

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
ENGENHARIA ELÉTRICA

VINÍCIUS CARVALHO FESTOSO

PROJETO ELÉTRICO PARA ARMAZÉM DE ESTOCAGEM DE AÇÚCAR VHP: Análise
de Conformidade Normativa e Dimensionamento de Sistemas Elétricos de Partida

Uberlândia
2024

VINÍCIUS CARVALHO FESTOSO

PROJETO ELÉTRICO PARA ARMAZÉM DE ESTOCAGEM DE AÇÚCAR VHP: Análise
de Conformidade Normativa e Dimensionamento de Sistemas Elétricos de Partida

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes

Uberlândia

2024

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

F418 2024	<p>Festoso, Vinícius Carvalho, 1999- PROJETO ELÉTRICO PARA ARMAZÉM DE ESTOCAGEM DE AÇÚCAR VHP [recurso eletrônico] : Análise de Conformidade Normativa e Dimensionamento de Sistemas Elétricos de Partida / Vinícius Carvalho Festoso. - 2024.</p> <p>Orientador: Luciano Coutinho Gomes. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em Engenharia Elétrica. Modo de acesso: Internet. Inclui bibliografia. Inclui ilustrações.</p> <p>1. Engenharia elétrica. I. Gomes, Luciano Coutinho, 1972-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU: 621.3</p>
--------------	--

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

VINÍCIUS CARVALHO FESTOSO

PROJETO ELÉTRICO PARA ARMAZÉM DE ESTOCAGEM DE AÇÚCAR VHP: Análise
de Conformidade Normativa e Dimensionamento de Sistemas Elétricos de Partida

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Uberlândia, como requisito parcial para a
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Uberlândia, 14 de novembro de 2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Carlos Eduardo Tavares
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Augusto Wohlgemuth Fleury Veloso da Silveira
Universidade Federal de Uberlândia

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho com todo carinho à minha família, especialmente aos meus pais, com destaque para meu pai, Luiz Antônio, que sempre foi um exemplo de engenheiro eletricista e de homem para mim, pelo incentivo e oportunidades, e aos meus irmãos, que sempre me apoiaram. Agradeço também a todos os amigos e familiares que estiveram comigo durante a graduação, pela companhia e incentivo. À minha querida companheira Erin, por estar ao meu lado em todos os momentos. Agradeço também à empresa Constele Eletricidade e Telecomunicação, em especial ao Engenheiro Rodrigo Favareto, grato pelos seus ensinamentos e paciência ao longo desses anos, pelo apoio durante o projeto e por me proporcionar a oportunidade de trabalhar em um projeto tão significativo como este.

Agradeço à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia por todo o conhecimento e suporte fornecidos ao longo da minha formação. Expresso minha gratidão a todos os professores que, com dedicação e competência, contribuíram para o meu desenvolvimento. Em especial, agradeço ao Professor Luciano Coutinho, por toda a atenção, orientação e apoio durante a produção deste trabalho.

RESUMO

A área de acionamentos elétricos desempenha um papel fundamental na Engenharia Elétrica, envolvendo a análise detalhada do funcionamento de motores elétricos e os fatores que impactam seus desempenhos. Este trabalho aplica esses conceitos no contexto de um armazém de açúcar VHP, abordando desde os processos industriais e os equipamentos utilizados até a especificação precisa dos materiais e dispositivos necessários para os acionamentos dos motores. O projeto foi desenvolvido com base nas normas técnicas elétricas estabelecidas pela ABNT-5410 e nas diretrizes da NBR IEC 60079, garantindo que todas as soluções apresentadas estejam de acordo com as exigências de segurança, especialmente em ambientes com atmosferas explosivas, que são característicos desse tipo de armazenagem. O dimensionamento dos condutores, eletrodutos e dispositivos de proteção foi realizado levando em consideração critérios técnicos e normativos, assegurando que as instalações elétricas operem com eficiência, confiabilidade e dentro dos padrões estabelecidos. Ao longo do trabalho, foram seguidas rigorosamente as recomendações normativas, visando minimizar os riscos e otimizar o desempenho do sistema elétrico. A parte final do projeto inclui cálculos detalhados e diagramas técnicos que demonstram a implementação dos sistemas de acionamento no armazém, além de evidenciar como as soluções propostas contribuem para a segurança e eficácia operacional da planta industrial.

Palavras-chave: armazém de açúcar VHP a granel; motores elétricos; atmosfera explosiva

ABSTRACT

The field of electric motor drives plays a fundamental role in Electrical Engineering, involving a detailed analysis of motor operation and the factors that impact their performance. This work applies these concepts in the context of a VHP sugar warehouse, addressing everything from industrial processes and the equipment used to the precise specification of materials and devices required for motor drives. The project was developed based on the electrical standards established by ABNT NBR 5410 and the guidelines of NBR IEC 60079, ensuring that all proposed solutions meet the safety requirements, particularly in explosive atmosphere environments, which are characteristic of this type of storage. The sizing of conductors, conduits, and protection devices was carried out following technical and regulatory criteria to ensure that the electrical installations operate efficiently, reliably, and within the established standards. Throughout the project, normative recommendations were strictly followed to minimize risks and optimize the performance of the electrical system. The final part of the project includes detailed calculations and technical diagrams that demonstrate the implementation of the motor drive systems in the warehouse, while also highlighting how the proposed solutions contribute to the safety and operational efficiency of the industrial plant

Keywords: Bulk VHP sugar storages; electric machines; explosive atmosphere

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 — Cristais de açúcar "VHP"	18
Figura 2 — Evaporador horizontal de açúcar.....	20
Figura 3 — Transporte de "Big Bags" de açúcar.	23
Figura 4 — Despejamento de açúcar em armazém a granel.	24
Figura 5 — Fluxograma de operações em uma armazém horizontal de açúcar a granel.	26
Figura 6 — Correias transportadoras com roletes.	27
Figura 7 — Desenho modelo de um elevador de canecas.....	28
Figura 8 — Partículas de açúcar em contato com superfície aquecida resultando em ignição	30
Figura 9 — Motor elétrico trifásico WEG W22Xtb à prova de explosão para zonas do tipo 21 e 22 e grupos IIIB e IIC com grau de proteção IP66.....	33
Figura 10 — Fatores de correção de agrupamento de circuitos	39
Figura 11 — Capacidade de condução de corrente, em amperes, para métodos de instalações de A a D, com condutores de cobre e alumínio, com isolação em EPR ou XLPE com temperatura ambiente de 30°C	40
Figura 12 — Conexão de eletroduto rígido e eletroduto flexível "Ex", com unidade seladora "Ex", para passagem de condutores em motor do elevador de canecas expedição "EL-01"...	44
Figura 13 — Corte longitudinal de armazém a granel de açúcar a ser analisado.....	47
Figura 14 — Corte transversal do armazém de açúcar a granel a ser analisado	47
Figura 15 — Diagrama unifilar de partida direta da carga VRO-02.	61
Figura 16 — Dispositivo Soft-Starter Trifásico Danfoss MCD 600.....	62
Figura 17 — Diagrama unifilar de força para partida de motor da carga EL-01 a partir de acionamento por Soft-starter.	63
Figura 18 — Disjuntor Motor WEG AZ MPW40i-3-U020,.....	68
Figura 19 — Relé Inteligente SRW01 - WEG	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 — Parâmetros de Qualidade do açúcar do Grupo II.....	17
Quadro 2 — Tipos de proteção em relação com EPL de equipamentos para atmosferas com poeiras combustíveis	32
Quadro 3 — Tabela de temperatura máxima suportáveis para isolações de condutores	36
Quadro 4 — Seção mínima para condutores de cobre e alumínio.	42
Quadro 5 — Seção de redução do condutor neutro para sistemas trifásicos.....	43
Quadro 6 — Motores elétricos conectados ao CCM-01.....	49
Quadro 7 — Motores elétricos conectados ao CCM-02.....	49
Quadro 8 — Dimensionamento de seção mínima de condutores pelo critério de ampacidade para cargas do CCM-01.....	51
Quadro 9 — Dimensionamento de seção mínima de condutores pelo critério de ampacidade para cargas do CCM-02.....	52
Quadro 10 — Dimensionamento de seção mínima de condutores pelo critério de queda de tensão para cargas em regime permanente CCM-01.....	53
Quadro 11 — Dimensionamento de seção mínima de condutores pelo critério de queda de tensão para cargas em regime permanente CCM-02.....	53
Quadro 12 — Dimensionamento de seção de condutores pelo critério de seção mínima para cargas em regime permanente CCM-01.....	54
Quadro 13 — Dimensionamento de seção de condutores pelo critério de seção mínima para cargas em regime permanente CCM-02.....	54
Quadro 14 — Seções de condutores adotadas para cargas conectadas ao CCM-01	55
Quadro 15 — Seções de condutores adotadas para cargas conectadas ao CCM-02	55
Quadro 16 — Valores de seções adotadas para o cabo neutro de cada circuito conectado ao CCM-01	56
Quadro 17 — Valores de seções adotadas para o cabo neutro de cada circuito conectado ao CCM-02.....	56
Quadro 18 — Dimensionamento de eletrodutos para acomodações de condutores de cargas associadas ao CCM-01	57
Quadro 19 — Dimensionamento de eletrodutos para acomodações de condutores de cargas associadas ao CCM-02	58
Quadro 20 — Tipos de partida definidos para acionamentos de motores do CCM-01 e CCM-02	64
Quadro 21 — Seleção de dispositivos de proteção e manobra para acionamentos de motores do CCM-01 e CCM-02.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 — Relações entre IP e grupos de EPL do equipamento para atmosferas explosivas.	33
Tabela 2 — Fatores de correção de corrente para temperaturas ambientes diferentes 30°C para linhas aéreas.....	37
Tabela 3 — Número de condutores carregados por tipo de circuito	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABB	Asea Brown Boveri
ABNT	Associação Brasileira de normas técnicas
BT	Baixa Tensão
CCM	Central de controle de motores
EPL	Equipment protection level
EPR	Borracha de Etileno-Propileno
IEC	International Electrotechnical Commission
IP	Ingress Protection
MT	Média Tensão
NA	Não Aplica
NBR	Norma brasileira
NPT	National Pipe Thread
NR	Norma Regulamentadora
PVC	Policloreto de Vinila
SPDA	Sistema de proteção contra descargas atmosféricas
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
VHP	Very High Polarization
XLPE	Polietileno Reticulado

LISTA DE SÍMBOLOS

"	Polegadas
@	Arrouba
%	Porcentagem
°C	Graus Celsius
°Z	Graus Zucker
A	Ampére
CaO	Óxido de cálcio
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
cv	Cavalo-vapor
Hz	Hertz
kA	Quiloampere
Kg	Quilograma
kW	Kilowatts
m	Metros
mg	Miligramas
mm	milímetros
pH	Potencial hidrogeniônico
SO ₂	Dióxido de enxofre
V	Volts
Vca	Volts em corrente alternada
Vcc	Volts em corrente contínua
W	Watts
Ω	Ohm

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Apresentação	13
1.2	Objetivo do trabalho	14
1.3	Estrutura do trabalho	14
2	FUNDAMENTOS E NORMATIVAS PARA ARMAZENAGEM DE AÇÚCAR VHP	16
2.1	Açúcar VHP	16
2.1.1	Características.....	16
2.1.1.1	<i>Processos de produção</i>	18
2.1.1.2	<i>Recepção e preparação de matéria prima</i>	18
2.1.1.3	<i>Moagem e extração</i>	19
2.1.1.4	<i>Tratamento de caldo</i>	19
2.1.1.5	<i>Evaporação</i>	20
2.1.1.6	<i>Cristalização</i>	21
2.1.1.7	<i>Centrifugação</i>	21
2.1.1.8	<i>Secagem</i>	21
2.1.1.9	<i>Armazenagem</i>	22
2.1.1.9.1	<i>Armazenamento em big bags ou sacas</i>	22
2.1.1.9.2	<i>Armazenamento a granel</i>	23
2.2	Armazém horizontal a granel: Estrutura e Funcionamento	24
2.2.1	Estruturas e configurações.....	25
2.2.2	Equipamentos e máquinas	27
2.2.3	Perigos de explosões em ambientes de armazenagem.....	29
3	ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO PROJETO ELÉTRICO	35
3.1	Condutores dos circuitos de distribuição	35
3.1.1	Critério de ampacidade	36
3.1.1.1	<i>Fator de correção de temperatura</i>	37
3.1.1.2	<i>Fator de correção de agrupamento de circuitos</i>	38
3.1.2	Critério de queda de tensão.....	41
3.1.3	Critério da seção mínima	42
3.1.4	Cabo neutro.....	43
3.2	Eletrodutos	43
4	CARACTERIZAÇÃO DE SILO HORIZONTAL DE AÇÚCAR VHP A GRANEL 46	
4.1	Descrição do armazém Fictício	46
4.2	Identificação das principais cargas elétricas	48
4.3	Dimensionamento de condutores	50
4.3.1	Dimensionamento pelo método de ampacidade	51

4.3.2	Dimensionamento pelo método de queda de tensão.....	52
4.3.3	Dimensionamento pelo método de seção mínima	53
4.3.4	Definições de seções de condutores	54
4.3.5	Dimensionamento do cabo neutro	56
4.4	Dimensionamento de eletrodutos	57
5	AUTOMAÇÃO E CONTROLE DAS PARTIDAS DE MOTORES	59
5.1	Seleção das partidas de motores	59
5.1.1	Partida direta.....	60
5.1.2	<i>Soft-starter</i>	61
5.1.3	Escolhas de partidas.....	64
5.2	Dimensionamento e seleção de proteção para acionamentos motores.....	66
5.2.1	Fusíveis	66
5.2.2	Disjuntores motores	68
5.2.3	Relés inteligentes	69
5.2.4	Chaves seccionadoras	69
5.2.5	Contatores	70
5.2.6	Escolhas de proteções para acionamento.....	71
6	CONCLUSÃO.....	74
	REFERÊNCIAS.....	76
	APÊNDICE A - PLANTA BAIXA E CORTES SILO HORIZONTAL - PLANTA BAIXA E CORTES SILO HORIZONTAL.....	80

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

O setor sucroalcooleiro brasileiro é vital para a economia global, sendo o maior produtor e exportador de açúcar do mundo. Na safra 2023/2024, o Brasil produziu cerca de 45,7 milhões de toneladas de açúcar, um aumento significativo em relação ao período anterior, impulsionado por condições climáticas favoráveis e avanços na eficiência produtiva. Grande parte dessa produção é exportada para consumidores na Ásia, Europa e África. (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO, 2024).

Essa produção está predominantemente concentrada na região Centro-Sul do Brasil, especialmente no estado de São Paulo, que contribui com cerca de 60% de toda a moagem de cana-de-açúcar. São Paulo é essencial não apenas para a produção de açúcar, mas também para a geração de empregos e a manutenção de um saldo positivo na balança comercial do país. (UNICA, 2024).

No cenário internacional, o Brasil exporta aproximadamente 35,974 mil toneladas métricas de açúcar no período de 2023/24 (USDA, 2024). Essa posição de destaque é sustentada por uma infraestrutura logística eficiente e uma grande capacidade produtiva, fatores que garantem a competitividade do país em um mercado globalmente disputado. (SOLIANI; ARGOUD, 2019).

O Brasil não se destaca apenas pela exportação de açúcar, mas também pelo consumo interno elevado, que se mantém significativo a cada safra. A demanda das indústrias alimentícia e de bebidas é um dos principais fatores que sustentam esse consumo. Para atender a essas necessidades, a eficiência no processo de armazenagem é crucial. Projetos bem elaborados para armazéns, especialmente no que se refere ao controle e fornecimento elétrico, são fundamentais para garantir a segurança e eficiência desse processo, assegurando o bom funcionamento do complexo sistema logístico do setor sucroalcooleiro (CASTRO,2006; SOUZA,2014).

1.2 Objetivo do trabalho

O presente documento tem como objetivo geral apresentar o funcionamento de um armazém de açúcar a granel em silos horizontais, com ênfase nos principais aspectos elétricos inerentes a esse processo. Dessa maneira, será realizada análise dos principais componentes elétricos e sistemas de automação demandados para assegurar a operação eficiente e segura de locais como esse, realizando uma contextualização referente às especificações técnicas e normas de segurança vigentes e correlacionadas à prática usuais envolvendo a cadeia de fornecimento de energia elétrica.

Este trabalho se concentrará especificamente nos seguintes aspectos:

- Explorar o funcionamento de silos horizontais de açúcar a granel, bem como o produto é movimentado e os principais equipamentos elétricos aplicados ao processo;
- Alinhamento com normas técnicas e segurança aplicáveis, integrando componentes elétricos e sistemas de proteção apropriados para ambientes de armazenagem com atmosferas potencialmente explosivas;
- Dimensionamento e detalhamento dos procedimentos para escolha de condutores para o fornecimento de energia à principais cargas elétricas para um armazém de açúcar a granel horizontal fictício;
- Dimensionamento dos eletrodutos que acomodarão os condutores visando atender as normas técnicas vigentes e potenciais riscos inerentes de ambientes de armazenagem classificados;
- Analisar soluções para o acionamento seguro e eficiente dos motores que serão integrados ao Centro de Controle de Motores (CCM), bem como o controle desses.

Ao final deste estudo, portanto, visa-se fornecer uma análise abrangente e fundamentada que aborde não apenas o funcionamento e a gestão dos ativos elétricos deste tipo de armazém, mas que também contribua para o aprimoramento de futuros projetos, a fim de garantir maior segurança e eficiência energética para o setor e para essas instalações.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está dividido em seis capítulos, cada um abordando aspectos essenciais para o desenvolvimento do projeto elétrico.

No segundo capítulo, serão discutidas as principais características do açúcar VHP, além de uma visão geral de seu processo de produção e armazenagem. A abordagem incluirá desde a produção até os métodos de estocagem, destacando aspectos essenciais da qualidade do produto e segurança no armazenamento. Também serão abordados os principais equipamentos e dinâmicas de um armazém horizontal de açúcar a granel, suas estruturas e funcionamento, ressaltando a importância dessas infraestruturas para a eficiência e segurança do processo. Além disso, serão discutidas as especificações das normas referentes a instalações elétricas nesse setor, especialmente em relação aos perigos de explosões em locais como esse, garantindo a conformidade com as exigências de segurança em ambientes com atmosferas explosivas.

No terceiro capítulo, será apresentada uma fundamentação teórica sobre o dimensionamento de condutores e eletrodutos em ambientes com atmosferas explosivas, destacando os critérios normativos e técnicos que orientam esse tipo de projeto. Serão abordados os parâmetros essenciais para garantir a segurança e a eficácia das instalações elétricas, levando em conta as particularidades desses ambientes de risco e a necessidade de conformidade com as regulamentações vigentes.

No quarto capítulo, serão abordados os dimensionamentos de condutores e eletrodutos para um armazém fictício, com base em critérios técnicos e normativos que serão disponibilizados. Serão realizadas análises detalhadas para garantir que as especificações dos componentes elétricos estejam de acordo com as exigências, embasados nos parâmetros adequados para ambientes industriais de atmosferas explosivas e critérios estabelecidos.

O quinto capítulo se dedicará à automação e controle dos motores, com uma análise dos diferentes tipos de partidas, a escolha de dispositivos de controle e a proteção dos sistemas de acionamento dos motores.

Finalmente, o sexto capítulo apresentará a conclusão do trabalho, sintetizando os principais resultados e análises desenvolvidos, destacando as contribuições realizadas e os pontos mais relevantes observados ao longo do estudo, enfatizando como as soluções propostas atendem às necessidades de segurança e eficiência no projeto elétrico do armazém de açúcar VHP a granel.

2 FUNDAMENTOS E NORMATIVAS PARA ARMAZENAGEM DE AÇÚCAR VHP

2.1 Açúcar VHP

A indústria sucroalcooleira brasileira desempenha um papel essencial na balança comercial internacional, posicionando o Brasil como o maior fornecedor de açúcar no mundo. O país lidera a produção global de açúcar, destacando-se como o maior produtor mundial. O açúcar produzido é amplamente utilizado em diversos setores, como o alimentício, onde serve tanto para consumo direto quanto como ingrediente em outros alimentos, além das indústrias de bebidas e farmacêutica. Em 2023, o Brasil exportou aproximadamente 31,4 milhões de toneladas de açúcar, reafirmando sua posição dominante no cenário global. (UNICA,2023)

A produção de açúcar a partir da cana-de-açúcar envolve uma série de processos extrativos que transformam a matéria-prima em um produto refinado, pronto para o mercado. Esses processos são fundamentais para garantir a extração eficaz dos açúcares presentes na cana, resultando em um produto final de alta qualidade. Ao longo dessas etapas, o caldo da cana é purificado e concentrado, removendo impurezas e aumentando a pureza do açúcar. A partir de processos complementares durante a produção desse produto, é possível a obtenção de variados tipos de açúcar, cada um com especificidades de coloração, pureza, granulometria e entre outros aspectos diferentes. Tal diferenciação permite atender a uma gama mais ampla de demandas do mercado, visando adaptar o produto final às necessidades específicas de diferentes indústrias e consumidores. (MACHADO,2012).

Entre os diversos tipos de açúcar produzidos no Brasil, o açúcar "VHP" (Very High Polarization) se destaca como a principal submatéria exportada, devido às suas características específicas e à alta demanda no mercado internacional devido a sua versatilidade para diferenciação e uso como insumo em indústrias de processamentos alimentícios ao redor do mundo. (UNICA,2023; MACHADO,2012)

2.1.1 Características

O açúcar "VHP" (Very High Polarization) é uma variedade de açúcar bruto que se caracteriza por seu alto grau de pureza. Além disso, apresenta baixa umidade, o que contribui para sua estabilidade durante o transporte e armazenamento. Outra característica distintiva do

açúcar VHP é que seus cristais são envoltos por uma fina camada de "mel", que é um resíduo do processo de produção. Essa camada confere ao açúcar "VHP" uma coloração amarelada, típica dos açúcares brutos, e influencia tanto sua aparência quanto algumas de suas propriedades perceptuais. (Machado,2012).

O termo "Very High Polarization" está associado a porcentagem para massa de sacarose contido em uma massa da solução do açúcar bruto. O açúcar bruto, obtido diretamente nas usinas por meio da extração e clarificação do caldo da cana-de-açúcar através de métodos físicos e químicos, seguido por etapas de evaporação, cristalização, centrifugação e secagem, é classificado como "VHP" (Very High Polarization) apenas quando seu grau de polarização excede 99,0°Z (Zucker). A polarização é uma medida da quantidade de sacarose aparente no açúcar, determinada por polarimetria em condições padronizadas, onde se utiliza um peso normal de 26,000 g de açúcar dissolvido em 100 ml de água a 20°C. Esse procedimento permite expressar a pureza do açúcar em graus Zucker (°Z), indicando o desvio da luz polarizada ao atravessar a solução, o que reflete a alta concentração de sacarose e, portanto, a elevada qualidade do produto final. (Machado,2012; BRASIL,2017).

Além do grau de polarização, outras características, como a umidade, a coloração e o teor de cinzas, também são determinantes para classificar o açúcar como "VHP", conforme mostra o quadro a seguir e a Figura 1.

Quadro 1 — Parâmetros de Qualidade de tipos de açúcar

Classe	Tipo	Polarização (°Z mín.)	Umidade (%máx.)	Cor ICUMSA (UI máx.)	Cinzas Condutimétricas (% máx.)	Pontos Pretos (n°/100g máx.)	Partículas Magnetizáveis (mg/Kg máx.)	Açúcares Redutores (%m/m máx.)
Branco	Cristal	99,50	0,10	300	0,10	20	15	N/A
	Refinado Amorfo ou Refinado	99,00	0,30	100	0,20	5	5	N/A
	Confeiteiro	99,00	0,30	150	0,20	5	5	N/A
	Refinado Granulado	99,80	0,05	60	0,05	5	5	N/A
Bruto	Demerara	96,00	1,20	5000	0,50	N/A	N/A	N/A
	VHP	99,00	0,25	2.500	0,25	N/A	N/A	N/A

	VVHP	99,49	0,15	1.000	0,15	N/A	N/A	N/A
Líquido	Líquido	N/A	N/A	120	0,30	N/A	N/A	0,30
	Invertido	N/A	N/A	120	0,30	N/A	N/A	60 a 90

Fonte: Adaptado de Brasil (2017).

Figura 1 — Cristais de açúcar "VHP"



Fonte: Usina Santa Ângela (2024).

2.1.1.1 *Processos de produção*

O processo de produção de açúcar é, sem dúvida, uma das etapas mais rigorosamente controladas na indústria sucroalcooleira. Cada fase, desde a extração da cana-de-açúcar até a cristalização dos grãos, é cuidadosamente monitorada para garantir que o produto final atenda aos elevados padrões de pureza, cor e estabilidade, assegurando sua aceitação e valorização nos diversos mercados que dependem desse produto, especialmente no mercado internacional. Dada a importância dessa etapa, a seguir serão descritos os principais processos envolvidos na produção do açúcar "VHP".

2.1.1.2 *Recepção e preparação de matéria prima*

Após a colheita nos campos, a cana-de-açúcar é transportada para a usina, onde é inicialmente pesada e inspecionada para verificar parâmetros de qualidade, como teor de sacarose e presença de impurezas. Em seguida, a cana é descarregada em mesas

alimentadoras, que têm a função de transportar a matéria-prima para o processo de preparação e limpeza. Nesse estágio, a cana é submetida a uma série de operações que incluem a remoção de sujeiras, seja por lavagem ou por limpeza a seco, eliminando terra e outros resíduos para garantir que a matéria-prima esteja em condições ideais para o processamento subsequente. (Machado,2012)

2.1.1.3 *Moagem e extração*

Após a limpeza, a cana-de-açúcar é conduzida por esteiras rolantes aos equipamentos responsáveis por picá-la em menores partes e fibrá-la, como picadores e desfibradores. Esses equipamentos são essenciais para aumentar a eficiência da extração do caldo. Em seguida, a cana picada é levada aos esmagadores, dispositivos que utilizam rolos mecânicos para exercer pressão mecânica através de rolos sobre a cana, extraíndo o "caldo" ou suco. Nesse processo, ocorre a separação dos materiais, resultando em bagaço, que é a fibra remanescente que é utilizado em outros processos, e o caldo, que é o líquido rico em sacarose destinado às próximas etapas de produção de açúcar (Payne,1989).

2.1.1.4 *Tratamento de caldo*

Nesta etapa, o caldo extraído através da moagem da matéria-prima é bombeado para tanques nas unidades de tratamento, onde será submetido a processos específicos com o objetivo de remover impurezas e demais materiais indesejados que estejam diluídos ou em suspensão no líquido. Entre esses processos, os mais usuais utilizados para a limpeza do caldo incluem:

- **Peneiramento:** Essa etapa envolve a passagem do caldo por peneiras rotativas que removem materiais maiores e detritos grossos, como fibras de cana e partículas sólidas;
- **Clarificação:** O procedimento de clarificação é onde o caldo é sulfitado, ou seja, tratado com dióxido de enxofre (SO₂) com o objetivo de clarear a cor do caldo, realizar a desinfecção e promover a coagulação de materiais coloidais presentes. Esse processo é essencial para garantir a remoção de impurezas finas. No entanto, o açúcar do tipo "VHP" não passa por esse tipo de tratamento, pois é produzido para atender a mercados que exigem um produto com alto grau de pureza, mas sem o uso de

sulfitação, a fim de evitar a presença de resíduos de enxofre no produto final. Além disso, o caldo é misturado com óxido de cálcio (CaO), um procedimento conhecido como caleado, que também coagula e precipita impurezas, além de elevar o pH a níveis neutros, contribuindo para a purificação do caldo por decantação antes das etapas subsequentes de produção.

- Filtração: Processo final do tratamento de caldo clarificado, o qual será filtrado em temperaturas elevadas para final remoção de sedimentos e lodos que se formaram pela etapa anterior (Machado,2012).

2.1.1.5 Evaporação

Nesta etapa, o caldo tratado é enviado aos evaporadores concorrentes, mostrado pela Figura-2, onde é aquecido até atingir o ponto de ebulição da água presente, permitindo a remoção de aproximadamente 85% da água e reduzindo o teor de umidade para cerca de 40%. Esse processo transforma o caldo em um xarope espesso e concentrado, preparado para a próxima fase do processo de produção de açúcar. (Machado,2012)

Figura 2 — Evaporador horizontal de açúcar



Fonte: Planusi (2024).

2.1.1.6 *Cristalização*

Após a produção do xarope, este é transportado para os cristalizadores, que são equipamentos especializados onde o xarope concentrado é cozido. Durante essa etapa, o xarope é submetido a condições controladas de temperatura e pressão para promover a formação de cristais de açúcar. Este processo, conhecido como cristalização, é essencial para a conversão do xarope espesso em cristais misturados com mel de açúcar (Machado,2012).

2.1.1.7 *Centrifugação*

Após a cristalização, o açúcar bruto, conhecido como "melaço", é enviado às turbinas centrífugas, que têm a função de separar os cristais de açúcar do melaço residual. As centrífugas giram em alta velocidade, utilizando a força centrífuga para expulsar o melaço líquido dos cristais de açúcar, deixando-os mais secos. Nesta etapa, ocorre a separação do açúcar do tipo "VHP", que ainda mantém uma fina camada de "mel" envolta de seus cristais, conferindo-lhe a característica coloração amarelada. Essa camada residual de melaço é uma marca distintiva do açúcar "VHP", o tornando ideal para exportação e posterior refino desejado. (Lima,2019)

2.1.1.8 *Secagem*

Visando diminuir a quantidade de umidade presente no açúcar produzido, e assim garantir uma maior durabilidade do produto e evitar perdas por deterioração, o açúcar passa por um processo de secagem após a centrifugação. Os níveis de água devem ser reduzidos a menos de 0,2% da massa total do açúcar produzido. Para alcançar essa meta, o açúcar é colocado em secadores de ar verticais ou horizontais, que utilizam ventilação forçada de ar quente, com controle preciso de temperatura e velocidade do vento. Esse processo é cuidadosamente monitorado para evitar que o açúcar seja superaquecido ou sofra danos pelo arrasto, garantindo a integridade dos cristais. Além disso, o açúcar mais seco promove uma maior qualidade para transporte e está pronto para ser armazenado, assegurando que o produto chegue ao destino em condições ideais (Castri,2006).

2.1.1.9 *Armazenagem*

A armazenagem de açúcar é uma das etapas mais cruciais em todo o processo de produção, exigindo um alto nível de atenção e cuidado para assegurar que o produto final mantenha sua qualidade e pureza durante longos períodos. Essa fase não apenas preserva as características essenciais do açúcar, como sua cor, textura e umidade, mas também protege o produto contra potenciais riscos de contaminação e deterioração (Lima,2006).

Além dos aspectos de qualidade, a armazenagem desempenha um papel estratégico no mercado, garantindo que o açúcar esteja disponível para comercialização de forma constante e ininterrupta, mesmo durante os períodos de entressafra, quando a produção é reduzida ou suspensa. Essa capacidade de estocar grandes quantidades de açúcar de maneira segura e eficaz permite que o mercado seja suprido de forma contínua, evitando flutuações nos preços e assegurando o atendimento às demandas dos consumidores (Manfrim,1994).

2.1.1.9.1 *Armazenamento em big bags ou sacas*

Tendo o açúcar pronto para estocagem ou transporte, ele pode ser acondicionado em sacas, conhecidas como *big bags*. Esses recipientes são normalmente manufaturados a partir de combinações de materiais de resina termoplástica, como o polietileno, associados a outros materiais como o algodão. Essa composição oferece durabilidade e resistência, suportando um peso de ensaque entre 50 e 1.500 kg de açúcar, dependendo das necessidades do produtor. Existem também *big bags* com revestimentos de plásticos impermeáveis, que proporcionam uma proteção adicional ao produto, especialmente contra umidade e contaminações externas (Lima,2006). Este tipo de armazenagem oferece uma maior flexibilidade no local de estocagem, permitindo um controle mais eficiente sobre a organização do estoque e o uso do espaço disponível. Além disso, os *Big Bags* podem ser facilmente movimentados por equipamentos hidráulicos, como pórticos, e veículos como empilhadeiras, em operações controladas manualmente por funcionários, o que possibilita um gerenciamento logístico mais preciso. Este método é mais comumente utilizado em espaços de acomodações menores, onde a otimização do armazenamento é essencial para maximizar a eficiência do espaço disponível. Além disso, os *Big Bags* oferecem a vantagem de já estarem com a pesagem desejada, facilitando o controle de inventário. Eles também podem ser reutilizados após passarem por

um processo de limpeza e inspeção do envase, tornando-os uma opção econômica, duradoura e prática.

Figura 3 — Transporte de "Big Bags" de açúcar.



Fonte: Jornal Cana (2015).

Contudo, esse tipo de armazenamento requer maiores condições de mão-de-obra por parte dos funcionários para alocação, empilhamento e desempilhamento dos *Big Bags*, conforme mostra a Figura 3. Essas operações demandam atenção e cuidado, já que o manuseio inadequado pode comprometer a integridade dos sacos, produto e segurança no local de trabalho. (Manfrim,1994)

2.1.1.9.2 *Armazenamento a granel*

Neste tipo de armazenamento, os cristais de açúcar produzidos são destinados diretamente a silos ou armazéns especializados, onde são estocados em grandes quantidades de forma sobreposta, como "montes", sem o uso de embalagens individuais, permitindo o armazenamento em massa desse produto. Essa forma de estocagem possibilita a movimentação do açúcar em larga escala de maneira automática, utilizando dispositivos eletromecânicos, como esteiras, elevadores, entre outros, o que otimiza o processo de carga e descarga do produto e reduz significativamente a necessidade de mão de obra, já que as operações são realizadas de forma eficiente pelos equipamentos (Manfrim, 1994).

Ademais, esse método de armazenamento oferece outros benefícios significativos, como um maior tempo para deterioração do produto, devido à formação de uma camada protetora úmida nas partes superiores e laterais dos "montes" de açúcar, principalmente

associado ao açúcar "VHP", que protege a parte interna contra a exposição direta ao ar e a outros fatores ambientais, garantindo assim a integridade do açúcar armazenado por períodos mais longos, conforme mostra a Figura 4 (Lima, 2006).

Em contrapartida, o armazenamento a granel exige um controle rigoroso para garantir a qualidade e a segurança do açúcar. Um dos principais desafios é o risco de incêndios, especialmente devido à formação de pó durante a movimentação do açúcar, que pode criar uma atmosfera explosiva no local. Além disso, é crucial monitorar o acúmulo de compactação dos cristais, o que pode levar a perdas de produto e dificuldades no fluxo do açúcar durante o manuseio. A umidade representa outro risco significativo, pois pode causar a formação de grumos e o empedramento do açúcar, comprometendo sua qualidade.

Figura 4 — Despejamento de açúcar em armazém a granel.



Fonte: Estação Conteúdo (2013).

2.2 Armazém horizontal a granel: Estrutura e Funcionamento

O local de armazenamento deve proporcionar condições adequadas em termos de infraestrutura e controle ambiental. Os armazéns destinados ao armazenamento de açúcar precisam ser projetados para manter o produto seguro, em condições ideais e sob controle rigoroso (Manfrim, 1994). Isso inclui:

- I. Isolamento térmico;
- II. Equilíbrio entre ar e açúcar;
- III. Controle de umidade;
- IV. Controle de riscos de explosões;
- V. Operações assistidas e semiautomáticas.

Há vários tipos de estruturas disponíveis para o armazenamento de açúcar, como silos verticais, armazéns convencionais e armazéns refrigerados, cada um com características e vantagens específicas. No entanto, o foco deste subtópico será o armazém horizontal a granel, uma solução amplamente adotada pelos produtores de açúcar "VHP".

2.2.1 Estruturas e configurações

Os armazéns horizontais de açúcar a granel são construções robustas, com grande comprimento em relação à altura, feitas de concreto armado ou aço, projetadas para suportar grandes volumes de produto. A base do silo é geralmente plana, revestida com materiais que facilitam a limpeza e ajudam a evitar a contaminação do açúcar. As paredes laterais, feitas de concreto ou aço galvanizado, oferecem resistência estrutural e protegem o produto contra fatores externos, como variações de umidade e temperatura. Essas estruturas podem ser térreas, semi-enterradas ou totalmente enterradas, de acordo com a capacidade de armazenamento, o tipo de terreno e a área disponível. Existem diferentes tipos de fundos e modelos construtivos para os silos, sendo os mais utilizados o fundo em formato de "V", que facilita o escoamento do açúcar por gravidade, e o fundo reto, projetado para uso com sistemas mecânicos de movimentação do produto. A cobertura, geralmente metálica, é projetada para resistir a ventos e ao peso de equipamentos, garantindo a proteção do açúcar contra intempéries (Gomes, 2000; Corpo de Bombeiros do Estado do Paraná, 2015).

Dessa maneira, para facilitar a compreensão e garantir a eficiência das operações, os silos horizontais são normalmente subdivididos em áreas funcionais específicas. Essa organização permite que cada etapa do processo seja gerida de forma mais eficaz. As principais áreas incluem:

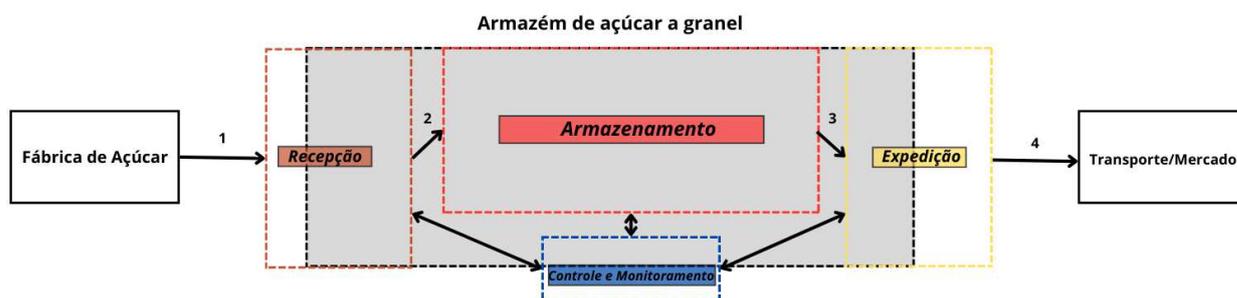
- **Área de recepção:** Local onde o açúcar é descarregado após ser produzido e conduzido ao armazenamento por meio de equipamentos mecânicos como esteiras e transportadoras na parte superior do armazém, garantindo um controle de fluxo de volume e organização do material (Gomes,2000).
- **Área de armazenamento:** Esta é a área onde o açúcar é amontoado em grandes montes piramidais, organizados para maximizar o uso do espaço. Sistemas automatizados mantêm o controle constante da temperatura e da umidade, assegurando a qualidade do produto durante o período de estocagem. A base dos silos possui

taludes inclinados e correias transportadoras subterrâneas, que facilitam o escoamento e a movimentação do açúcar para redistribuição ou expedição (Da Silva,2006).

- **Área de expedição:** Esta área é responsável pelo preparo do açúcar para transporte. O produto é transportado por correias subterrâneas até elevadores de caçamba, que o levam a pequenos silos verticais subsequentes. Esses silos verticais auxiliam no controle da vazão de saída do açúcar, permitindo um carregamento mais rápido e eficiente nos veículos de transporte (Da Silva,2006).

- **Área de controle, manutenção e apoio:** Responsável pelo monitoramento das condições de armazenamento, como temperatura e umidade, utilizando sensores e sistemas automatizados para garantir a qualidade do açúcar. Também abriga as atividades de manutenção preventiva e corretiva dos equipamentos, com espaços de apoio aos trabalhadores do armazém (Gomes,2000).

Figura 5 — Fluxograma de operações em um armazém horizontal de açúcar a granel.



Fonte: O autor (2024).

Conforme mostrado na Figura 5, após sair da fábrica, o açúcar chega à área de recepção do armazém, onde é descarregado e direcionado para a área de armazenamento. Em seguida, o produto é estocado a granel até ser levado para a área de expedição, onde é preparado para o transporte aos clientes. Todos esses processos são visualizados e operados pela área de controle e monitoramento, garantindo a qualidade do produto e a eficiência das operações.

2.2.2 Equipamentos e máquinas

Para compreender plenamente a dinâmica operacional de um armazém de açúcar a granel, é fundamental identificar e entender o papel dos principais equipamentos e maquinários utilizados em cada área. Cada um desses elementos desempenha uma função crucial para assegurar a eficiência, qualidade e segurança de todas as etapas do processo, desde a recepção do produto até sua expedição, passando pelo armazenamento e controle das condições internas (Da Silva, 2006). Essa identificação é essencial para o desenvolvimento de um bom projeto elétrico e de automação, garantindo que todos os sistemas sejam devidamente atendidos em termos gerais. A seguir, são descritos os principais equipamentos e suas funções em cada área do armazém.

- **Correia transportadoras:** Transportam o açúcar em direções horizontais ou com pequenas inclinações verticais, utilizando esteiras deslizantes sobre roletes, e em alguns casos, permitem a movimentação em ambos os sentidos (Corpo de Bombeiros do Estado do Paraná, 2015). São geralmente empregadas para mover o produto da área de recepção até o armazém, localizadas na parte superior da estrutura, alinhadas com *trippers* para facilitar o despejamento no armazenamento de forma uniforme. Além disso, as correias transportadoras também são instaladas de forma subterrânea para movimentar o açúcar da área de armazenamento até a expedição.
- **Tripper:** São equipamentos móveis, semelhantes a pequenos carros, que permitem o lançamento do açúcar em pontos específicos ao longo do silo. Eles são instalados junto às correias transportadoras e se movem ao longo delas, permitindo que o produto seja despejado de maneira controlada e uniforme.

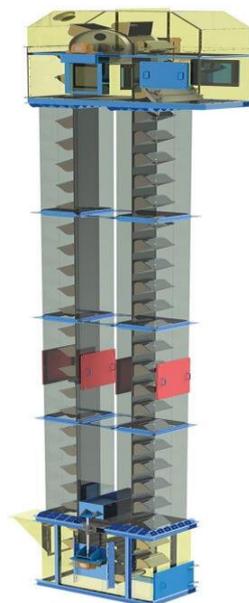
Figura 6 — Correias transportadoras com roletes.



Fonte: Corpo de bombeiros do estado do paraná (2015).

- **Elevadores:** Equipamentos utilizados para elevar o açúcar a diferentes níveis do armazém. O tipo mais comum é o elevador de canecas, que consiste em uma série de pequenos recipientes fixados a uma correia ou corrente. Essas canecas captam o açúcar na base do elevador e o transportam verticalmente até a parte superior, onde o produto é descarregado. Esse equipamento é utilizado principalmente para elevar o açúcar das esteiras subterrâneas até os silos de expedição, suas características básicas podem ser vistas na Figura 7.

Figura 7 — Desenho modelo de um elevador de canecas



Fonte: Tetracom (2023).

Sistema de aeração: Composto por ventiladores, exaustores e dutos ao longo do armazém, o sistema de aeração garante a circulação forçada e constante do ar, controlando a umidade e a temperatura do açúcar durante o armazenamento. Também possui filtros para capturar o pó do açúcar, prevenindo acúmulos que poderiam comprometer a segurança do ambiente. Esses sistemas são ajustados automaticamente com base em sensores ambientais conectados à central de monitoramento das operações (Elias, De Oliveira, Varnier, 2018).

Silos verticais intermediários: São pequenos silos verticais de estruturas metálica responsáveis por receber o açúcar proveniente da expedição do elevador de canecas, armazená-lo temporariamente e controlar a vazão para o carregamento dos veículos de transporte ou devolver o excesso do produto ao armazém através de correias transportadoras (Manfrim, 1994).

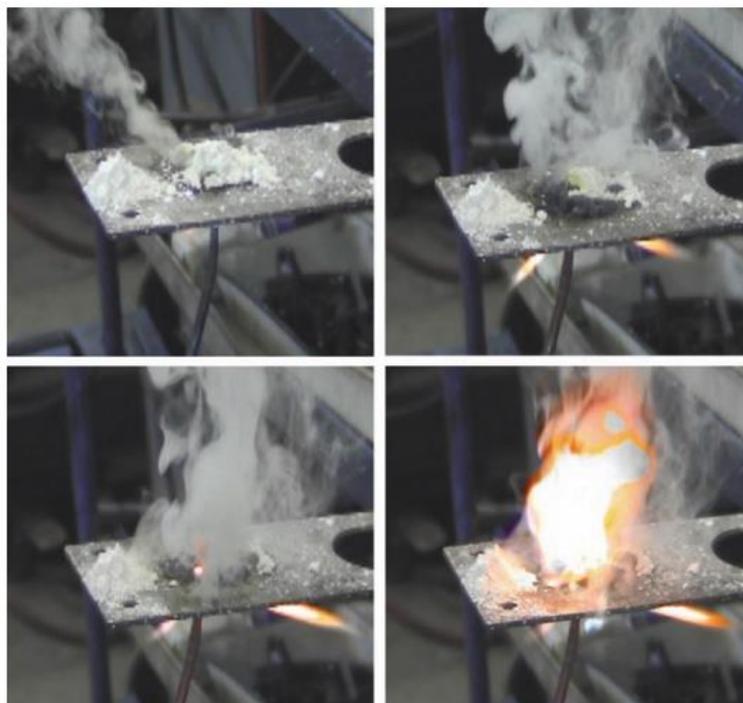
Balanças: Dispositivos instalados na área de expedição, responsável por pesar a quantidade de açúcar que será transferida para os veículos de transporte.

2.2.3 Perigos de explosões em ambientes de armazenagem

O armazenamento e a movimentação do açúcar do tipo "VHP" apresentam uma série de riscos significativos ao ambiente de armazenagem. Devido ao baixo teor de umidade presente no material, conforme mostrado na Quadro 1, é comum ocorrer a formação de materiais particulados durante esses processos. Essas partículas finas podem ficar suspensas no ar e, por serem extremamente leves, ajudam a se propagar facilmente, criando uma atmosfera explosiva. Esse risco é exacerbado pelo transporte e manuseio do açúcar, seja durante a carga e descarga, gerando uma quantidade considerável de partículas combustíveis. A combinação de partículas em suspensão e possíveis fontes de ignição, como sistemas elétricos, torna o ambiente ainda mais crítico, podendo resultar em explosões altamente destrutivas, além de problemas respiratórios e irritações aos trabalhadores (Iwuozor et al., 2023).

No armazém, existem várias fontes potenciais de ignição para os materiais particulados, que podem criar uma atmosfera explosiva. Entre essas fontes, destacam-se os curtos-circuitos em sistemas elétricos, o atrito em componentes rotativos, o superaquecimento de motores e máquinas, uso inadequado de lâmpadas, eletricidade estática e entre outros meios que geram calor excessivo. Essas condições, combinadas com a presença de partículas finas suspensas no ar, tornam o ambiente suscetível a ignições acidentais, conforme mostra a Figura 8. Com o passar do tempo, a poeira acumulada pode, ao ser movimentada ou novamente suspensa, reagir na presença de uma fonte de ignição, resultando em explosões. Essas explosões, por sua vez, geram ondas de choque que podem levantar mais poeira acumulada, criando um efeito em cadeia de explosões secundárias cada vez mais destrutivas. As consequências incluem danos graves às instalações, paralisações na produção e a perda de vidas humanas (Glor,2003).

Figura 8 — Partículas de açúcar em contato com superfície aquecida resultando em ignição



Fonte: Adaptado de Westran *et al.* (2008, p. 7).

Existem diversas estratégias para o controle de partículas finas de açúcar em ambientes de armazenagem e movimentação, como o uso de ventiladores e exaustores para promover a ventilação adequada e impedir o acúmulo de poeira em suspensão. Além disso, sistemas de aspiração centralizada e filtros de alta eficiência também são comumente utilizados para reduzir a concentração de materiais particulados no ar, minimizando o risco de explosão (Iwuozor *et al.*, 2023).

As instalações elétricas em ambientes de armazenagem e movimentação de açúcar VHP são consideradas áreas classificadas, devido ao risco de formação de atmosferas explosivas, e devem seguir rigorosamente normas técnicas específicas. Neste trabalho, as fundamentações de cálculos e especificações para a instalação de componentes elétricos serão baseadas nas normas ABNT NBR IEC 60079, NBR 5363, NBR 5410 e entre outras normas nacionais e internacionais que estabelecem requisitos essenciais para atmosferas potencialmente explosivas em áreas classificadas. Essas normas fornecem diretrizes detalhadas para a escolha e instalação de equipamentos elétricos "Ex" (à prova de explosão), como motores, luminárias, cabos e dispositivos de controle. Elas também definem aspectos cruciais, como o aterramento, o sistema de proteção contra descargas atmosféricas adequado para as estruturas, fundamentais para evitar faíscas em ambientes com partículas

combustíveis. Além disso, outras normas brasileiras, como a NR-10, que trata da segurança em instalações elétricas e dos serviços a elas relacionados, serão consideradas para garantir a segurança dos trabalhadores durante o projeto, a instalação e a manutenção dos sistemas.

Pode-se determinar a classificação da área do armazém, que será definida de acordo com a presença e o comportamento da poeira de açúcar em suspensão. As áreas são categorizadas em zonas específicas que indicam a frequência e a duração da presença de uma atmosfera potencialmente explosiva. No caso do armazém horizontal de açúcar "VHP" a granel, ele é pertencente ao Grupo III, que abrange atmosferas explosivas devido a poeiras e fibras combustíveis. Este grupo se subdivide em categorias com base nas características das poeiras presentes (ABNT NBR IEC 60079-0,2020):

- IIIA: Poeiras e fibras combustíveis;
- IIIB: Poeiras não condutivas;
- IIIC: Poeiras condutivas.

Ademais, o EPL (*Equipment Protection Level*) ou Nível de Proteção do Equipamento é uma classificação que define o grau de segurança de um equipamento para operar em atmosferas explosivas, de acordo com a probabilidade e a presença de gases, vapores ou poeiras combustíveis. Os níveis de EPL são indicados por letras que indicam a robustez da proteção oferecida contra a ignição de atmosferas explosivas. Para áreas com poeiras combustíveis, os níveis de proteção são indicados pelas letras "Da", "Db" e "Dc", cada um deles relacionado a um tipo específico de risco presente em diferentes zonas classificadas. Essas áreas são subdivididas em zonas que determinam a probabilidade da presença de poeiras em suspensão (ABNT NBR IEC 60079-2,2016):

- Zona 20: Refere-se a locais onde há a presença contínua ou frequente de poeira em suspensão, capaz de formar uma atmosfera explosiva. Para essa zona, os equipamentos utilizados devem possuir "EPL Da", que garante o maior nível de proteções. Esses equipamentos são projetados para não representar nenhuma fonte de ignição e são obrigatórios em locais de risco contínuo de explosão (ABNT NBR IEC 60079-2,2016).
- Zona 21: Envolve áreas em que a poeira combustível pode estar presente em suspensão no ar durante as atividades normais, embora não de forma constante. Os equipamentos utilizados nessas áreas devem ser classificados como "EPL Db", o que significa que eles são adequados para operar em condições normais e são projetados

para minimizar riscos de ignição durante possíveis situações de falha, garantindo a segurança da instalação (ABNT NBR IEC 60079-2,2016).

- Zona 22: Corresponde a locais onde a poeira explosiva só é encontrada em condições não usuais, por períodos curtos. Áreas ao redor de silos e transportadores, onde a poeira pode se acumular e ser levantada devido a intervenções de manutenção ou falhas eventuais, são exemplos desta zona. Os equipamentos para essa área devem possuir "EPL Dc", oferecendo um nível de proteção suficiente para evitar a ignição em situações em que a poeira só está presente de forma esporádica e em pequenas quantidades (ABNT NBR IEC 60079-2, 2016).

Além das classificações EPL "Da", EPL "Db" e EPL "Dc" para atmosferas explosivas, existem sufixos que especificam as características construtivas, o nível de proteção e outros detalhes importantes, como instalação e adequação ao ambiente. Esses sufixos oferecem uma visão mais detalhada sobre as especificidades de cada equipamento, como será mostrado no quadro a seguir.

Quadro 2 — Tipos de proteção em relação com EPL de equipamentos para atmosferas com poeiras combustíveis

EPL	Tipo de Proteção	Código
Da	Encapsulamento	"sa"
	Proteção por invólucro	"ta"
	Segurança intrínseca	"ia" ou "iaD"
	Proteção especial	"sa"
Db	Encapsulamento	"mb"
	Proteção por invólucro	"tb" ou "tD"
	Invólucros pressurizados	"pD"
	Segurança intrínseca	"ib" ou "ibD"
	Proteção especial	"sb"
Dc	Encapsulamento	"mc"
	Proteção por invólucro	"tc" ou "tD"
	Invólucros pressurizados	"pD"
	Segurança intrínseca	"ic"
	Proteção especial	"sc"

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016, p. 17,18).

Outro fator importante é o grau de proteção IP (*Ingress Protection*), que define o nível de proteção dos invólucros dos equipamentos contra a entrada de partículas sólidas e líquidos. Esse grau de proteção pode ser correlacionado com a especificação do grupo e subgrupo dos equipamentos utilizados em atmosferas com poeiras explosivas. A classificação IP está diretamente relacionada à capacidade dos equipamentos de resistirem a condições específicas, como poeira e umidade, especialmente em áreas classificadas. Abaixo, segue uma tabela que relaciona os graus de proteção IP mais comumente utilizados com as classificações ta, tb e tc, de acordo com as zonas de poeiras explosivas.

Tabela 1 — Relações entre IP e grupos de EPL do equipamento para atmosferas explosivas.

Nível de proteção do equipamento (EPL)	Grupo IIIC	Grupo IIIB	Grupo IIIA
"ta"	IP6X	IP6X	IP6X
"tb"	IP6X	IP6X	IP5X
"tc"	IP6X	IP5X	IP5X

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016, p. 52).

Figura 9 — Motor elétrico trifásico WEG W22Xtb à prova de explosão para zonas do tipo 21 e 22 e grupos IIIB e IIIC com grau de proteção IP66.



Fonte: Adaptado de WEG (2024).

Além do nível de proteção do equipamento, é fundamental assegurar que os motores elétricos instalados em áreas classificadas atendam também às especificações de classe de temperatura. Esta classe define a temperatura máxima da superfície da máquina, com o objetivo de evitar a ignição da poeira presente e depositada sobre suas superfícies. Quando o

equipamento está exposto a nuvens de poeira suspensa no ar, a seguinte equação estabelece o valor máximo de temperatura que o equipamento pode atingir sem que haja ignição da poeira combustível. No caso da poeira de açúcar, a temperatura de ignição geralmente está na faixa de 350°C (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, 2024). Dessa forma, quando o equipamento está exposto a nuvens de poeira suspensa no ar a seguinte equação estabelece o valor máximo de temperatura que o equipamento pode atingir sem que haja ignição da poeira combustível:

$$T_{m\acute{a}x} = \frac{2}{3} \times T_{cl} \quad (1)$$

onde T_{cl} é a temperatura mínima para ignição do material presente em poeira em nuvem.

Além disso, no caso de poeira acumulada sobre a superfície dos equipamentos, deve-se aplicar um fator de segurança ainda mais rigoroso. Para camadas de até 5 mm de espessura, a temperatura máxima de superfície, quando ensaiada sem a presença de poeira, deve ser inferior à temperatura mínima de ignição da poeira específica, subtraindo-se 75 °C, conforme mostra a Equação 2. (ABNT NBR IEC 60079-14, 2016.)

$$T_{m\acute{a}x} = T_{5mm} - 75 \text{ °C} \quad (2)$$

onde T_{5mm} representa a temperatura mínima de incandescência da poeira para uma camada acumulada de 5 mm.

3 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO PROJETO ELÉTRICO

As especificações técnicas de um projeto elétrico são fundamentais para garantir que o sistema opere de forma eficiente, segura e em conformidade com as normas vigentes. Elas abrangem a seleção de materiais e equipamentos apropriados, bem como o correto dimensionamento dos condutores e dispositivos de proteção. Esses elementos são cruciais para assegurar que o sistema funcione dentro dos parâmetros operacionais exigidos, especialmente em ambientes industriais, onde a confiabilidade das instalações e a segurança são prioridades (Filho, 2007).

Neste subcapítulo, serão determinados os critérios técnicos para o dimensionamento dos condutores e dispositivos de proteção no sistema de distribuição que será alimentado pelos centrais de controle de motores. O foco está em garantir que esses sistemas sejam adequadamente dimensionados para suportar as condições operacionais das cargas, levando em consideração as exigências das normas técnicas aplicáveis, como a ABNT NBR 5410 e a ABNT NBR IEC 60079.

3.1 Condutores dos circuitos de distribuição

Os condutores elétricos são componentes essenciais em sistemas de distribuição de energia, sendo responsáveis pelo transporte seguro e eficiente da corrente elétrica entre a fonte de alimentação e as cargas conectadas. A correta especificação dos condutores é crucial para garantir a integridade do sistema, prevenindo sobreaquecimento, quedas de tensão excessivas e falhas que possam comprometer a operação e a segurança das instalações.

A escolha do condutor envolve tanto o material quanto o tipo de isolamento, ambos fundamentais para assegurar o desempenho adequado e a proteção contra condições ambientais adversas. O cobre é amplamente utilizado devido à sua alta condutividade e durabilidade, enquanto o alumínio oferece uma opção mais leve e econômica, exigindo cuidados adicionais nas conexões. O tipo de isolamento, por sua vez, é escolhido conforme os requisitos da instalação, protegendo o condutor contra fatores como temperatura e umidade. Materiais como PVC, EPR e XLPE são comuns, devido à sua resistência mecânica e térmica. Os condutores também podem ser unipolares, compostos por um único condutor, ou

multipolares, que contêm vários condutores em um único cabo, dependendo das necessidades da instalação (Filho, 2007).

Para efeito de cálculos, a determinação correta do dimensionamento dos condutores é essencial, devendo atender simultaneamente a três critérios principais, os quais serão abordados a seguir.

3.1.1 Critério de ampacidade

O Critério de ampacidade refere-se à corrente elétrica máxima que um condutor pode conduzir continuamente sem que sua temperatura ultrapasse os limites definidos pelo material de isolamento, preservando os sistemas de condução. Esse critério é fundamental para evitar o sobreaquecimento, que pode comprometer tanto a vida útil do condutor quanto a segurança da instalação. O Quadro 3 apresenta as temperaturas limites para cada tipo de condutor (ABNT NBR 5410, 2004).

Quadro 3 — Tabela de temperatura máxima suportáveis para isolações de condutores

Tipo de isolação	Temperatura máxima para serviço contínuo (Condutor) °C	Temperatura limite de sobrecarga (condutor) °C	Temperatura limite de curto-circuito (condutor) °C
PVC até 300 mm ²	70	100	160
PVC maior que 300 mm ²	70	100	140
EPR	90	130	250
XLPE	90	130	250

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004, p. 100).

Para o dimensionamento da seção do condutor utilizando o critério de ampacidade, deve-se inicialmente determinar a corrente que suprirá a carga desejada. Para sistemas trifásicos ou a trifásicos com neutro, esta corrente pode ser encontrada pela seguinte equação:

$$I_c = \frac{P}{\sqrt{3} \times V \times fp} \quad (3)$$

Onde:

- P - Potência ativa demandada pela carga [W];
- V- Tensão entre fases [V];
- f_p - Fator de potência do circuito.

Em sequência, deve-se determinar o método de instalação do condutor, considerando fatores como tipo de suporte, condições de ventilação, e outros aspectos relevantes para a dissipação de calor. Os tipos de instalação, como condutores em eletrocalhas, leitos, dutos enterrados ou diretamente ao ar livre, bem como as condições associadas a cada um, podem ser encontrados na norma técnica ABNT NBR 5410. Em seguida, deve-se utilizar os fatores de correção de corrente para ajustar a ampacidade dos condutores. Esses fatores de correção garantem que o condutor opere de forma segura e dentro dos limites permitidos, mesmo em situações em que a dissipação de calor é comprometida. Os critérios e métodos de correção que serão utilizados serão abordados a seguir.

3.1.1.1 Fator de correção de temperatura

O fator de correção de temperatura é aplicado ao dimensionamento de condutores para ajustar a capacidade de condução de corrente quando a temperatura ambiente for superior ou inferior ao valor de referência padrão, que é 30°C. Temperaturas ambientes elevadas reduzem a capacidade do condutor de dissipar calor, o que aumenta o risco de sobreaquecimento. Para evitar isso, é necessário ajustar a ampacidade do condutor utilizando um fator de correção apropriado, conforme mostra a tabela a seguir:

Tabela 2 — Fatores de correção de corrente para temperaturas ambientes diferentes 30°C para linhas aéreas.

Temperatura °C	PVC	ERP ou XLPE
Ambiente	Fatores de Correção	
10	1,22	1,15
15	1,17	1,12
20	1,12	1,08
25	1,06	1,04
35	0,94	0,96
40	0,87	0,91

Temperatura °C	PVC	ERP ou XLPE
45	0,79	0,87
50	0,71	0,82
55	0,61	0,76
60	0,50	0,71
65	-	0,65
70	-	0,58
75	-	0,50
80	-	0,41

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004, p. 106).

3.1.1.2 Fator de correção de agrupamento de circuitos

O fator de correção de agrupamento de circuitos deve ser aplicado quando múltiplos condutores são instalados juntos em eletrocalhas, bandejas, dutos ou outros sistemas de suporte. Nessas condições, a proximidade dos condutores restringe a dissipação de calor, resultando em um aumento da temperatura ambiente ao redor dos cabos e, conseqüentemente, na redução da sua capacidade de condução de corrente. Primeiramente, deve-se calcular o número de condutores carregados em cada circuito, conforme mostra tabela abaixo:

Tabela 3 — Número de condutores carregados por tipo de circuito

Esquema de condutores do circuito	Número de condutores carregados a serem adotados
Monofásico a dois condutores	2
Monofásico a três condutores	2
Duas fases sem neutro	2
Duas fases com neutro	3
Trifásico sem neutro	3
Trifásico com neutro	3 ou 4

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004, p. 112).

Figura 10 — Fatores de correção de agrupamento de circuitos

Ref.	Forma de agrupamento de condutores	Número de circuitos ou de cabos multipolares												Tabelas dos métodos de referência
		1	2	3	4	5	6	7	8	9 a 11	12 a 15	16 a 19	≥20	
1	Em feixe : ao ar livre ou sobre superfície; embutidos; em conduto fechado.	1	0,8	0,7	0,65	0,6	0,57	0,54	0,52	0,5	0,45	0,41	0,38	36 a 39 (métodos A a F)
2	Camada única sobre parede, piso, ou em bandeja não perfurada ou prateleira	1	0,85	0,79	0,75	0,73	0,72	0,72	0,71	0,7				36 a 37 (método C)
3	Camada única no teto	0,95	0,81	0,72	0,68	0,66	0,64	0,63	0,62	0,61				
4	Camada única em bandeja perfurada	1	0,88	0,82	0,77	0,75	0,73	0,73	0,72	0,72				38 a 39 (métodos E e F)
5	Camada única sobre leito, suporte etc	1	0,87	0,82	0,8	0,8	0,79	0,79	0,78	0,78				

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004, p. 108).

O circuito trifásico com neutro precisa ser tratado como um sistema composto por quatro condutores ativos. A capacidade de condução de corrente dos condutores deve, portanto, ser ajustada pelo "fator de correção devido ao carregamento do neutro". Esse fator, geralmente fixado em 0,86, é aplicável independentemente do método de instalação, sendo usado para corrigir as capacidades de condução de corrente que se referem a três condutores ativos (ABNT NBR 5410, 2004).

Dessa maneira, o fator de correção pode ser aplicado com base no número de condutores carregados e nas condições de instalação, conforme previsto nas tabelas da ABNT NBR 5410. A norma apresenta diversas tabelas que detalham as formas de instalação de agrupamentos, como condutores dispostos em feixe, em paralelo com diferentes distâncias e em outros arranjos para especificação deste critério.

Por fim, com os fatores de correção de corrente em mãos, é possível calcular a nova corrente ajustada pela seguinte equação:

$$I'_c = \frac{I_c}{K_1 \times K_2} \quad (4)$$

Sendo:

- I'_c - Corrente ajustada do condutor [A];
- K_1 - Fator de correção de temperatura;
- K_2 - Fator de correção de agrupamento de condutores.

Em seguida, deve-se consultar as tabelas da ABNT NBR 5410 para identificar a capacidade correta do condutor. Nessas tabelas, considerando o tipo de instalação, a isolamento e o método de agrupamento, é possível definir a corrente máxima suportada para a seção do condutor escolhida.

Figura 11 — Capacidade de condução de corrente, em amperes, para métodos de instalações de A a D, com condutores de cobre e alumínio, com isolamento em EPR ou XLPE com temperatura ambiente de 30°C

Seções nominais mm ²	Métodos de referência indicados na tabela 33											
	A1		A2		B1		B2		C		D	
	Número de condutores carregados											
	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)
Cobre												
0,5	10	9	10	9	12	10	11	10	12	11	14	12
0,75	12	11	12	11	15	13	15	13	16	14	18	15
1	15	13	14	13	18	16	17	15	19	17	21	17
1,5	19	17	18,5	16,5	23	20	22	19,5	24	22	26	22
2,5	26	23	25	22	31	28	30	26	33	30	34	29
4	35	31	33	30	42	37	40	35	45	40	44	37
6	45	40	42	38	54	48	51	44	58	52	56	46
10	61	54	57	51	75	66	69	60	80	71	73	61
16	81	73	76	68	100	88	91	80	107	96	95	79
25	106	95	99	89	133	117	119	105	138	119	121	101
35	131	117	121	109	164	144	146	128	171	147	146	122
50	158	141	145	130	198	175	175	154	209	179	173	144
70	200	179	183	164	253	222	221	194	269	229	213	178
95	241	216	220	197	306	269	265	233	328	278	252	211
120	278	249	253	227	354	312	305	268	382	322	287	240
150	318	285	290	259	407	358	349	307	441	371	324	271
185	362	324	329	295	464	408	395	348	506	424	363	304
240	424	380	386	346	546	481	462	407	599	500	419	351
300	486	435	442	396	628	553	529	465	693	576	474	396
400	579	519	527	472	751	661	628	552	835	692	555	464
500	664	595	604	541	864	760	718	631	966	797	627	525
630	765	685	696	623	998	879	825	725	1 122	923	711	596
800	885	792	805	721	1 158	1 020	952	837	1 311	1 074	811	679
1 000	1 014	908	923	826	1 332	1 173	1 088	957	1 515	1 237	916	767
Alumínio												
16	64	58	60	55	79	71	72	64	84	76	73	61
25	84	76	78	71	105	93	94	84	101	90	93	78
35	103	94	96	87	130	116	115	103	126	112	112	94
50	125	113	115	104	157	140	138	124	154	136	132	112
70	158	142	145	131	200	179	175	156	198	174	163	138
95	191	171	175	157	242	217	210	188	241	211	193	164
120	220	197	201	180	281	251	242	216	280	245	220	186
150	253	226	230	206	323	289	277	248	324	283	249	210
185	288	256	262	233	368	330	314	281	371	323	279	236
240	338	300	307	273	433	389	368	329	439	382	322	272
300	387	344	352	313	499	447	421	377	508	440	364	308
400	462	409	421	372	597	536	500	448	612	529	426	361
500	530	468	483	426	687	617	573	513	707	610	482	408
630	611	538	556	490	794	714	658	590	821	707	547	464
800	708	622	644	566	922	830	760	682	958	824	624	529
1 000	812	712	739	648	1 061	955	870	780	1 108	950	706	598

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004, p. 102).

3.1.2 Critério de queda de tensão

Para sistemas elétricos de baixa tensão, a queda de tensão deve ser verificada para garantir que não ultrapasse os limites estabelecidos pelas normas, em relação à tensão nominal, a fim de assegurar o funcionamento adequado. Os seguintes valores podem ser definidos (ABNT NBR 5410, 2004):

- 7%, calculados a partir dos terminais secundários do transformador MT/BT, quando o transformador for de propriedade da unidade consumidora;
- 7%, calculados a partir dos terminais secundários do transformador MT/BT da concessionária de energia elétrica, quando o ponto de entrega estiver nesse local;
- 5%, calculados a partir do ponto de entrega, nos casos de fornecimento em tensão secundária de distribuição;
- 7%, calculados a partir dos terminais de saída do gerador, no caso de instalação com grupo gerador próprio.

Em especial para circuitos de motores, é definido que, no momento de sua partida, a queda de tensão nos terminais de alimentação não pode ultrapassar o limite de 10% da tensão nominal e em nenhum caso a queda de tensão nos circuitos terminais pode ser superior a 4% (ABNT NBR 5410, 2004). A seção mínima do condutor de um sistema trifásico pode ser encontrada pela seguinte equação:

$$S = \frac{100 \times \sqrt{3} \times \rho \times \sum(L \times I)}{\Delta V \times V} \quad (5)$$

- S = seção do condutor [mm²];
- ρ = resistividade do material condutor [Ω /m];
- L = comprimento do circuito [m];
- I = corrente do circuito [A];
- ΔV = queda de tensão admissível [%];
- V = tensão entre fases [V].

3.1.3 Critério da seção mínima

Neste critério, os condutores deverão apresentar uma seção mínima de acordo com suas características de linha e isolamento, além do tipo de circuito em que serão utilizados. Desta maneira, a norma ABNT NBR 5410 apresenta uma tabela que determina os valores mínimos de seção para condutores de cobre e alumínio.

Quadro 4 — Seção mínima para condutores de cobre e alumínio.

Tipos de linha		Tipo de utilização para o circuito	Seção mínima para condutores em mm ² - material condutor
Instalações Fixas em geral	Condutores e cabos isolados	Circuito de iluminação	1,5 Cobre 16 Alumínio
		Circuito de força	2,5 Cobre 16 Alumínio
		Circuitos de sinalização e controle	0,5 Cobre
	Condutores nus	Circuitos de força	10 Cobre 16 Alumínio
		Circuitos de sinalização e controle	4 Cobre
Linhas flexíveis com cabos isolados		Para um equipamento específico	Como especificado na norma do equipamento
		Para qualquer outra aplicação	0,75 Cobre
		Circuitos a extra-baixa tensão para aplicações especiais	0,75 Cobre

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004, p. 113).

Portanto, utilizando-se da Quadro 4, pode-se identificar que para circuitos de força, como os circuitos de acionamento de motores, os condutores deverão apresentar seções iguais ou maiores que 2,5 mm² para o caso do cobre e 16 mm² para o caso do alumínio, considerando as condições gerais de instalação.

3.1.4 Cabo neutro

Em sistemas trifásicos equilibrados, onde não há correntes harmônicas ou múltiplos que ultrapassem 15%, e considerando que os condutores estejam adequadamente protegidos contra sobrecorrentes, é permitido reduzir a seção do cabo neutro caso a seção dos condutores de fase seja superior a 25 mm² (ABNT NBR 5410, 2004). Abaixo, apresenta-se uma tabela com os valores determinados de redução da seção do neutro em relação à seção dos demais condutores do sistema.

Quadro 5 — Seção de redução do condutor neutro para sistemas trifásicos.

Seção dos condutores de fase mm ²	Seção reduzida do neutro mm ²
$S \leq 25$	S
35	25
50	25
70	35
95	50
120	70
150	70
185	95
240	120
300	150
400	185

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004, p. 115).

3.2 Eletrodutos

Em instalações elétricas industriais, especialmente em áreas classificadas como atmosferas explosivas, o uso de eletrodutos e condutes requer uma abordagem cuidadosa em relação à proteção e à organização dos circuitos. Esses componentes não apenas acomodam os cabos elétricos, mas também garantem que o sistema mantenha sua integridade sob condições adversas, como calor, umidade, presença de poeiras inflamáveis. Em geral, os eletrodutos são fabricados em PVC ou ferro galvanizado, podendo ser instalados de forma embutida em pisos,

tetos, ou até mesmo de maneira aparente, dependendo das necessidades do projeto e das exigências de segurança (Filho, 2007).

A determinação da ocupação interna de um eletroduto deve ser feita com base na taxa de ocupação, que é calculada pela relação entre a soma das áreas das seções transversais dos condutores, considerando o diâmetro externo de cada condutor, e a área útil da seção transversal do eletroduto, não excedendo os seguintes valores (ABNT NBR 5410, 2004):

- 53% para um único condutor;
- 31% para dois condutores;
- 40% para três ou mais condutores.

Para sistemas elétricos em atmosferas explosivas, é fundamental adotar cuidados adicionais na instalação para garantir a segurança e prevenir e conter em seu interior o risco de ignição. Esses sistemas devem possuir algumas características essenciais, como a utilização de unidades seladoras e componentes intrínsecos, como massas seladoras, que asseguram a vedação adequada contra a entrada de gases ou poeiras inflamáveis. Além disso, os eletrodutos utilizados nesses ambientes são normalmente fabricados em aço galvanizado pesado, com propriedades antichamas, roscados com utilização de roscas NPT, e possuem certificações à prova de explosão e especificações de invólucro, conforme mostra Figura 12.

Figura 12 — Conexão de eletroduto rígido e eletroduto flexível "Ex", com unidade seladora "Ex", para passagem de condutores em motor do elevador de canecas expedição "EL-01".



Fonte: O autor (2024).

Outras características e requisitos específicos para a instalação de eletrodutos em áreas classificadas podem ser encontrados nas normas técnicas ABNT NBR IEC 60079, ABNT NBR 5410 e ABNT NBR 5597.

Para a determinação da área ocupada pelos condutores e o correto dimensionamento do eletroduto, atendendo aos requisitos normativos, a seguinte equação pode ser utilizada (Filho, 2007):

$$S_{cond} = \frac{N_f \times \pi \times D_{cf}^2}{4} + \frac{N_{neutro} \times \pi \times D_{neutro}^2}{4} \quad (6)$$

S_{cond} - Seção ocupada pelos condutores [mm²];

N_f - Número de condutores por fase;

N_n - Número de condutores neutro;

D_f - Diâmetro externo dos condutores fase [mm];

D_n - Diâmetro externo dos condutores neutro[mm].

4 CARACTERIZAÇÃO DE SILO HORIZONTAL DE AÇÚCAR VHP A GRANEL

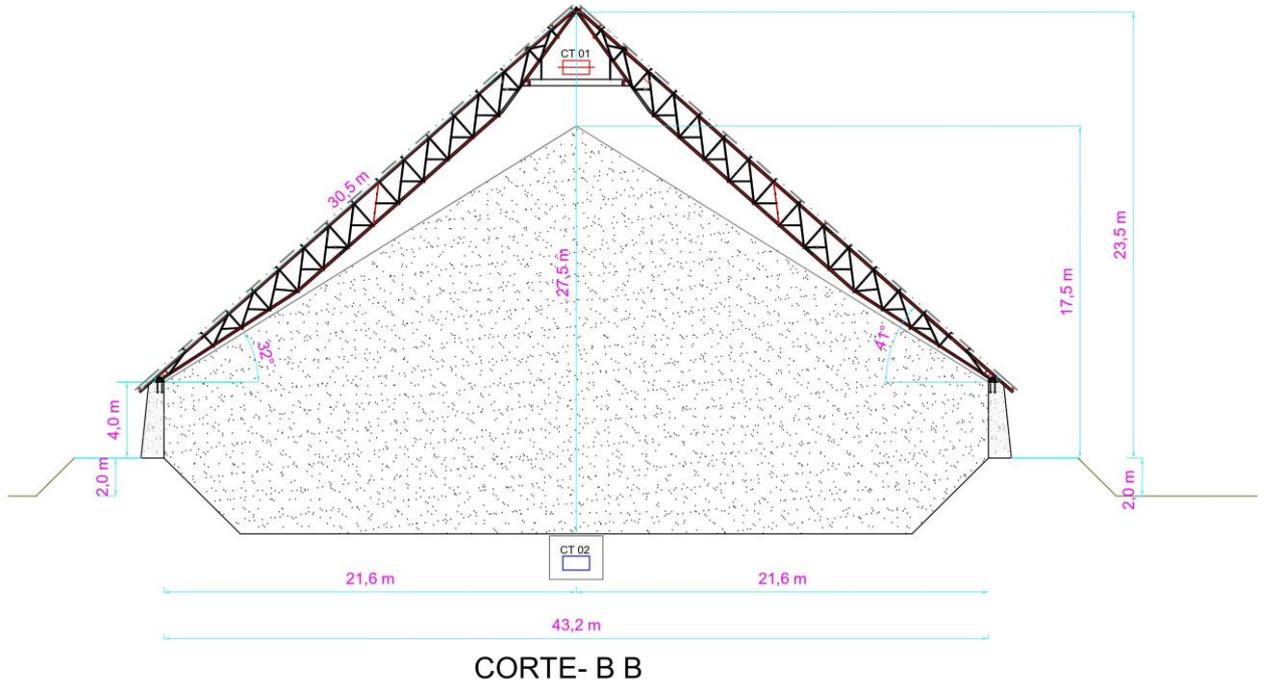
Neste tópico, será apresentado o projeto de um armazém fictício. A análise incluirá os aspectos físicos e as características estruturais do silo, fundamentais para a elaboração de um projeto elétrico adequado. A compreensão detalhada dessas especificações é crucial para garantir que a instalação elétrica não apenas atenda às normas de segurança, mas também funcione de maneira eficiente no contexto operacional. Serão discutidas as diferentes cargas elétricas que o sistema deve suportar, além das condições ambientais que podem influenciar o desempenho do armazém.

4.1 Descrição do armazém Fictício

A análise detalhada dos cortes do projeto é essencial para a elaboração do projeto elétrico, pois fornece as informações necessárias para o correto dimensionamento do projeto executivo. Essa avaliação permite uma compreensão profunda das interações entre as estruturas e os equipamentos, assegurando que todos os aspectos críticos sejam considerados no desenvolvimento da infraestrutura elétrica (Filho,2007)

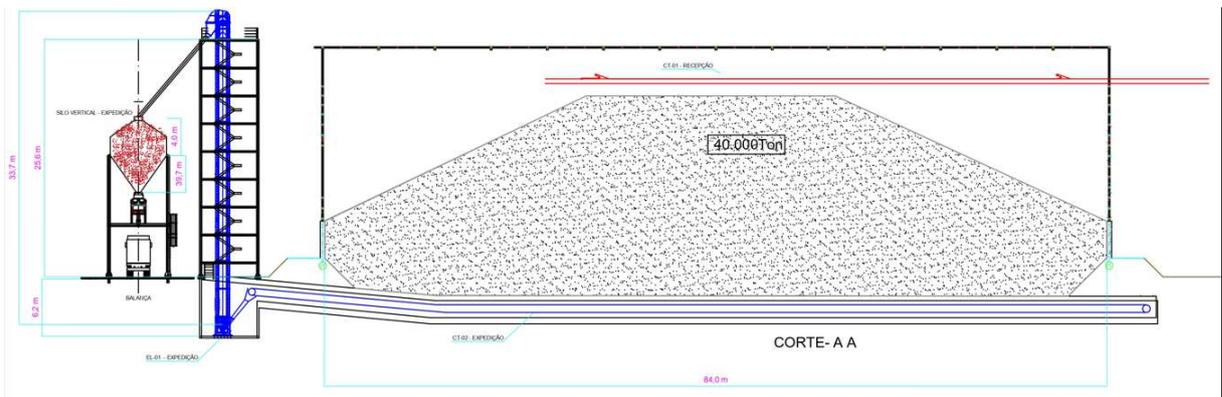
O projeto em questão refere-se a um armazém de açúcar "VHP" a granel do tipo semi-aterrado. Este silo terá um comprimento de 84 metros e uma largura de 43,2 metros e uma altura do nível base do silo ao topo da cobertura de 27,5 metros, e a capacidade máxima de armazenamento será de até 40.000 toneladas. A área total do silo, portanto, será de 3628,8 m². Os telhados do silo, com um comprimento de 30,5 metros, são projetados com duas estruturas inclinadas do tipo "duas águas". As figuras abaixo ilustram, através de cortes longitudinais e transversais, as dimensões e o layout da estrutura do silo.

Figura 13 — Corte longitudinal de armazém a granel de açúcar a ser analisado



Fonte: O autor (2024).

Figura 14 — Corte transversal do armazém de açúcar a granel a ser analisado



Fonte: O autor (2024).

Analisando as imagens acima, é possível obter uma visão clara das dimensões e distâncias em que serão instalados alguns dos principais equipamentos, como as correias transportadoras para expedição e recepção, assim como o elevador de expedição. Essas informações são essenciais para os cálculos futuros e para o levantamento das cargas envolvidas no local, considerando tanto suas características mecânicas quanto elétricas. Além disso, o layout e a distribuição do armazém permitem estabelecer parâmetros para os seguintes projetos de proteção, como os sistemas de aterramento e sistemas de proteção contra descargas atmosféricas.

4.2 Identificação das principais cargas elétricas

A identificação das principais cargas eletromecânicas em um ambiente industrial é essencial para garantir o dimensionamento correto do sistema de alimentação e assegurar a segurança da instalação. A compreensão das características dessas cargas permite a escolha adequada dos componentes elétricos e mecânicos, contribuindo para a eficiência energética e a proteção contra falhas (Filho, 2007). Este subcapítulo abordará as principais cargas de potência inseridas para o bom funcionamento do armazém, com ênfase nos sistemas eletromecânicos que englobam motores elétricos, cruciais para os processos necessários para movimentação e manutenção do açúcar armazenado. Dessa maneira, visando servir como base para o projeto, serão apresentadas as premissas básicas para a estruturação e embasamento dos cálculos de dimensionamento elétrico dos sistemas de potência do armazém. Essas premissas definem os parâmetros operacionais e técnicos necessários para garantir um dimensionamento seguro dos sistemas de alimentação e acionamento das máquinas. Além disso, os motores escolhidos já respeitam tais características, atendendo adequadamente os dispositivos mecânicos existentes e considerando requisitos como regime de funcionamento, torque necessário e capacidade de operação contínua. O armazém contará com um sistema de potência para atender o acionamento e controle de motores, dividido em duas Centrais de controle de motores (CCM's). O primeiro CCM será responsável por atender as cargas de potências móveis, como esteiras transportadoras e elevadores, enquanto o segundo CCM ficará dedicada exclusivamente ao controle do sistema de despoejamento e ventilação do armazém. Dessa forma, as tabelas abaixo especificam os motores que serão alocados em cada CCM, detalhando suas respectivas características.

Quadro 6 — Motores elétricos conectados ao CCM-01.

Numeração Motor	Descrição	Potência Nominal [cv]	Tensão Nominal [V]	Corrente Nominal [A]	Relação Ip/In	Polos	Fator de Potência em 100 %	Distância ao CCM-01 [m]
CT-01	Correia Transportadora Recepção	25	380	37,1	6,9	4	0,81	330
CT-02	Correia Transportadora Armazenamento/Expedição	30	380	44,1	8	4	0,81	290
TP-01	Tripper da correia transportadora Recepção	2	380	3,29	7,1	4	0,80	340
EL-01	Elevador de canecas Expedição	30	380	44,1	8	4	0,81	320

Fonte: O autor (2024).

Quadro 7 — Motores elétricos conectados ao CCM-02.

Numeração Motor	Descrição	Potência Nominal [cv]	Tensão Nominal [V]	Corrente Nominal [A]	Relação Ip/In	Polos	Fator de Potência em 100 %	Distância ao CCM-02 [m]
SCD-01	Sistema central de despoeiramento Expedição	50	380	71,7	7,8	4	0,83	290
VRO-01	Válvula rotativa expedição	1,5	380	2,49	7,4	4	0,80	290
SCD-02	Sistema central de despoeiramento Esteira CT-02 e Elevador de canecas EL-01	30	380	44,1	8,0	4	0,81	300

Numeração Motor	Descrição	Potência Nominal [cv]	Tensão Nominal [V]	Corrente Nominal [A]	Relação Ip/In	Polos	Fator de Potência em 100 %	Distância ao CCM-02 [m]
VRO-02	Válvula rotativa Esteira CT-02 e Elevador de canecas EL-01	1	380	1,67	7,3	4	0,82	300
RH-01	Rosca Helicoidal Partículas 01	3	380	4,78	7,4	4	0,80	290
RH-02	Rosca Helicoidal Partículas 02	3	380	4,78	7,4	4	0,80	300
VI-01	Ventilador insuflamento Esteira CT-02	3	380	4,77	7,8	2	0,81	170
VE-01	Ventilador exaustão Esteira CT-02	3	380	4,77	7,8	2	0,81	280
FP-01	Filtro Pontual esteira CT-01	2	380	3,29	7,1	4	0,80	120

Fonte: O autor (2024).

Todos os motores conectados ao CCM-01 e CCM-02, presentes na Quadro 6 e Quadro 7, foram definidos a partir da linha WEG W22Xtb IR3 Premium, a qual é recomendada para aplicações em zonas 21 e 22, conforme classificação de áreas com atmosferas explosivas com poeira combustível, atendendo aos grupos IIIB e IIIC com grau de proteção IPW66.

4.3 Dimensionamento de condutores

Serão apresentados os resultados do dimensionamento dos condutores elétricos que alimentam os motores descritos anteriormente. O dimensionamento foi conduzido com base nas condições de operação e requisitos normativos, assegurando que os cabos selecionados sejam adequados tanto em termos de segurança quanto de eficiência. Adicionalmente, algumas premissas de projeto serão expostas, servindo como fundamento para a definição das bitolas de todas as cargas definidas, conforme exposto a seguir:

- Temperatura ambiente: 40°C (Ar);
- Material de condutores: Cobre (Resistividade a 20°C: 0,017241 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$);
- Material de isolamento de condutores: Borracha etileno-propileno (EPR) com isolamento de 0,6/1 kV;
- Tipo de eletroduto: Aço galvanizado rígido;
- Quantidade de circuitos por eletroduto: 1;
- Método de instalação segundo NBR 5410: B1 (Condutores unipolares em eletroduto aparente de seção circular sobre parede);
- Tipo de alimentação: Trifásico com Neutro (Cabos isolados ou unipolares);
- Tensão nominal: 220/380 V;
- Frequência nominal: 60 Hz;
- Fator de serviço de motores: 1;
- Queda de tensão máxima admitida: 10% (Partida) e 4% (Regime permanente).

4.3.1 Dimensionamento pelo método de ampacidade

Para o critério de ampacidade, será aplicada a Equação 3 juntamente com os fatores de correção para agrupamento e temperatura. No caso da temperatura ambiente, será utilizado o coeficiente de correção de 0,91, conforme indicado na Tabela 2. Para o agrupamento dos condutores, o coeficiente adotado será 1, de acordo com o método de instalação especificado. Entretanto, devido à presença de carregamento no condutor neutro, um fator adicional de 0,86 deverá ser aplicado ao coeficiente de agrupamento. As tabelas a seguir apresentam os resultados das seções mínimas, a partir da Figura 11, de todos os circuitos para ambos os CCM's, obtidos por meio do critério de ampacidade, considerando os fatores de correção aplicados.

Quadro 8 — Dimensionamento de seção mínima de condutores pelo critério de ampacidade para cargas do CCM-01.

Numeração Motor	Descrição	Corrente Nominal [A]	Corrente Ajustada [A]	Seção Mínima [mm ²]
CT-01	Correia Transportadora Recepção	37,10	47,40	6
CT-02	Correia Transportadora Armazenamento/Expedição	44,10	56,35	10

Numeração Motor	Descrição	Corrente Nominal [A]	Corrente Ajustada [A]	Seção Mínima [mm ²]
TP-01	Tripper da correia transportadora Recepção	3,29	4,20	0,5
EL-01	Elevador de canecas Expedição	44,10	56,35	10

Fonte: O autor (2024).

Quadro 9 — Dimensionamento de seção mínima de condutores pelo critério de ampacidade para cargas do CCM-02.

Numeração Motor	Descrição	Corrente Nominal [A]	Corrente Ajustada [A]	Seção Mínima [mm ²]
SCD-01	Sistema central de despoejamento Expedição	71,70	91,61	25
VRO-01	Válvula rotativa expedição	2,49	3,18	0,5
SCD-02	Sistema central de despoejamento Esteira CT-02 e Elevador de canecas EL-01	44,10	56,35	10
VRO-02	Válvula rotativa Esteira CT-02 e Elevador de canecas EL-01	1,67	2,13	0,5
RH-01	Rosca Helicoidal Partículas 01	4,78	6,10	0,5
RH-02	Rosca Helicoidal Partículas 02	4,78	6,10	0,5
VI-01	Ventilador insuflamento Esteira CT-02	4,77	6,09	0,5
VE-01	Ventilador exaustão Esteira CT-02	4,77	6,09	0,5
FP-01	Filtro Pontual esteira CT-01	3,29	4,20	0,5

Fonte: O autor (2024).

4.3.2 Dimensionamento pelo método de queda de tensão

Neste método, será utilizada a Equação 5, considerando os respectivos valores de corrente, distância e resistividade do material cobre, assegurando que a queda de tensão esteja dentro do limite de 4% para regime permanente estabelecido.

Quadro 10 — Dimensionamento de seção mínima de condutores pelo critério de queda de tensão para cargas em regime permanente CCM-01.

Numeração Motor	Descrição	Queda de tensão máxima admitida [%]	Seção Mínima [mm ²]
CT-01	Correia Transportadora Recepção	4	25
CT-02	Correia Transportadora Armazenamento/Expedição	4	35
TP-01	Tripper da correia transportadora Recepção	4	2,5
EL-01	Elevador de canecas Expedição	4	35

Fonte: O autor (2024).

Quadro 11 — Dimensionamento de seção mínima de condutores pelo critério de queda de tensão para cargas em regime permanente CCM-02.

Numeração Motor	Descrição	Queda de tensão máxima admitida [%]	Seção Mínima [mm ²]
SCD-01	Sistema central de despoejamento Expedição	4	50
VRO-01	Válvula rotativa expedição	4	1,5
SCD-02	Sistema central de despoejamento Esteira CT-02 e Elevador de canecas EL-01	4	35
VRO-02	Válvula rotativa Esteira CT-02 e Elevador de canecas EL-01	4	1,5
RH-01	Rosca Helicoidal Partículas 01	4	4
RH-02	Rosca Helicoidal Partículas 02	4	4
VI-01	Ventilador insuflamento Esteira CT-02	4	2,5
VE-01	Ventilador exaustão Esteira CT-02	4	4
FP-01	Filtro Pontual esteira CT-01	4	1,5

Fonte: O autor (2024).

4.3.3 Dimensionamento pelo método de seção mínima

Para o último dimensionamento dos condutores de fase, é determinado pela Quadro 4 as seções mínimas para condutores de cobre obrigatórias para determinados circuitos. Dessa

forma, pode ser selecionado as seções de cada carga a partir dessa recomendação, conforme explicita tabelas abaixo:

Quadro 12 — Dimensionamento de seção de condutores pelo critério de seção mínima para cargas em regime permanente CCM-01.

Numeração Motor	Descrição	Seção Mínima [mm ²]
CT-01	Correia Transportadora Recepção	2,5
CT-02	Correia Transportadora Armazenamento/Expedição	2,5
TP-01	Tripper da correia transportadora Recepção	2,5
EL-01	Elevador de canecas Expedição	2,5

Fonte: O autor (2024).

Quadro 13 — Dimensionamento de seção de condutores pelo critério de seção mínima para cargas em regime permanente CCM-02.

Numeração Motor	Descrição	Seção Mínima [mm ²]
SCD-01	Sistema central de despoejamento Expedição	2,5
VRO-01	Válvula rotativa expedição	2,5
SCD-02	Sistema central de despoejamento Esteira CT-02 e Elevador de canecas EL-01	2,5
VRO-02	Válvula rotativa Esteira CT-02 e Elevador de canecas EL-01	2,5
RH-01	Rosca Helicoidal Partículas 01	2,5
RH-02	Rosca Helicoidal Partículas 02	2,5
VI-01	Ventilador insuflamento Esteira CT-02	2,5
VE-01	Ventilador exaustão Esteira CT-02	2,5
FP-01	Filtro Pontual esteira CT-01	2,5

Fonte: O autor (2024).

4.3.4 Definições de seções de condutores

Por fim, para o dimensionamento dos condutores, foram aplicados os métodos de seção mínima, ampacidade e queda de tensão, conforme cálculos anteriores, sendo adotada a

maior seção resultante entre esses critérios para cada circuito. O resultado e definição das seções adotadas para cada carga é mostrado a seguir:

Quadro 14 — Seções de condutores adotadas para cargas conectadas ao CCM-01

Numeração Motor	Descrição	Seção Adotada [mm ²]
CT-01	Correia Transportadora Recepção	25
CT-02	Correia Transportadora Armazenamento/Expedição	35
TP-01	Tripper da correia transportadora Recepção	2,5
EL-01	Elevador de canecas Expedição	35

Fonte: O autor (2024).

Quadro 15 — Seções de condutores adotadas para cargas conectadas ao CCM-02

Numeração Motor	Descrição	Seção Adotada [mm ²]
SCD-01	Sistema central de despoejamento Expedição	50
VRO-01	Válvula rotativa expedição	2,5
SCD-02	Sistema central de despoejamento Esteira CT-02 e Elevador de canecas EL-01	35
VRO-02	Válvula rotativa Esteira CT-02 e Elevador de canecas EL-01	2,5
RH-01	Rosca Helicoidal Partículas 01	4
RH-02	Rosca Helicoidal Partículas 02	4
VI-01	Ventilador insuflamento Esteira CT-02	2,5
VE-01	Ventilador exaustão Esteira CT-02	4
FP-01	Filtro Pontual esteira CT-01	2,5

Fonte: O autor (2024).

Nota-se, pelos Quadro 14 e Quadro 15, que, para cargas de maiores potências, as seções adotadas foram maiores quando dimensionadas pelo critério de queda de tensão. Em contrapartida, para a maioria das cargas de menores potências, o método que definiu as maiores seções foi o de seção mínima.

4.3.5 Dimensionamento do cabo neutro

Com os resultados de dimensionamento dos condutores de fase obtidos para as cargas conectadas aos CCM's (Quadro 14 e Quadro 15), será possível determinar a seção do cabo neutro atribuída a cada circuito, utilizando como referência os critérios de redução estabelecidos na Quadro 5. Dessa forma, tem-se:

Quadro 16 — Valores de seções adotadas para o cabo neutro de cada circuito conectado ao CCM-01

Numeração Motor	Descrição	Seção Adotada para Fase [mm ²]	Seção Adotada para Neutro [mm ²]
CT-01	Correia Transportadora Recepção	25	25
CT-02	Correia Transportadora Armazenamento/Expedição	35	25
TP-01	Trippler da correia transportadora Recepção	2,5	2,5
EL-01	Elevador de canecas Expedição	35	25

Fonte: O autor (2024).

Quadro 17 — Valores de seções adotadas para o cabo neutro de cada circuito conectado ao CCM-02.

Numeração Motor	Descrição	Seção Adotada para Fase [mm ²]	Seção Adotada para Neutro [mm ²]
SCD-01	Sistema central de despoejamento Expedição	50	25
VRO-01	Válvula rotativa expedição	2,5	2,5
SCD-02	Sistema central de despoejamento Esteira CT-02 e Elevador de canecas EL-01	35	25
VRO-02	Válvula rotativa Esteira CT-02 e Elevador de canecas EL-01	2,5	2,5
RH-01	Rosca Helicoidal Partículas 01	4	4
RH-02	Rosca Helicoidal Partículas 02	4	4
VI-01	Ventilador insuflamento Esteira CT-02	2,5	2,5
VE-01	Ventilador exaustão Esteira CT-02	4	4
FP-01	Filtro Pontual esteira CT-01	2,5	2,5

Fonte: O autor (2024).

4.4 Dimensionamento de eletrodutos

Será realizado o dimensionamento dos eletrodutos, onde cada circuito será instalado em um eletroduto individual, com três condutores de fase e o neutro, evitando, assim, o agrupamento de condutores. Conforme explicitado pelas premissas de projeto, esses eletrodutos deverão ser de aço galvanizado à prova de explosão (Ex), com rosca NPT. As conexões aos motores serão feitas por meio de eletroduto metálico flexível à prova de explosão (Ex), utilizando-se uniões de junção e terminais, com a adição de unidades seladoras para garantir a impermeabilidade entre os meios.

Para o dimensionamento dos eletrodutos, considera-se que a área útil ocupada pelos cabos não deverá exceder 40% da seção transversal do eletroduto. Assim, com base na Equação 6, o diâmetro dos eletrodutos será determinado a partir do somatório das seções dos três cabos de fase e do neutro, garantindo que a capacidade de preenchimento não ultrapasse o limite permitido. Os diâmetros e dimensões de isolamento EPR dos cabos unipolares utilizados para o cálculo foram retirados do catálogo técnico Condu spar (Condu spar,2024) e as referências de diâmetro nominal dos eletrodutos do catálogo técnico Elecon (Elecon,2024).

Quadro 18 — Dimensionamento de eletrodutos para acomodações de condutores de cargas associadas ao CCM-

01

Numeração Motor	Descrição	Dimensões de Eletrodutos escolhidos ["]	Área útil ocupada por condutores [%]
CT-01	Correia Transportadora Recepção	1.1/2	27,56
CT-02	Correia Transportadora Armazenamento/Expedição	1.1/2	32,55
TP-01	Tripper da correia transportadora Recepção	3/4	28,09
EL-01	Elevador de canecas Expedição	1.1/2	32,55

Fonte: O autor (2024).

Quadro 19 — Dimensionamento de eletrodutos para acomodações de condutores de cargas associadas ao CCM-02

Numeração Motor	Descrição	Dimensões de Eletrodutos escolhidos ["]	Área útil ocupada por condutores [%]
SCD-01	Sistema central de despoeiramento Expedição	2	26,93
VRO-01	Válvula rotativa expedição	3/4	28,09
SCD-02	Sistema central de despoeiramento Esteira CT-02 e Elevador de canecas EL-01	1.1/2	32,55
VRO-02	Válvula rotativa Esteira CT-02 e Elevador de canecas EL-01	3/4	28,09
RH-01	Rosca Helicoidal Partículas 01	3/4	34,81
RH-02	Rosca Helicoidal Partículas 02	3/4	34,81
VI-01	Ventilador insuflamento Esteira CT-02	3/4	28,09
VE-01	Ventilador exaustão Esteira CT-02	3/4	34,81
FP-01	Filtro Pontual esteira CT-01	3/4	28,09

Fonte: O autor (2024).

Portanto, ao analisar o Quadro 18 e a Quadro 19, percebe-se que a área útil de todos os eletrodutos dimensionados para cada circuito atende à obrigatoriedade de não ultrapassar o limite estabelecido, o que confirma o bom dimensionamento deles.

5 AUTOMAÇÃO E CONTROLE DAS PARTIDAS DE MOTORES

A escolha dos métodos de acionamento para os motores elétricos no contexto industrial considera rigorosamente as exigências técnicas do projeto, as normas de segurança, condições específicas do ambiente industrial e as demandas impostas pelos clientes e pela concessionária de energia. Para o acionamento de cargas com determinadas potências, é essencial atender aos requisitos de limitação de corrente de partida, evitar quedas de tensão, fornecimento adequado de energia à máquina e garantir a conformidade com as diretrizes da concessionária quanto à qualidade de energia e impactos na rede.

Ademais, a configuração dos sistemas de proteção é cuidadosamente planejada para garantir que os acionamentos dos motores estejam devidamente protegidos contra as condições adversas do ambiente e as exigências operacionais. Considerando as potências das cargas e os impactos na rede, a escolha dos dispositivos visa assegurar que os motores operem de maneira segura e eficiente dentro de sua faixa de operação de tensão, corrente e frequência, prevenindo interrupções ou danos causados por sobrecargas, curtos-circuitos ou falhas no sistema (Filho, 2007).

Nesta seção, serão discutidos os princípios aplicados nos acionamentos das partidas dos motores, com foco nas escolhas técnicas dos tipos de partidas e suas respectivas funcionalidades dentro do sistema. Também será tratado o dimensionamento dos equipamentos elétricos utilizados para proteção desses acionamentos.

5.1 Seleção das partidas de motores

A partida de motores elétricos representa um dos momentos mais críticos da operação, pois é nessa fase que o motor exige da rede uma corrente significativamente maior do que sua corrente nominal de operação. Esse pico de corrente ocorre devido à necessidade de superar a inércia inicial e iniciar o movimento do sistema mecânico conectado ao motor. Durante essa transição, a corrente de partida pode ser de cinco a sete vezes maior que a corrente nominal, o que pode causar impactos significativos na rede elétrica, como quedas de tensão e sobrecargas. Portanto, o controle adequado do processo de partida é essencial para evitar danos aos equipamentos, minimizar distúrbios na rede elétrica. Nesse contexto, a escolha correta dos métodos de partida e dos dispositivos de proteção desempenha um papel

fundamental na preservação da integridade do sistema elétrico e na longevidade dos motores (Franchi, 2008).

A seguir, serão apresentados os principais tipos de partidas de motores utilizados neste trabalho, com suas características, vantagens e os critérios de seleção aplicados.

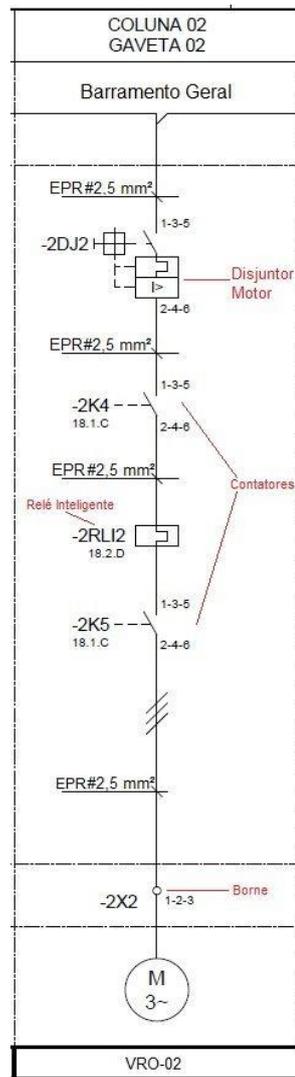
5.1.1 Partida direta

A partida direta é a forma mais simples e tradicional de acionamento de um motor elétrico trifásico. Nesse método, as fases de alimentação são conectadas diretamente ao motor. Normalmente, as concessionárias de energia estabelecem que, em alimentações industriais, partidas diretas são permitidas para motores de até 10 cv. Esse limite visa evitar que os elevados picos de corrente que causem distúrbios no fornecimento de eletricidade, como quedas de tensão ou sobrecarga na rede elétrica. Esse tipo de acionamento é caracterizado por uma elevada corrente de partida, necessária para vencer a inércia do motor. Durante essa fase, a corrente pode ser de seis a oito vezes superior à corrente nominal, o que exige uma rede elétrica robusta e dispositivos de proteção adequadamente dimensionados. As vantagens desse método incluem a simplicidade de projeto e implementação, o baixo custo em comparação com outros tipos de partida e a rápida resposta do motor ao acionamento. Entretanto, há desvantagens importantes a considerar, como a queda de tensão no circuito de alimentação, que pode afetar o desempenho de equipamentos próximos ou conectados ao mesmo sistema. Além disso, há a necessidade de superdimensionar cabos e dispositivos de proteção para evitar sobrecargas, o que eleva os custos do sistema. Outro ponto crítico são as restrições impostas pela concessionária de energia, que limitam a queda de tensão nos pontos terminais, tornando essa solução menos viável para motores de maior potência em instalações mais complexas (Franchi, 2008).

À medida que o motor se aproxima de sua velocidade nominal, a corrente de partida elevada começa a diminuir gradualmente, estabilizando-se em valores próximos à corrente nominal. Isso ocorre porque, com o aumento da velocidade, o motor gera uma força contra eletromotriz que se opõe à tensão de alimentação. Dessa forma, a tensão eficaz aplicada ao motor diminui, reduzindo também a corrente necessária para manter o motor em operação. Além disso, o conjugado de partida varia proporcionalmente ao quadrado da tensão de alimentação, ou seja, qualquer variação na tensão tem um impacto significativo no torque disponível para iniciar o movimento do motor (Filho, 2007).

A imagem da Figura 15 exemplifica um diagrama unifilar de partida direta para acionamento de um motor elétrico associado a uma carga. Note que, não há quaisquer elementos elétricos que irão controlar e reduzir a sua corrente de partida durante o acionamento, há apenas a inserção de dispositivos de proteção e manobra.

Figura 15 — Diagrama unifilar de partida direta da carga VRO-02.



Fonte: O autor (2024).

5.1.2 Soft-starter

A *soft starter* é um dispositivo eletrônico, composto por chaves estáticas, que permite controlar e limitar a corrente de partida dos motores de forma eficiente. Esse controle é feito ajustando progressivamente a tensão aplicada ao motor durante o processo de partida, utilizando tiristores em configurações específicas. Esses tiristores funcionam como chaves

eletrônicas, regulando a tensão de maneira suave e gradual, evitando picos de corrente e minimizando impactos mecânicos. Além disso, a progressão da rotação pode ser controlada por meio de uma rampa de aceleração, proporcionando uma transição suave até a velocidade nominal. A *soft starter* também oferece controle sobre a proteção térmica do motor, garantindo que ele não seja sobrecarregado, e assegura a proteção mecânica, evitando esforços bruscos nos componentes durante a partida. Essa solução é ideal para motores de maior potência, onde o controle da corrente de partida e a proteção do sistema são essenciais para uma operação segura e estável (Filho, 2007; Franchi, 2008).

Dependendo do modelo de *soft starter* escolhido, as funções podem variar, mas as principais funcionalidades incluem o ajuste das rampas de aceleração e a limitação de corrente de forma ajustável, permitindo controle preciso sobre os picos de corrente durante a partida. Além disso, o conjugado de partida pode ser ajustado para fornecer o torque necessário no início do movimento, e alguns modelos também oferecem a opção de frenagem por injeção de corrente contínua, que desacelera o motor de forma controlada. A maioria dos modelos ainda inclui proteções contra sobrecarga, aquecimento excessivo e desequilíbrios na rede, garantindo a segurança e o funcionamento confiável do sistema (Franchi, 2008).

Figura 16 — Dispositivo *Soft- Starter* Trifásico Danfoss MCD 600

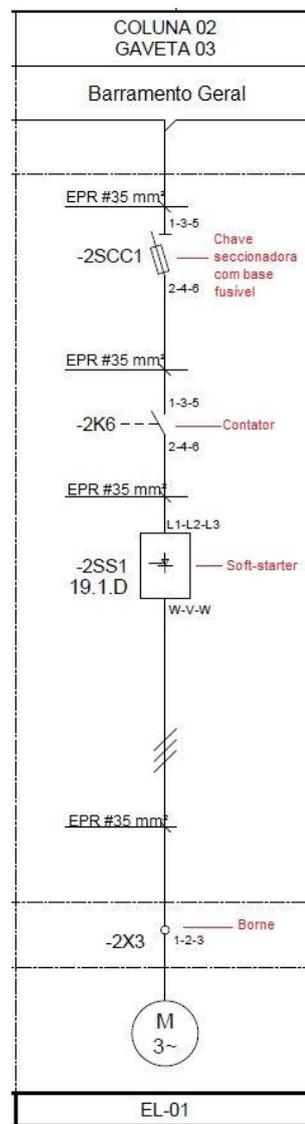


Fonte: Danfoss (2024).

Outra vantagem adicional da *soft starter* é sua flexibilidade na configuração de força. Ela pode ser conectada diretamente aos dispositivos de proteção do motor, como disjuntores e relés térmicos, ou ser configurada em ligação paralela para controlar vários motores simultaneamente, ou ainda ser conectada de forma sequencial a múltiplos motores, dependendo da necessidade da aplicação.

Apesar das diversas vantagens oferecidas pela *soft starter*, é importante considerar algumas desvantagens. O custo inicial tende a ser mais alto em comparação com sistemas de partida direta, especialmente para motores de menor potência. Além disso, a *soft starter* atua apenas nas fases de partida e parada, não fornecendo controle contínuo de velocidade, o que pode ser uma limitação em aplicações que exigem ajustes dinâmicos durante a operação. Outro fator a ser observado é que, dependendo da aplicação, pode ser necessário espaço adicional no painel elétrico para a instalação do dispositivo e seus componentes. Por fim, em ambientes sujeitos a grandes variações de tensão, o desempenho da *soft starter* pode ser afetado, comprometendo sua eficácia (Franchi, 2008).

Figura 17 — Diagrama unifilar de força para partida de motor da carga EL-01 a partir de acionamento por *Soft-starter*.



Fonte: O autor (2024).

5.1.3 Escolhas de partidas

A escolha dos métodos de partida para os motores do CCM 1 e CCM 2 será fundamentada em critérios técnicos e econômicos, levando em conta as potências dos motores, o tipo de carga, os custos envolvidos e as preferências do cliente. O objetivo é garantir um equilíbrio entre eficiência, segurança e viabilidade financeira, proporcionando a melhor solução para o sistema.

Considerando as características dos motores que serão acionados, foi determinado que motores de até 10 cv ou 7,5 kW deverão ser acionados por partida direta. Esse critério foi adotado com base na simplicidade, baixo custo e rápida implementação da partida direta, que é adequada para motores de menor potência, onde os picos de corrente podem ser suportados pela rede elétrica sem causar distúrbios significativos.

Por outro lado, para motores com potência superior a 10 cv, foi necessária a implementação de *soft starters* no acionamento para proporcionar um maior controle sobre a corrente de partida e minimizar os choques mecânicos durante o processo de arranque. Além disso, a utilização de *soft starters* oferece uma proteção adicional ao motor e permite um controle mais eficiente e seguro da reversão, quando necessário, garantindo uma operação mais estável e protegida em comparação com outros métodos de partida.

As tabelas abaixo apresentam os modelos de partidas selecionados para cada motor, considerando a potência e os requisitos operacionais, bem como o modelo de *soft starter* utilizado nos casos em que se aplicam.

Quadro 20 — Tipos de partida definidos para acionamentos de motores do CCM-01 e CCM-02

CCM-01					
Numeração Motor	Descrição	Potência do Motor [cv]	Tipo de Partida	Reversão	Modelo Soft-Starter
CT-01	Correia transportadora Recepção	25	<i>Soft-Starter</i>	Não	SSW900B0045T5E2
CT-02	Correia transportadora Armazenamento/Expedição	30	<i>Soft-Starter</i>	Não	SSW900B0061T5E2
TP-01	Tripper da correia transportadora Recepção	2	Direta	Sim	N.A

EL-01	Elevador de canecas Expedição	30	<i>Soft- Starter</i>	Não	SSW900B0061T5E2
CCM-02					
Numeração Motor	Descrição	Potência do Motor [cv]	Tipo de Partida	Reversão	Modelo Soft-Starter
SCD-01	Sistema central de despoeiramento Expedição	50	<i>Soft- Starter</i>	Não	SSW900B0085T5E2
VRO-01	Válvula rotativa Expedição	1,5	Direta	Não	N.A
SCD-02	Sistema central de despoeiramento Esteira CT-02 e Elevador de canecas EL-01	30	<i>Soft- Starter</i>	Não	SSW900B0061T5E2
VRO-02	Válvula rotativa Esteira CT-02 e Elevador de canecas EL-01	1	Direta	Não	N.A
RH-01	Rosca Helicoidal Partículas 01	3	Direta	Não	N.A
RH-02	Rosca Helicoidal Partículas 02	3	Direta	Não	N.A
VI-01	Ventilador insuflamento Esteira CT-02	3	Direta	Não	N.A
VE-01	Ventilador exaustão Esteira CT-02	3	Direta	Não	N.A
FP-01	Filtro Pontual esteira CT-01	2	Direta	Não	N.A

Fonte: O autor (2024).

* N.A - Não se aplica.

Pelo quadro anterior, é possível observar que a grande maioria das cargas será acionada por partida direta, devido à sua natureza de baixa potência. Apenas a carga do *tripper*, pela necessidade de trafegar em ambos os sentidos na correia transportadora, exigiu a aplicação de reversão.

O modelo WEG SSW900, da linha de alto desempenho, foi selecionado por suas funcionalidades avançadas, como o controle preciso de rampa de aceleração e desaceleração, que otimiza o desempenho dos motores e reduz o desgaste mecânico. Conta com proteção integrada contra sobrecarga térmica, curto-circuito, falha de fase e desbalanceamento de tensão, simplificando o sistema e eliminando a necessidade de dispositivos adicionais de

proteção. As *soft starters* trifásicas desta linha possuem contadores internos de by-pass, reduzindo o consumo de energia durante a operação. Operam em uma faixa de 200-525 Vca, com chassi IP20, otimizando o espaço no painel CCM. A alimentação de comando é em 220-240 Vca, garantindo fácil integração aos sistemas. Os dispositivos são projetados para suportar correntes superiores às nominais dos motores, assegurando alta confiabilidade mesmo em condições anormais de operação.

5.2 Dimensionamento e seleção de proteção para acionamentos motores

O dimensionamento adequado dos dispositivos de proteção para acionamento de motores é crucial para assegurar a integridade do sistema e dos motores envolvidos. Neste capítulo, será apresentada a análise dos principais dispositivos de proteção utilizados, como disjuntores, relés, fusíveis e contadores, com ênfase em suas características e critérios de seleção. Um circuito estará devidamente protegido contra sobrecorrentes quando todos os seus componentes possuírem capacidades térmicas e dinâmicas compatíveis, ou inferiores, aos limites estabelecidos pelos dispositivos de proteção. Dessa forma, garante-se que os elementos do circuito não serão submetidos a esforços superiores aos que os dispositivos de proteção podem controlar, assegurando a integridade e segurança do sistema elétrico (Filho, 2007).

Além disso, serão discutidas as combinações de proteções que serão utilizadas para os acionamentos das cargas do projeto, visando garantir uma proteção integrada e eficiente. Essas combinações incluirão a interação entre diferentes dispositivos, assegurando que as cargas sejam protegidas conforme suas necessidades operacionais específicas.

5.2.1 Fusíveis

Os fusíveis são dispositivos de proteção contra curtos-circuitos, desativando o circuito quando ocorre uma falha interna. Eles protegem tanto a linha quanto os equipamentos adjacentes e atuam como limitadores de corrente, impedindo que a corrente de curto atinja níveis perigosos. Seu funcionamento baseia-se na fusão de um elemento metálico, que se rompe quando a corrente excede o seu valor nominal especificado. Nesse momento, o material isolante presente no fusível isola o circuito, interrompendo o fluxo de energia e garantindo a segurança do sistema (Franchi, 2008).

Além da corrente nominal, os fusíveis são classificados pela sua capacidade de interrupção, de acordo com as classes g e a.

- Classe g: São fusíveis que podem suportar a corrente nominal por tempo indeterminado e são capazes de operar desde o menor valor de sobrecorrente até a corrente nominal de desligamento. Eles atuam em toda a faixa de sobrecarga, desligando o circuito mesmo com pequenas variações de corrente.
- Classe a: Esses fusíveis também suportam a corrente nominal indefinidamente, mas operam apenas a partir de múltiplos da corrente nominal de desligamento. Eles são projetados para reagir a níveis mais altos de sobrecorrente, sendo conhecidos como fusíveis de faixa parcial.

Além dessas classes de função, há classificações que indicam o tipo de equipamento protegido, como L-G, M, R, B, entre outros. Os fusíveis devem ser especificados por classes de serviço, que combinam a classe de função (g ou a) com o objeto protegido, resultando em classificações como aM (fusíveis para proteção de motores) ou gR (fusíveis de uso geral para semicondutores), por exemplo.

No uso industrial, dois tipos de fusíveis se destacam: os fusíveis NH e os ultrarrápidos, cada um com aplicações específicas. Os fusíveis NH são utilizados em sistemas que demandam alta capacidade de interrupção, suportando elevados valores de corrente e tensão, sendo ideais para circuitos com sobrecargas de curta duração, como acionamentos de motores. Já os fusíveis ultrarrápidos são aplicados em circuitos que possuem equipamentos eletrônicos sensíveis oferecendo um tempo de resposta muito rápido para extinguir curtos-circuitos e proteger dispositivos que requerem uma interrupção imediata (Franchi, 2008). Para a aplicação de fusíveis de proteção em *soft starters*, é recomendado o uso de fusíveis do tipo aR (ultrarrápidos), ligeiramente superdimensionados (cerca de 20%) em relação à corrente nominal do motor. Isso ocorre porque, ao utilizar uma *soft starter*, as sobrecargas típicas da partida são eliminadas, tornando desnecessário o uso de fusíveis projetados para suportar picos de corrente. O fusível aR é ideal para proteger os semicondutores do *soft starter* e atuar rapidamente em caso de curto-circuito. Além disso, no catálogo do fabricante, são descritos os fusíveis ideais para cada tipo de aparelho, orientando corretamente a seleção de acordo com as especificações da *soft starter* utilizada

5.2.2 Disjuntores motores

Os disjuntores motores são dispositivos eletromecânicos que desempenham simultaneamente duas funções essenciais em sistemas de acionamento de motores: a de proteção e a de manobra. No aspecto de proteção, eles são responsáveis por detectar sobrecorrente e curto-circuito, desarmando o circuito quando as correntes ultrapassam os limites seguros estabelecidos, prevenindo danos ao motor e aos equipamentos associados. A proteção é dividida em duas partes principais: a proteção térmica, que atua em casos de sobrecarga prolongada, e a proteção magnética, que reage rapidamente a curtos-circuitos ou falhas graves. Além da proteção, os disjuntores motores também atuam como dispositivos de manobra, permitindo o acionamento e desligamento seguro do motor, operando de forma manual ou automática conforme necessário. Dessa forma, o disjuntor motor substitui a necessidade de dispositivos separados para manobra e proteção, integrando essas duas funções em um único componente, garantindo não apenas a segurança do motor, mas também a facilidade de operação e controle em ambientes industriais.

O dimensionamento de um disjuntor motor visa identificar a corrente nominal do motor. O disjuntor deve permitir que essa corrente flua durante a operação normal sem desarmar. A proteção térmica deve ser ajustada para um valor levemente superior à corrente nominal, garantindo proteção contra sobrecargas prolongadas. Já a proteção magnética precisa ser configurada para atuar rapidamente em caso de curto-circuito, com ajustes entre 8 a 12 vezes a corrente nominal. Além disso, a capacidade de interrupção do disjuntor deve ser suficiente para suportar a maior corrente de curto-circuito esperada no sistema, assegurando proteção eficiente ao motor e ao sistema elétrico.

Figura 18 — Disjuntor Motor WEG AZ MPW40i-3-U020,



Fonte: Adaptado de WEG (2024).

5.2.3 Relés inteligentes

Os relés inteligentes são dispositivos avançados de proteção e monitoramento, projetados para melhorar a segurança e eficiência em sistemas elétricos. Eles são capazes de monitorar parâmetros como corrente, tensão, potência e temperatura, além de detectar falhas como sobrecarga, curto-circuito, desbalanceamento de fase, sobrecorrente, rotor bloqueado e falta de fase. Essas funções permitem que atuem como substitutos para diversos dispositivos de proteção tradicionais, como relés térmicos e relés de sobrecorrente. Normalmente, os relés inteligentes são associados a disjuntores motores e contatores, auxiliando na proteção e supervisão de motores elétricos. Além disso, eles possuem comunicação via diferentes protocolos industriais como Modbus, Profibus e Ethernet, facilitando a integração com sistemas de automação e supervisão, possibilitando controle em tempo real e facilitando a manutenção preventiva.

Figura 19 — Relé Inteligente SRW01 - WEG



Fonte: Adaptado de WEG (2024).

5.2.4 Chaves seccionadoras

As chaves seccionadoras são dispositivos de manobra utilizados para isolar circuitos elétricos de forma segura, permitindo intervenções e manutenções sem a presença de tensão no circuito. Elas são amplamente utilizadas para garantir o seccionamento de áreas específicas do sistema elétrico. As chaves seccionadoras, no entanto, não possuem a capacidade de interromper correntes de carga, ou seja, devem ser operadas somente quando o circuito está

sem corrente. A sua função principal é a de criar um ponto visível de isolamento no sistema, proporcionando segurança para os técnicos e operadores durante manutenções (Franchi, 2008). Esses dispositivos são frequentemente utilizados em conjunto com disjuntores e fusíveis, que realizam a proteção contra curto-circuito. A chave seccionadora oferece a capacidade de manobrar o circuito de forma manual, garantindo que o isolamento ocorra de forma segura antes de qualquer intervenção. Existem diferentes tipos de chaves seccionadoras, como as chaves com base de fusível, que integram a proteção de sobrecorrente no mesmo dispositivo, otimizando o espaço e a funcionalidade no sistema.

5.2.5 Contatores

Os contatores são dispositivos eletromecânicos utilizados tanto em circuitos de comando quanto em circuitos de força, permitindo o controle de cargas elétricas de alta potência através de um circuito de comando de baixa corrente. Sua principal função é permitir o acionamento e desligamento de equipamentos de maior demanda elétrica, como motores e aquecedores, sem que o operador precise interagir diretamente com correntes elevadas. O contator funciona por meio de uma bobina que, ao ser energizada, movimenta seus contatos, abrindo ou fechando o circuito de força. (Filho, 2007). Dessa forma, o circuito de comando, que opera com correntes menores, controla indiretamente o fluxo de energia no circuito de potência.

Os contatores AC são classificados de acordo com o tipo de carga que controlam:

- AC-1: Para cargas não-indutivas, como aquecedores resistivos e iluminação.
- AC-2: Usado em motores com rotor de anéis, projetado para correntes elevadas na partida.
- AC-3: Destinado a motores trifásicos de gaiola, ideal para acionamento e desligamento sob carga.
- AC-4: Aplicado em motores com partida, frenagem e reversão, lidando com picos frequentes de corrente.

Para circuitos de motores trifásicos, os contatores do tipo AC-3 são comumente utilizados, sendo projetados para suportar o acionamento e desligamento do motor em diversas condições de operação. No caso de um motor sendo acionado por partida direta, os contatores do tipo AC-3 podem ser dimensionados seguindo os seguintes requisitos:

Em regime permanente:

$$I_e > I_n \quad (7)$$

Partida:

$$I_e > \frac{I_{conex\tilde{a}o}}{6} \quad (8)$$

Desconexão:

$$I_e > \frac{I_{ruptura}}{6 \text{ ou } 8} \quad (9)$$

Sendo:

I_e - Corrente nominal do contator;

I_n - Corrente nominal do motor;

$I_{conex\tilde{a}o}$ - Máxima corrente de partida;

$I_{ruptura}$ - Máxima corrente a ser interrompida

5.2.6 Escolhas de proteções para acionamento

Para a determinação dos dispositivos de proteção dos circuitos de acionamento das máquinas, é essencial considerar tanto as opções técnicas disponíveis quanto as solicitações do cliente, buscando integrar a segurança elétrica com a viabilidade econômica. Esse equilíbrio permite que a proteção dos equipamentos seja assegurada sem comprometer o orçamento do projeto.

Dessa forma, foi definido que, para o acionamento com partidas diretas, será necessário alinhar o uso de disjuntores motores, contadores e relés inteligentes para garantir a proteção e o controle adequado do sistema. Já no caso de partidas por soft-starter, que incorpora diversas proteções internas, como a proteção contra sobrecorrente, a solução será a

associação desse dispositivo com contadores e chaves seccionadoras com bases fusíveis, oferecendo uma proteção complementar robusta ao sistema de acionamento.

Para efeitos de cálculos e, conforme fornecido pelo cliente, foi considerada uma corrente de curto-circuito nos barramentos dos CCM's de 50 kA. Esse valor será utilizado no dimensionamento dos dispositivos de proteção. A seguir, apresenta-se um quadro detalhando a relação dos equipamentos de proteção e manobra utilizados para cada circuito motor, incluindo suas respectivas especificações técnicas:

Quadro 21 — Seleção de dispositivos de proteção e manobra para acionamentos de motores do CCM-01 e CCM-02.

CCM 01								
Numeração Motor	Tipo de Partida	Corrente Nominal [A]	Soft-starter	Chave Seccionadora	Fusível	Disjuntor Motor	Relé Inteligente de sobrecarga	Contator
CT-01	Soft-Starter	37,10	SSW900B00045T5E2	OS125GD12P	FNH00-125K-A	NA	NA	CWB50-11-30D33
CT-02	Soft-Starter	44,10	SSW900B0061T5E2	OS125GD12P	FH00-160K-A	NA	NA	CWB50-11-30D33
TP-01	Direta	3,29	NA	NA	NA	MPW40t-3-U004	SRW01-UCE3TE1E47 + UMC1	CWB9-11-3033
EL-01	Soft-Starter	44,10	SSW900B0061T5E2	OS125GD12P	FH00-160K-A	NA	NA	CWB50-11-30D33
CCM 02								
Numeração Motor	Tipo de Partida	Corrente Nominal [A]	Soft-starter	Chave Seccionadora	Fusível	Disjuntor Motor	Relé Inteligente de sobrecarga	Contator
SCD-01	Soft-Starter	71,70	SSW900B0085T5E2	OS125GD12P	FH00-250K-A	NA	NA	CWB80-11-30D33
VRO-01	Direta	2,49	NA	NA	NA	MPW40t-3-DO25	SRW01-UCE3TE1E47 + UMC1	CWB9-11-3033
SCD-02	Soft-Starter	44,10	SSW900B0061T5E2	OS125GD12P	FH00-160K-A	NA	NA	CWB50-11-30D33

VRO-02	Direta	1,67	NA	NA	NA	MPW40t-3-DO25	SRW01- UCE3TE1E47 + UMC1	CWB9- 11-3033
RH-01	Direta	4,78	NA	NA	NA	MPW40t-3-DO63	SRW01- UCE3TE1E47 + UMC2	CWB9- 11-3033
RH-02	Direta	4,78	NA	NA	NA	MPW40t-3-DO63	SRW01- UCE3TE1E47 + UMC2	CWB9- 11-3033
VI-01	Direta	4,77	NA	NA	NA	MPW40t-3-U004	SRW01- UCE3TE1E47 + UMC2	CWB9- 11-3033
VE-01	Direta	4,77	NA	NA	NA	MPW40t-3-U004	SRW01- UCE3TE1E47 + UMC2	CWB9- 11-3033
FP-01	Direta	3,29	NA	NA	NA	MPW40t-3-U004	SRW01- UCE3TE1E47 + UMC1	CWB9- 11-3033

Fonte: O autor (2024).

* N.A - Não se aplica.

Todos os dispositivos de proteção e manobra foram dimensionados e selecionados corretamente, considerando as correntes nominais dos motores, a capacidade de interrupção de curto-circuito de 50 kA nos barramentos dos CCM's. As *soft starters* utilizadas foram deduzidas da fabricante WEG, enquanto as chaves seccionadoras foram escolhidas da fabricante ABB, combinadas com fusíveis ultrarrápidos da WEG. Os disjuntores, relés inteligentes e contadores foram escolhidos de acordo com as características de acionamento de cada circuito, utilizando ferramentas de integração entre dispositivos de proteção da WEG, garantindo uma proteção eficiente contra sobrecargas e curtos-circuitos.

6 CONCLUSÃO

Este documento ofereceu uma visão abrangente dos processos de produção do açúcar VHP, abordando cada etapa de forma detalhada, desde a recepção da cana-de-açúcar até o armazenamento em silos horizontais. Inicialmente, foram descritas as fases de extração da matéria-prima, que incluem a moagem e o tratamento do caldo, seguidas pelos processos de evaporação, cristalização e centrifugação, essenciais para garantir a qualidade e pureza do açúcar produzido. Também foram discutidos os diferentes métodos de armazenagem, como o uso de 'Big Bags' e o armazenamento a granel, destacando a importância desses processos para a preservação das características do açúcar "VHP".

Além disso, o estudo apresentou uma análise detalhada das propriedades do açúcar VHP, ressaltando suas principais características, como o elevado grau de polarização, baixa umidade e estabilidade durante o transporte e armazenamento. Essas propriedades são fundamentais para compreender a logística eficiente e os cuidados necessários para manter a qualidade do produto ao longo do tempo.

Foi igualmente relevante a discussão sobre os desafios e riscos associados ao armazenamento de açúcar a granel, especialmente em relação à formação de atmosferas explosivas devido à poeira de açúcar. Controlar fatores como umidade, ventilação e temperatura é essencial para evitar a deterioração do produto, além de garantir a segurança no uso dos equipamentos envolvidos nesse processo.

Outro ponto central foi o entendimento das normas NBR IEC 60079 e ABNT NBR 5410, que tratam das necessidades especiais de ambientes com atmosferas explosivas e poeira combustível, como é o caso dos armazéns de açúcar "VHP". O conhecimento dessas normativas foi fundamental para orientar a elaboração do projeto, garantindo que os procedimentos adotados estivessem em conformidade com os padrões de segurança. O dimensionamento adequado dos sistemas elétricos, a seleção dos dispositivos de proteção e o uso de equipamentos certificados, aliados ao entendimento das classificações de materiais e equipamentos específicos para esses ambientes, foram cruciais para assegurar que o projeto fosse executado de forma segura e eficiente.

A elaboração de um armazém fictício permitiu uma abordagem prática para o dimensionamento de condutores, eletrodutos e sistemas de proteção, com base nas demandas elétricas previstas. Esse modelo teórico facilitou a aplicação dos conceitos normativos e

técnicos, garantindo eficiência e segurança no fornecimento de energia. O dimensionamento dos condutores considerou fatores como ampacidade, quedas de tensão e seções mínimas, assegurando a adequação dos circuitos às cargas projetadas. Da mesma forma, o dimensionamento das proteções dos sistemas de acionamento, como fusíveis, disjuntores e relés, foi fundamental para proteger os motores e demais equipamentos contra curto-circuitos e sobrecargas. A escolha correta do tipo de acionamento dos motores, como partidas diretas ou *soft starters*, foi realizada com base nas demandas do cliente e nas características técnicas das cargas, garantindo um equilíbrio entre eficiência, custo e confiabilidade operacional. Além disso, a escolha dos eletrodutos foi feita com foco na proteção e correto encaminhamento dos condutores, levando em conta as condições específicas de atmosferas explosivas. Com isso, o projeto foi desenvolvido em conformidade com as normas de segurança, selecionando dispositivos e materiais apropriados para operar em ambientes críticos. Este estudo consolidou o conhecimento de engenharia elétrica, cujos resultados foram fundamentais para o entendimento completo da tarefa proposta, ressaltando a importância do planejamento e da análise técnica em projetos industriais de alto risco.

Entretanto, é importante destacar que este estudo representa apenas uma parte de um conjunto mais amplo de análises necessárias para a elaboração completa de um projeto elétrico industrial. Para a conclusão integral de um projeto como este, é necessário abordar também outros aspectos complementares, como os estudos de SPDA (Sistema de Proteção contra Descargas Atmosféricas), o dimensionamento adequado do sistema de aterramento, a análise do sistema de iluminação, entre outros fatores, como a eficiência energética e a integração dos diferentes subsistemas que compõem a instalação.

Dessa forma, este trabalho constitui uma base sólida para futuras padronizações e aprimoramentos. A estrutura e os resultados apresentados servem como um referencial técnico que, junto aos estudos complementares, contribuirão para a elaboração de um projeto elétrico industrial completo e eficiente. A correta aplicação das normas e dos conceitos de engenharia elétrica neste contexto é fundamental para garantir a segurança, eficiência operacional e durabilidade das instalações. Assim, este estudo estabelece não apenas os alicerces para o desenvolvimento contínuo das soluções de engenharia aplicáveis a este armazém, mas também uma plataforma para futuras melhorias tecnológicas e adaptações, conforme novas demandas surgirem.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR IEC 60079-0**: Atmosferas explosivas. 4 ed. Rio de Janeiro, 2020.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR IEC 60079-14**: Projeto, seleção e montagem de instalações elétricas. 3 ed. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR IEC 60079-2**: Classificação de áreas. 2 ed. Rio de Janeiro: Associação brasileira de normas técnicas, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410**: Instalações elétricas de baixa tensão. 2 ed. Rio de Janeiro, 2004. 209 p.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa n. 42, de 12 de outubro de 2017. **Diário Oficial da União**: Seção 1, 17 de outubro de 2017, ano 2017. Disponível em: https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/39939558/do1-2018-09-06-instrucao-normativa-n-47-de-30-de-agosto-de-2018-39939440. Acesso em: 13 set. 2024.
- CASTRO, Marcos Daniel Gomes de; SOUZA, Daniel Tadeu. Gestão da armazenagem: estudo dos benefícios e dificuldades no setor sucroalcooleiro. *In*: CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO, n. 10. 2014. Anais [...] Rio de Janeiro: Instituto Nacional de tecnologia, 2014. Disponível em: https://unifac.edu.br/images/materiais_de_apoio/adm/adm_materiais/armazenagem_setor_sucroalcooleiro.pdf. Acesso em: 3 set. 2024.
- CASTRO, S. B.; ANDRADE, S. A. C. **Engenharia e Tecnologia açucareira**. Pernambuco: UFPE, 2006.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO: Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. Brasília,DF, v. 11,n.4, abril 2024. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana>>. Acesso em: 2 set. 2024.
- CONDUSPAR. **Cabo Flex HEPR 0,6/1 kV**: Catálogo técnico. Condu spar. Disponível em: <<https://conduspar.com.br/produtos/baixa-tensao/cabo-flex-hepr-06-1-kv/>>. Acesso em: 15 out. 2024.
- CORPO DE BOMBEIROS DO ESTADO DO PARANÁ. **NPT 027**: Unidades de armazenamento e beneficiamento de produtos agrícolas e insumos. 2 ed. Corpo de Bombeiros BM/7, 2015.
- DA SILVA, L. C. **Unidades Armazenadoras**: Planejamento e Gerenciamento Otimizado. 2006. Disponível em: <https://agais.com/manuscript/ag0106_planejamento_gerenciamento_ua.pdf>. Acesso em: 27 set. 2024.

DANFOSS. **Imagem de Soft Starter MCD 600**. 2024. Disponível em: <https://store.danfoss.com/es/pt_BR/Conversores/Soft-Starters/VLT%C2%AE-Soft-Starter-MCD-600/MCD60063BT5S1X20CV2/p/136G8763>. Acesso em: 21 out. 2024.

DEUTSCHE GESETZLICHE UNFALLVERSICHERUNG. **GESTIS Substance Database – Sugar Dust (Sucrose)**. GESTIS Substance Database. 2024. Disponível em: <<https://gestis-database.dguv.de/data?name=011990>>. Acesso em: 8 out. 2024.

ELECON. **Catálogo Técnico - Elecon**. Elecon indústria de eletrodutos. Disponível em: <<https://elecon.com.br/wp-content/uploads/2018/08/catalogo-elecon.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2024.

ELIAS, M. C.; OLIVEIRA, M.; VANIER, N. L. **Tecnologias de pré-armazenamento, armazenamento e conservação de grãos**. Capão do Leão: Universidade Federal de Pelotas. 2018. Disponível em: <<https://labgraos.com.br/manager/uploads/arquivo/apostila---unidade-i---prova-i.pdf>>. Acesso em: 28 set. 2024.

ESTADÃO CONTEÚDO. **Aumenta fila de navios para embarcar açúcar no Brasil, informa agência**. 2013. Disponível em: <<https://globo rural.globo.com/Noticias/Agricultura/Cana/noticia/2013/12/aumenta-fila-de-navios-para-embarcar-acucar-no-brasil-informa-agencia.html>>. Acesso em: 16 set. 2024.

FILHO, J. M. **Instalações Elétricas Industriais**. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2007.

FRANCHI, C. M. **Acionamentos elétricos**. 4 ed. São Paulo: Editora Érica, 2008.

GLOR, M. Dust explosions: Hazards, preventions, and protection. **Chimia**, v. 57, p. 778-780, 2003.

GOMES, F. C. **Estudo teórico e experimental das ações em silos horizontais**. 2000. 185f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

IWUOZOR, K. O. *et al.* Management of sugar dust in the sugar industry. **Heliyon**, v.10, n.1. p.e23158, 2024.

JORNAL CANA. **Açúcar/Cepea: Mesmo em entressafra, preços seguem em queda**. JornalCana. 2015. Disponível em: <<https://jornalcana.com.br/mercado/acucarcepea-mesmo-em-entressafra-precos-seguem-em-queda/>>. Acesso em: 16 set. 2024.

LIMA, B. A. A. G. *et al.* A cadeia produtiva da exportação do açúcar a granel no porto de Santos: Automatização de processos logísticos. *In: FATECLOG - LOGÍSTICA 3.0 & A SOCIEDADE DO CONHECIMENTO*, n. X. 2019, Guarulhos: FatecLOG.

MACHADO, S. S. **Tecnologia da fabricação do açúcar**. 2012. Disponível em: <https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/413/2018/12/11_tecnologia_fabricacao_acucar.pdf>. Acesso em: 13 set. 2024.

MANFRIM, I. M. S. **Um estudo dos silos para açúcar**: Propriedades físicas do material armazenado, recomendações construtivas, normativas e análise estrutural. 1994. 116f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Procel - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica**. 2024. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/sntep/procel>>. Acesso em: 6 nov. 2024.

PAYNE, J. H. **Operações unitárias na produção de açúcar de cana**. São Paulo: Ed. Nobel Franquias S.A, 1989.

PLANUSI. **Secadores Horizontais de Açúcar**. 2024. Disponível em: <https://www.planusi.com.br/secadores-horizontais-de-acucar>. Acesso em: 15 set. 2024.

SILVA, L.. Unidades armazenadoras: Planejamento e gerenciamento otimizado. **Revista Cultivar Máquinas**, v. 3, p.1-15, 2006.

SOLIANI, R. D.; ARGOUD, A. R. T. T. **A logística do Açúcar**: Conceitos,estratégias e práticas. Mauritius: Novas Edições Acadêmicas, 2019.

Tetacom. **Elevador de Canecas**. 2023. Disponível em: <<https://tetacom.com.br>>. Acesso em: 28 set. 2024.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). **SAFRA 2023/2024 termina como a maior da história**. São Paulo. Disponível em: <https://unica.com.br/noticias/safra-2023-2024-termina-como-a-maior-da-historia/#:~:text=A%20produ%C3%A7%C3%A3o%20final%20de%20a%C3%A7%C3%BAcar,%2C46%20milh%C3%B5es%20de%20toneladas)>. Acesso em: 2 set. 2024.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). **Painel de Comércio exterior: Açúcar e etanol**. UNICAdata. Disponível em: <<https://unicadata.com.br/listagem.php?idMn=19>>. Acesso em: 13 set. 2024.

USDA - United states department of agriculture Sugar. **World markets and trade, Washington, DC**. 2024. Disponível em: <<https://fas.usda.gov/data/sugar-world-markets-and-trade-05232024>>. Acesso em: 2 set. 2024.

Usina Santa Ângela. **Açúcar VHP**. Usina Santa Ângela. 2024. Disponível em: <<https://www.usangelo.com.br/produto/acucar-vhp>>. Acesso em: 13 set. 2024.

WEG. **Disjuntor Motor AZ MPW40i-3-U020**. 2024. Disponível em: <<https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Controls/Partida-e-Prote%C3%A7%C3%A3o-de-Motores/Disjuntores-motores/Disjuntores-Motores-MPW/DISJUNTOR-MOTOR-AZ-MPW40i-3-U020/p/12428181>>. Acesso em: 23 out. 2024.

WEG. **Motor Trifásico à Prova de Explosão de Baixa Tensão Catálogo Técnico - Mercado Brasileiro**. weg.net. 2024. Disponível em: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hdb/h72/WEG-w22xdb-motor-trifasico-a->

prova-de-explosao-de-baixa-tensao-50066323-brochure-portuguese-web.pdf.> Acesso em: 3 out. 2024.

WEG. **Relé Inteligente SRW01 – Unidades de Controle**. 2024. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Controls/Partida-e-Prote%C3%A7%C3%A3o-de-Motores/Rel%C3%A9s-Inteligentes/Rel%C3%A9-Inteligente-SRW01/Unidades-de-Controle/SRW01---Unidades-de-Controle/p/MKT_WDC_BRAZIL_PRODUCT_SRW01_UC>. Acesso em: 23 out. 2024.

WESTRAN, M. *et al.* **Dust explosion in sugar silo tower: Investigation and lessons learnt**. 2008. Disponível em: < <https://www.icheme.org/media/9784/xx-paper-90.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2024.

APÊNDICE A - PLANTA BAIXA E CORTES SILO HORIZONTAL - PLANTA BAIXA E CORTES SILO HORIZONTAL

