

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

MARCELO JATTI JUNIOR

**“Compensação reativa através de bancos de capacitores chaveados
automaticamente”**

MARCELO JATTI JUNIOR

**"Compensação reativa através de bancos de capacitores
chaveados automaticamente"**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: **Prof. Dr. Dionízio Paschoareli Júnior**

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

J39c Jatti Junior, Marcelo.
Compensação reativa através de bancos de capacitores chaveados automaticamente / Marcelo Jatti Junior. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2021
84 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2021

Orientador: Dionízio Paschoareli Júnior
Inclui bibliografia

1. Fator de potência. 2. Compensação reativa. 3. Banco de capacitores. 4.
Sistema de média tensão. 5. Automação industrial. 6. CLP.

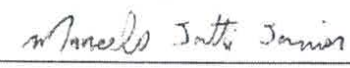

Raiane da Silva Santos

Supervisora Técnica de Seção
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação
CRB/8 - 9999

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos vinte dias do mês de setembro de dois mil e vinte e um, o discente **MARCELO JATTI JUNIOR**, matriculado sob o nº 121052834, tendo como banca examinadora seu orientador, o *Prof. Dr. Dionízio Paschoareli Júnior*, o *Prof. Falcondes José Mendes de Seixas* e o *Prof. Júlio Borges de Souza*, apresentou o Trabalho de Graduação intitulado "**Compensação reativa através de bancos de capacitores chaveados automaticamente**" obtendo a nota sete (7,0) e conceito **APROVADO**.


Prof. Dr. Dionízio Paschoareli Jr
- orientador -


Marcelo Jatti Júnior
- discente -


Prof. Dr. Falcondes José Mendes de Seixas
- Membro da Banca -


Prof. Dr. Júlio Borges de Souza
- Membro da Banca -

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família, que sempre me apoiou e me motivou a seguir em frente, a estudar e a me desenvolver pessoal e profissionalmente. Sem eles, eu nada seria.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, aos professores, e aos colegas de curso e de trabalho que me auxiliaram nesta jornada.

RESUMO

Este trabalho propõe o estudo e a programação de um controle de chaveamento de bancos de capacitores utilizando CLP, cuja finalidade é fazer a compensação reativa de energia elétrica em uma indústria de média tensão. Inicialmente sugere-se um projeto estático de correção de fator de potência. Em seguida, apresenta-se a possibilidade de utilizar um sistema automatizado. Então, a partir daí, foi desenvolvido um programa para o controle e análise das implicações que este sistema automatizado pode trazer para a indústria. Finalmente serão apresentados os custos para a implementação do banco de capacitores e do sistema de controle e a viabilidade econômica do projeto.

Palavras-chave: Fator de Potência; Compensação Reativa; Banco de Capacitores; Sistema de Média Tensão; Automação Industrial; CLP.

ABSTRACT

This paper proposes the study and programming of a control of switched capacitor banks using PLC, whose purpose is to make the reactive compensation of electric energy in a medium voltage industry. Initially, a static power factor correction project is suggested. Then, the possibility of using an automated system is presented. Then, from there, it is intended to develop a program for the control and to analyze the implications that this controlled system will bring to the industry. Finally, the costs for the implementation of the capacitor bank and the control system and the economic viability of the project will be presented.

Keywords: Power factor; Reactive compensation; Power Capacitors; Capacitor bank; Medium voltage system; Industrial Automation; PLC.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Plano das potências.....	19
Figura 2 - Tetraedro das potências	20
Figura 3 - Tetraedro das potências considerando componentes de origem indutiva e capacitiva.....	23
Figura 4 - Representação de um capacitor de potência.....	27
Figura 5 - Representação de um capacitor com fusíveis internos	29
Figura 6 - Representação gráfica de um capacitor de fusível externo	30
Figura 7 - Conexão estrela simples (a esquerda) e conexão dupla estrela (a direita)	32
Figura 8 - Controladores de fator de potência	33
Figura 9 - Para-raios de subestação	34
Figura 10 - Reatores	35
Figura 11 - IEDs de desbalanceamento.....	36
Figura 12 - Transformador de corrente	37
Figura 13 - Transformador de potencial	37
Figura 14 - Chave monopolar a vácuo	38
Figura 15 - Chave de aterramento tetrapolar	38
Figura 16 - Modelos de chaves seccionadoras monopolares	39
Figura 17 - Diagrama de blocos de um CLP	43
Figura 18 - Fluxograma de funcionamento de um CLP	44
Figura 19 - CLP compacto SIEMENS LOGO.....	49
Figura 20 - CLP modular SIEMENS S7-1200	50
Figura 21 - Esquema de proteção de BC em estrela isolada por relé de sobrecorrente.....	65
Figura 22 - Representação simplificada do BC conectado a um circuito com bancos em operação.....	66
Figura 23 - Triângulo das potências após a inserção dos bancos de capacitores	69
Figura 24 - Programação do bloco de controle.....	72
Figura 25 - Programação do sistema de controle	73
Figura 26 - Ligação simplificada do CLP	74
Figura 27 - Representação simplificada da ligação dos bancos.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre capacitores de fusível externo e fusível interno	30
Tabela 2 - Tipos de memória para o sistema de operação e de aplicação	48
Tabela 3 - Tipos de dados	54
Tabela 4 - Dados de carga disponibilizados pela empresa	57
Tabela 5 - Dados de projeto	58
Tabela 6 - Níveis de isolamento para tensões de até 242 kV	59
Tabela 7 - Dados do capacitor dimensionado	61
Tabela 8 - Dados projetados para o TC	62
Tabela 9 - Dados projetados para o TP	63
Tabela 10 - Dados da chave de aterramento	64
Tabela 11 - Dados do sistema de proteção contra descargas atmosféricas	65
Tabela 12 - Capacidades de condução de corrente para condutores de cobre	66
Tabela 13 - Dados dos Bancos de Capacitores projetados	67
Tabela 14 - Variáveis definidas para o sistema	70
Tabela 15 - Estimativa do valor de conta de energia mensal da empresa	77
Tabela 16 - Preço para a implementação do BC dimensionado e de seu sistema de controle ..	77
Tabela 17 - Retorno do projeto nos períodos seguintes à implementação do banco de capacitores.	79
Tabela 18 - Indicadores para viabilidade do projeto	80
Tabela 19 - Comparação entre banco de capacitores chaveado e fixo	80

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BC	Banco de Capacitores
CI	Circuito integrado
CLP	Controlador Lógico Programável
CPU	Central Process Unit
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
EPROM	Erasable Programmable Read-Only Memory
FP	Fator de Potência
FPr	Fator de Potência Real
H	Componente de Distorção Harmônica da Potência Aparente
I/O	Input / Output
IHM	Interface Homem-Máquina
MCOV	Tensão Máxima de Operação Contínua
NBI	Nível Básico de Isolação
NBR	Norma Brasileira
P	Potência Ativa
$\tilde{P}$	Parcela Oscilante da Potência Ativa
Q	Potência Reativa
$\tilde{Q}$	Parcela Oscilante da Potência Reativa
RAM	Random Access Memory
ROM	Read Only Memory
S	Potência Aparente
St	Potência Aparente Total
TC	Transformador de Corrente
THD	Total Harmonic Distortion
TIR	Taxa Interna de Retorno
TP	Transformador de Potencial
VA	Volt Ampère
var	Volt Ampère Reativo
VPL	Valor Presente Líquido

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
μ	Micro
φ	Defasagem angular entre a potência ativa e a potência reativa
λ	Defasagem angular entre a potência aparente total e a potência aparente sem distorções
A	Ampère
C	Capacitância em cada Capacitor
C_b	Capacitância Total do Sistema
F	Farad
H	Henry
I_b	Corrente Total por Banco de Capacitor
I_{cap}	Corrente em cada Capacitor
I_{cc}	Corrente de Curto-Circuito
I_n	Corrente Nominal
k	Quilo
L_b	Indutância em cada Banco de Capacitor
L_{eq}	Indutância Equivalente do Sistema
M	Mega
m	Mili
s	Segundo
V	Volt
W	Watt

SUMÁRIO

1.0	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	OBJETIVO	15
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2.0	POTÊNCIA ELÉTRICA.....	17
2.1	EQUACIONAMENTO CLÁSSICO DA POTÊNCIA ELÉTRICA	17
2.2	COMPONENTES DA POTÊNCIA	18
3.0	FATOR DE POTÊNCIA	22
3.1	CONSEQUÊNCIAS DE UM BAIXO FATOR DE POTÊNCIA	26
3.2	CAPACITORES DE POTÊNCIA	26
3.3	TIPOS DE CAPACITORES DE POTÊNCIA	28
3.3.1	CAPACITORES DE FUSÍVEIS INTERNOS.....	28
3.3.2	CAPACITORES DE FUSÍVEIS EXTERNOS	29
3.4	BANCO DE CAPACITORES SHUNT	31
3.5	PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM BANCO DE CAPACITORES	32
4.0	CLP (CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL)	40
4.1	ARQUITETURA E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	42
4.1.1	ENTRADAS E SAÍDAS DIGITAIS E ANALÓGICAS	45
4.1.2	MÓDULOS DISCRETOS	46
4.1.3	MÓDULOS ANALÓGICOS.....	46
4.1.4	MEMÓRIA DE OPERAÇÃO	47
4.1.5	MEMÓRIA DE APLICAÇÃO	47
4.2	TIPOS DE CLP	48
4.3	PROGRAMAÇÃO BÁSICA DO CLP	50
4.3.1	NORMA IEC 61131	51
4.3.2	TEMPO DE VARREDURA (SCAN TIME)	52
4.3.3	TIPOS DE VARIÁVEIS.....	53
4.3.4	TIPOS DE LINGUAGEM	54
5.0	APLICAÇÃO DOS BANCOS DE CAPACITORES NA INDÚSTRIA	57
5.1	CAPACITORES DE POTÊNCIA NA INDÚSTRIA.....	58
5.2	TRANSFORMADORES DE CORRENTE	61
5.3	TRANSFORMADORES DE POTENCIAL	62
5.4	CHAVE SECCIONADORA DE ATERRAMENTO	63
5.5	SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	64
5.6	RELÉ DE DESBALANCEAMENTO	65
5.7	CABOS	66
5.8	CARACTERÍSTICAS DOS BANCOS DIMENSIONADOS	66
6.0	METODOLOGIA UTILIZADA NO SISTEMA DE CONTROLE	70
6.1	PROGRAMAÇÃO	70
7.0	COMPARAÇÃO ECONÔMICA	76
8.0	CONCLUSÃO	81
	REFERÊNCIAS	82

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

A necessidade de manter o fator de potência dentro das normas da ANEEL faz com que os usuários conectados no sistema elétrico busquem técnicas de correção de fator de potência, de modo a se adequar a estas normas.

No Brasil, de acordo com ANEEL n. 414 (2010), o descumprimento da norma acarreta em multa aplicada na fatura de energia elétrica, se o fator de potência apresentar valor abaixo do limite de 0,92, estipulado pela agência. De modo a evitar esta penalidade, os usuários do sistema elétrico recorrem a métodos para a adequação do FP.

A energia reativa é necessária para o funcionamento de diversos equipamentos: motores, transformadores, lâmpadas fluorescentes e as próprias reatâncias da linha de transmissão. Os bancos de capacitores se apresentam como os dispositivos mais frequentemente utilizados para fornecer a energia reativa necessária. (COTRIM, 2008)

Os bancos de capacitores são formados por grupos de capacitores de potência conectados de forma a gerar um nível de potência reativa para corrigir o FP. Para que o banco de capacitor opere de maneira correta e segura, é necessário que outros equipamentos como reatores, relés de desbalanço e para-raios constituam o sistema. (MAMEDE, 2013)

Antes de se fazer a instalação de bancos de capacitores é necessário determinar o tipo de carga instalada e a porcentagem de distorção causadas por harmônicas (THD). Caso exista distorção e ela supere os 20% das componentes da carga, não é possível corrigir o fator de potência utilizando apenas bancos de capacitores, de acordo com Cotrim (2008). Neste caso, como proposto por Akagi (1983) e Furuhashi (1990), deve-se utilizar filtros ativos de potência para a correção do fator de potência, ou de maneira geral, utilizar filtros de harmônicas instalados junto aos bancos de capacitores.

O CLP, utilizado como atuador neste trabalho, é um pequeno computador industrial que executa tarefas de forma sequencial. Pode ser do tipo compacto ou modular. Existem vários modelos no mercado, que podem contar com quantidades diferentes de entradas e saídas, IHM's e outros tipos de periféricos. Mas todos os tipos

de CLP compartilham o mesmo propósito, realizar tarefas simples de controle na indústria. (FRANCHI; CAMARGO, 2008)

Foi desenvolvido na década de 1960 e, desde então, vem recebendo atualizações. Hoje em dia, é o equipamento de controle mais utilizado em automação industrial. Inicialmente utilizados em operações de controle discreto (on/off) como alternativa a sistemas a relé. Possuíam instalação e manutenção mais simples devido aos seus indicadores de diagnóstico, eram menores e mais eficientes. Além disso, era possível alterar a sua lógica de programação sem ter a necessidade de refazer as ligações elétricas dos equipamentos do sistema.

Se tornou ainda mais atraente na década de 1980, onde novas tecnologias possibilitaram a comunicação em rede, o aumento no número de entradas e saídas e a diminuição de suas dimensões devido ao surgimento de novas tecnologias de componentes eletrônicos. (PETRUZELLA, 2013)

Um marco para a história do CLP foi a publicação da norma IEC 1131 na década de 1990. A comunidade industrial, reconhecendo a necessidade de se estabelecer padrões para o desenvolvimento do CLP, criou um grupo dentro do IEC (*International Electrotechnical Commission*) que visava estabelecer normas para padronizar os parâmetros de construção do CLP, projetos de *hardware*, sistemas, comunicação e programação. Alguns anos depois, após ser revisada, a norma recebeu o número IEC 61131.

1.1 OBJETIVO

Almeja-se com este trabalho a elaboração de um controle de chaveamento utilizando CLP para bancos de capacitores, cujo objetivo principal será a implementação de um sistema inteligente de correção de fator de potência com intenção de garantir a qualidade de energia elétrica transmitida, além de diminuir valores de conta de energia da empresa. Ao final do trabalho pretende-se demonstrar que é possível desenvolver uma solução barata e eficaz para um sistema de controle de compensação reativa aplicado na correção de fator de potência em um sistema de média tensão.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho de graduação foi estruturado da seguinte forma:

O capítulo 2 introduz os conceitos clássicos de potência elétrica instantânea e uma análise mais atual, considerando componentes de potência causados por harmônicas.

O capítulo 3 descreve o cálculo do fator de potência, as principais características de um capacitor e os principais componentes que compõem os bancos de capacitores.

O capítulo 4 apresenta o CLP, bem como suas características, modelos, linguagens de programação e histórico de aplicação na indústria.

Em seguida, no capítulo 5 é apresentada a aplicação do BC na indústria e seus componentes principais.

O capítulo 6 descreve toda a metodologia do trabalho, mostrando a programação proposta para automatizar o BC projetado.

No capítulo 7 são comparados os custos do BC automatizado aos de um estático, além dos benefícios gerados pela automatização.

O capítulo 8 apresenta a conclusão deste trabalho.

Capítulo 2

POTÊNCIA ELÉTRICA

Este capítulo apresenta as definições sobre a teoria clássica das potências elétricas, também apresenta uma maneira alternativa de tratamento matemático utilizando as componentes instantâneas de potências, utilizando como base a Teoria Generalizada das Potências Instantâneas, de acordo com Akagi (1983). Em seguida é apresentada a definição mais atual das potências elétricas, proposta por Furuhashi (1990) e Watanabe (1991), que leva em consideração componentes harmônicas e distorção.

2.1 EQUACIONAMENTO CLÁSSICO DA POTÊNCIA ELÉTRICA

Para um sistema elétrico monofásico é possível calcular o valor instantâneo do fluxo de potência que parte da fonte em direção à carga como a multiplicação das componentes instantâneas de tensão e corrente, de acordo com a Equação (1).

$$p(t) = v(t) * i(t) \quad (1)$$

Para um sistema elétrico monofásico, com fonte senoidal de tensão, de acordo com a Equação (2) e carga linear em regime permanente, Equação (3), a potência instantânea é dada por:

$$v(t) = \sqrt{2} * V * \text{sen}(\omega t) \quad (2)$$

$$i(t) = \sqrt{2} * I * \text{sen}(\omega t - \theta) \quad (3)$$

Onde:

V: Tensão nominal (RMS);

I: Corrente nominal (RMS);

Θ : Ângulo de defasagem entre tensão e corrente;

ω : Frequência angular;

f: Frequência de oscilação da tensão.

$$p(t) = v * i = \sqrt{2} * V * \text{sen}(\omega t) * \sqrt{2} * I * \text{sen}(\omega t - \theta) \rightarrow$$

$$p(t) = V * I * \cos\theta * (1 - \cos(2\omega t)) - V * I * \text{sen}(2\omega t) \quad (4)$$

Para sistemas elétricos trifásicos equilibrados, cujas fases são representadas por r, s e t, a potência instantânea fornecida é dada pela Equação 5:

$$p(t) = p_r(t) + p_s(t) + p_t(t) = v_r * i_r + v_s * i_s + v_t * i_t \quad (5)$$

2.2 COMPONENTES DA POTÊNCIA

Como apresentado na Equação 4, a potência instantânea entregue ao sistema possui duas componentes:

$$V * I * \cos\theta * (1 - \cos(2\omega t)) \text{ e } V * I * \text{sen}(2\omega t)$$

De acordo com Watanabe (1991), a primeira parcela é sempre positiva e pulsa em torno do valor médio ($V * I * \cos\theta$), onde a frequência é duas vezes maior que a frequência da rede. Ela é definida como Potência Ativa e é a componente responsável por produzir trabalho útil no sistema.

Da mesma forma, a segunda parcela da potência, cuja amplitude é dada por $V * I * \text{sen}\theta$ e oscila em torno do valor médio com o dobro da frequência da rede, é conhecida como Potência Reativa, gerada por cargas reativas, que atuam como acumuladoras de energia. Esta parcela não produz trabalho para o sistema, ou seja, não produz contribui positivamente, apenas circula na linha de transmissão, representando uma perda de energia.

Os valores de potência ativa e reativa definidos pela teoria clássica em sistemas monofásicos são expressos pelas Equações 6 e 7:

$$P = V * I * \cos(\theta) \quad (6)$$

$$Q = V * I * \text{sen}(\theta) \quad (7)$$

Estas expressões correspondem aos valores médios, e portanto, representam as potências ativa e reativa como magnitudes em regime permanente.

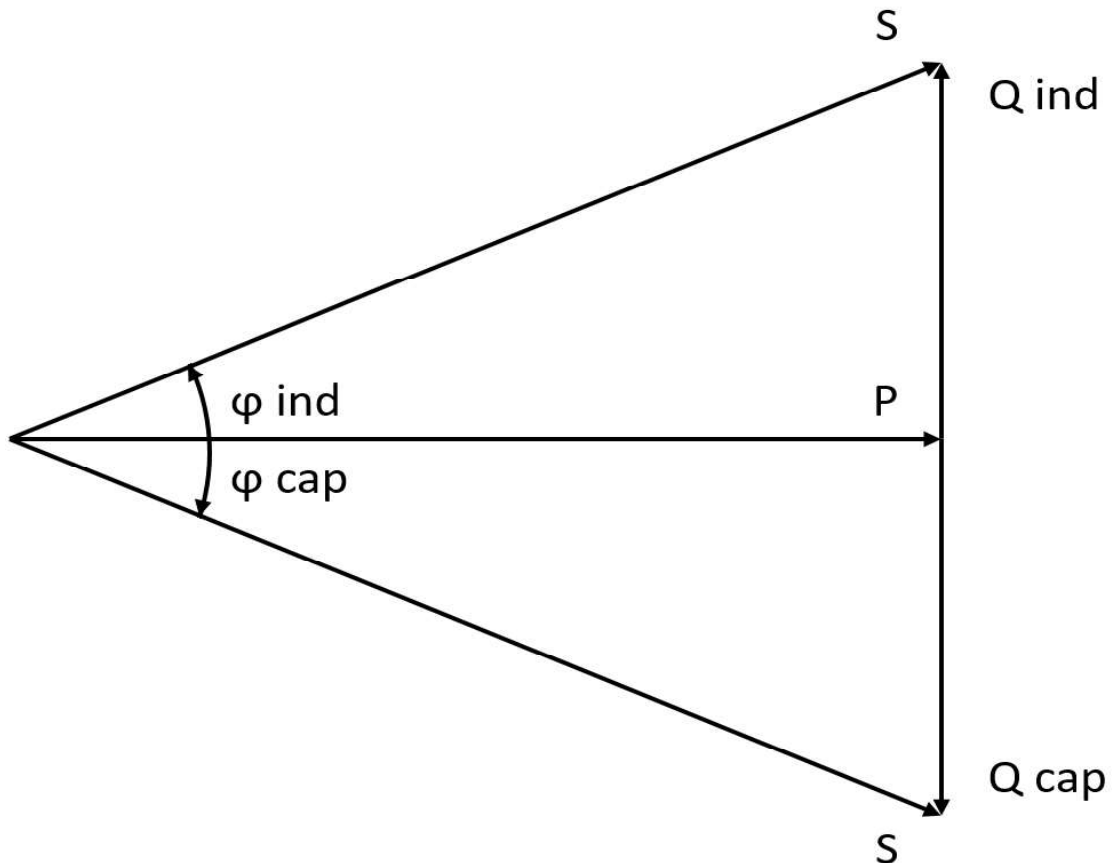
Para sistemas trifásicos equilibrados, as potências ativa e reativa são representadas de acordo com as Equações 8 e 9:

$$P = 3 * V * I * \cos(\theta) \quad (8)$$

$$Q = 3 * V * I * \text{sen}(\theta) \quad (9)$$

Finalmente é definida a potência aparente, que é o valor resultante da soma vetorial das componentes ativa e reativa. A Figura 1 apresenta as componentes de potência:

Figura 1 - Plano das Potências



Fonte: Adaptado de Cotrim (2008).

De acordo com a Figura 1, define-se a potência aparente como:

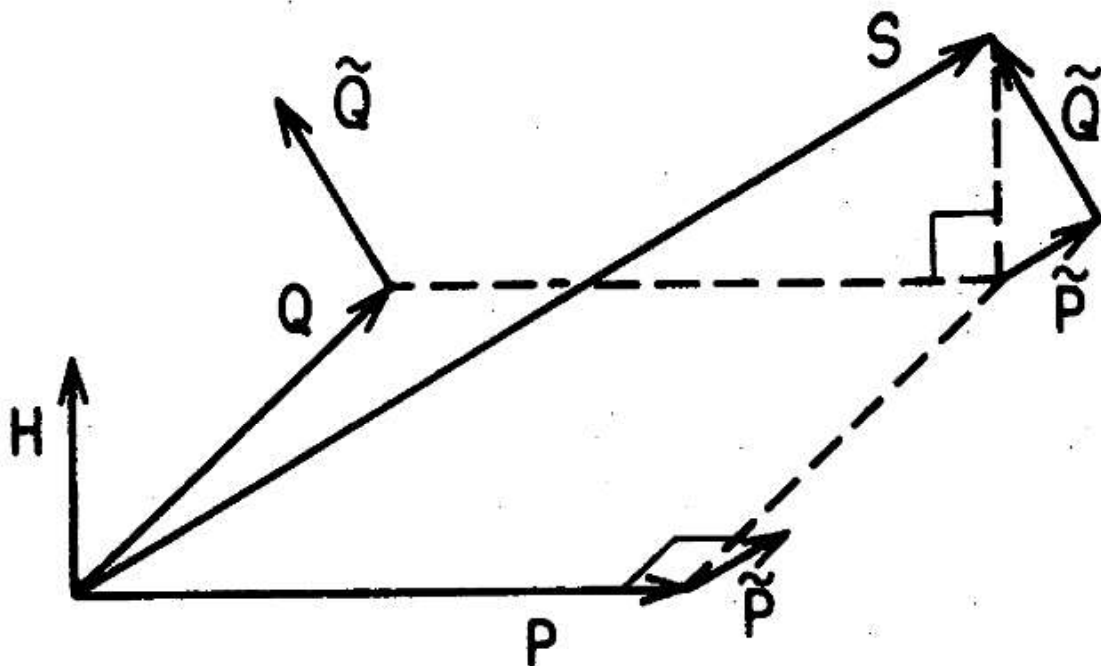
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (10)$$

Substituindo na Equação (10), os valores de P e Q das Equações (6) e (7), obtém-se a amplitude da potência aparente monofásica, dada pela Equação (11).

$$S = V * I \quad (11)$$

Entretanto, a análise feita anteriormente não considera a presença de correntes e tensões que circulam em frequências diferentes da frequência fundamental. Devido ao grande número de cargas não lineares presentes no sistema, essas componentes não devem ser consideradas desprezíveis. Sendo assim, a potência aparente passa a ser melhor representada pelo Tetraedro das potências, segundo Watanabe (1991), como mostra a Figura 2.

Figura 2 - Tetraedro das potências



Fonte: Watanabe (1991).

Onde:

P : Componente ativa da potência.

Q : Componente reativa da potência. Pode ter característica indutiva (positiva) ou capacitiva (negativa).

S : Parcela aparente da potência.

$\tilde{P}$: Parcela oscilante da potência ativa.

$\tilde{Q}$: Parcela oscilante da potência reativa.

H : Parcela de distorção da potência aparente causada pelas componentes harmônicas.

Pode-se observar que a potência aparente, Equação 13, é dada pela soma vetorial das três componentes de potência: Ativa, reativa e a somatória vetorial das parcelas oscilantes das potências ativa e reativa, causadas pelas componentes nas frequências harmônicas diferentes da fundamental, Equação 14.

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (12)$$

$$St^2 = P^2 + Q^2 + H^2 \quad (13)$$

$$H^2 = \tilde{P}^2 + \tilde{Q}^2 \quad (14)$$

Watanabe (1991) propõe que não é possível corrigir um sistema de potência que possua níveis de distorção como os apresentados acima, através da troca de potência entre fases, utilizando o método tradicional de inserção de cargas reativas através de bancos de capacitor. Para cargas com estas características é proposta a utilização de um sistema composto por elementos armazenadores capazes de receber energia nos ciclos negativos da parcela oscilante da potência instantânea e devolver nos ciclos positivos, ou então a utilização de filtros ativos de potência, constituídos basicamente de inversores de tensão (VSI) ou corrente (CSI) controlados, como apresentado por Akagi (1983).

Capítulo 3

FATOR DE POTÊNCIA

Para sistemas constituídos majoritariamente de cargas lineares, com componente de distorção desprezível, o fator de potência (FP) representa a relação entre potência ativa (P) e potência aparente (S), apresentando valor máximo 1. Para tensões e correntes senoidais, P equivale à parte real da potência complexa, enquanto que para tensões e correntes não senoidais, P equivale ao somatório das potências ativas provenientes de componentes contínuos, fundamentais e harmônicos. (COTRIM, 2008)

Se tratando de cargas capacitivas, existe um defasamento angular entre corrente e tensão, onde a corrente referência é adiantada em relação à tensão, representando fator de potência capacitivo ou adiantado. Para casos com cargas indutivas a corrente é atrasada em relação à tensão, caracterizando fator de potência indutivo ou atrasado.

Para valores de fator de potência (FP) próximos do valor unitário, a potência elétrica entregue é majoritariamente transformada em trabalho, desconsiderando as perdas intrínsecas. Enquanto que quando o fator potência é próximo de zero, a potência não é transformada em trabalho, sendo predominantemente reativa.

Entretanto, para cargas cujas componentes de distorção representam mais de 20% do total conectado é necessário considerar os efeitos de distorção causados pelas harmônicas na correção do fator de potência, utilizando filtros junto aos capacitores de modo a filtrar estas componentes.

Para que seja possível a correção do fator de potência em sistemas com grandes magnitudes de distorção, é necessário definir o THD (Distorção Harmônica Total) da carga, de acordo com a Equação 15.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{nh} I_i^2}}{I_1} * 100 \quad (15)$$

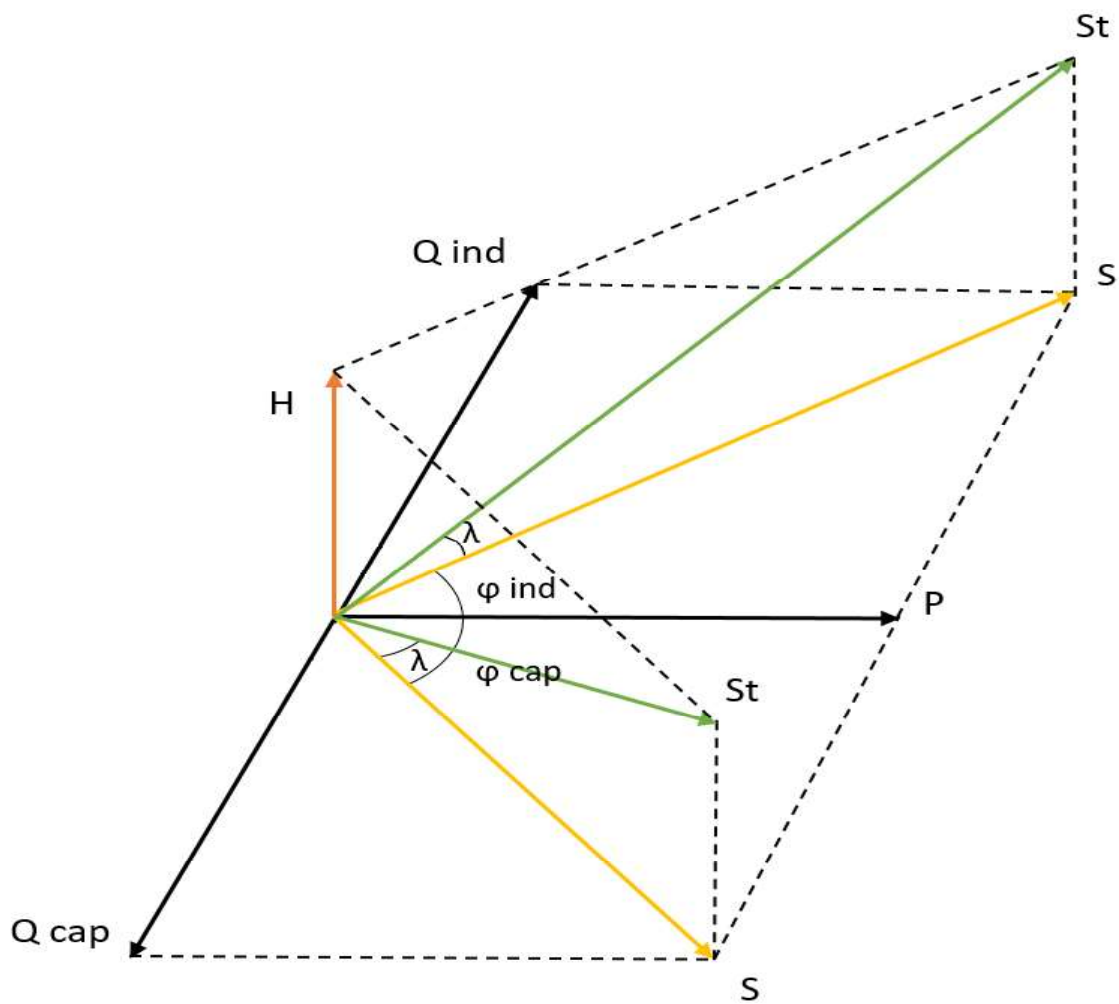
Onde:

I_i : Corrente eficaz da i -ésima componente harmônica;

I_1 : Corrente eficaz da fundamental.

Na Figura 3 é representado o tetraedro das potências para cargas de origem indutiva e capacitiva:

Figura 3 – Tetraedro das potências considerando componentes de origem indutiva e capacitiva.



Fonte: Adaptado de Cotrim (2008).

A partir da Figura 3:

$$P = S * \cos(\varphi) \quad (16)$$

$$S = St * \cos(\lambda) \rightarrow St = \frac{S}{\cos(\lambda)} \quad (17)$$

Onde:

St : Potência aparente total. Soma vetorial das componentes ativa, reativa e de distorção.

λ : Defasagem angular entre a potência aparente total e a potência aparente sem distorções.

A partir de (16) e (17) define-se o fator de potência real (fpr):

$$FPr = \frac{P}{St} \quad (18)$$

Substituindo (16) e (17) em (18):

$$FPr = \frac{S * \cos(\varphi)}{\frac{S}{\cos(\lambda)}} = \cos(\varphi) * \cos(\lambda) \quad (19)$$

Portanto, multiplicando o fator de potência em regime de carga linear ($\cos(\varphi)$) por um fator menor que 1 ($\cos(\lambda)$) faz com que o fator de potência assuma um valor menor relativo ao valor em regime linear.

Para um sistema Trifásico Simétrico Equilibrado, a potência St pode ser escrita como:

$$St = \sqrt{3} * V_1 * I_{RMS} \quad (20)$$

Onde:

V_1 : Tensão de linha fundamental;

I_{RMS} : Corrente eficaz total na presença de harmônicas.

Substituindo (16) e (20) em (18):

$$FPr = \frac{P}{St} = \frac{\sqrt{3} * V_1 * I_1 * \cos(\varphi)}{\sqrt{3} * V_1 * I_{RMS}} \rightarrow$$

$$FPr = \frac{I_1 * \cos(\varphi)}{I_{RMS}} = \frac{I_1 * \cos(\varphi)}{\sqrt{I_1^2 + \sum_{i=2}^{nh} I_i^2}} \quad (21)$$

Elevando (15) ao quadrado e manipulando:

$$THD^2 = \frac{\sum_{i=2}^{nh} I_i^2}{I_1^2} * 100^2 \rightarrow$$

$$\sum_{i=2}^{nh} I_i^2 = I_1^2 * \left(\frac{THD}{100}\right)^2 \quad (22)$$

Substituindo (22) em (21):

$$FPr = \frac{I_1 * \cos(\varphi)}{\sqrt{I_1^2 + I_1^2 * \left(\frac{THD}{100}\right)^2}} = \frac{I_1 * \cos(\varphi)}{\sqrt{I_1^2 * \left[1 + \left(\frac{THD}{100}\right)^2\right]}} \rightarrow$$

$$FPr = \frac{\cos(\varphi)}{\sqrt{1 + \left(\frac{THD}{100}\right)^2}} \quad (23)$$

Através da equação (23), pode-se estimar o fator de potência real (FPr) conhecendo o THD% da carga. Para este trabalho, a distorção causada por harmônicas será considerada desprezível. Caso o THD% da carga fosse maior que 20%, seria necessária a instalação de filtro de harmônicas nos capacitores projetados para a correção do fator de potência, ou então, como descrito no capítulo 1, a

utilização de um sistema composto por elementos armazenadores capazes de receber energia nos ciclos negativos da parcela oscilante da potência instantânea e devolver nos ciclos positivos, proposto por Watanabe (1991), ou a utilização de filtros ativos de potência, constituídos de inversores (VSI ou CSI) controlados, como apresentado por Akagi (1983).

3.1 CONSEQUÊNCIAS DE UM BAIXO FATOR DE POTÊNCIA

Segundo Bordim (2011), o que motiva um baixo fator de potência são valores elevados de potência reativa (Q), causando acréscimo na corrente total que circula nas redes de distribuição e em unidades consumidoras, acarretando sobrecarga em linhas de transmissão e distribuição, provocando instabilidade no sistema, o que pode causar quedas de tensão e subutilização da potência elétrica instalada.

O afundamento de tensão causa desde sobrecarga em elementos da rede a problemas de operação em equipamentos. Isto é mais comum em períodos de maior demanda.

Perdas de energia elétrica se dão em forma de aumento de temperatura, o que causa sobreaquecimento em condutores e equipamentos. A potência reativa é diretamente proporcional à corrente total do sistema, então, observa-se uma relação direta entre um baixo fator de potência e níveis elevados de perda elétrica.

3.2 CAPACITORES DE POTÊNCIA

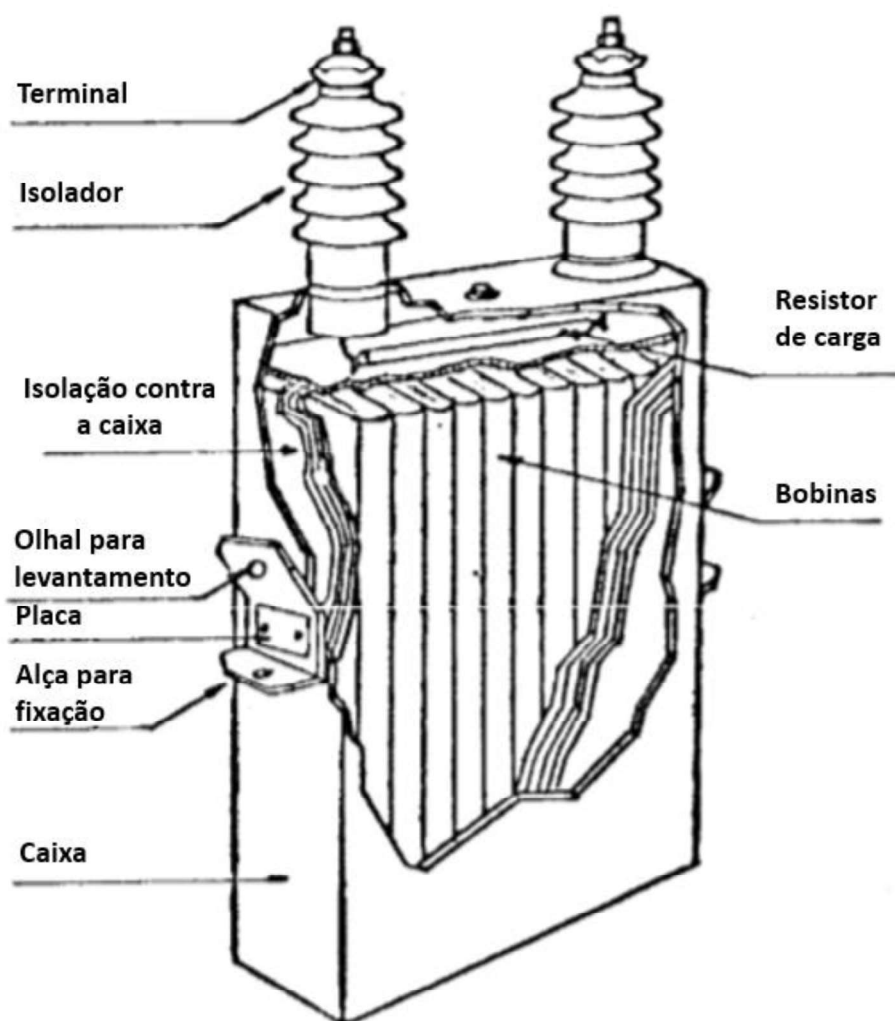
Os capacitores de potência apresentam o mesmo princípio de funcionamento de capacitores comuns, mas uma construção mais robusta e elaborada. A parte ativa do capacitor é formada por um par de folhas de alumínio de alta pureza, para não afetar a capacitância, separadas por um dielétrico sólido impregnado com líquido isolante. O dielétrico é constituído de filme de polipropileno com espessura fina, banhado em óleo isolante.

De acordo com ITTEL (1981) as folhas de alumínio e o dielétrico que as separa, são enrolados em bobinas cilíndricas, comprimidas no formato retangular. Estas bobinas são agrupadas e interligadas em série ou em paralelo com a intenção de obter a capacitância e a tensão nominais da unidade capacitiva, formando assim a parte

ativa do capacitor. A parte ativa é isolada da caixa metálica do capacitor por meio de um filme isolante. Em seguida, são feitas as conexões com os isoladores e com a resistência interna de descarga, então o conjunto é introduzido na caixa do capacitor.

A Figura 4 mostra a parte construtiva interna e externa de um capacitor de potência.

Figura 4 – Representação de um capacitor de potência.



Fonte: Adaptado de ITEL (1981).

A caixa do capacitor é geralmente constituída de chapas de aço pintado. Possui olhais para içamento (levantamento), isoladores, alça para fixação e placa de identificação.

A caixa é soldada para vedação após o processo de secagem e impregnação, que é importante para a diminuição de perdas do dielétrico e para aumentar a vida útil

do capacitor. Este processo é composto de ciclos de elevação de temperatura sob vácuo, que tem como objetivo reter toda a umidade contida nos componentes da parte ativa.

Após a fabricação são realizados os ensaios em todas as unidades produzidas para verificar as características dos equipamentos e eliminar aqueles que apresentarem defeitos no material ou na fabricação. De acordo com a ABNT NBR 5282 (1998) estes ensaios são:

1. Ensaio de estanqueidade
2. Tensão suportável nominal entre terminais
3. Tensão suportável nominal entre terminal e caixa
4. Medição de capacitância
5. Medição do fator de perdas
6. Medição da resistência ôhmica do dispositivo de descarga

Estes ensaios não serão detalhados, pois não têm relevância para o objetivo do trabalho. Caso um capacitor seja reprovado em algum destes testes, ele é descartado.

3.3 TIPOS DE CAPACITORES DE POTÊNCIA

Os capacitores utilizados para a correção do fator de potência são divididos em três grupos: Capacitores de fusíveis internos, de fusíveis externos e sem fusíveis (ou *fuseless*).

3.3.1 CAPACITORES DE FUSÍVEIS INTERNOS

Nos capacitores de fusíveis internos, elementos fusíveis localizados na parte interna da caixa do capacitor são responsáveis por proteger cada elemento capacitivo do sistema.

Neste modelo de capacitor qualquer elemento em curto circuito após uma falha dielétrica é desconectado imediatamente, desta forma caso um fusível atue, o objetivo é que ocorra uma variação mínima na capacitância ou na distribuição de tensão, ou

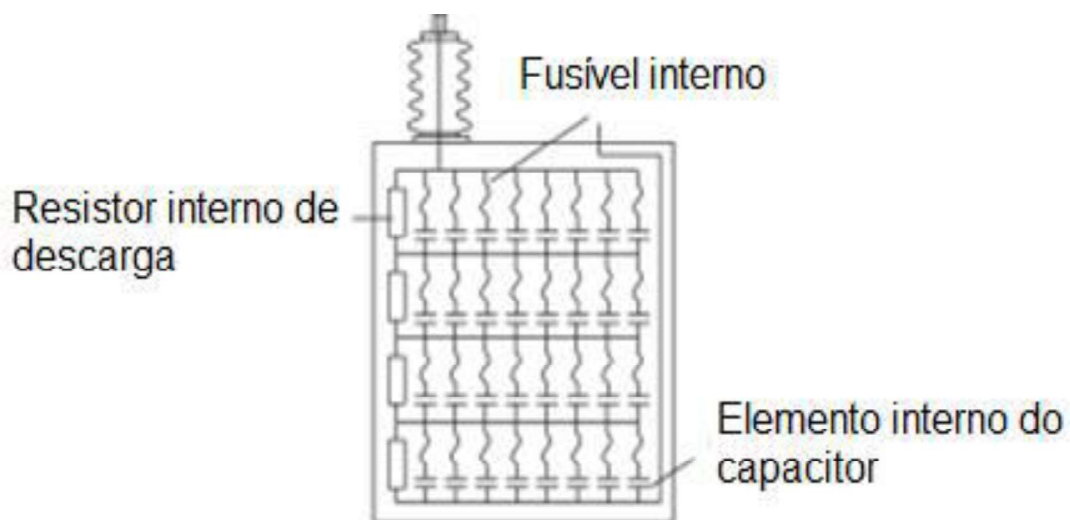
seja, o rompimento de um fusível gera uma influência desprezível no capacitor ou e banco de capacitores. Este tipo de capacitor apresenta um número maior de elementos capacitivos, se comparado às outras tecnologias de fusíveis.

Este tipo de capacitor apresenta maiores perdas se comparado aos outros tipos de capacitores devido ao maior número de conexões internas. Sua característica construtiva faz com que este modelo de capacitor não possa ser produzido com potências baixas, menores do que dezenas de kvar, entretanto não há restrições para a fabricação de capacitores com fusíveis internos de alta potência.

Uma característica única deste modelo é a necessidade de garantir a operação dos fusíveis em diferentes condições de tensão e que eles sejam capazes de suportar descargas devido a sobretensões temporárias. Uma solução para estes problemas é utilizar um número menor possível de elementos em paralelo. (MORIEL, 2013)

A estrutura de um capacitor de fusíveis internos é apresentada na Figura 5.

Figura 5 – Representação de um capacitor com fusíveis internos.



Fonte: Seielectric (2019).

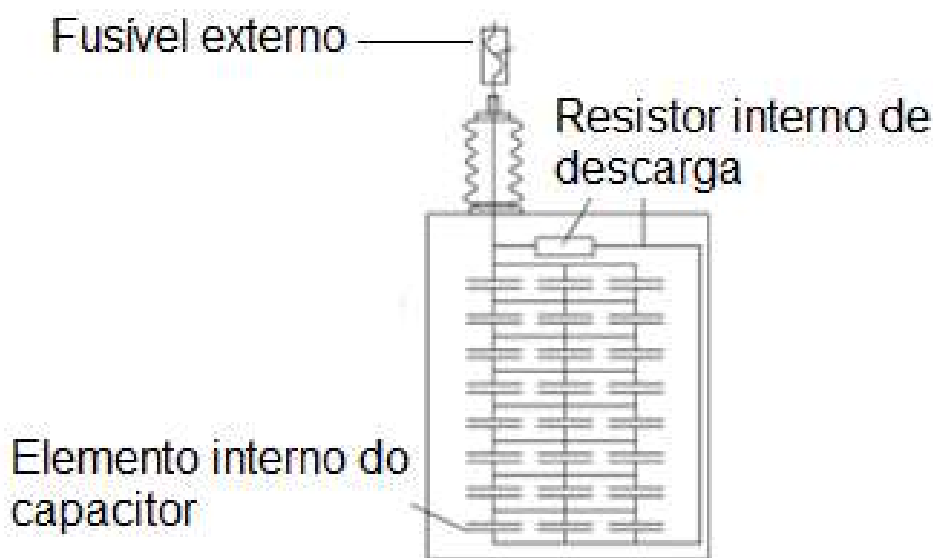
3.3.2 CAPACITORES DE FUSÍVEIS EXTERNOS

Os capacitores de fusíveis externos são protegidos por um elemento fusível localizado externamente ao capacitor, o que permite uma rápida detecção na ocorrência de uma falha do capacitor, já que se pode identificar o problema a partir do elemento fusível atuado.

Os bancos de capacitores com fusíveis externos são formados por capacitores de potência mais baixa se comparado a potência total do banco, isso é necessário devido às limitações impostas pela capacidade de interrupção de fusível, caso um fusível operante seja retirado de um capacitor do banco de capacitores, não pode ocasionar em um acréscimo de tensão maior do que 10% nas unidades remanescentes.

Os capacitores de fusível externo (Figura 6) apresentam potências típicas entre 200 kVar e 600 kVar, menores do que os capacitores de fusível interno padrão, isto ocorre devido a máxima corrente de operação confiável do fusível. (MORIEL, 2013)

Figura 6 – Representação gráfica de um capacitor de fusível externo.



Fonte: Seielectric (2019).

A Tabela 1, de acordo com BARCÓN, S.; et al. (2012), apresenta uma comparação entre algumas das principais características destes dois modelos.

Tabela 1 – Comparação entre capacitores de fusível externo e fusível interno.

Característica	Fusíveis Externos	Fusíveis Internos
Operação	Coordenada com a curva de ruptura do capacitor.	Cada bobina interna tem um fusível que a protege.
Perdas	Elemento único – menores perdas.	Um elemento fusível por capacitor – perdas maiores.

Segurança	Alta - fusível único que protege o sistema.	Pode haver curto-circuito entre a bobina e o capacitor - risco de explosão.
Custos	Maiores.	Menores.
Aquecimento	Mínimo, pois o fusível é externo.	Aquece o dielétrico e o óleo.
Identificação de falha	Imediata e visual.	Difícil identificação - necessário identificar o elemento que falhou.
Aplicação	Qualquer tipo de banco de capacitor.	Bancos de capacitores para sistemas de transmissão.
Facilidade de proteção	Alta, o relé identifica até a perda de unidade capacitiva.	Baixa, o relé não consegue identificar a perda de apenas uma bobina.
Aplicação em Filtros	Dispara um alarme em caso de perda de unidade capacitiva.	Perda de sintonia gradual, aumenta o esforço dos equipamentos secundários.

Fonte: BARCÓN, S.; et al., (2012).

3.4 BANCO DE CAPACITORES SHUNT

De acordo com BARCÓN, S.; et al. (2012) os bancos de capacitores podem ser ligados em derivação na linha. Esta configuração é mais conhecida como shunt e tem como principal função o fornecimento de potência reativa capacitiva ao circuito para contrabalancear a potência reativa indutiva necessária para o funcionamento de alguns tipos de equipamento, de modo a regular a tensão e diminuir perdas.

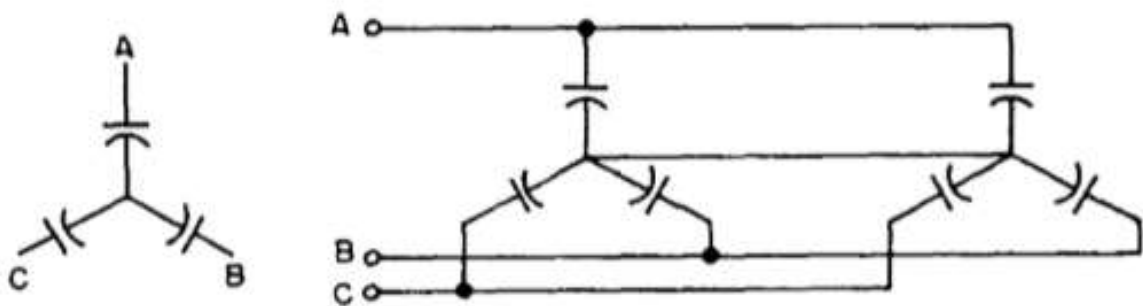
Os bancos de capacitores trifásicos são geralmente constituídos por uma quantidade de capacitores monofásicos arranjados em grupos, conectados em série ou em paralelo obtendo assim os valores de tensão e potência total do banco.

Geralmente os bancos de capacitores de média tensão são conectados em estrela com neutro isolado. Em um grupo de capacitores em série, caso uma unidade capacitiva apresente falha, a corrente é limitada pela impedância das outras fases, desta forma pode ser utilizado um fusível com menor capacidade de condução de corrente, o que implica em menores custos.

Não apresenta harmônicas de terceira ordem, o que reduz a possibilidade de interferência na comunicação, sobretensão por ressonância e má operação de fusíveis.

A conexão em estrela tem duas principais variações, estrela simples e dupla estrela. Estas configurações são apresentadas na Figura 7.

Figura 7 – conexão estrela simples (a esquerda) e conexão dupla estrela (a direita).



Fonte: Adaptado de D'AJUZ, A; et al. (1985).

3.5 PRINCIPAIS COMPONENTES DE UM BANCO DE CAPACITORES

Para que o banco de capacitores possa operar corretamente, também são necessários outros equipamentos. Cada modelo de banco de capacitor pode conter dispositivos diferentes; aqui serão citados os equipamentos mais comuns. BARCÓN, S. et al. (2012) cita o controlador, representado na Figura 8, como um equipamento que utiliza alguns parâmetros medidos (corrente, tensão, temperatura) para conectar e desconectar algumas fases do banco. Alguns modelos deste dispositivo também têm a função de medir a THD (distorção harmônica total), verificar a potência do banco de capacitor e estabelecer ajustes para que ocorra uma diminuição de perdas.

Figura 8 – Controladores de fator de potência.



Fonte: WEG (2020).

O pára-raios, apresentado na Figura 9, atua na proteção do banco de capacitor e do sistema contra transitórios gerados por descargas atmosféricas e manobras de chaves seccionadoras e disjuntores, reduzindo os níveis de sobretensão a valores que podem ser suportados pelo sistema. Os primeiros modelos de para-raios produzidos comercialmente eram compostos de centelhadores. Quando havia uma surto, o centelhador disparava, limitando a sobretensão nos equipamentos protegidos pelo dispositivo, porém havia o risco de o centelhador estabelecer um curto-circuito que deveria ser eliminado pelo sistema de proteção.

De modo a evitar este curto-circuito, foi desenvolvido o para-raios composto por blocos de resistores não-lineares, que têm como função absorver energia e limitar a corrente de surto. Geralmente composto por óxido de zinco (ZnO) e com excelentes características de proteção. Apresenta construção simples, o que aumenta a confiabilidade do equipamento, possui maior capacidade de absorção de energia, tem melhor desempenho sob contaminação, além de apresentar curva suave de entrada e saída em condução. (D'AJUZ, A. et al. 1985)

Para que não ocorram tensões superiores ao nível de proteção do dispositivo, é indicado que se conecte o para-raios diretamente aos terminais do equipamento a ser protegido. Na maioria dos casos, um para-raios pode proteger um grupo de equipamentos.

De acordo com Piombini (2017), seus parâmetros mais importantes são a corrente de descarga e a Tensão Máxima de Operação Contínua (*Maximum Continuous Operating Voltage* - MCOV).

Figura 9 – Para-raios de subestação.

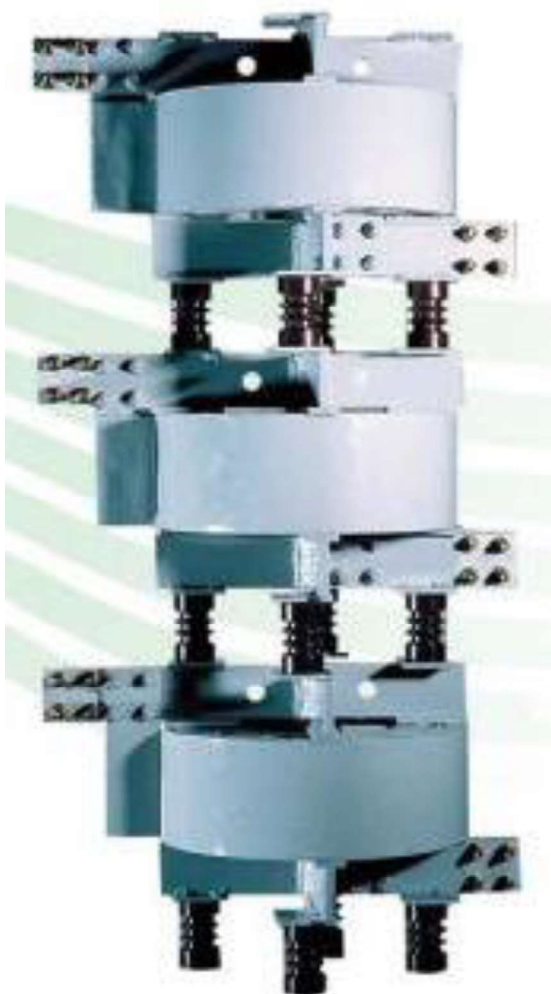


Fonte: Balestro (2021).

O Reator (Figura 10) limita o fluxo de corrente no capacitor, permitindo que sejam instalados bancos de maior potência. Além de também atuar como um método de proteção quando são instalados bancos de capacitores paralelos em um mesmo barramento. Quando o banco de capacitor é introduzido no sistema já energizado, um

pico de corrente de energização (corrente de *inrush*) pode ocorrer, o reator atua limitando esta corrente, protegendo o banco e os outros equipamentos conectados.

Figura 10 – Reatores.



Fonte: Adelco (2012).

O relé de desbalanço, atualmente conhecido como IED (dispositivo eletrônico inteligente), apresentado na Figura 11, tem como função monitorar o funcionamento do banco de capacitor a partir de medidas de vários parâmetros e caso o sistema opere acima das condições normais de operação do banco, o dispositivo tem a função de retirar o banco do sistema. O IED deve ser suficientemente sensível para detectar e emitir um alarme caso ocorra a perda de uma unidade capacitiva.

Figura 11 – IEDs de desbalanceamento.



Fonte: SIEMENS (2021).

De acordo com Mamede Filho (2013), o transformador de corrente (TC), apresentado na Figura 12, auxilia instrumentos de proteção, medição ou controle. Estes transformadores convertem correntes elevadas em baixas, podendo assim ser utilizadas por outros equipamentos. O banco de capacitor calculado irá utilizar um TC, este equipamento pode ser classificado em 2 principais tipos:

- Transformadores de corrente de medição: São normalmente utilizados para correntes baixas e apresentam alta precisão. São geralmente aplicados na medição do consumo de energia de indústrias.
- Transformadores de corrente de precisão: São mais robustos, trabalham com correntes mais altas e apresentam uma menor precisão. Geralmente utilizados em conjunto com relés de proteção. Em caso de surto no sistema, o TC detecta a falha e o relé atua para evitar maiores perdas.

Figura 12 – Transformador de corrente.



Fonte: DAX Energy (2021).

De acordo com Mamede Filho (2013), o transformador de potencial (TP), apresentado na Figura 13, são equipamentos empregados em sistemas de medição e proteção. Estes transformadores convertem níveis de tensão de modo a adequar as medidas aos equipamentos que serão utilizados.

Figura 13 – Transformador de potencial.



Fonte: Rehtom (2021).

Os interruptores a vácuo permitem a conexão ou desconexão do banco no sistema devido a atuação manual ou a partir da atuação da proteção (no caso por relé ou IED). Este equipamento pode apresentar modelos monopolares ou tripolares, a Figura 14 representa este equipamento.

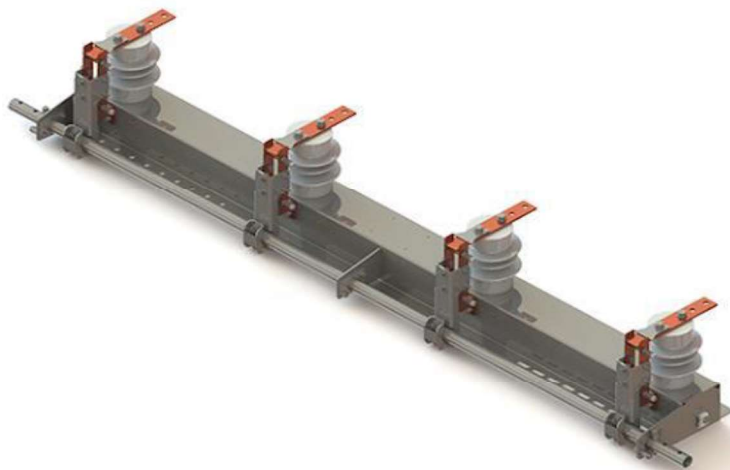
Figura 14 – Chave monopolar a vácuo.



Fonte: DAX Energy (2020).

A chave de aterramento tetrapolar possibilita o aterramento do banco de capacitor em derivação após sua desenergização. A Figura 15 mostra um modelo de chave de aterramento.

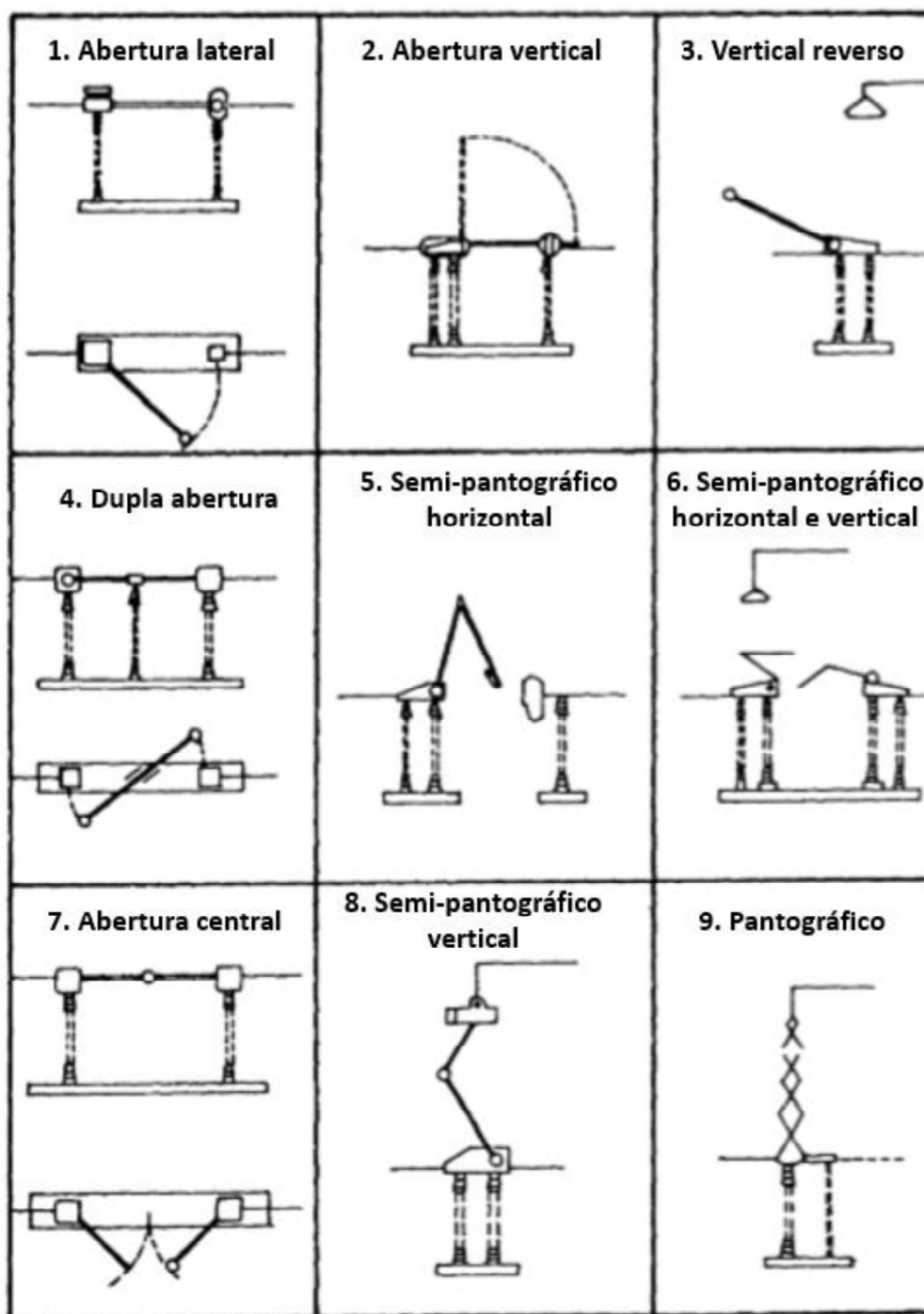
Figura 15 – Chave de aterramento tetrapolar.



Fonte: Adaptado de Seielectric (2019).

Como dispositivo de manobra e isolamento de equipamentos em subestações são utilizadas as chaves seccionadoras. Bancos de capacitores não devem operar quando existir variação de tensão ou corrente em seus terminais (interrupção ou restabelecimento). Alguns modelos de chaves seccionadoras são apresentados na Figura 16.

Figura 16 – Modelos de chaves seccionadoras monopolares.



Fonte: Adaptado de D'AJUZ. et al (1985).

Capítulo 4.0

CLP (CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL)

Com a Segunda Revolução Industrial, em meados do século XIX, foram desenvolvidos sistemas primitivos de controle. Sua lógica de controle era executada por dispositivos mecânicos nas linhas de montagem, que tinham como função a automatização de tarefas que eram consideradas indispensáveis e repetitivas para os trabalhadores. Estes dispositivos possuíam vida útil curta e eram projetados para uma tarefa específica.

No início dos anos 1920 surgiram relés e contadores, que substituíram os dispositivos mecânicos. A utilização da lógica por relés permitiu que fossem desenvolvidas funções de controle mais elaboradas, e desde então, vários sistemas de controle são desenvolvidos utilizando essa metodologia. A lógica por relés e contadores se apresentava como uma alternativa de baixo custo, principalmente para a automação de máquinas cujo número de transdutores e atuadores era limitado. Em sistemas antigos a lógica utilizando relés ainda é empregada, mas, na indústria moderna, dificilmente é aplicada na elaboração de novos sistemas de controle.

O desenvolvimento da tecnologia dos Circuitos Integrados (CIs) viabilizou o surgimento de uma nova geração de sistemas de controle. Comparando com os relés, os CIs baseados nas tecnologias TTL ou CMOS são menores, mais rápidos e possuem uma maior vida útil. Muitos sistemas de controle baseados em relés e CIs possuem lógica de controle permanentemente, definida pela ligação elétrica dos componentes. Sistemas onde a lógica é definida pela ligação elétrica entre componentes são de fácil implementação, mas é muito trabalhoso e demorado modificar sua lógica e seu comportamento.

Devido às inovações tecnológicas dos microprocessadores do início da década de 1970, que apresentavam maior flexibilidade e maior grau de inteligência, os primeiros computadores comerciais passaram a ser empregados como controladores em sistemas de controle de grande porte. Estes computadores podiam ser programados, o que proporcionava uma grande vantagem quando comparado com a lógica por ligação elétrica, utilizada em sistemas com contadores e relés. Entretanto, os primeiros computadores eram grandes, caros, difíceis de programar e não eram

capazes de suportar os ambientes considerados hostis, encontrados na maior parte das plantas industriais.

A grande demanda existente na indústria automobilística dos Estados Unidos fez com que o primeiro projeto de Controlador Lógico Programável (CLP), ou Programmable Logic Controller (PLC), surgisse. O primeiro projeto de CLP foi desenvolvido na década de 1960 pela *General Motors*, como alternativa para sistemas de controle a relés, onde a lógica de controle de painéis de comando era muito difícil de ser modificada a cada mudança na linha de montagem. Essas mudanças demandavam muito tempo, além de apresentarem um alto custo.

O engenheiro Richard Morley liderou a elaboração de uma especificação que atendia as necessidades dos usuários de circuitos a relés em toda a indústria, não apenas do setor automobilístico. Para uma aplicação a nível industrial, era necessário que o controlador apresentasse as seguintes características:

- Facilidade de programação e alteração da programação, para que seja possível modificar a sequência de operações na linha de produção;
- Dispositivos de entrada e saída modulares, de fácil substituição e manutenção;
- Robustez, para que seja capaz de operar em um ambiente industrial, suportando condições adversas (vibração, calor, poeira);
- Ser competitivo em custo e em tamanho, comparado a painéis de relés e contadores;
- Possuir entradas e saídas que tenham condições de controlar contadores e válvulas solenoides, através de corrente de, no mínimo, 2 A e tensões de 115 V;
- Memória programável de pelo menos 4 kbytes e que apresentem capacidade de expansão;
- Interface simples;
- Possibilidade de coletar dados do CLP e os armazenar em bancos de dados gerenciais, de modo a disponibilizar informações sobre o processo para os departamentos de planejamento e controle da produção.

Inicialmente CLPs eram utilizados em operações de controle discreto (*on/off*), mesmo modo de operação de sistemas a relé, além de possuírem instalação e

manutenção mais simples por contarem com indicadores de diagnóstico, ocupavam menos espaço e eram mais eficientes. Modificações na lógica de controle da máquina podiam ser realizadas alterando o programa, sem a necessidade de refazer a ligação elétrica dos equipamentos.

Na década de 1980, devido às novas tecnologias aplicadas na indústria, o CLP se tornou o equipamento mais interessante para a Automação Industrial. Um exemplo dessas novas tecnologias é a possibilidade de comunicação em rede (1981), indispensável na indústria nos dias de hoje. Também houve um crescimento nos níveis de integração, com o aumento no número de pontos e a diminuição de suas dimensões, o que possibilitou o surgimento de CLPs menores, do tipo mini e micro.

Segundo Franchi e Camargo (2008), hoje em dia os CLPs podem apresentar módulos de alta densidade de entrada e saída, módulos que podem ser remotamente controlados por uma única CPU, módulos inteligentes (controle PID, posicionamento de eixos, transmissão via rádio ou modem, leitura de código de barras), softwares de programação em ambiente Windows, o que representa maior facilidade de programação, comunicação utilizando Aplicativos Windows (*Access*, *Excel*, *Visual Basic*), monitoramento de execução de programas, diagnósticos e detecção de erros, instruções avançadas, que permitem operações complexas (ponto flutuante, funções trigonométricas), menor *Scan Time* (tempo de varredura), o que representa maior velocidade de processamento.

4.1 ARQUITETURA E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

De acordo com Franchi e Camargo (2008) e Petruzella (2013), o Controlador Lógico Programável, pode ser definido como um equipamento eletrônico que desenvolve funções de controle e monitoramento de máquinas industriais, ou seja, um pequeno computador industrial, que armazena informações e instruções que serão utilizadas para implementar funções de controle (sequências lógicas, temporização e contagem), manipular dados, realizar operações lógicas aritméticas, além de poder se comunicar em rede, sendo utilizado principalmente em automação de sistemas.

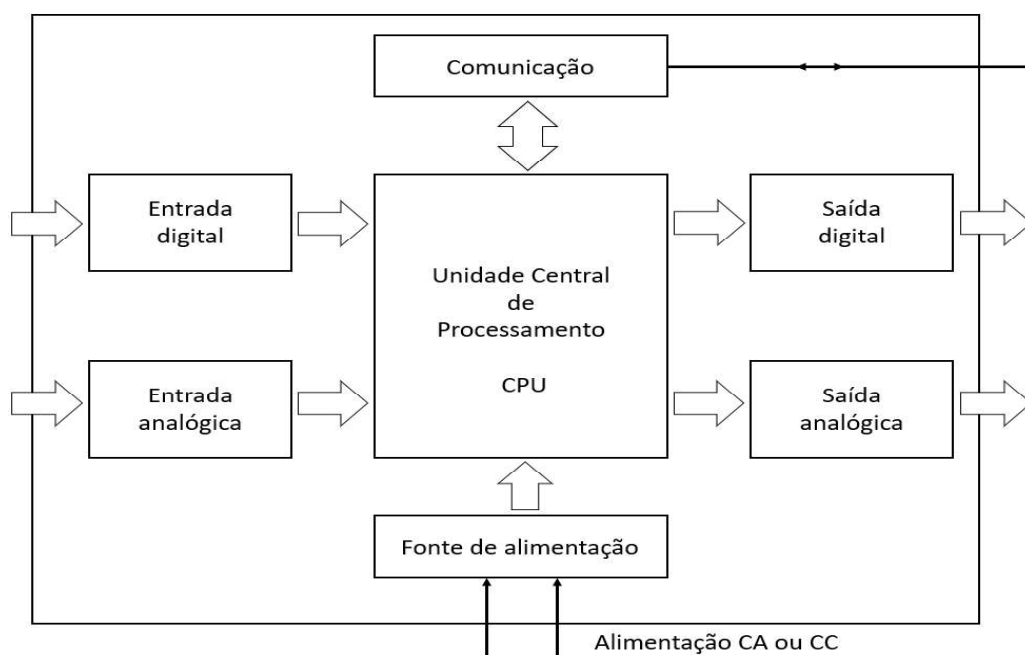
CLPs foram criados para trabalhar em ambientes hostis e, portanto, devem ser capazes de resistir a altas temperaturas, sujeira e a ruídos elétricos, na maioria das vezes operando ininterruptamente. Sua capacidade de memória, quantidade de

entradas e saídas, conjuntos de instruções, velocidade de processamento, tipo de conexão de rede, flexibilidade e presença de IHM podem variar dependendo do fabricante e do modelo.

Os primeiros controladores lógicos programáveis aplicados na indústria tinham como função a substituição de relés. Sua função era apenas realizar operações sequenciais, que antes eram implementadas com relés e contadores, como o controle de liga e desliga de máquinas e equipamentos. Em um período curto, várias melhorias foram implementadas para estes controladores em relação aos relés, como a redução de seu tamanho e de uso de energia, apresentavam indicadores de diagnóstico, o que facilitava a detecção de erros, e diferentemente dos relés, sua lógica de operação podia ser modificada sem que fosse necessário mudar as conexões físicas entre os elementos.

A seguir é apresentado um diagrama de bloco simplificado que ilustra o CLP. De acordo com a Figura 17, o CLP é composto por um sistema de comunicação, suas interfaces de entrada e saída digitais e analógicas, uma unidade central de processamento (CPU) e a fonte de alimentação. Vale ressaltar que cada modelo de CLP possui um nível de tensão de operação específico, que depende do projeto. O CLP pode operar com tensões alternadas de 127 ou 220 V, ou então, com tensão contínua de 24 V, dependendo do modelo e do fabricante.

Figura 17 – Diagrama de blocos de um CLP.



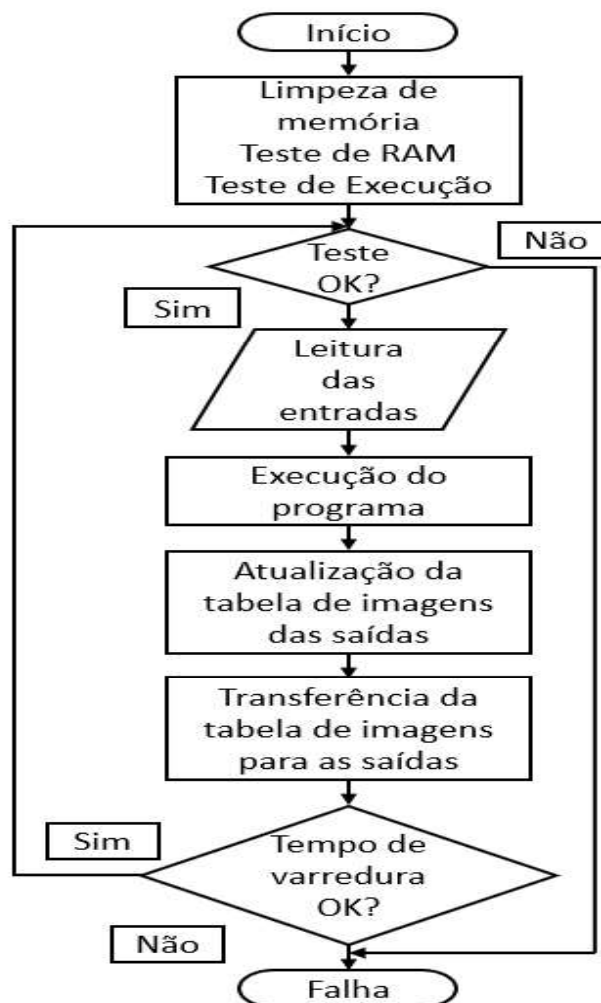
Fonte: Adaptado de Franchi e Camargo (2008).

Conforme a definição do Vocabulário Eletrotécnico Internacional, Controle Automático – IEC 60050, um Sistema de Controle pode ser dividido em duas partes:

- Sistema Controlado: Sistema que executa as operações físicas.
- Sistema de Controle: Equipamento que transmite ordens ao Sistema Controlado, de acordo com as informações provenientes do operador e/ou do processo a ser controlado.

Conforme a Figura 18, o CLP funciona de forma sequencial, fazendo cada ciclo de varredura em estágios. Onde cada etapa do ciclo é executada de cada vez, enquanto as outras etapas ficam inativas. A realização total do ciclo leva um certo tempo, o que justifica a necessidade de processadores cada vez mais rápidos.

Figura 18 – Fluxograma de funcionamento de um CLP.



Fonte: Franchi e Camargo (2008).

Início: Teste de componentes do circuito, verificação de estado das chaves e da presença de um programa em sua memória. Em caso de falha, emite aviso de erro e desativa as saídas.

Leitura das entradas: Verifica o estado das entradas. Este processo é chamado de ciclo de varredura.

Atualização da tabela de variáveis de entrada: Atualiza a memória imagem das entradas.

Execução do programa do usuário: Realiza uma ação previamente programada.

Transferência da tabela de imagens para as saídas: Atualiza a memória imagem das saídas em caso de acionamento das entradas, conforme a determinação da CPU.

Teste de tempo de varredura: Realiza um teste de tempo de varredura e um novo ciclo é iniciado caso o sistema não apresente falhas.

4.1.1 ENTRADAS E SAÍDAS DIGITAIS E ANALÓGICAS

Os módulos de entrada e saída (I/O) são responsáveis por realizar a comunicação entre a CPU e os outros componentes, além de assegurar a isolamento e a proteção da CPU. Podem ser divididos em módulos de entrada e módulos de saída. Para CLPs modulares, também existem os módulos combinados, que possuem entrada e saída no mesmo ponto. (FRANCHI; CAMARGO, 2008)

- Módulo de entrada (*Input Module*): Recebem sinais de dispositivos conectados às entradas (chaves, botoeiras, sensores, transdutores) e os transformam em valores que a CPU é capaz de processar.

- Módulo de saída (*Output Module*): Mandam os sinais processados para os dispositivos de saída (motores, sinalizadores, atuadores). Esses sinais podem ter várias origens, podem ser resultados de lógicas de controle, definidos pelo Programa de Aplicação ou podem ser determinados pelo usuário, independentemente da lógica de controle.

4.1.2 MÓDULOS DISCRETOS

São conhecidos como entradas e saídas digitais, utilizados em sistemas sequenciais e na maior parte das aplicações com CLPs, mesmo em sistemas contínuos. Cada entrada ou saída dos módulos discretos corresponde a um *bit* de um determinado endereço da Tabela de imagens de entradas e saídas, acessada pelo Programa de Aplicação enquanto ele é executado.

A densidade de um módulo é definida pela quantidade de pontos que este módulo apresenta. No caso dos módulos de saída, a densidade é inversamente proporcional à corrente que pode ser fornecida por cada ponto de saída, ou seja, quanto maior a densidade, menor a corrente fornecida por cada ponto.

Não é recomendado que sejam utilizadas saídas utilizando relés para acionamentos cíclicos, mesmo que de baixa frequência, ou para acionamentos rápidos, pois os dispositivos podem sofrer fadiga mecânica, o que é um ponto importante para a configuração dos Módulos de Saída para acionamentos mecânicos dos dispositivos controlados. (FRANCHI; CAMARGO, 2008)

4.1.3 MÓDULOS ANALÓGICOS

De acordo com Franchi e Camargo (2008), módulos analógicos recebem e enviam sinais analógicos (corrente, tensão, temperatura), que serão utilizados em sistemas contínuos ou como parte de sistemas sequenciais.

Módulos de entrada analógicos convertem sinais analógicos vindos dos instrumentos conectados às entradas (transdutores, conversores, termopares), em sinais digitais por meio de conversores A/D (*Analog to Digital Converter*), que em seguida são enviados à CPU. De forma análoga, os módulos analógicos de saída convertem sinais digitais em sinais analógicos por meio de conversores D/A (*Digital to Analog Converter*), que então são enviados às saídas.

Entradas e saídas analógicas são conhecidas como canais. Os valores convertidos referentes a cada canal de entrada, ou enviado para cada canal de saída, são armazenados em endereços específicos na Tabela de Dados, que são definidos pelo Programa de Aplicação. O número de *bits* que cada canal pode conter depende da resolução dos Conversores A/D e D/A.

Cada módulo analógico de entrada e saída utiliza um certo número de pontos de I/O, que varia de acordo com o tipo de CLP utilizado, independentemente da quantidade de canais que podem ser utilizados e da resolução dos conversores.

4.1.4 MEMÓRIA DE OPERAÇÃO

- Programa de Execução (*Firmware*): Programa desenvolvido pelo fabricante do CLP, que determina como será a operação do sistema, como deve ser executado o Programa de Aplicação, o comando de periféricos e a atualização dos módulos de entrada e saída, dentre outras funções. O Programa de Execução converte o Programa de Aplicação em instruções que podem ser executadas pelo processador. (GEORGINI, 2000)

- Rascunho do Sistema: Região da memória utilizada para armazenar provisoriamente uma quantidade de dados, que em seguida será utilizada para cálculos ou controle (relógio interno, *flags* de alarme e erros) pelo Sistema de Operação. Por ser uma memória do tipo RAM, possui característica de acesso rápido.

4.1.5 MEMÓRIA DE APLICAÇÃO

- Programa de Aplicação: Região da memória onde o programa é armazenado para execução. Geralmente composto por memória do tipo EEPROM, mas também podem ser utilizadas memórias do tipo EPROM ou em alguns casos, RAM protegida por bateria de segurança.

- Tabela de Dados: Região da memória onde são armazenados os dados que serão utilizados pelo Programa de Aplicação. Esses dados podem ser valores atuais ou de *preset* (pré-definidos) de equipamentos (temporizadores, comparadores, contadores), variáveis do programa ou variáveis de estado dos pontos de entrada e de saída. Essas variáveis de estado são atualizadas constantemente, refletindo as alterações ocorridas nas entradas e, conseqüentemente, as mudanças nas saídas ocasionadas pelo Programa de Aplicação. Cada ponto de entrada e de saída conectado ao módulo

de E/S possui endereço específico na Tabela de Dados, que é acessada pelo Programa de Aplicação. (GEORGINI, 2000)

Pode haver diferenças na forma de armazenamento de dados e na quantidade de memória, conforme indicado na Tabela 2:

Tabela 2 - Tipos de memória para o sistema de operação e de aplicação.

Memória do Sistema de Operação	Memória de Aplicação
Programa de Execução - ROM / EPROM	Programa de Aplicação - RAM (Bateria) / EPROM / EEPROM
Rascunho do Sistema - RAM (Bateria Opcional)	Tabela de Dados - RAM (Bateria Opcional)

Fonte: Adaptado de GEORGINI (2000).

4.2 TIPOS DE CLP

Pode-se classificar os controladores lógicos programáveis em compactos ou modulares de acordo com os tipos e a disposição dos elementos que constituem o equipamento. (FRANCHI; CAMARGO, 2008)

CLPs compactos

Possuem uma unidade básica composta por uma CPU, fonte de alimentação, e uma quantidade de módulos de entrada e saída que pode variar de acordo com o modelo do CLP, onde o usuário tem acesso apenas às conexões do sistema de entrada e saída. Essa configuração é geralmente empregada em CLPs pequenos, que podem apresentar até 16 entradas. Atualmente contam com um diverso número de módulos especiais, que geralmente são opcionais, tais como:

- Entradas e saídas analógicas;
- Contadores rápidos;
- Módulos de comunicação;
- Interfaces Homem-Máquina (IHM);
- Expansões de entrada e saída.

A Figura 19 apresenta o modelo de CLP compacto LOGO da SIEMENS.

Figura 19 - CLP compacto SIEMENS LOGO.



Fonte: SIEMENS (2021).

CLPs modulares

Esse tipo de CLP é formado por uma base (*rack*) onde são conectados módulos que executam determinadas funções. Existem opções que apresentam processador e memória em um bloco, com fonte de alimentação separada, e também opções com os três componentes em um único módulo. As unidades de entrada e saída são separadas de acordo com suas características. São conectados ao CPU em posições pré-definidas, formando estruturas que podem ser de médio ou de grande porte. Sendo assim, os elementos básicos que formam o CLP modular são:

- CPU;
- Fonte de alimentação;
- Rack;

- Módulos de entrada e saída;
- Módulos de comunicação.

Os CLPs modulares contemplam desde Micro CLPs, que suportam até 16 pontos de entradas e saídas, até CLPs de grande porte, que podem apresentar centenas, ou até mesmo milhares, de pontos. Um CLP modular é apresentado na Figura 20, no caso, o modelo S7-1200 da SIEMENS. A figura apresenta, da esquerda para a direita, dois módulos de comunicação Profibus, entrada e saída, respectivamente, CPU, módulo de entrada digital, módulo de saída digital e módulo de entrada/saída analógica.

Figura 20 - CLP modular SIEMENS S7-1200.



Fonte: SIEMENS (2021).

4.3 PROGRAMAÇÃO BÁSICA DO CLP

Linguagem de programação é um conjunto de regras de instrução, padronizado pela norma IEC 61131-3, que podem ser reconhecidas, lidas e processadas pelo sistema computacional. Em computação, as instruções são definidas como um conjunto de comandos que permitem que um sistema com capacidade computacional realize determinada operação.

Desta forma, programar um equipamento que possua capacidade computacional significa definir um conjunto de instruções ao sistema, de modo que

este se comporte de forma determinística, executando decisões de controle de forma automatizada com base no estado atual das variáveis de entrada e saída do sistema em um determinado instante.

O programador deve considerar as possíveis situações do sistema, planejar uma estratégia de controle e escrever as instruções em uma linguagem de programação padronizada, que em seguida será enviada ao sistema computacional.

4.3.1 NORMA IEC 61131

Nos últimos anos, vários métodos de modelagem foram criados e linguagens de programação poderosas foram desenvolvidas de modo a atender os mais diversos setores da indústria, o que representou um enorme avanço nas técnicas de programação e nas linguagens.

É inegável que a programação de controladores lógicos programáveis é atualmente muito mais fácil e rápida, especialmente após o desenvolvimento de novas linguagens de programação e do aperfeiçoamento de várias linguagens, como o das linguagens Ladder e Lista de Instruções. A falta de uma norma que tratasse das linguagens de programação dos CLPs fez com que surgissem diversas versões diferentes de linguagens ao longo do tempo. Do ponto de vista das empresas e dos usuários, isto não era viável do ponto de vista econômico, já que não era possível reaproveitar o programa utilizado e as habilidades desenvolvidas na utilização de um determinado tipo de CLP quando era necessário substituir o equipamento por outro tipo, modelo ou fabricante.

Assim, quando havia a necessidade de substituir um CLP antigo devido ao aumento da demanda ou mesmo para a incorporação de novos recursos, deveriam ser feitos investimentos por parte das empresas para aquisição e desenvolvimento de software, hardware e treinamento do pessoal envolvido na implantação e manutenção desses novos sistemas.

A comunidade industrial internacional, reconhecendo que era necessário estabelecer padrões para o desenvolvimento dos CLPs, de modo a uniformizar os procedimentos dos diversos fabricantes. Para isto, foi criado um grupo dentro do IEC (International Electrotechnical Commission) que visava estabelecer normas para

regulamentar os parâmetros de construção dos CLPs, desde os projetos de hardware e instalação dos sistemas, até os padrões de comunicação e programação.

Na década de 1990, vários trechos da norma IEC 1131 foram publicados. Essa norma, que trata de todo o ciclo de vida dos CLPs, é considerada um marco histórico para o equipamento. Alguns anos depois, após ser revisada, a norma recebeu o número IEC 61131.

4.3.2 TEMPO DE VARREDURA (SCAN TIME)

Ao executar um programa, o CLP deve ter informações em tempo real das mudanças causadas pelo sistema de controle que está conectado a um dispositivo externo. Durante cada ciclo de operação, o processador lê as entradas, processa esses valores e liga ou desliga as saídas de acordo com a programação executada. Este processo é conhecido como ciclo de varredura do programa. (PETRUZELLA, 2013)

O tempo necessário para completar um ciclo de varredura é chamado de *scan time* (tempo de ciclo de varredura) e indica o tempo de reação do controlador às variações ocorridas nas entradas, e pode variar de 1 a 20 milissegundos. Caso um sinal mude de estado duas vezes durante o intervalo de tempo de varredura e o controlador reagir a este sinal, é possível que o CLP não seja capaz de detectar essa mudança. O equipamento irá detectar uma mudança caso esta ocorra durante a atualização da tabela de imagens das entradas, mas não será capaz de responder a todas as mudanças. O tempo de varredura é dado em função dos seguintes elementos:

- Velocidade do módulo do processador;
- Extensão do programa;
- Tipo de instrução executada;
- Condições reais de verdadeiro ou falso da lógica.

O tempo de varredura real é calculado a cada fim de programa, quando a instrução END é executada, e armazenado na memória do CLP. Os valores de tempo

de varredura obtidos podem ser monitorados via programação do CLP e incluem o valor máximo e o último tempo de varredura.

4.3.3 TIPOS DE VARIÁVEIS

De acordo com Franchi e Camargo (2008), os elementos mais importantes de um CLP são as entradas, as saídas e a memória interna. O CLP só pode receber dados e informações do mundo ao seu redor através de suas entradas. Da mesma forma, o CLP só é capaz de controlar um dispositivo que estiver conectado a uma de suas saídas.

Uma posição de memória de um CLP é identificada por três regiões lógicas. A primeira componente indica se a variável lida é uma entrada, saída ou posição interna de memória, são elas:

- Entradas - *Inputs* (I);
- Saídas - *Outputs* (Q);
- Memória - *Memory* (M).

A segunda componente identifica o tipo de dado, como mostrado a seguir:

- X - *Bit*;
- B - *Byte* (8 bits);
- W - *Word* (16 bits);
- D - *Double Word* (32 bits);
- L – *Long Word* (64bits).

Os demais componentes representam a posição de memória e estabelecem uma hierarquia, que depende do CLP utilizado e da metodologia empregada pelo fabricante. A norma não define o número de níveis hierárquicos. Alguns fabricantes usam números, que definem a posição física no gabinete e a posição de memória, separados por pontos para definir um endereço. Por exemplo, a variável IW1.2.14

representa uma variável de entrada, do tipo *word*, alocada no Rack 1, Módulo 2, canal 14.

A norma IEC 61131-3 não define a faixa de valores, que podem começar com 0 ou 1, dependendo do fabricante. Também não define como deve ser feita a distribuição individual de bits de um *Byte* ou *Word*. É comum, por exemplo, utilizar M3.1 para designar o bit 1 da *Word* 3, mas isso não é uma regra. Outro ponto é a numeração da posição dos bits, que pode começar da direita para a esquerda ou ao contrário, onde a primeira forma é a mais comum. O primeiro passo antes de iniciar a programação de um CLP é consultar o seu manual.

Deve ser possível definir valores específicos para temporizadores, contadores, variáveis discretas e variáveis analógicas em um programa de controle. Os tipos básicos de variáveis são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Tipos de dados.

Código	Tipo	Faixa de valores
BOOL	<i>Boolean</i>	0 ou 1
SINT	<i>Short integer</i>	0 a 255
INT	<i>Integer</i>	-32.768 a 32.768
DINT	<i>Double Integer</i>	-2.147.483.648 a 2.147.483.647
UINT	<i>Unsigned Integer</i>	0 a 65.535
REAL	<i>Floating point</i>	+/- 2,9e-39 a +/-3,4e38
TIME	Tempo	Depende da implementação
STRING	<i>String</i>	Depende da implementação
BYTE	8 bits	Faixa não declarada
WORD	16 bits	Faixa não declarada

Fonte: Adaptado da norma IEC 61131-3.

4.3.4 TIPOS DE LINGUAGEM

De modo a atender às necessidades dos mais variados segmentos da indústria, incluindo seus usuários, e padronizar os diversos métodos de programação de controladores industriais, a norma IEC 61131-3 define as principais linguagens de programação:

- Diagrama de Blocos de Funções (FBD - Function Block Diagram)
- Linguagem Ladder (LD - Ladder Diagram)
- Sequenciamento Gráfico de Funções (SFC - System Function Chart)
- Lista de Instruções (IL - Instruction List)
- Texto Estruturado (ST - Structured Text)

LINGUAGEM LADDER - LADDER DIAGRAM (LD)

Ladder é uma linguagem gráfica, que utiliza a mesma lógica de relés e contatos elétricos para projetar circuitos de comando de acionamentos. Foi a primeira linguagem a ser desenvolvida, e por isso é a mais utilizada pelos desenvolvedores. Pode ser encontrada em praticamente todos os CLPs da atual geração.

A simbologia utilizada nesta linguagem são bobinas e contadores. Os símbolos de contatos representados em uma linha de comando caracterizam as condições que serão avaliadas de acordo com o programa. O resultado da avaliação destas condições determina o controle de uma saída, que normalmente é representada por uma bobina.

TEXTO ESTRUTURADO - STRUCTURED TEXT (ST)

Texto estruturado é uma linguagem textual de alto nível, baseada na linguagem Pascal. Possui todos os elementos fundamentais de uma linguagem moderna de programação, incluindo as instruções de condição (*IF-THEN-ELSE* e *CASE OF*) e as instruções de iteração (*FOR*, *WHILE* e *REPEAT*). Incentiva o desenvolvimento de programação estruturada, como seu nome sugere, sendo a melhor escolha para definir blocos de funções complexas, que podem então ser incorporados em qualquer uma das outras linguagens IEC.

É a mais versátil das linguagens textuais e, portanto, é a mais utilizada em aplicações complexas que envolvem a descrição de comportamentos sequenciais.

LISTA DE INSTRUÇÕES - INSTRUCTION LIST (IL)

Baseada na linguagem assembly, tem característica de programação puramente linear, desenvolvida de maneira sequenciada, e é composta por instruções que possuem uma função de operação e podem incluir uma ou mais funções a ser operadas, separados por vírgulas, dependendo do tipo de operação. É indicada para pequenos CLPs ou para o controle de processos simples.

DIAGRAMA DE BLOCOS DE FUNÇÕES - FUNCTION BLOCK DIAGRAM (FBD)

Diagrama de blocos de função é uma linguagem gráfica de programação, onde os elementos são representados por blocos interligados, de modo semelhante aos utilizados em eletrônica digital. Essa linguagem permite que o *software* seja desenvolvido de forma hierárquica e modular, onde blocos de funções complexos podem ser construídos utilizando blocos menores e mais simples. Geralmente se utiliza a linguagem de texto estruturado para construir esses blocos. Tem recebido atenção especial por parte dos usuários e dos fabricantes por se tratar de uma ferramenta de programação versátil. Seu uso é indicado quando se trata de programas descentralizados ou distribuídos, e é bastante utilizada em processos químicos em geral.

SEQUENCIAMENTO GRÁFICO DE FUNÇÕES – SEQUENTIAL FUNCTION CHART (SFC)

Linguagem gráfica utilizada para descrever ações sequenciadas, paralelas e alternativas em uma aplicação de controle. Foi desenvolvida a partir do Grafcet, e possibilita a estruturação de uma unidade organizacional de um programa em um conjunto de etapas separadas por transições. Cada etapa é associada a um conjunto de operações. A cada transição está associada uma receptividade que deve ser satisfeita de modo que a transposição da transição ocorra, e assim o sistema possa avançar para a etapa seguinte. O SFC tem recebido várias implementações nos dias de hoje, principalmente em CLPs de grande porte, afirmando-se como a linguagem ideal para processos com características sequenciais.

Capítulo 5.0

APLICAÇÃO DOS BANCOS DE CAPACITORES NA INDÚSTRIA

Este trabalho foi elaborado utilizando como base os dados disponibilizados por uma indústria têxtil, coletados no período entre 2018 e 2019. As informações sobre suas instalações são apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados de carga disponibilizados pela empresa.

Dados	Valores
Potência Ativa	13.153 (kW)
Potência Reativa	11.357 (kVar)
Fator de Potência	0,7569
Demanda Média Diária	546,51 (kW)
Demanda Média Fora de Horário de Ponta	536,92 (kW)
Demanda Média em Horário de Ponta	613,63 (kW)
Demanda Máxima	1,41 (MW)
Consumo Médio Mensal	393,49 (MW)

Fonte: Dados disponibilizados pela empresa.

Com base nestes dados foi determinada a potência aparente inicial, Equação 24, e a potência reativa necessária para a correção do fator de potência, Equação 25:

$$S_a = \sqrt{13.153^2 + 11.357^2} = 17.377,65 \text{ (kVA)} \quad (24)$$

$$Q_d = P * \tan(\varphi_d) = 5.602,09 \text{ (kVar)} \quad (25)$$

Onde φ_d é o ângulo cujo fator de potência se deseja alcançar, sendo 23,07° para um fator de potência 0,92.

Foram necessários estudos de carga e análise da instalação elétrica, além dos parâmetros disponibilizados pela empresa contratante para que os bancos pudessem ser projetados. Estes parâmetros disponibilizados são apresentados na Tabela 5:

Tabela 5 – Dados de projeto.

Dados	Valores
Local do BC	Abrigado
Potência nominal	6 MVar
Frequência nominal	60 Hz
Tensão nominal	13,8 kV
Corrente térmica de Curto Circuito	31,5 kA/1 s
Zona Sísmica	N/A
Altitude	1.000 m
Temperatura Máxima	40 °C
Temperatura Mínima	5 °C
Nível de poluição	25 mm/kV

Fonte: Dados disponibilizados pela empresa.

O efeito de harmônicas que surgem devido aos equipamentos conectados ao sistema, e que podem causar sobrecarga nos capacitores devido ao aumento da corrente circulante, também foi considerado para o projeto destes bancos de capacitores. A frequência de operação adotada será 60 Hz.

5.1 CAPACITORES DE POTÊNCIA NA INDÚSTRIA

Com base nos dados dos bancos de capacitores são determinados os capacitores, utilizando valores de potência e tensão do banco e o tipo de ligação. Para este projeto será utilizada a conexão estrela com neutro isolado, como na maior parte dos sistemas de média tensão.

Utilizando 9 capacitores conectados em estrela e divididos em 3 bancos para formar o sistema projetado, sendo 1 capacitor por fase em cada banco. Nas Equações 26 e 27 são calculados os seguintes valores de potência e tensão:

$$Q_{cap} = \frac{Q_{sist}}{9} = \frac{6 \times 10^6}{9} = 666,67 \text{ (kvar)} \quad (26)$$

Onde:

Q_{cap} : Potência do capacitor.

Q_{sist} : Potência reativa total do sistema.

Devido a ligação do sistema em estrela, a tensão sobre os capacitores é:

$$V_{cap} = \frac{V_{sist}}{\sqrt{3}} = \frac{13,8 \times 10^3}{\sqrt{3}} = 7,96 \text{ kV} \quad (27)$$

Onde:

V_{cap} : Tensão do capacitor.

V_{sist} : Tensão do sistema.

Nível básico de isolamento (NBI) é a amplitude de tensão que o equipamento suporta devido às solicitações dielétricas. De acordo com a Tabela 6, observa-se que o NBI recomendado para capacitores com classe de tensão de 15 kV é de 34 a 110 kV.

Tabela 6 – Níveis de isolamento para tensões de até 242 kV.

Tensão máxima do equipamento kV (valor eficaz)	Tensão suportável de impulso atmosférico kV (valor de crista)	Tensão suportável nominal à frequência nominal kV (valor eficaz)
1,2	30	10
7,2	40	20
7,2	60	20
15	95	34
15	110	34

24,2	125	34 / 50
24,2 / 36,2	150	50 / 70
36,2	170	50 / 70
36,2	200	70
72,2	350	140
92,4	380	150
92,4 / 145	450	165
145	550	230
145	650	275
242	750	325
242	850	360
242	950	395

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 5282 (1998).

A classe de tensão de todos os equipamentos é a mesma, portanto o NBI determinado para os capacitores pode ser considerado para os outros componentes do sistema.

Na Equação 28 é calculada a capacitância:

$$C = \frac{Q_{cap}}{2 * \pi * f * V_{cap}^2} = \frac{666,67 \times 10^3}{2 * \pi * 60 * 7960^2} = 27,92 \mu F \quad (28)$$

Na Equação 29 é calculada a capacitância para o banco de capacitores:

$$C_b = 3 * C = 83,76 \mu F \quad (29)$$

A corrente eficaz que flui por cada capacitor é calculada na Equação 20:

$$I_{cap} = \frac{Q_{cap}}{V_{cap}} \Rightarrow \frac{666,67 \times 10^3}{7960} = 83,79 A \quad (30)$$

Sendo cada banco de capacitores composto por 3 capacitores conectados em estrela.

A partir dos dados do sistema e dos valores calculados, as características do capacitor são apresentadas na Tabela 7:

Tabela 7 – Dados do capacitor dimensionado.

Dados do capacitor	Valores
Potência nominal	666,67 kVar
Tensão nominal	7,96 kV
Nível de isolamento	34 / 110 kV
Capacitância nominal	27,92 μ F
Frequência nominal	60 Hz
Corrente eficaz	83,79 A
Fusíveis internos	Sim
Norma Aplicável	NBR 5282:1998

Fonte: Dados disponibilizados pela empresa.

5.2 TRANSFORMADORES DE CORRENTE

O Transformador de corrente (TC) é crucial como proteção de desbalanço, e foi dimensionado de acordo com a norma ABNT NBR 6856. Sua máxima tensão de operação é da classe de 15 kV, de acordo com o sistema, que opera em 13,8 kV.

A corrente nominal primária flui pelo enrolamento primário do TC, neste projeto será utilizado o valor de 100 A. Da mesma forma, a corrente nominal secundária atravessa o enrolamento secundário, ao aplicar corrente do lado primário. Os valores padrão para a corrente no secundário são 1 e 5 A, aqui será utilizado 5 A.

Multiplicando-se a corrente nominal por uma constante de segurança, obtém-se as correntes de curto-circuito (I_{cc}). I_{cc} térmica é o valor eficaz da corrente primária que o TC pode suportar com o enrolamento secundário em curto-circuito por um tempo

determinado, neste caso 1s, sem que exceda os limites de temperatura para sua classe de isolamento. Icc dinâmica é o valor de pico instantâneo da corrente primária, associada ao primeiro semiciclo, que o TC é capaz de suportar com o enrolamento em curto-circuito. Para as correntes determinadas, os valores são respectivamente 80 e 200 A.

Fator térmico é o fator que multiplica a corrente primária nominal do TC de modo a obter a máxima corrente primária que pode fluir pelo equipamento em regime permanente, com frequência nominal e a plena carga sem exceder os limites de temperatura. O fator térmico para este projeto é 1,2. (MAMEDE FILHO, 2013)

A Tabela 8 apresenta os valores calculados para o TC:

Tabela 8 – Dados projetados para o TC.

Dados	Valores
Tensão máxima de operação	15 kV
Corrente nominal primária	100 A
Corrente nominal secundária	5 A
Corrente de curto-circuito (térmica)	$80 * I_n (1s)$
Corrente de curto-circuito (dinâmica)	$200 * I_n (pico)$
Classe de exatidão	1,2C25
Fator térmico	1,2
Norma aplicável	NBR 6856

Fonte: Dados disponibilizados pela empresa.

5.3 TRANSFORMADORES DE POTENCIAL

O Transformador de corrente (TP) é utilizado para suprir os equipamentos de medição com uma magnitude de tensão menor e como proteção galvânica, e foi dimensionado de acordo com a norma ABNT NBR 6855. Sua máxima tensão de operação é da classe de 15 kV e opera em 13,8 kV, de acordo com o sistema.

A tensão nominal secundária para este TP será de 115 V, de acordo com uma relação de transformação nominal de 120. Sua tensão secundária será utilizada para a medição de parâmetros pelos IEDs e equipamentos de proteção. (MAMEDE FILHO, 2013)

A Tabela 9 apresenta os valores calculados para o TP:

Tabela 9 – Dados projetados para o TP.

Dados	Valores
Tensão máxima de operação	15 kV
Tensão nominal primária	13,8 kV
Tensão nominal secundária	115 V
Fator de sobretensão	1,5
NBI	34/110 kV
Potência térmica	500 VA
Classe de exatidão	1,2P200
Norma aplicável	NBR 6855

Fonte: Dados disponibilizados pela empresa.

5.4 CHAVE SECCIONADORA DE ATERRAMENTO

A chave de aterramento tem como função a proteção do operador durante a manutenção do BC. No momento do desligamento as três fases são desconectadas dos 3 pólos e o quarto polo realiza a conexão para a terra.

De acordo com o sistema, a chave seccionadora opera em 13,8 kV, portanto sua classe de tensão é 15 kV. A lcc térmica é equivalente a corrente de curto-circuito do barramento e a lcc dinâmica é a multiplicação da lcc térmica pelo fator de assimetria de 2,6. Os valores para a chave seccionadora são apresentados na Tabela 10:

Tabela 10 – Dados da chave de aterramento.

Dados	Valores
Número de pólos	4
Classe de tensão	15 kV
NBI	34/110 kV
Corrente de curto-circuito (térmica)	31,5 kA/1s
Corrente de curto-circuito (dinâmica)	81,9 kA
Contatos auxiliares	3NA + 3NF + 3 passantes
Bloqueio Kirk	Sim
Norma aplicável	NBR IEC 62271-102:2006

Fonte: Dados disponibilizados pela empresa.

5.5 SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

O sistema de proteção contra descargas atmosféricas projetado, com ligação em estrela aterrada, apresenta tensão nominal de 12 kV e MCOV de 10,2 kV.

MCOV é a máxima tensão aplicável aos terminais do sistema para que ele seja capaz de realizar corretamente seu ciclo de serviço.

Corrente de descarga é um pulso de corrente que atravessa o sistema, gerando uma tensão residual. Neste caso a corrente solicitada foi de 10 kA, caso uma corrente de maior magnitude fosse solicitada, a quantidade de energia absorvida seria maior, o que acarretaria em maiores custos para o sistema de proteção.

Considerando as mesmas características de proteção e níveis de isolamento dos demais equipamentos projetados, o nível de isolamento do invólucro será de 34 a 110 kV.

A Tabela 11 apresenta as características do sistema de proteção dimensionado:

Tabela 11 – Dados do sistema de proteção contra descargas atmosféricas.

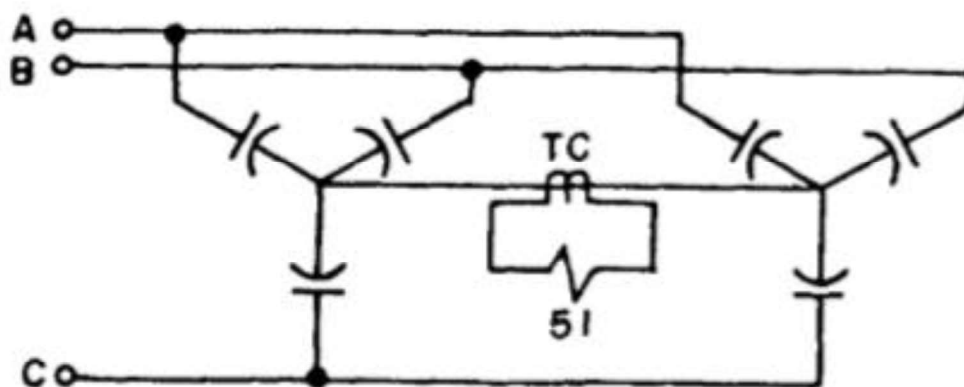
Dados	Valores
Tipo	Subestação
Tensão nominal (U_r)	12 kV
MCOV (U_c)	10,2 kV
Corrente de descarga (8/20 μ S)	10 kA
Capacidade de absorção de energia	4,3 kJ / kV
Nível de isolamento do invólucro	34 / 110 kV
Norma aplicável	IEC 60099-4

Fonte: Dados disponibilizados pela empresa.

5.6 RELÉ DE DESBALANCEAMENTO

O relé de desbalanceamento com atuação por corrente de desequilíbrio, deve conter filtros para os principais harmônicos e protetores contra sobretensões transitórias instalados no primário ou secundário do TC. Uma representação gráfica do esquema de proteção do BC em estrela isolada por relé de desbalanceamento:

Figura 21 – Esquema de proteção de BC em estrela isolada por relé de desbalanceamento.



Fonte: Adaptado de D'AJUZ, A; et al. (1985).

5.7 CABOS

A corrente nominal para o BC projetado foi de 83,79 Ampères, de acordo com a Equação 30. Com base na tabela 28 da NBR 14039 obteve-se o diâmetro dos cabos que serão utilizados. Estes dados são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Capacidades de condução de corrente para condutores de cobre.

	Seção mm²	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Tensão nominal menor ou igual a 8,7/15 kV	10	87	105	80	92	67	55	63	65	78
	16	114	137	104	120	87	70	81	84	99
	25	150	181	135	156	112	90	104	107	126
	35	183	221	164	189	136	108	124	128	150
	50	221	267	196	226	162	127	147	150	176
	70	275	333	243	279	200	154	178	183	212
	95	337	407	294	336	243	184	213	218	250
	120	390	470	338	384	278	209	241	247	281
	150	445	536	382	433	315	234	270	276	311
	185	510	613	435	491	357	263	304	311	347
	240	602	721	509	569	419	303	351	358	395
	300	687	824	575	643	474	340	394	402	437
	400	796	959	658	734	543	382	447	453	489
	500	907	1.100	761	829	613	426	502	506	542
	630	1.027	1.258	829	932	686	472	561	562	598
	800	1.148	1.411	916	1.031	761	517	623	617	655
	1.000	1.265	1.571	996	1.126	828	555	678	666	706

Fonte: NBR 14039 – Instalações elétricas de média tensão de 1kV a 36,2 kV.

Pelo o método B, obtém-se uma seção transversal de 10 mm² para os cabos condutores.

5.8 CARACTERÍSTICAS DOS BANCOS DIMENSIONADOS

Com base nas informações apresentadas previamente, cada um dos 3 bancos de capacitores desenvolvidos tem suas características apresentadas na Tabela 13:

Tabela 13 – Dados dos Bancos de Capacitores projetados.

Dados dos Bancos de Capacitores	Valores
Potência Nominal	2 MVar
Tensão Nominal	13,8 kV
Frequência Nominal	60 Hz
Nível de Isolamento	34 / 110 kV
Corrente Nominal	83,79 A
Capacitância a 20 °C	83,76 µF
Categoria de Temperatura	- 5 / C
Norma Aplicável	NBR 5282:1998
Arranjo	Y
Neutro	Não Aterrado
Capacitores	Fusíveis Internos
Quantidade de Capacitores	3

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a instalação do banco, a potência reativa do sistema é acrescida de 6 MVar, com isto a nova potência aparente do sistema é calculada. Utilizando o valor inicial da potência ativa, através da Equação 42 obtém-se a nova potência aparente:

$$Q_c = P [\tan(\cos^{-1}(fp_a)) - \tan(\cos^{-1}(fp_d))] \quad (42)$$

Onde:

Qc: Valor da potência reativa inserida no sistema a partir da instalação do banco de capacitor.

P: Valor da potência ativa existente no sistema.

fp_a : Fator de potência anterior à instalação do BC.

fp_d : Fator de potência após a instalação do BC.

Para que os cálculos fossem realizados foi feita uma estimativa entre o fp_a (0,75) e o fp_d (0,92).

De acordo com os dados disponibilizados pela empresa, Tabela 4:

$$P = 13.153 \text{ kW} \text{ e } Q = 11.357 \text{ kvar}$$

Subtraindo o valor de potência reativa inserida pelo banco de capacitor, obtém-se a potência reativa total (Q_d) do sistema pela Equação 43:

$$Q_d = Q_a - Q_c \rightarrow Q_d = 11.357 - 6.000 = 5.357 \text{ kvar} \quad (43)$$

Onde:

Q_a : Potência reativa antes da inserção dos bancos.

Q_c : Potência reativa dos bancos de capacitor.

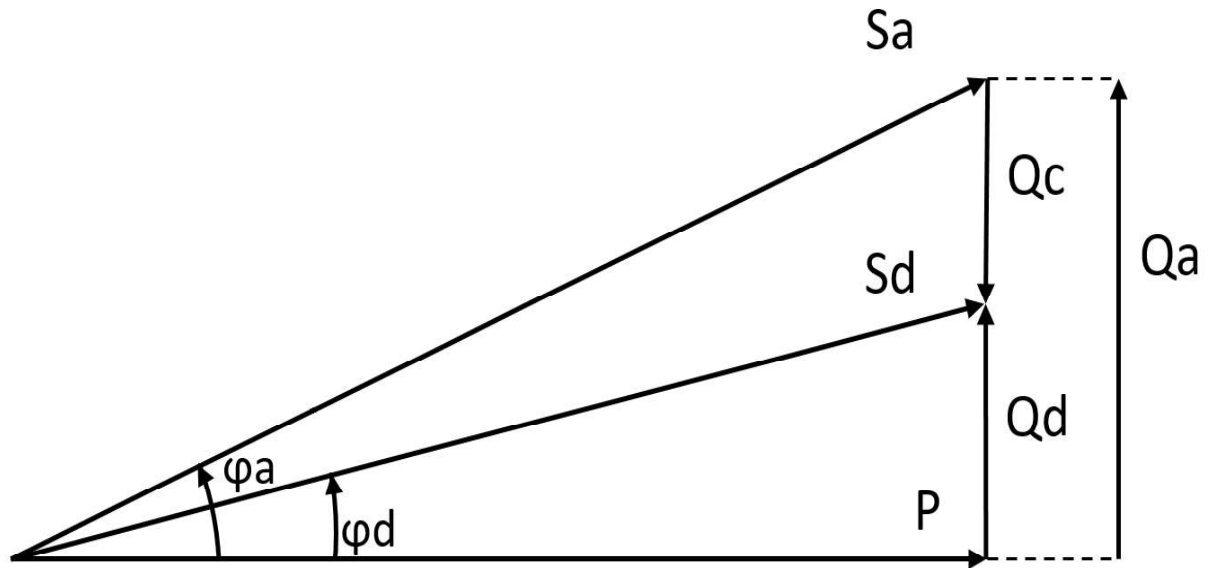
Q_d : Potência reativa final do sistema.

E então, após a adição do BC, o valor da nova potência aparente (S_d) é calculado através da Equação 44:

$$S_d^2 = P^2 + Q_d^2 \rightarrow S_d = \sqrt{13.150^2 + 5.357^2} = 14.536,12 \text{ kVA} \quad (44)$$

Através dos valores obtidos, a potência reativa antes do BC (Q_a), a partir da subtração do Q_t pelo Q_c , de acordo com a Figura 23:

Figura 23 – Triângulo das potências após a inserção dos bancos de capacitores.



Fonte: Adaptado de Cotrim (2008).

Utilizando Q_a , Equação 45, calcula-se a potência aparente antes (S_a) da inserção do banco de capacitor:

$$S_a = \sqrt{P^2 + Q_a^2} = \sqrt{13.153^2 + 11.357^2} = 17.651,71 \text{ kVA} \quad (45)$$

Com os valores de S_a e S_n , verificamos o aumento percentual na potência do sistema (M_s) após a instalação do banco de capacitor:

$$M_s = \left(1 - \frac{S_a}{S_d}\right) \times 100 = \left(1 - \frac{14.536,12}{17.651,71}\right) \times 100 = 17,65 \% \quad (46)$$

Com base nos resultados obtidos na Equação 46, observou-se um aumento de 17,65% na potência disponível no sistema, permitindo uma maior vida útil aos cabos e equipamentos em razão da diminuição na potência demandada.

Capítulo 6.0

METODOLOGIA UTILIZADA NO SISTEMA DE CONTROLE

Neste trabalho o CLP trabalha como um atuador, ligando ou desligando cada bloco do banco de capacitores de acordo com o nível de fator de potência lido. Estes valores de fator de potência são então transferidos para a memória do CLP através de variáveis de memória, processados e transformados em variáveis de saída, que por sua vez irão acionar os contadores auxiliares, abrindo ou fechando os contadores de potência. Também foram inseridas lâmpadas para visualização de sistema ligado e para cada um dos blocos de capacitor, indicando o acionamento deles.

Utilizando um medidor analógico de fator de potência, cuja saída de 0 à 20 mA foi previamente conectada em uma das entradas analógicas do CLP, pode-se iniciar o controle de chaveamento dos bancos de capacitores seguindo a lógica de *If then do*, onde as entradas são lidas, o CLP as processa e então faz comparações com os valores de *offset* definidos no programa.

Foi utilizada a plataforma OpenPLC para elaboração e teste da programação e do circuito de comando. Este simulador utilizou como base o CLP SIEMENS LOGO 6ED1 052, um modelo compacto que conta com 6 entradas digitais, além de 2 entradas analógicas de 0 à 10 V e 4 saídas analógicas a relé.

6.1 PROGRAMAÇÃO

O primeiro passo para o desenvolvimento do sistema de controle de chaveamento foi a definição das variáveis utilizadas. Para a resolução deste problema foram definidas as variáveis de acordo com a Tabela 14.

Tabela 14 – Variáveis definidas para o sistema.

#	Nome	Tipo	Localização	Valor Inicial
1	Ref	Real	%I7.0	0.0
2	V	Real	%M0.0	0.0
3	On	Bool	%I2.0	Falso
4	Off	Bool	%I4.0	Falso
5	Lon	Bool	%Q4.0	Falso

6	M1	Bool	%M1.0	Falso
7	M2	Bool	%M2.0	Falso
8	M3	Bool	%M3.0	Falso
9	C1	Bool	%Q1.0	Falso
10	L1	Bool	%Q1.1	Falso
11	C2	Bool	%Q2.0	Falso
12	L2	Bool	%Q2.1	Falso
13	C3	Bool	%Q3.0	Falso
14	L3	Bool	%Q3.1	Falso

Fonte: Elaborado pelo autor.

Onde as variáveis utilizadas são definidas por:

- Ref: Variável de entrada, corresponde ao valor determinado pelo medidor analógico de fator de potência.
- V: Variável virtual utilizada para tratamento e processamento do valor de entrada.
- On e Off: Variáveis de liga e desliga do sistema.
- Lon: Representa a sinalização de ligado do sistema.
- M1 a M3: Variáveis virtuais que habilitam as saídas analógicas.
- C1 a C3: Variáveis de saída analógica que representam os bancos de capacitores que serão ligados através de contadores.
- L1 a L3: Sinalização de liga de cada um dos blocos de capacitor.

Definidas as variáveis, foi desenvolvida uma subrotina em *Structured Text*. Esta linguagem, com característica textual e de alto nível, foi escolhida por possibilitar a resolução do problema determinado neste trabalho usando apenas comandos básicos da programação como laços e condicionais, e portanto, representa a maneira mais simples e prática para a resolução deste problema.

A subrotina é então salva em um bloco de comando que será utilizado posteriormente. Desta forma o circuito de controle ficará menor e menos carregado, visto que a parte mais complexa será feita em um bloco separado que pode ser inserido em um bloco de comando, que por sua vez pode ser introduzido no sistema

quantas vezes forem necessárias. Deve-se apenas se atentar aos nomes e posições das variáveis que serão ligadas diretamente ao bloco.

Figura 24 – Programação do bloco de controle.

```
1
2  V := Ref * 5.0;
3
4  If V < 92.0 and V >= 83.5 Then
5    Q1 := True;
6
7    ElseIf V < 83.5 And V >= 75.0 Then
8      Q1 := True;
9      Q2 := True;
10
11     ElseIf V < 75.0 Then
12       Q1 := True;
13       Q2 := True;
14       Q3 := True;
15
16 End_If;
```

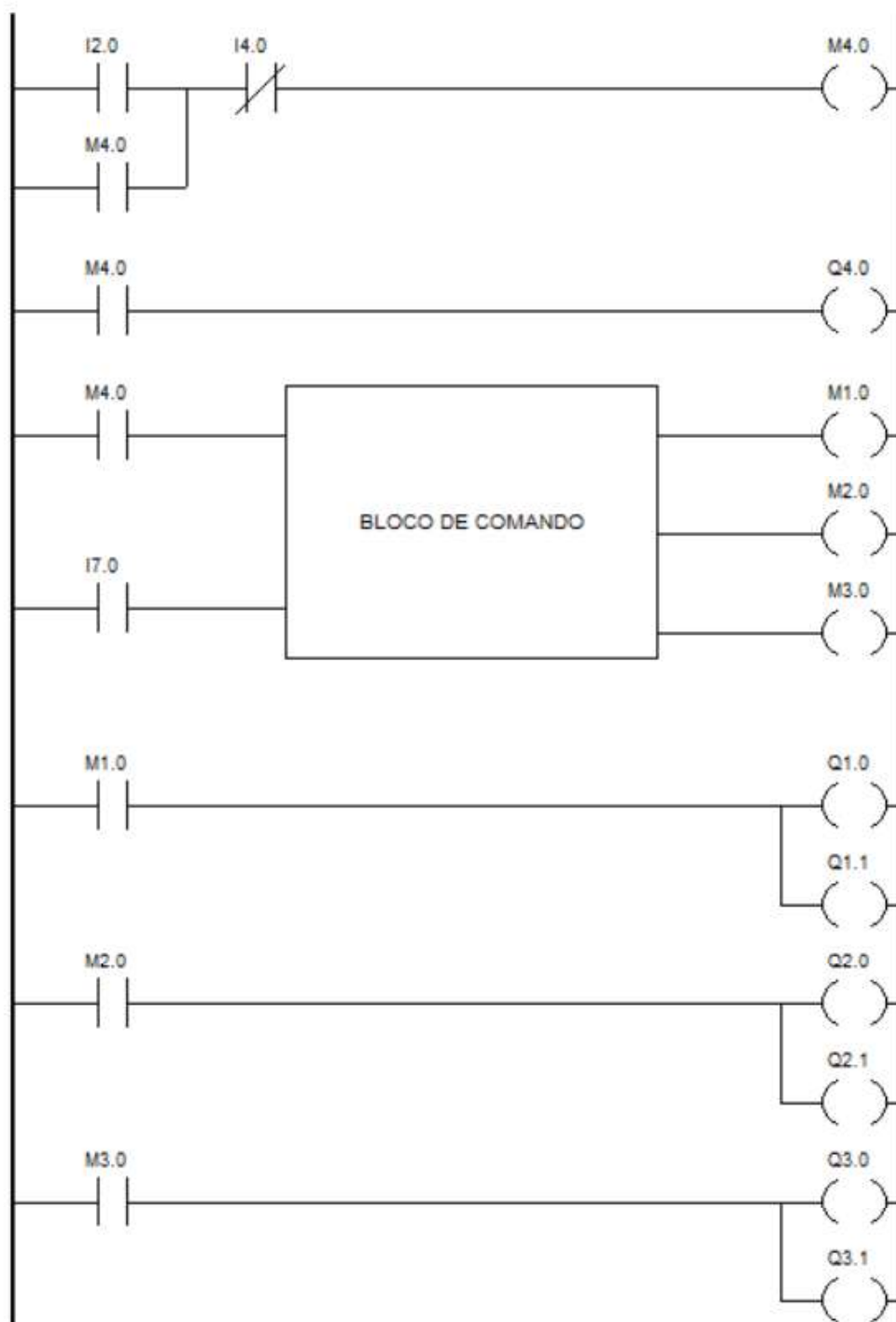
Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida foi desenvolvido o sistema de controle utilizando as variáveis definidas e a subrotina implementada. Para o sistema de controle foi utilizada a linguagem Ladder. Nota-se que o sistema de controle de chaveamento é bastante simples, principalmente quando se usa ferramentas de blocos de função previamente construídas.

Foram utilizadas variáveis virtuais para transformar os dados analógicos de entrada em valores *Booleanos*, ligado e desligado, e então transferir estes dados para as saídas.

Neste trabalho, optou-se por utilizar botoeiras de liga e desliga e lâmpadas de sinalização de ligado para o sistema e para as saídas, o que é bastante comum em sistemas reais. Outra solução poderia ser a implementação de um IHM com as mesmas funções de liga e desliga, mas com uma interface mais elaborada, que representa com imagens na tela o que se passa no sistema. Este tipo de interface possui um valor muito maior em comparação com elementos analógicos. A análise de viabilidade de instalação de IHM em um sistema de controle de chaveamento de bancos de capacitores não será abordada neste trabalho.

Figura 25 – Programação do sistema de controle.

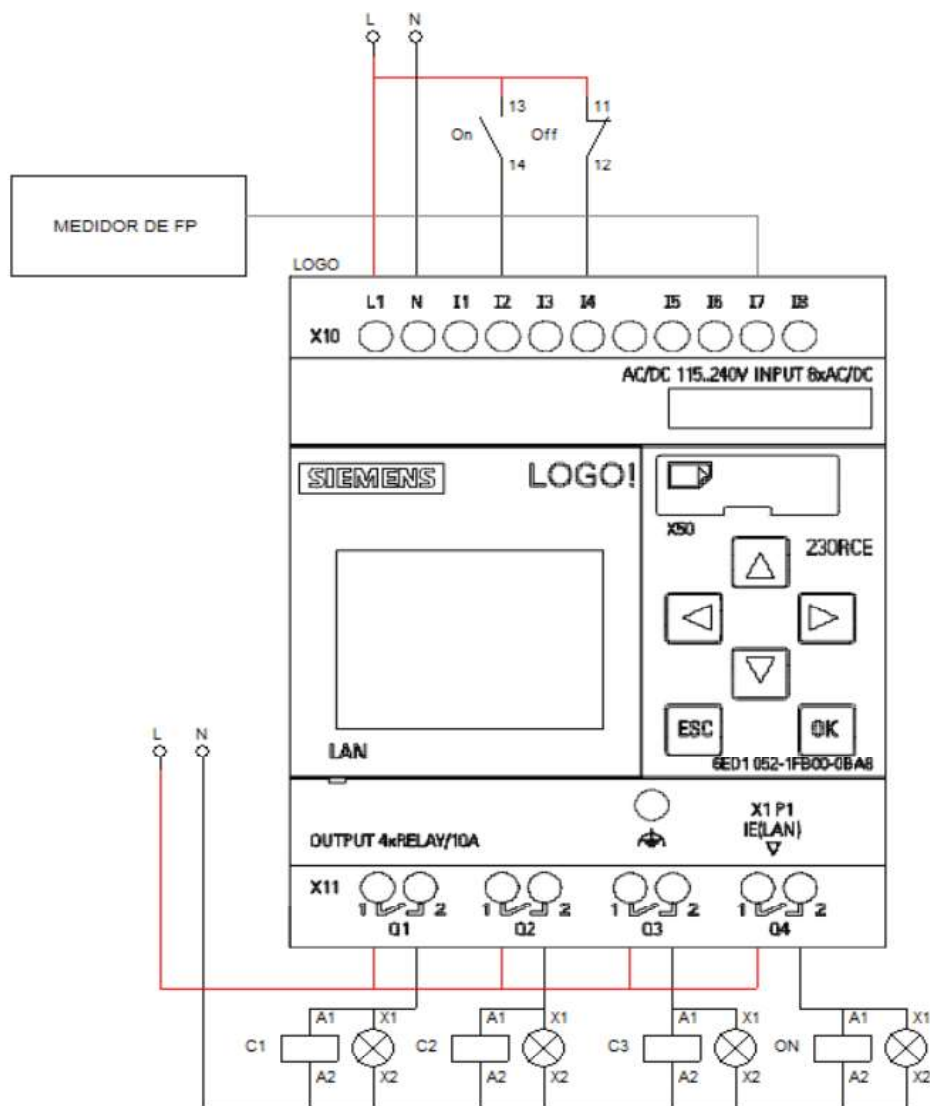


Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida é apresentada a ligação simplificada do CLP para esta programação, Figura 26. Foi inserido um bloco que representa o medidor analógico de fator de potência, pois o simulador não possui blocos de função deste tipo. O valor

lido pelo medidor de fator de potência foi forçado no bloco apenas para simular as entradas reais deste dispositivo.

Figura 26 – Ligação simplificada do CLP.



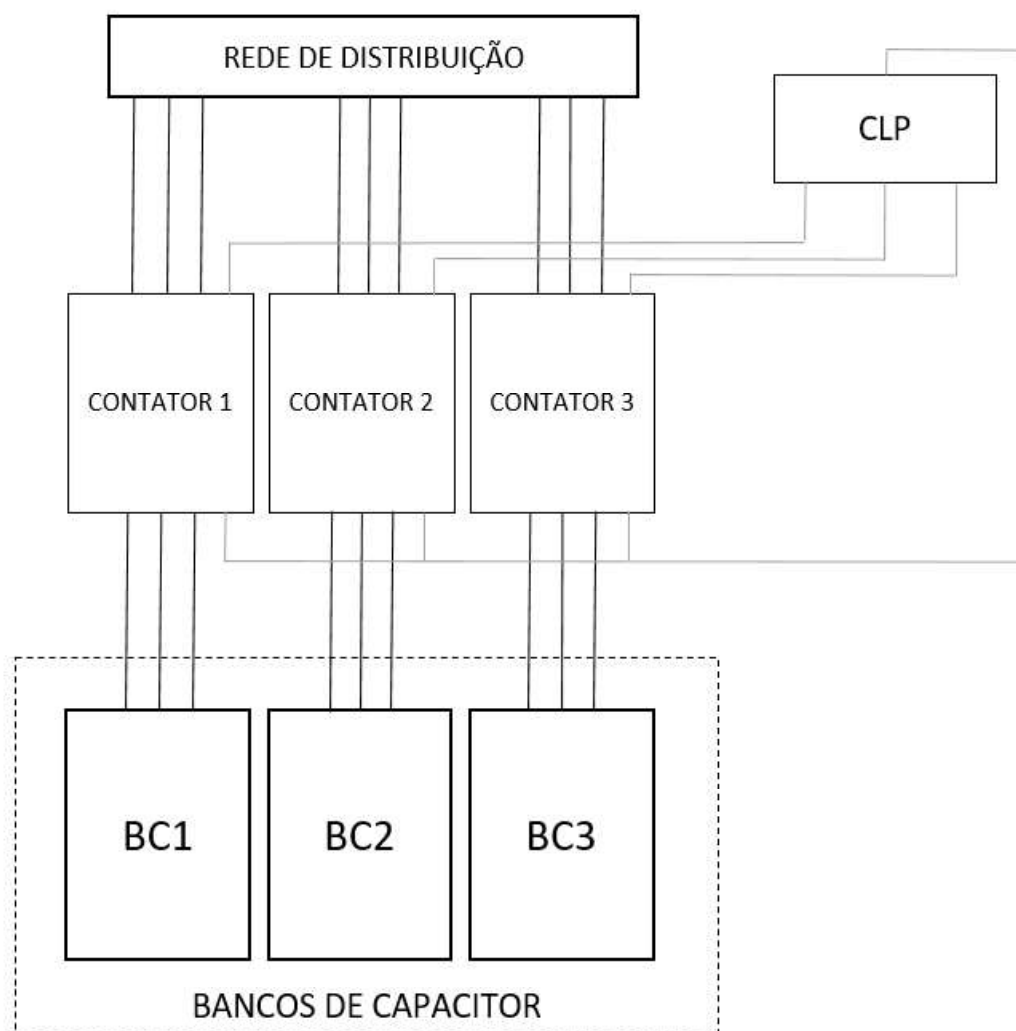
Fonte: Elaborado pelo autor.

O circuito é alimentado por uma fase de 127 V, representada em vermelho para facilitar a visualização. Como mencionado anteriormente, foram utilizadas as entradas digitais (I2 e I4) para os botões de liga e desliga e a entrada analógica I7 para o medidor de fator de potência.

As saídas do CLP são ligadas aos contatos auxiliares dos contadores de potência, que por sua vez acionam os blocos que fazem parte do banco de

capacitores. Uma representação simplificada da ligação de força do sistema é apresentada na Figura 27:

Figura 27 - Representação simplificada da ligação dos bancos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram omitidas várias informações, como a ligação da fonte de alimentação do CLP, por exemplo, apenas para simplificar o diagrama, que tem como função representar o acionamento pelo CLP dos contadores que ligam o banco de capacitor à rede de distribuição.

Capítulo 7.0

COMPARAÇÃO ECONÔMICA

De acordo com os dados de carga da empresa apresentados no capítulo 4, pode-se estimar os valores de conta de energia mensal e com este valor, um valor plausível de multa por baixo fator de potência.

A resolução normativa nº 414 da Aneel (2010) estabelece os critérios para as cobranças de conta de energia elétrica e os valores de multa por baixo fator de potência. Alguns pontos da resolução nº 414 são alterados pela resolução normativa nº 419 (2012). Os valores de conta de energia mensal estimados para a empresa são calculados com base na Equação 47:

$$Fad = Cp * (TE_p + TU_p) + Cfp * (TE_{fp} + TU_{fp}) + D * Td \quad (47)$$

Onde:

Fad: Fatura de energia diária, em R\$.

Ci: Consumo de energia.

TE_i: Tarifa de energia.

TU_i: Tarifa de utilização da rede.

D: Demanda máxima.

Td: Tarifa de demanda

Índices:

p: Referentes ao horário de ponta, definido das 17h30 às 20h30 para o estado de São Paulo.

fp: Referentes ao horário fora de ponta.

Em seguida é apresentado o valor estimado de conta de energia mensal para a empresa. A tarifa utilizada na fatura é a tarifa verde (consumidor A4), devido às especificações do tipo de alimentação. Esse tipo de fatura utiliza tanto os valores de consumo quanto os de demanda em seu cálculo.

Com os valores disponibilizados pela empresa e os valores estimados obtidos pela Equação 48. Os dados de consumo e de conta de energia, como mencionado

previamente, são referentes ao período entre 2018 e 2019. Estes valores são apresentados na Tabela 15:

Tabela 15 – Estimativa do valor da conta de energia mensal da empresa.

Valores	Ponta	Fora de Ponta
Consumo	1.840,88 (kW)	11.275,39 (kW)
TE	0,50729 (R\$/kWh)	0,3219 (R\$/kWh)
TU	1,07956 (R\$/kWh)	0,06331 (R\$/kWh)
Demanda Máxima	1.413,94 (kW)	
Td	17,92 (R\$/kWh)	
Fatura diária	R\$ 32.602,44	
Fatura mensal	R\$ 978.073,08	

Fonte: Dados disponibilizados pela empresa.

Tendo concluído o dimensionamento do BC e do sistema de controle, podem ser verificados os custos da construção do equipamento. Estes valores são apresentados na Tabela 16:

Tabela 16 – Preço para a implementação do BC dimensionado e de seu sistema de controle.

Descrição	Quantidade	Valor Total (R\$)
Banco de Capacitores trifásico de 2 MVar x 15 kV x 60 Hz, NBI de 110 kV, norma NBR 5282/98	03	100.329,00
CLP SIEMENS LOGO 6ED1 052	01	1.058,00
Contator 3 Pólos Boerstn CKG3 18 kV, 800 A	03	9.108,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Fazendo uma comparação entre os custos envolvidos na instalação deste BC controlado com os benefícios gerados, observou-se um prolongamento na vida útil de

cabos e equipamentos, além do aumento na disponibilidade de potência, o que permite a implantação de novas cargas sem a necessidade da substituição do transformador por um de maior potência ou da aquisição de outros transformadores, o que apresentaria custos maiores e demandaria maior tempo de implementação, além da eliminação da multa da fatura de energia, que pode chegar a 30% do valor total da conta. (ANEEL, 2012)

Com base no valor de conta de energia estimado para a empresa, obtém-se um valor estimado para a multa mensal por baixo fator de potência. Considerando as piores condições possíveis, um fator de potência da ordem de 0,75 durante todo o período de operação da empresa. O valor de multa estimado é obtido através da Equação 48:

$$Multa = valor\ da\ conta * \left(\frac{fp_r}{fp_u} - 1 \right) \quad (48)$$

Onde:

fp_r : Fator de potência referência, 0,92.

fp_u : Fator de potência da unidade consumidora.

Nestas condições, o valor de multa mensal estimado para a empresa é da ordem de R\$ 5.900,00 para um FP de 0,75, como apresentado. Com a instalação do banco de capacitor, o cliente teria o retorno financeiro deste investimento em cerca de 2 anos, além de outras melhorias na instalação elétrica de sua empresa, como já mencionadas.

De acordo com Veloso, G.; Camargo, M. (2017) é importante analisar os indicadores para viabilidade econômica do investimento. Para este caso foram analisados: Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e período de *payback*.

O VPL é a somatória de todos os fluxos de caixa estimados referentes à execução do projeto, calculados a partir de uma taxa de desconto e do período de duração. A taxa de desconto mencionada é o percentual mínimo que a empresa está disposta a lucrar a partir do investimento realizado.

Caso o VPL apresente um valor menor que zero, isto representa que o retorno do projeto será menor do que o valor investido e, portanto, o investimento não deve ser feito. O VPL pode ser obtido a partir da Equação 49:

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{\text{Fluxo de caixa}}{(1 + \text{Taxa de Desconto})^{\text{Período}}} \quad (49)$$

TIR é a máxima taxa de desconto considerada para que o investimento feito apresente um retorno zero, ela pode ser obtida a partir da Equação 50:

$$TIR = 0 = \sum_{t=0}^n \frac{\text{Fluxo de caixa}}{(1 + \text{Taxa de Desconto})^{\text{Período}}} \quad (50)$$

O *tempo de Payback* é o intervalo em que o valor investido é recuperado, tendo sido calculado a partir do somatório dos valores de VP acumulados com os de cada semestre. Para a melhor compreensão dos resultados obtidos foi construída a Tabela 17:

Tabela 17 – Retorno do projeto nos períodos seguintes à implementação do banco de capacitores.

Período (semestre)	Fluxo de caixa	Valor presente (VP)	VP acumulado
0	-R\$ 110.495,00	-R\$ 110.495,00	-R\$ 110.495,00
1	R\$ 35.400,00	R\$ 30.798,00	-R\$ 79.697,00
2	R\$ 35.400,00	R\$ 28.481,99	-R\$ 51.215,06
3	R\$ 35.400,00	R\$ 26.340,14	-R\$ 24.874,87
4	R\$ 35.400,00	R\$ 24.359,36	-R\$ 515,49
5	R\$ 35.400,00	R\$ 22.527,54	R\$ 22.012,04

Fonte: Elaborado pelo autor.

O fluxo de caixa considerado é a movimentação financeira referente ao valor pago pelo projeto e o benefício gerado devido a eliminação da multa mensal (multa de cerca de R\$5.900,00, equivalente a R\$35.400,00 em 6 meses). O valor presente é a somatória do fluxo de caixa com uma taxa de desconto, para o caso representado

consideramos a taxa de 13%. O VP acumulado é a somatória do custo do projeto por semestre para definir qual é o período em que o investimento realizado vai começar a dar retorno.

A Tabela 18 apresenta os dados obtidos:

Tabela 18 – Indicadores para viabilidade do projeto.

VPL do projeto	R\$22.012,04
Taxa Interna de Retorno (TIR)	19%
Tempo de <i>payback</i>	2,08 anos

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 19 apresenta uma comparação entre os custos envolvidos na implementação de um banco de capacitores controlado e um não controlado.

Tabela 19 – Comparação entre banco de capacitores chaveado e fixo.

Tipo de banco de capacitor	Valores
Chaveado	R\$ 110.495,00
Fixo	R\$ 100.329,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos dados apresentados na Tabela 19, o banco de capacitores apresentado neste trabalho necessita de um investimento 10,13% maior para a sua implementação, comparando com os valores de implementação de um banco fixo.

Capítulo 8.0

CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo apresentar o programa de um sistema de controle para bancos de capacitores chaveados instalados em uma indústria de média tensão, cujos objetivos são automatizar o sistema e impedir que a indústria seja prejudicada por multa da fornecedora de energia.

O primeiro passo para a aplicação de bancos de capacitores em uma indústria é a análise das características da carga e dos níveis de distorção harmônica do sistema, visto que não é possível corrigir o fator de potência de uma instalação sem antes garantir que a indústria não apresenta altos níveis de distorção. Nestes casos, se utiliza de filtros ativos para o tratamento de distorções harmônicas.

Em seguida é realizada análise de custo dos equipamentos para avaliar a possibilidade de construção de um sistema automatizado de bancos de capacitores com essas características, assim, foi possível observar que a solução desenvolvida apresenta um baixo custo, principalmente quando comparada a um sistema não automatizado, e um rápido retorno financeiro para o contratante. O banco projetado permitiu um aumento na quantidade de potência disponível, fazendo com que o sistema não fique sobrecarregado, possibilitando um aumento na vida útil dos equipamentos e que futuras expansões na instalação elétrica sejam feitas sem que seja necessário substituí-la.

Posteriormente foi feita análise dos custos de equipamentos, de modo a verificar a viabilidade do projeto de um BC com essas características e realizar uma análise de indicadores financeiros. Esta análise permitiu a compreensão do valor de mercado do sistema e o custo benefício deste projeto devido ao seu baixo custo e rápida implementação. Também se compreendeu um estudo de viabilidade de projeto a partir do valor investido e do tempo de *payback*.

Ao final do trabalho observou-se que o aumento na potência aparente do sistema devido ao BC automatizado foi de 17,65%, além de se tratar de um sistema inteligente, mais seguro e que possibilita ser remotamente controlado.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 14039 (2003) – Instalações elétricas de média tensão de 1kV a 36,2 kV.

ABNT NBR 5282 (1998) - Capacitores de potência em derivação para sistema de tensão nominal acima de 1000V – Especificação.

ABNT NBR 5356-6 (2014) Transformadores de potência - Parte 6 – Reatores.

ABNT NBR 6856 (2015) - Transformador de corrente - Especificação e ensaios.

ABNT NBR IEC 62271-102 (2006) - Equipamentos de alta-tensão - Parte 102: Seccionadores e chaves de aterramento.

Adelco; catálogo; 2012; Disponível em:
<http://www.adelco.com.br/2012/catalogos/Catalogo%20Adelco%20Reatores.pdf>.
Acesso em: 15 mar 2021.

AKAGI, H.; KANAZAWA, Y.; FUJITA, K. E NABAE, A., “**Generalized Theory of Instantaneous Reactive Power and its Application**”; Eletrical Engineering in Japan, 1983.

Arteche; Banco de capacitores tipo poste; 2020; Disponível em:
<https://www.artech.com/pt/produtos/bancos-de-condensadores-tipo-poste>. Acesso em: 15 mar 2021.

AWD Energia; 2012; adaptado de Equipamentos Elétricos; Disponível em:
<http://awdenergia.com.br/wp-content/themes/awd/scripts/timthumb.php?src=http://awdenergia.com.br/wp-content/uploads/2012/11/para-raios.jpg>. Acesso em 16 mar 2021.

Balestro; catálogo; 2021; <https://balestro.com.br/wp-content/uploads/2020/01/Para-raios-polim-Estacao-SL-classe-2-PBPE.pdf>
Acesso em: 8 ago 2021.

BARCÓN, S.; GUERRERO, R.; MARTÍNEZ I. “**Calidad de la Energía – Factor de potência y filtrado de armónicas**”. México: Naucalpan de Juárez, 2012.

BORDIM, J; “**Instalação de Bancos de Capacitores em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica para Correção do Fator de Potência e Regulação de Tensão**”. Brasil: São Carlos, 2011.

COTRIM, A. A. M. B., “**Instalações Elétricas**” – 5 Ed. Editora Pearson, 2008.

D'AJUZ, A. et al; **“Equipamentos Elétricos – especificação e aplicação em subestação de alta tensão”**. Brasil: Rio de Janeiro, 1985.

DAX Energy; catálogo; 2016; Disponível em: http://dax.energy/wp-content/uploads/Cat%C3%A1logo-de-Produtos-Banco-de-Capacitores_Id.pdf. Acesso em: 16 mar 2021.

FRANCHI, C. M.; CAMARGO, V. L. A., **“Controladores Lógicos Programáveis - Sistemas Discretos”**. 1 Ed. Editora Érica, 2008.

FURUHASHI, T.; OKUMA, S. E UCHIKAWA, Y., **“A Study on the Theory of Instantaneous Reactive Power”**; IEEE Trans. On Industrial Electronics, 1990.

GEORGINI, M., **“Automação Aplicada - Descrição e Implementação de Sistemas Sequenciais com PLCs”**. 6 Ed. Editora Érica, 2000.

IEC 60099-4:2014 Standard | Surge arresters - Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for AC systems.

IEEE Std. 1036 (2010) - Guide for Application of Shunt Power Capacitors.

IEEE Std. C37.012 (2005) - IEEE Application Guide for Capacitance Current.

INDUCAP; 2020; Disponível em: <https://www.inducap.com.br/capacitores-para-protecao-de-surto-de-media-tensao>. Acesso em: 18 mar 2021.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL VOCABULARY - Part 351: Control technology.

ITEL, Apostila – **“Capacitores de Potência”**, 1981.

JUNIOR, J. G. M.; **“Compensação reativa a partir de Bancos de capacitores para uma indústria conectada a média tensão”**. Ilha Solteira: UNESP, 2020.

MAMEDE FILHO, J., **“Manual de Equipamentos Elétricos”** – 4 Ed. Editora LTC, 2013.

MORIEL, A; **“Uma Análise Comparativa entre Simulação do Modelo Clássico de Capacitores de Potência e Capacitores Reais Testados em um Ambiente Laboratorial Controlado”**. Brasil: São Carlos, 2013.

MP Engenharia Elétrica; 1998; Disponível em: <http://www.mp.srv.br/banco-capacitor>. Acesso em: 21 mar 2021.

NORMA IEC 61131; 2003.

PETRUZELLA, F. D., **“Programmable Logic Controllers”**. 4 Ed. Editora McGraw Hill Education, 2013.

PIOMBINI, D; **“Detalhamento de uma Subestação Consumidora Industrial com Tensão de 13,8 kV”**. Brasil: Rio de Janeiro, 2017.

Rehtom; catálogo; 2021; <https://www.rehtom.com.br/rehtom-produtos-transformadores-de-potencial>. Acesso em: 8 ago 2021.

SEIELETRIC; catálogo; 2019; Disponível em: <http://www.seielectric.com/pt/eletrica/10-chaves-seccionadoras/4-chave-seccionadora-de-aterramento-tetrapolar>. Acesso em: 21 mar 2021.

SEIELETRIC; catálogo; 2019; Disponível em: <http://www.seielectric.com/pt/eletrica?format=raw &task=download&fid=7>. Acesso em: 18 mar 2021.

SEL; catálogo; 2019; Disponível em: <https://selinc.com/pt/products/710/> Acesso em: 21 mar 2021.

SIEMENS; apostila; Basics of PLCs. [S.I.], 1999. Disponível em: <http://diagramas.diagramasde.com/otros/Siemens%20Basics%20Of%20Plc.pdf>. Acesso em 25 mar 2021.

VELOSO, G; CAMARGO M; **“Viabilidade econômica da implantação de um banco de capacitores em unidade armazenadora de grãos”**. Brasil: Brasília, 2017.

WATANABE, E. H.; STEPHAN, R. M., **“Potência Ativa e Reativa Instantâneas em Sistemas Elétricos com Fontes e Cargas Genéricas”**; Revista da SBA: Controle e Automação, 1991.

WEG; apostila; Automação de Processos Industriais.

WEG; apostila; Manual do Software WLP, 2008. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h7b/hd5/WEG-software-de-programacao-ladder-wlp-manual-do-usuario-10000051020-10.0x-manual-portugues-br.pdf>. Acesso em 25 mar 2021.

WEG; catálogo; 2020; Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Controls/Capacitores-e-Corre%C3%A7%C3%A3o-do-Fator-de-Pot%C3%Aancia/Controladores/Controlador-Autom%C3%A1tico-do-Fator-de-Pot%C3%Aancia-PFW01/CONTROLADOR-FATOR-POTENCIA-PFW01-T12/p/11335176>. Acesso em: 22 mar 2021.