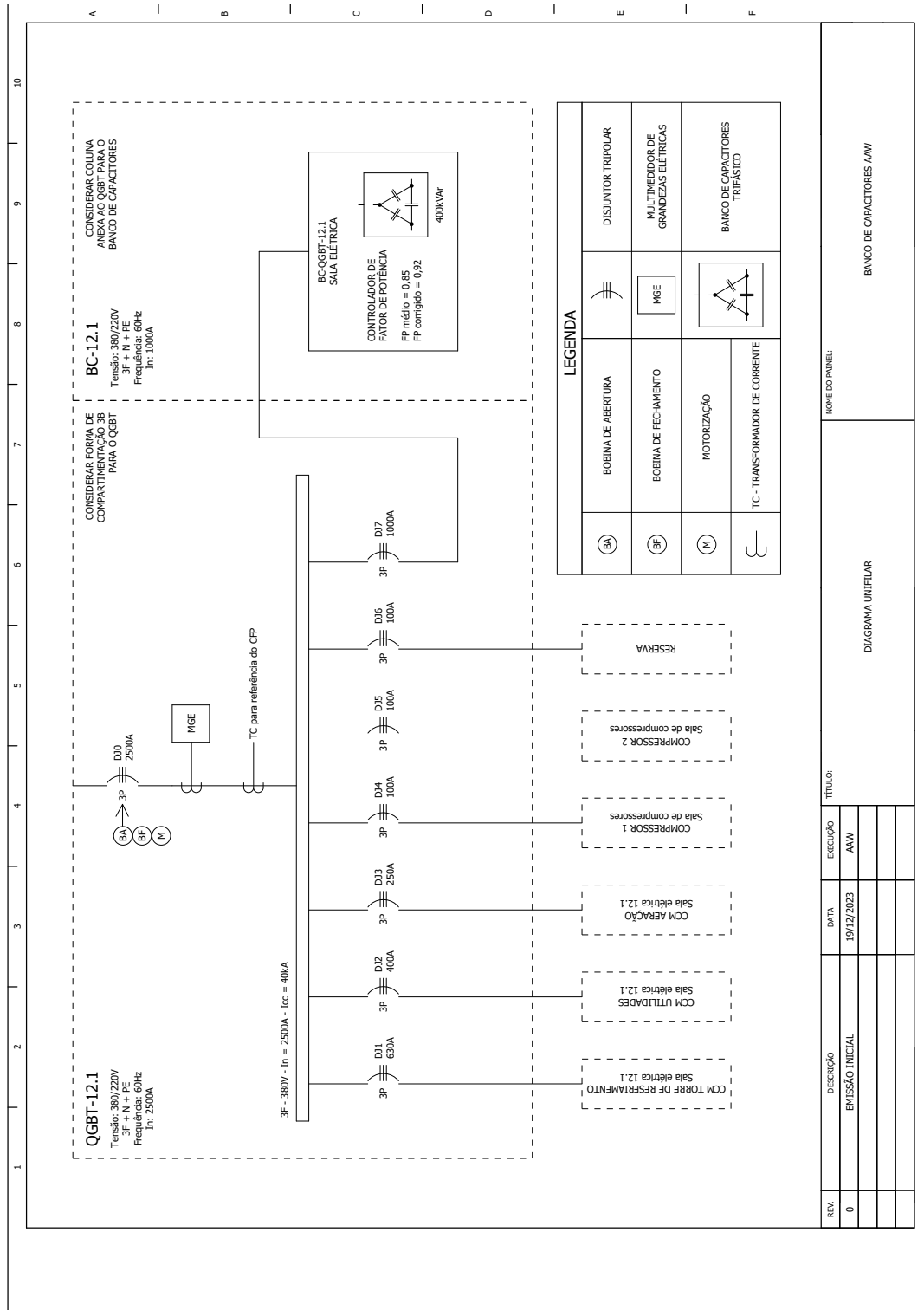


Figura B.1 - Exemplo de diagrama unifilar para banco de capacitores.

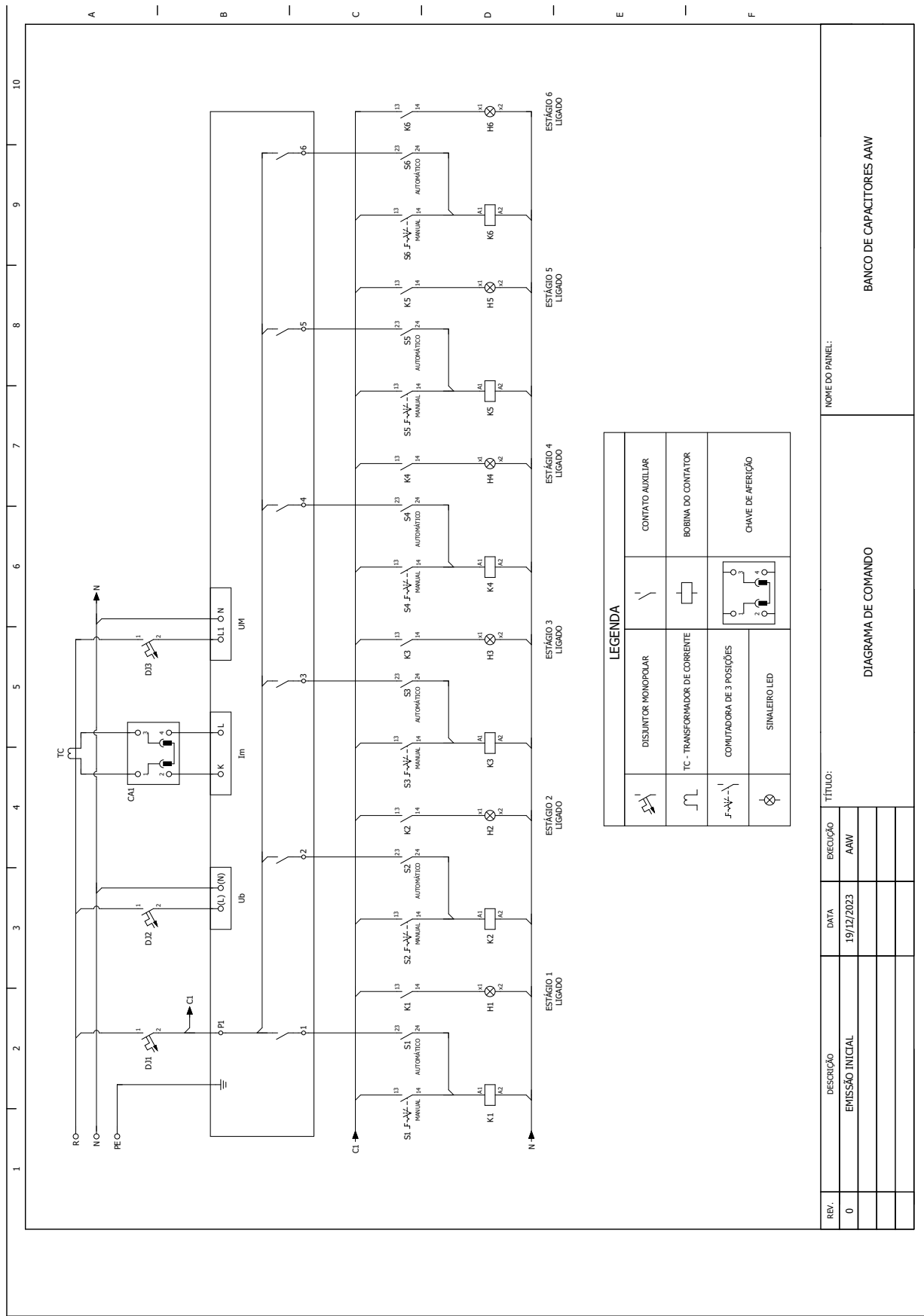


Figura B.2 - Exemplo de diagrama de comando.

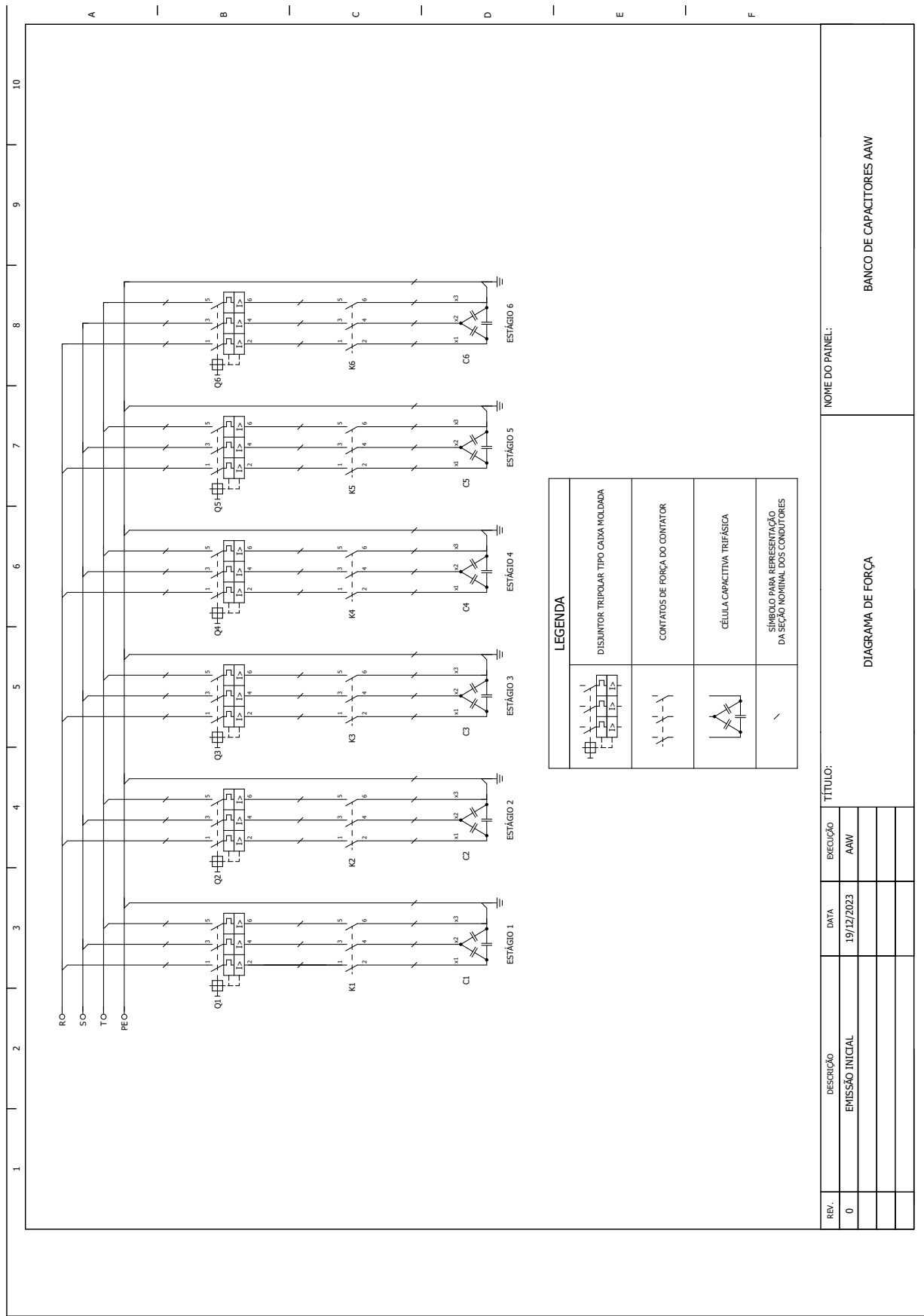


Figura B.3 - Exemplo de diagrama de força.

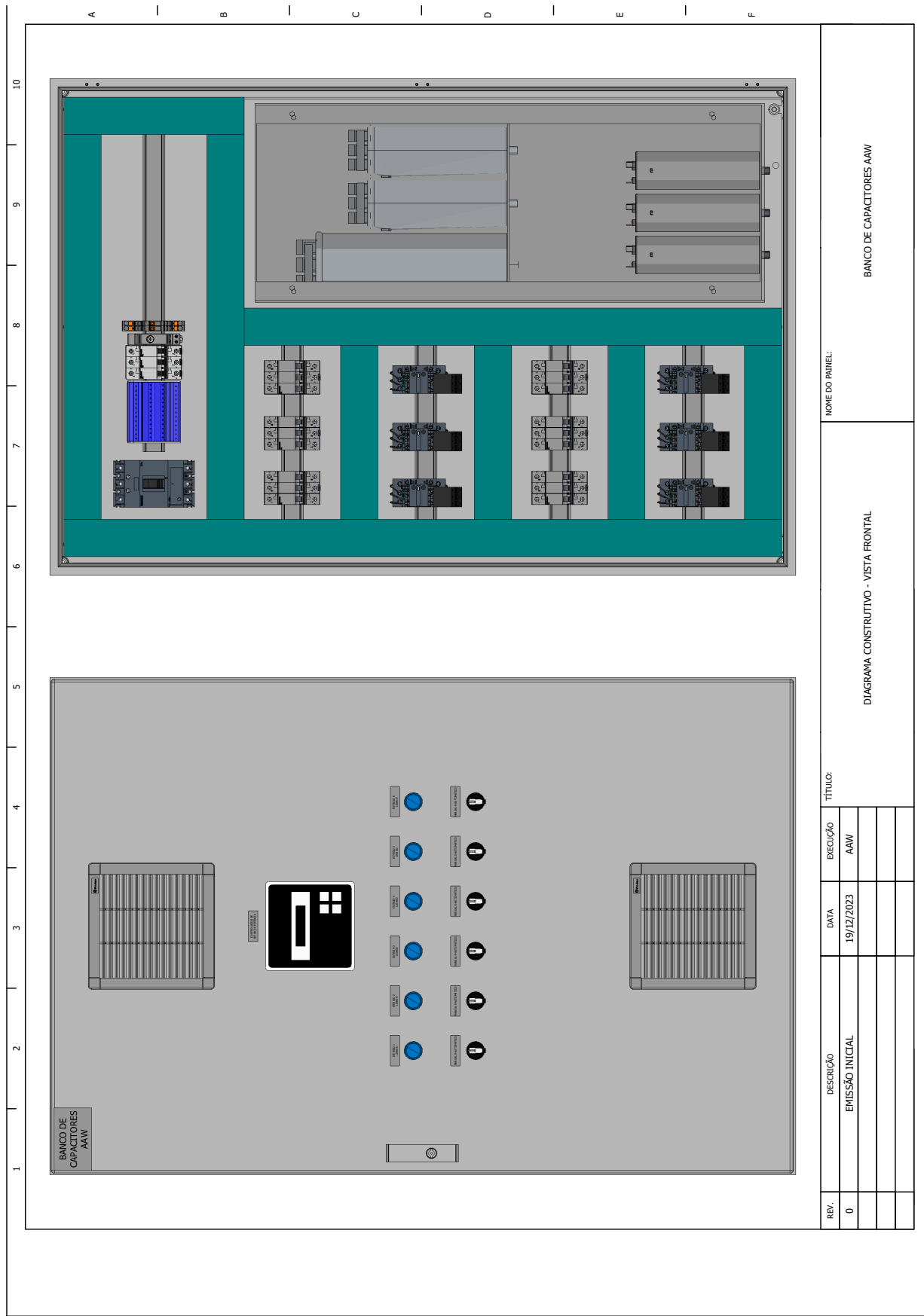


Figura B.4 - Diagrama construtivo: vista frontal externa do painel.

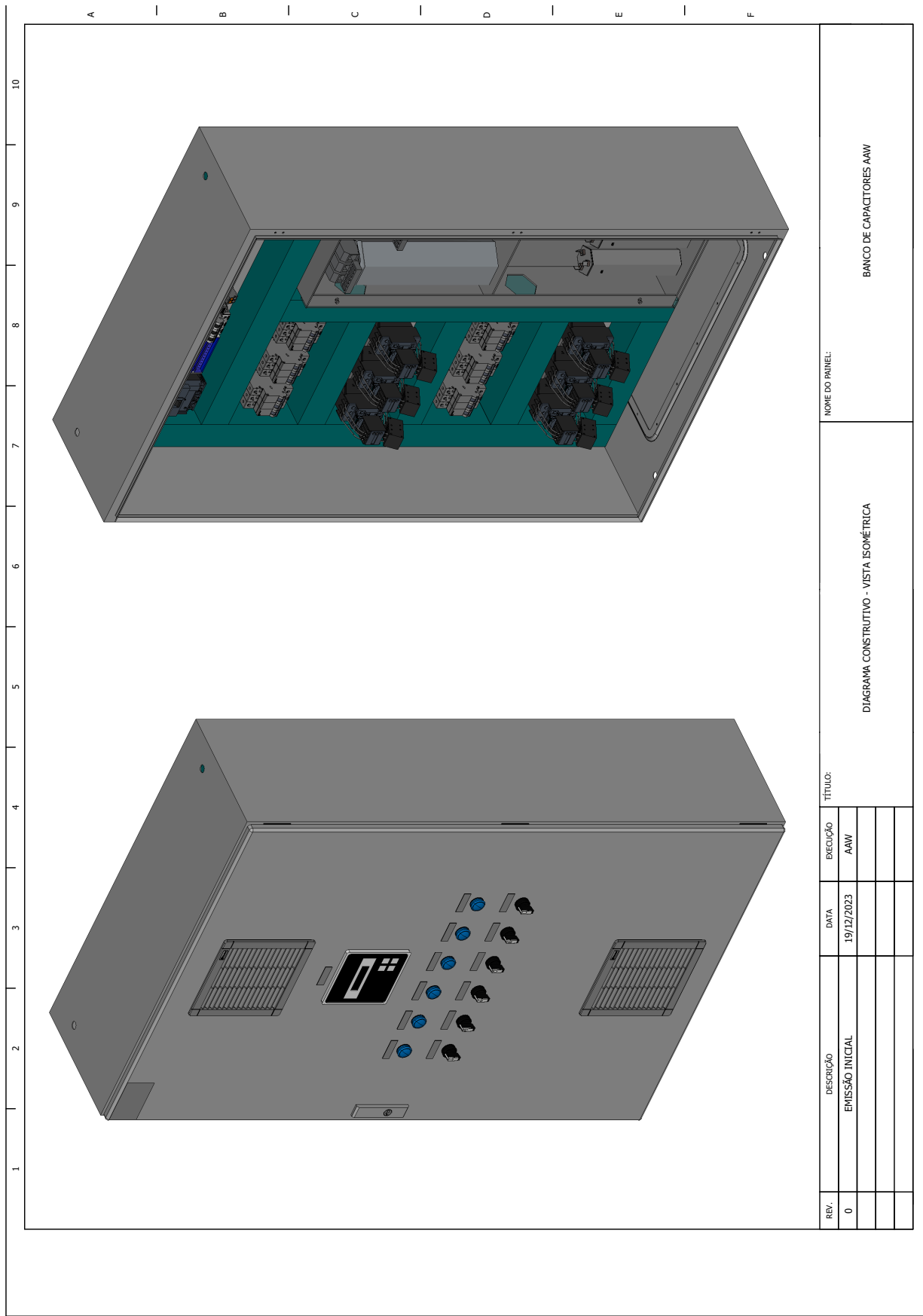


Figura B.5 - Diagrama construtivo: vista isométrica do painel.

APÊNDICE C

Estudo de Caso: Diagramas do Banco de Capacitores

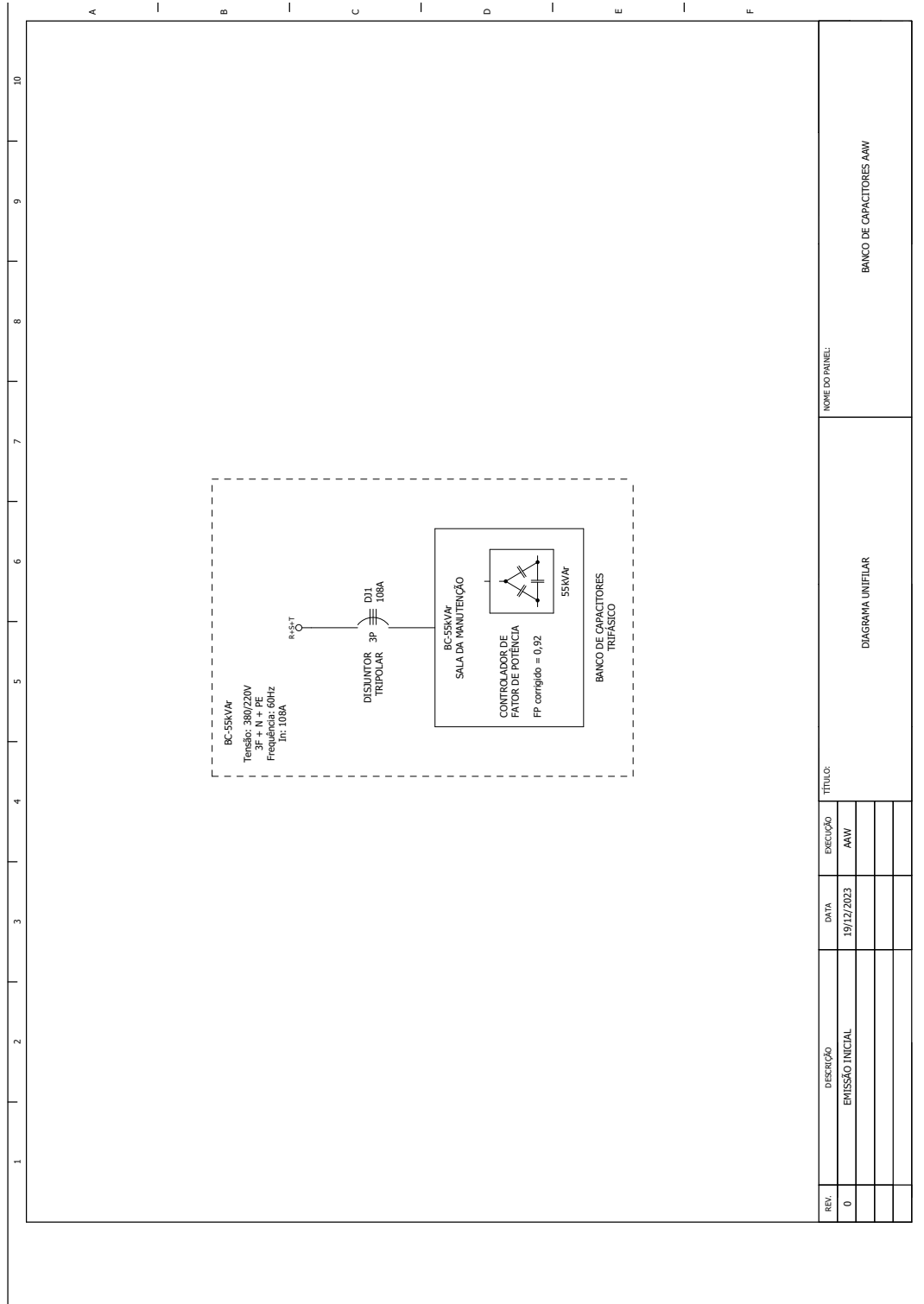


Figura C.1 - Diagrama unifilar do projeto.

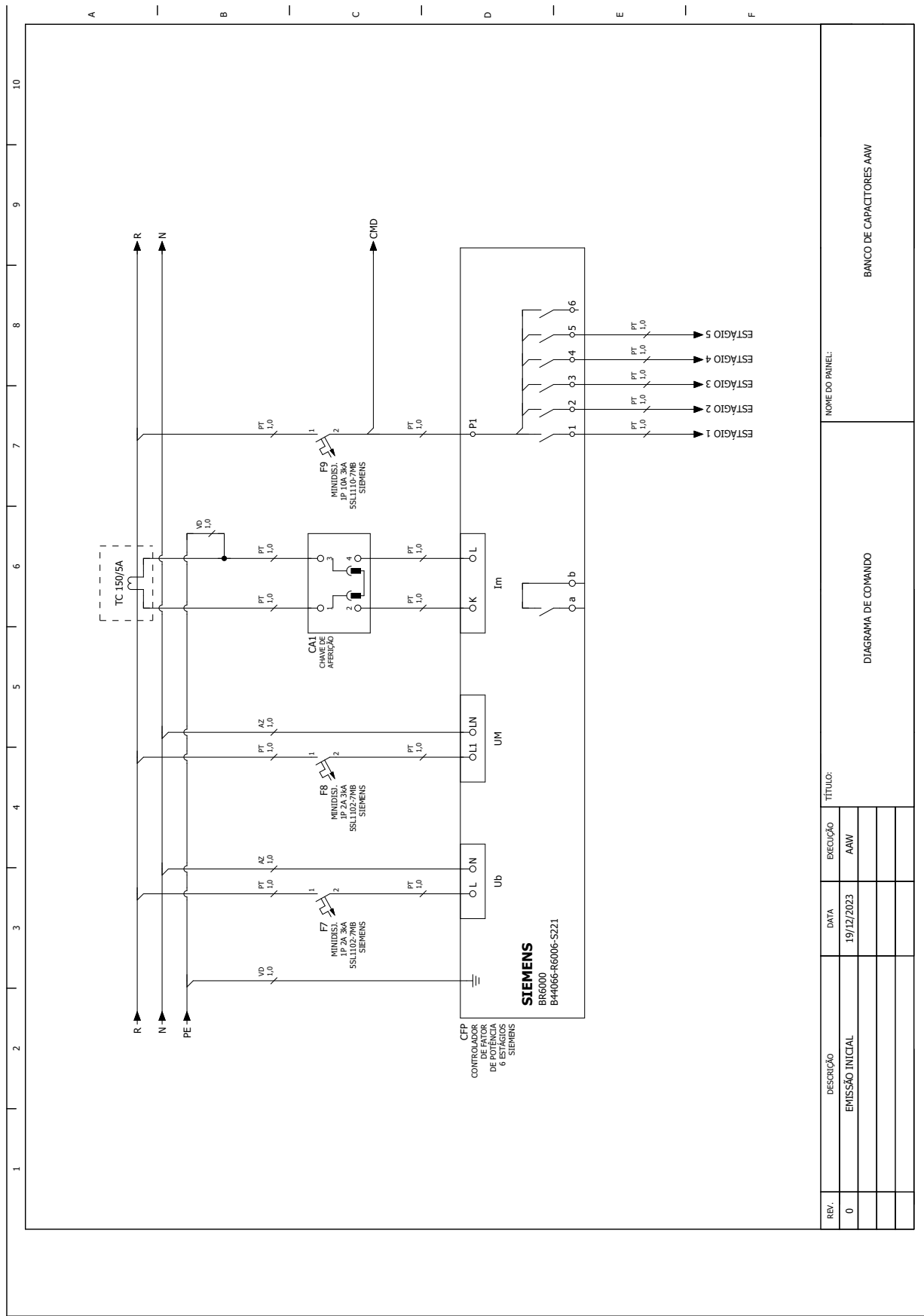


Figura C.2 - Diagrama de comando do projeto - Controlador de Fator de Potência.

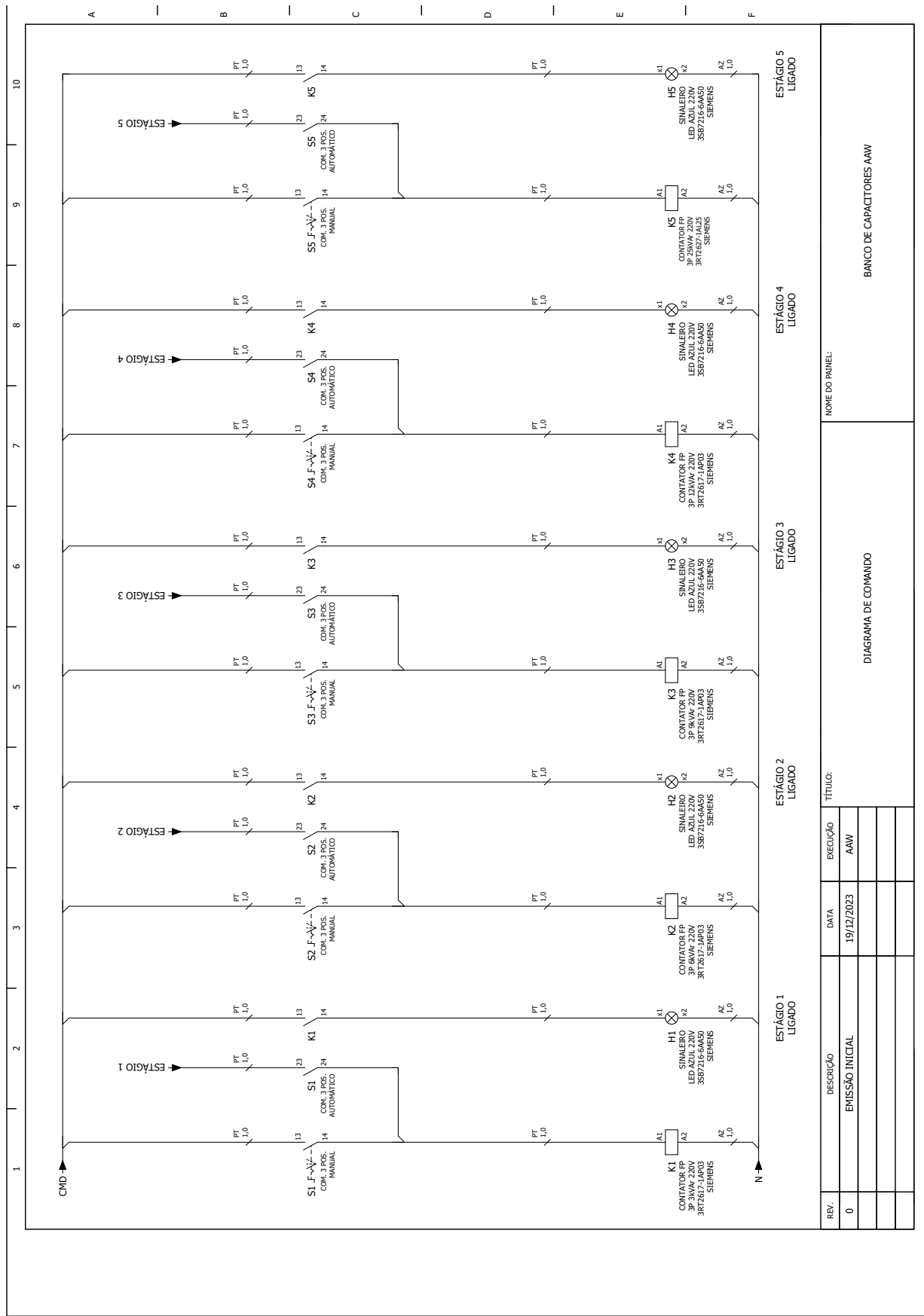


Figura C.3 - Diagrama de comando do projeto.

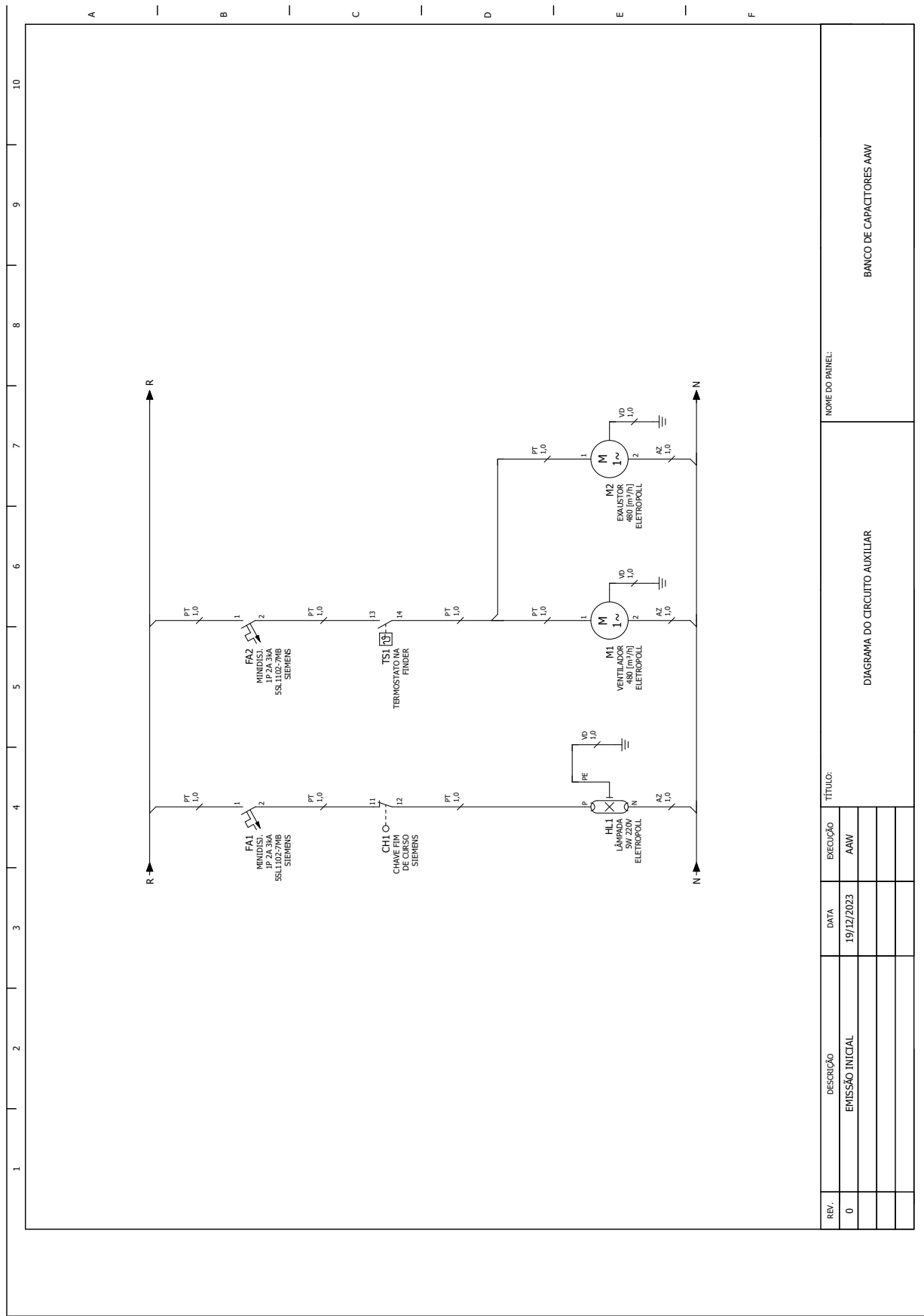
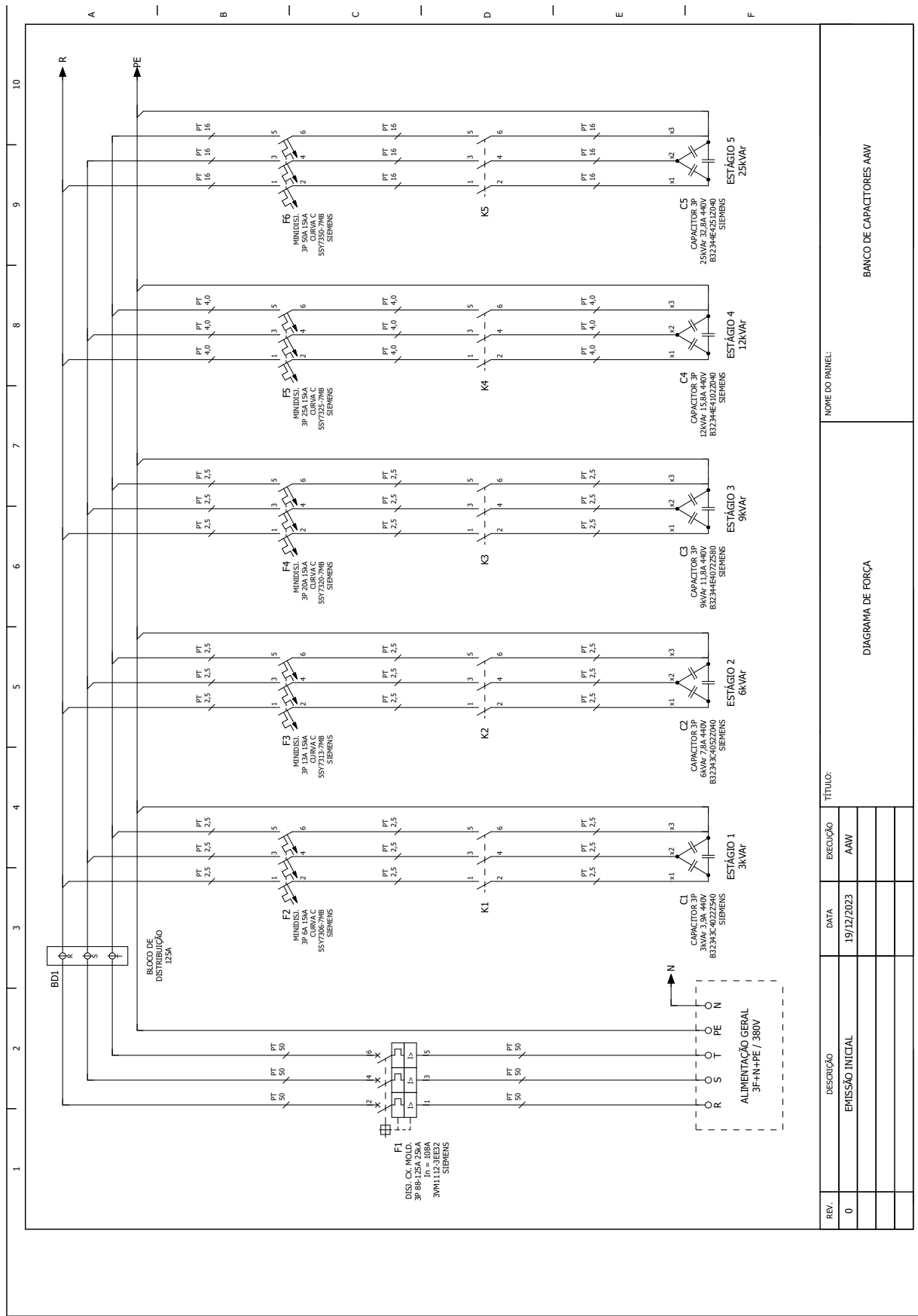


Figura C.4 - Diagrama do circuito auxiliar.



REV.	DESCRIÇÃO	DATA	EXECUÇÃO	TÍTULO:	NOBRE DO PAINEL:
0	EMISSÃO INICIAL	19/12/2023	AAW	DIAGRAMA DE FORÇA	BANCO DE CAPACITORES AAW

Figura C.5 - Diagrama de força do projeto.

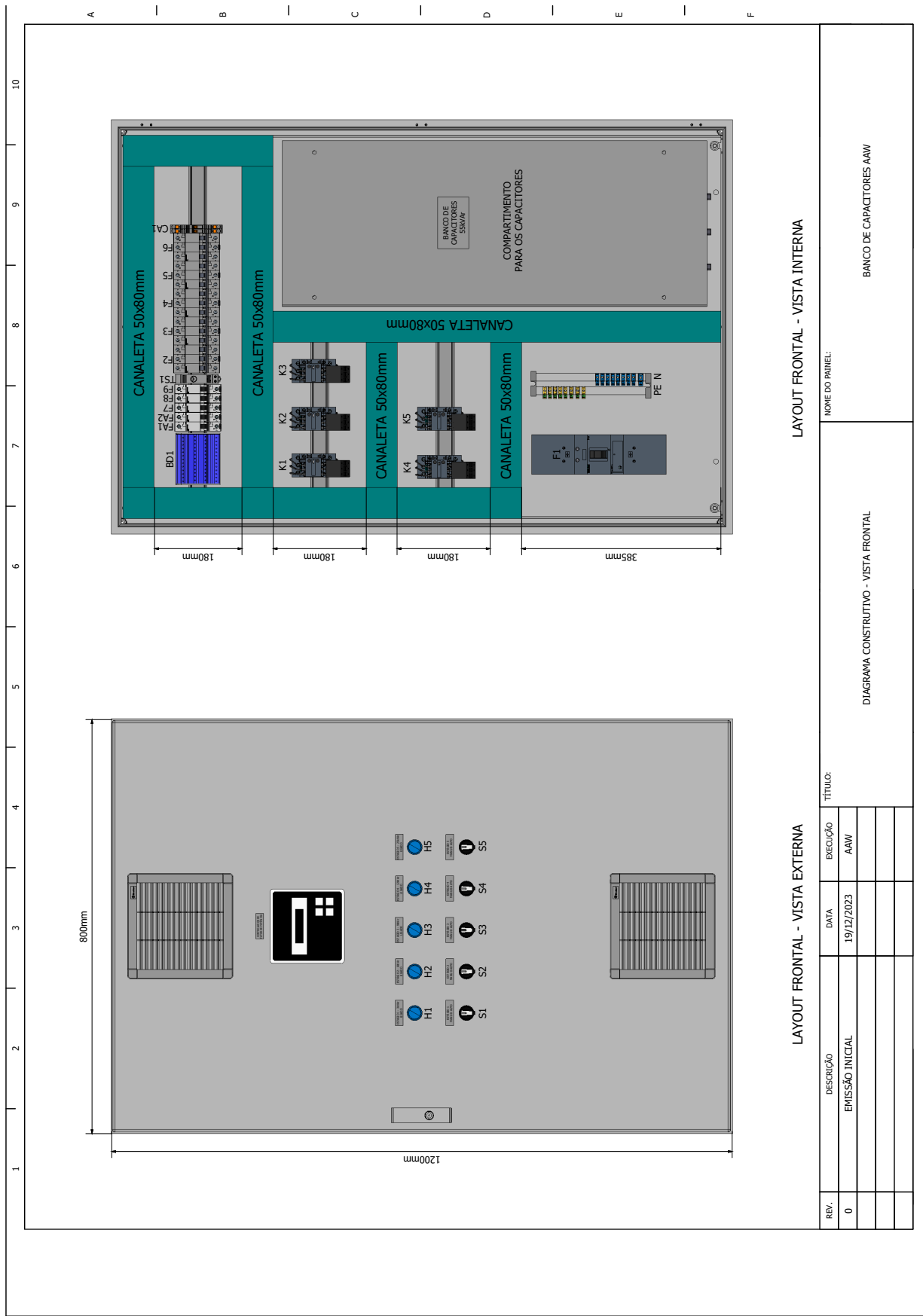


Figura C.6 - Diagrama construtivo: vista frontal externa do painel.

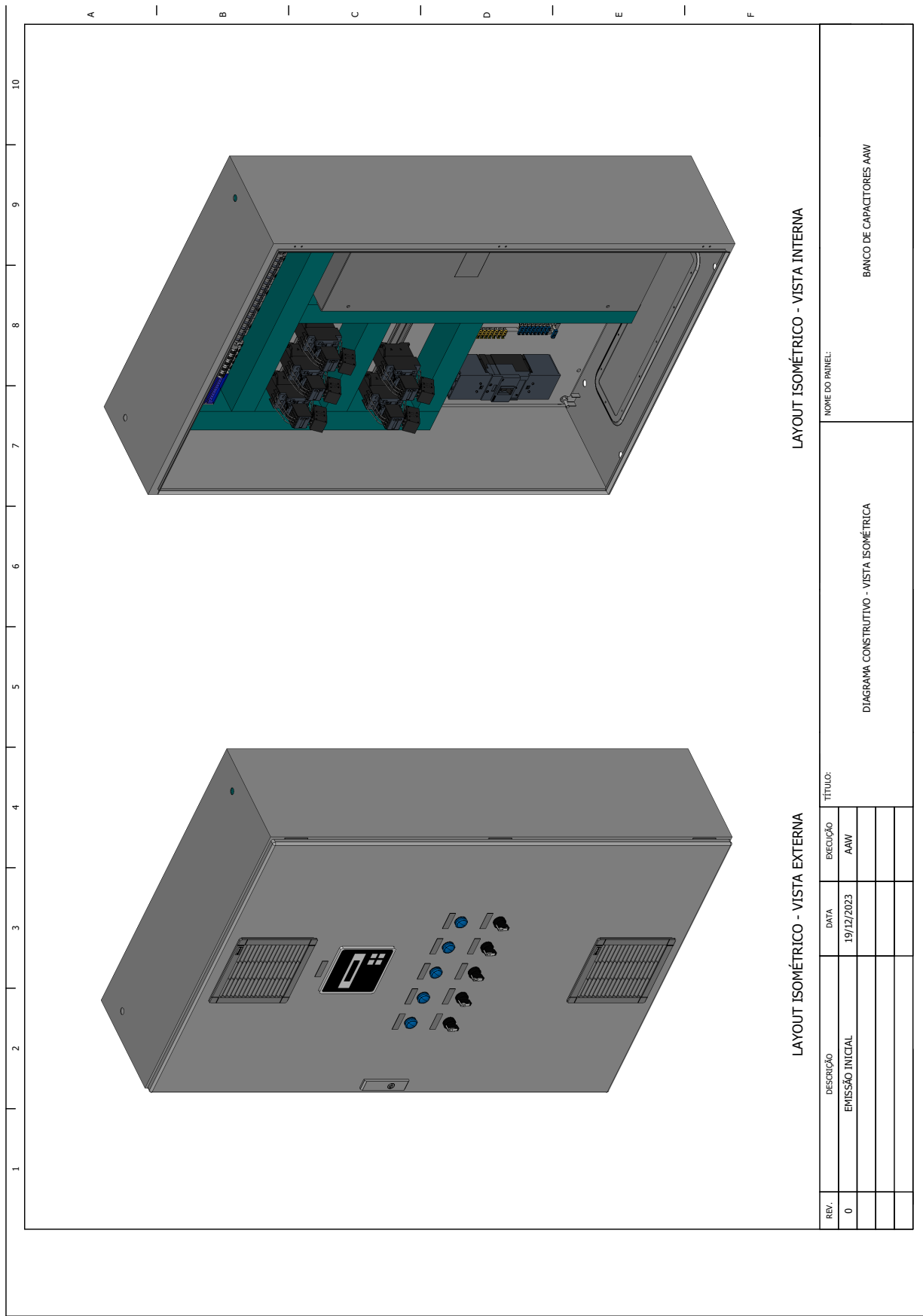


Figura C.7 - Diagrama construtivo: vista isométrica do painel.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. 5410: Instalações elétricas de baixa tensão. **Rio de Janeiro, Brasil:[sn]**, 2008. 61, 65, 66, 67, 72, 73, 74

_____. Nbr iec 61439-1: Conjuntos de manobra e comando de baixa tensão parte 01: Regras gerais. **Rio de Janeiro, Brasil:[sn]**, 2017. 65

_____. NBR IEC 62381: Sistemas de automação de processos industriais - testes de aceitação em fábrica (TAF), testes de aceitação em campo (TAC), testes de integração em campo (TIC). **Rio de Janeiro**, 2019. 74

ALMEIDA, P. S. D. **Manutenção Mecânica Industrial Conceitos Básicos e Tecnologia Aplicada**. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2018. 77

ANEEL. **Resolução Normativa ANEEL Nº 1.000, de 7 De Dezembro De 2021**. 2021. Lei. Acesso em 29/10/2023. Disponível em: <<<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf>>>. 21, 22, 23, 82

_____. **Resolução 1000 da ANEEL, seus direitos sobre energia elétrica, agora num só lugar!** Brasília: [s.n.], 2022. <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/campanhas/resolucao-1000-da-aneel-seus-direitos-sobre-energia-eletrica-agora-num-so-lugar-2022>>. Acesso em: 29 out. 2023. 22, 24, 25

BARROS, B. F.; GEDRA, R. L.; BORELLI, R. **Eficiência Energética Técnicas de aproveitamento, gestão de recursos e fundamentos**. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2015. 6

BORDEAUX-REGO, R. **Viabilidade econômico-financeira de projetos**. [S.l.]: Editora FGV, 2015. 50, 51

BOYLESTAD, R. L.; NASCIMENTO, J. L. do. **Introdução à análise de circuitos**. [S.l.]: Pearson Educación, 2004. 27, 28

CODI, C. d. D. d. E. E. **Manual de Orientação aos Consumidores: Energia Reativa Excedente**. [S.l.], 2004. CODI, 2004. 20

COGO, J. R.; SIQUEIRA, J. Capacitores de potência e filtros de harmônicos. **Ciência Moderna, São Paulo**, 2018. 1, 16, 18, 19, 23, 31, 33, 34, 46, 48, 49, 53, 55,

56, 57, 59, 62, 68, 70, 76, 77

COTRIM, A. A. M. B. **Instalações Elétricas**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009. 2, 9, 11, 13, 14, 15, 16, 19, 31, 36, 41, 42, 46, 48, 54, 59, 64, 84

CREDER, H. **Instalações Elétricas**. 16. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. 1, 9, 11, 12, 13, 14, 26, 31, 34, 35, 36, 42, 45, 56, 62, 75

ELETROPOLL. Soluções em climatização e iluminação. **Santa Catarina**, 2023. 61

EPE, E. d. P. E. **Propostas de Medidas no Setor Industrial Brasileiro**. 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br>>, note = Acesso em: 06 de Novembro de 2023. 8

_____. **White Paper: Conceitos e Indicadores de Eficiência Energética**. 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-750/Whitepaper-conceitoseindicadoresdeeficienciaenergaltica.pdf>>. Acesso em: 06 de Novembro de 2023. 5, 6, 8

FILHO, J. B. S. et al. Bancos de capacitores na presença de harmônicos. Universidade Federal de Itajubá, 1995. 1

GASPAR, C. Eficiência energética na indústria. **Cursos de eficiência Energética, ADENE**, 2004. 8

INMETRO. **Portaria Inmetro nº 587**. 2012. Publicada em 05 de novembro de 2012. 49

LUCAS, F. R. Correção do fator de potência de cargas industriais. 2013. 25

MAMEDE, J. F. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 4. ed. [S.l.]: LTC, 2013. 35, 46, 65

_____. **Instalações Elétricas Industriais: de acordo com a Norma Brasileira NBR 5419: 2015**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. 1, 2, 5, 8, 9, 11, 14, 18, 19, 27, 28, 30, 31, 33, 43, 47, 53, 57, 58

_____. **Manual de Equipamentos Elétricos**. 5. ed. [S.l.]: LTC, 2019. 2, 33, 72

MARCHI, D. et al. Projeto e estudo de viabilidade técnica e financeira da correção do fator de potência em indústria têxtil utilizando bancos de capacitores. Florianópolis, SC, 2019. 2, 20, 21

MARKUS, O. et al. **Circuitos Elétricos Corrente Contínua e Corrente Alternada**. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2018. 29

Ministério de Minas e Energia – MME. **Plano Nacional de Energia 2030**. 2007. Brasília. Disponível em: URL do documento, se disponível online. 5

Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora nº 10 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade**. 2019. Disponível em: <http://www.mte.gov.br/legislacao/normas_regulamentadoras/nr_10.pdf>. Acesso em: 26 de novembro de 2023. 69

NISKIER, J. **Manual de instalações elétricas**. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2018. 56, 60

NISKIER, J.; MACINTYRE, A. Instalações elétricas, 5ª edição, rio de janeiro. **RJ, Brasil: LTC**, 2014. 60

POLIQUEZI, A. **Eficiência Energética**. Paraná: Nome do Editor ou Editora, 2016. 1, 2, 5, 11

PROCEL. Guia básico: Energia elétrica: Conceito, qualidade e tarifação. Rio de Janeiro, 2009. Acessado em: 07 de novembro de 2023. 18

RIEDEL, S. A.; NILSSON, J. W. **Circuitos Elétricos**. [S.l.]: Pearson Universidades, São Paulo, 2015. 27, 28, 29

RINALDI, M. P. Estudo de caso de correção de fator de potência em indústrias de baixa tensão. 2018. 1

SAMED, M. M. A. Fundamentos de instalações elétricas. **Curitiba: Intersaberes**, 2017. 30, 34

SIEMENS. **Soluções para Correção do Fator de Potência**. [S.l.], 2021. Disponível em: <<https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:f86fb77b-68fc-4155-bfa9-87f7d0cc7586/version:1612443684/catalogo-cfp-2016-pt.pdf>>. 59

SILVA, D. A. P. d.; REZENDE, H. M. d. Análise de harmônicas na rede de distribuição de energia elétrica. Goiânia, GO, 2021. 16, 17

SILVA, R. S. **Sistemas Elétricos de Potência**. [S.l.]: Editora e Distribuidora Educacional S.A, 2019. 11

SOUSA, L. M. O. d. Análise da qualidade de energia de um banco de capacitores de uma indústria em sobral-ceará. 2019. 2

VELOSO, G.; CAMARGO, M. P. de. Viabilidade econômica da implantação de um banco de capacitores em unidade armazenadora de grãos. **Revista IPecege**, v. 3, n. 3, p. 28–39, 2017. 1

WEG. **Manual para Correção do Fator de Potência**. [S.l.], 5 2009. Disponível em: <<https://www.weg.net>>. 14, 19, 20, 25, 26, 44, 49, 55, 62, 66, 70, 71, 75, 77