

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

GABRIEL MAKOTO ALAÓ CURCINO

ANÁLISE DO SISTEMA ELÉTRICO DE UMA CALDEIRA A VAPOR

UBERLÂNDIA

2022

GABRIEL MAKOTO ALAÓ CURCINO

ANÁLISE DO SISTEMA ELÉTRICO DE UMA CALDEIRA A VAPOR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito obrigatório à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes

UBERLÂNDIA

2022

GABRIEL MAKOTO ALAÓ CURCINO

ANÁLISE DO SISTEMA ELÉTRICO DE UMA CALDEIRA A VAPOR

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito obrigatório à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica, da Faculdade de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Uberlândia.

Uberlândia, 11 de agosto de 2022

Banca examinadora:

Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes
Universidade Federal de Uberlândia
Orientador

Prof. Dr. Carlos Eduardo Tavares
Universidade Federal de Uberlândia

Prof. Dr. Josemar Alves dos Santos Jr.
Universidade Federal de Uberlândia

Dedico esse trabalho aos meus pais que sempre se sacrificaram para me dar as melhores condições e principalmente a oportunidade de estar em uma universidade.

AGRADECIMENTOS

Meu agradecimento vai especialmente para meu pai Wilson e para minha mãe Jane que sempre se sacrificaram e me deram todo o suporte para que eu pudesse superar todas as dificuldades e conseguir chegar até aqui.

Também agradeço a minha amiga Carolina Moreira Coelho que me apoiou e me incentivou durante todo o processo produtivo desse trabalho.

RESUMO

CURCINO, G. M. A. **Análise do Sistema Elétrico de uma Caldeira a Vapor.** Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

As caldeiras são equipamentos térmicos que possuem a função de gerar vapor a partir da queima de um combustível, que geralmente é lenha. Este vapor é direcionado para o distribuidor que encaminha todo o fluido para os equipamentos e locais necessários. Em suma, pode-se dizer que a caldeira foi o grande motor da revolução industrial e da indústria em geral ao longo do século XX. Assim, as caldeiras foram se alterando e se desenvolvendo ao longo dos anos, criando normas e automações que são essenciais para os processos industriais de alguns setores. Para o funcionamento desta máquina, o sistema elétrico é de fundamental importância, e como foi dito anteriormente, houve grande evolução nesse segmento, proporcionando maior produção e eficiência com um menor gasto de energia. Portanto, esse trabalho visa analisar o sistema elétrico de uma caldeira a vapor destacando os principais dispositivos eletrônicos utilizados, e quais as vantagens que essa modernização pode oferecer.

Palavras-chave: Automação. Caldeira. Controladores Lógicos Programáveis. Sensores. Sistema Elétrico.

ABSTRACTION

CURCINO, G. M. A. **Analysis of the Electrical System of a Steam Boiler.** Monography (Bachelor in Electrical Engineering) - Faculty of Electrical Engineering, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

Industrial Boilers are thermal equipment that have the function of generating steam from the burning of a fuel, which is usually firewood. This steam is directed to the distributor, which forwards all the fluid to the necessary equipment and locations. In short, it can be said that the boiler was the great engine of the industrial revolution and industry in general throughout the 20th century. Therefore, boilers have been changing and developing over the years, creating standards and automations that are essential for industrial processes in some sectors. For the operation of this machine, the electrical system is fundamental, and as mentioned before, there has been great evolution in this segment, providing greater production and efficiency with less energy consumption. Therefore, this work aims to analyze the electrical system of a steam boiler, highlighting the main electronic devices used, and what advantages this modernization can offer.

Palavras-chave: Automation. Boiler. Programmable Logic Controller. Sensors. Electrical System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Princípio de funcionamento de uma caldeira flamotubular	16
Figura 2 - Ventilador industrial utilizado para o exaustor e insuflador	18
Figura 3 - Vista em corte de uma bomba hidráulica	19
Figura 4 - Curva de uma bomba hidráulica da altura manométrica em função da vazão	20
Figura 5 - Bomba hidráulica em uma caldeira	21
Figura 6 - Processo de funcionamento de um inversor de frequência Erro! Indicador não definido.	
Figura 7 - Controle Escalar para um motor trifásico de 220 Vca e 4 polos	26
Figura 8 - Sistema de controle em malha do PID	28
Figura 9 - Dados de placa de um motor com destaque para a corrente de partida ..	29
Figura 10 - Folha de dados do produto - Altistart 22	30
Figura 11 - Gráfico de corrente x tempo para alguns métodos de acionamentos	31
Figura 12 - Processo de funcionamento de um CLP	33
Figura 13 - Itens sujeitos a serem encontrados nas entradas e saídas do CLP	34
Figura 14 - Alguns blocos de funções da linguagem Ladder	35
Figura 15 - Primeira página do projeto elétrico - Disjuntor geral de 100A	38
Figura 16 - Segunda página do projeto elétrico - Acionamento do exaustor	40
Figura 17 - Sistema de controle em malha do PID com variáveis	42
Figura 18 - Terceira página do projeto elétrico - Acionamento do insuflador	43
Figura 19 - Quarta página do projeto elétrico - Acionamento da bomba d'agua.....	44
Figura 20 - Quinta página do projeto elétrico - Acionamento da porta guilhotina e do carro alimentador	46
Figura 21 - Sexta página do projeto elétrico - Acionamento da descarga e do multiclone.....	47
Figura 22 - Sétima página do projeto elétrico - Pressostato de segurança	48
Figura 23 - Oitava página do projeto elétrico - Comando da bomba d'água e eletrodos de níveis	49
Figura 24 - Nona página do projeto elétrico - Comando das partidas diretas com reversão	51

Figura 25 - Décima página do projeto elétrico - Comando das partidas diretas sem reversão.	52
Figura 26 - Décima primeira página do projeto elétrico - Sinalização de motor funcionando e de sobrecarga	53
Figura 27 - Décima segunda página do projeto elétrico - Sinalização de motor funcionando e de sobrecarga	54
Figura 28 - Décima terceira página do projeto elétrico - CLP e válvulas solenoides	55
Figura 29 - Automação realizada para o CLP a partir de linguagem Ladder.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parametrização das entradas digitais	41
Tabela 2 - Parametrização das entradas e saídas analógicas	41
Tabela 3 - Parametrização do controle PID	42

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

NR13	Norma Regulamentadora 13
Hm	Altura Manométrica
CV	Cavalo-Vapor
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
RPM	Rotação por Minuto
MIT	Motor de Indução Trifásico
PID	Proporcional Integral Derivativo
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
IHM	Interface Homem Máquina
RMS	<i>Root Mean Square</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
	1.1. JUSTIFICATIVA	14
	1.2. OBJETIVOS	14
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
	2.1. CALDEIRAS	16
	2.2. BOMBAS HIDRÁULICAS	18
	2.3. MOTORES ELÉTRICOS	21
	2.4. MOTOREDUTORES	23
	2.5. INVERSORES DE FREQUÊNCIA	23
	2.6. SOFT STARTER	28
	2.7. CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL (CLP)	31
	2.8. PRESSOSTATO	35
3.	PROJETO ELÉTRICO	36
	3.1. INFORMAÇÕES GERAIS DO PROJETO	36
	3.2. CIRCUITO DE POTÊNCIA	39
	3.3. CIRCUITO DE COMANDO	47
4.	CONCLUSÃO	57
5.	REFERÊNCIAS	58

1. INTRODUÇÃO

As caldeiras são equipamentos térmicos que possuem a função de gerar e armazenar vapor a partir da queima de um combustível, que geralmente é lenha, sob uma pressão superior à atmosférica. São divididas basicamente em aquatubulares, flamotubulares, na qual basicamente se diferenciam pela maneira como geram o vapor. Enquanto que na aquatubular a água passe por tubos que são envolvidos pela combustão dos gases que irá aquecer a água, na flamotubular o calor é movimentado dentro dos tubos que estão imersos no tanque de água. Esse tipo de maquinário teve seu início por volta do fim do século 18 e final do século 19, no contexto da Primeira Revolução Industrial, com peças ainda muito rudimentares e que se mostravam até perigosas com riscos de explosões (BRANDE, 2020).

Atualmente, as caldeiras são regidas de acordo com a Norma Regulamentadora 13 (NR-13) na qual trata a respeito de caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento. Além disso, de acordo com essa norma, esses equipamentos também podem ser classificados em 3 categorias, conforme segue:

- Caldeiras da categoria "A" são aquelas cuja pressão de operação é igual ou superior a 1960 kPa (19,98 Kgf/cm²);
- Caldeiras categoria "C" são aquelas cuja pressão de operação é igual ou inferior a 588 kPa (5,99 Kgf/cm²) e o volume interno é igual ou inferior a 100 litros;
- Caldeiras categoria "B" são todas as caldeiras que não se enquadram nas categorias anteriores. (NR-13, 2019)

Com as constantes evoluções e regulamentações, as caldeiras foram se tornando mais seguras e modernas transformando-se em peça fundamental nas indústrias, até mesmo com a presença da tecnologia e das indústrias avançadas. Um grande fator que auxiliou esse aprimoramento foi o seu sistema elétrico, possibilitando um funcionamento correto e dentro das normas das caldeiras, com o advento de novas automações e dispositivos de segurança. O pressostato, por exemplo, um equipamento eletrônico comum em processos industriais que trabalham com pressão,

permitiu uma maior segurança pois monitora a pressão da caldeira. Já a utilização de inversores de frequência para alguns motores proporciona uma economia de energia.

Portanto, é possível concluir quão significativo é o sistema elétrico da caldeira, podendo oferecer mais segurança, maior eficiência energética e até mesmo mais controle em sua operação.

1.1. JUSTIFICATIVA

Apesar de aparentar ser uma máquina primitiva, as caldeiras ainda se apresentam como um tipo de equipamento essencial estando presente em diversos setores da economia, principalmente no industrial.

Entre os variados tipos de indústrias, pode-se citar o ramo alimentício, especificamente no campo de laticínios que utiliza o vapor no procedimento de pasteurização do leite, da esterilização de recipientes, fabricação de creme de leite, fermentação (responsável pela produção de queijos, iogurtes e requeijões) (BRANDE, 2020) ou em frigoríficos que o manuseiam de forma mais simples para a esterilização e limpeza de equipamentos, além da utilização direta de água quente (KETLIN, 2020). Pode-se dizer que sem vapor, o frigorífico não consegue manter seu funcionamento.

Na agricultura, as caldeiras também vêm se tornando comum no processo de beneficiamento substituindo as antigas fornalhas que já estão se mostrando ultrapassadas. Geralmente é utilizado o vapor diretamente para a umidificação, por exemplo do algodão, ou indiretamente em radiadores que geram calor que auxiliam na secagem de grãos como soja e milho.

Na indústria madeireira, as caldeiras também se mostram vitais por meio do fornecimento de vapor para as estufas de secagem que garantem mais qualidade e durabilidade para o produto final (BRANDE, 2020).

Portanto, nota-se que esse tipo de equipamento ainda é essencial e possui uma demanda de certos setores industriais. Visto isso, é conveniente expor como o sistema elétrico pode amparar a evolução de uma máquina como a caldeira, com o advento de novas tecnologias.

1.2. OBJETIVOS

Este trabalho possui como objetivo analisar o sistema elétrico presente no funcionamento da caldeira englobando todos os mecanismos e acessórios envolvidos

para o seu correto manuseio e cumprimento das normas propostas. Ademais, será explicado todas as nuances do projeto elétrico, e como cada equipamento é utilizado com determinada função, principalmente na questão de acionamento de motores.

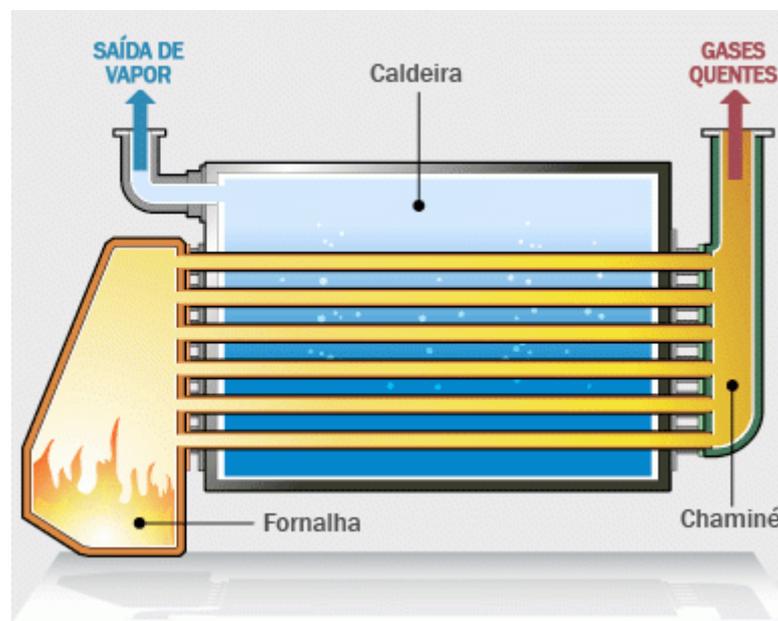
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. CALDEIRAS

Nesse trabalho, tudo que será abordado refere-se a uma caldeira flamotubular de categoria B com capacidade de geração de vapor abaixo de 10 Kgf/cm², sendo considerada de pequeno porte.

Assim sendo, na figura 1, pode-se visualizar o princípio básico de funcionamento de uma caldeira com essas características, onde, basicamente, há uma injeção de água no corpo da caldeira que será aquecido através de tubos que são chamados de tubos de fogo que são instalados dentro do reservatório de água. Com isso, através da queima de combustível em sua fornalha, o calor percorre os tubos e aquece a água gerando o vapor que será distribuído para sua devida utilização. Além disso, são produzidos os gases provenientes da queima da lenha que são tratados e expelidos no ambiente.

Figura 1 - Princípio de funcionamento de uma caldeira flamotubular.



Fonte: Página do Website da Fábrica do Projeto¹¹

Tendo em vista a construção padrão de uma caldeira deste tipo, destaca-se que o principal da caldeira é o seu corpo na qual comportará os tubos e aquecerá a

¹ Manual de Caldeiras - Disposições Gerais» Fábrica do Projeto. Disponível em: <<https://www.fabricadoprojeto.com.br/2010/04/manual-de-caldeiras/>>. Acesso em: 12 jul.

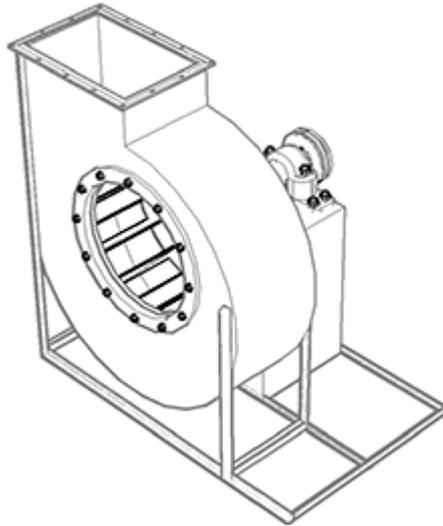
água. Entretanto, a caldeira é composta por outros diversos elementos que possuem funções específicas que auxiliam em seu processo operacional.

Um desses componentes é a bomba d'água que possui a responsabilidade de introduzir água no tanque da caldeira que posteriormente se transformará em vapor. Seu modo de funcionamento recebe bastante atenção, possuindo normas específicas a ela na NR-13.

Outro segmento fundamental da caldeira é o seu sistema de alimentação que se incumbe de abastecer algum tipo de combustível para a queima e geração de calor, podendo ser desde combustíveis fósseis, que são mais incomuns, até lenhas, cavacos, briquetes e biomassa, que são considerados mais ecológicos. Para fim deste trabalho, será adotado um sistema por alimentação de lenha integrado por 3 blocos, sendo estes a porta guilhotina, o carro alimentador e a corrente de descarga. Basicamente, a porta guilhotina abre e fecha a entrada para a fornalha, que é o local onde realmente acontece a queima. Já o carro alimentador carrega a lenha por meio de trilhos até a boca da fornalha e a descarga despeja as madeiras.

O ventilador industrial, representado pela Figura 2, é constituído por um motor e paletas e também é utilizado nas caldeiras, mais especificamente para dois papéis diferentes. Enquanto um empurra o ar para fora da caldeira, expulsando a fumaça proveniente da queima de combustível, o outro introduz ar para dentro, oxigenando o interior da fornalha a fim de auxiliar na queima de lenha por exemplo. Eles são chamados de exaustor e insuflador respectivamente.

Figura 2 - Ventilador industrial utilizado para o exaustor e insuflador



Fonte: Página da Caldeira Compostal²

Antes do exaustor, há um equipamento chamado multiciclone que possui a atribuição de captar particulados na fumaça para que esta seja eliminada mais limpa para o meio ambiente. Isso é possível em virtude da força centrífuga criada que pressiona as partículas a se colidirem contra as paredes internas, ocasionando em redução na sua velocidade e conseqüente separação dos resíduos com o ar agora limpo.

Mais um bloco da caldeira que o painel elétrico engloba são as descargas de fundo, que são localizadas em locais estratégicos com o objetivo de descartar resíduos sólidos que se encontram na água, como sais e lodo, a fim de manter a sua qualidade e conseqüentemente, uma maior longevidade da caldeira.

2.2. BOMBAS HIDRÁULICAS

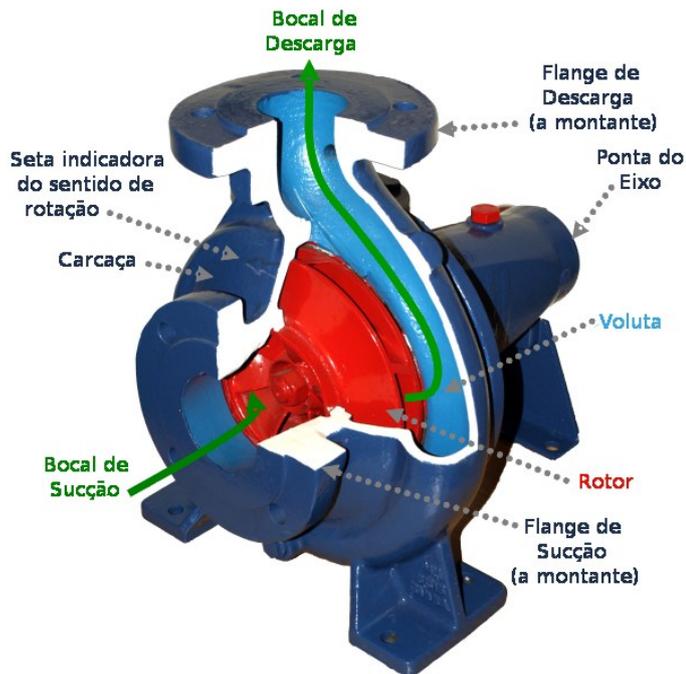
As bombas hidráulicas são equipamentos que transformam energia mecânica em energia cinética para movimentação de um fluido de um local para outro.

O princípio de funcionamento se baseia na ideia de que uma energia deve ser adicionada ao fluido para a sua movimentação, energia esta que é fornecida pela bomba. E para que esse equipamento possa funcionar, é fundamental que esteja

² Exaustores Centrifugos – Camposcal Caldeiras. Disponível em: <<https://www.camposcal.com.br/produtos/exaustores-centrifugos/>>. Acesso em: 27 jul. 2022.

presente um motor que terá a função de através da rotação mecânica criar um vácuo parcial na entrada da bomba, fazendo com que a pressão atmosférica force o fluido do tanque, e tudo isso por uma linha de sucção, a penetrar na bomba (JUNIOR, João B. Tolentino, 2021).

Figura 3 - Vista em corte de uma bomba hidráulica



Fonte: JUNIOR, 2021

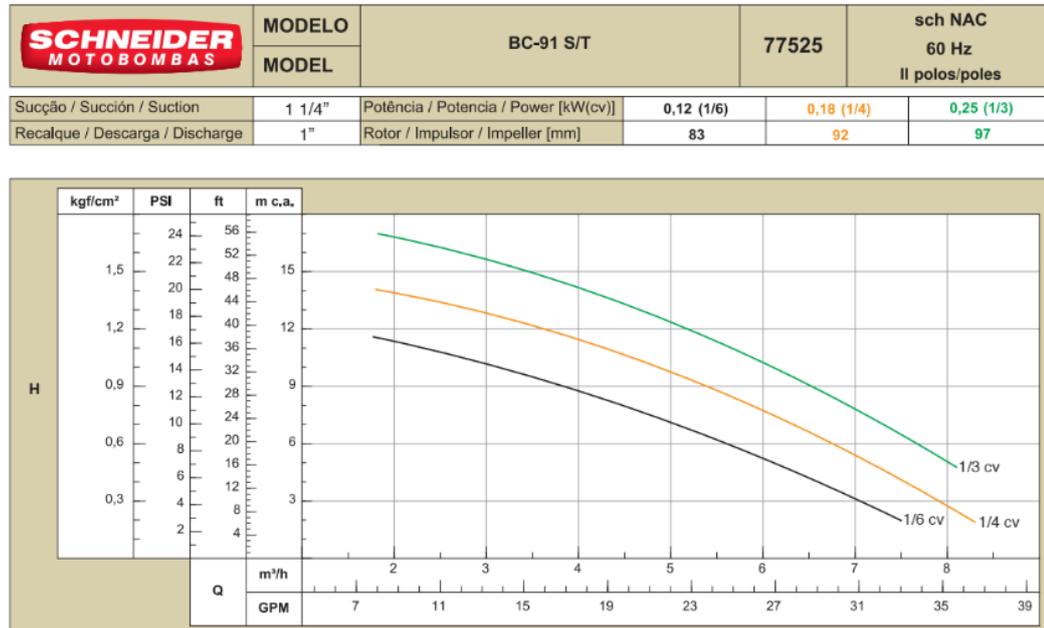
Essas máquinas podem ser classificadas de acordo com sua aplicação, sendo as mais comuns: centrífugas, de engrenagens, de palhetas, de pistão axial e de pistão radial (JUNIOR, João B. Tolentino, 2021).

Já para o dimensionamento correto das bombas, deve-se levar em consideração a vazão a ser recalçada (Q) e da altura manométrica da instalação (H_m).

A vazão a ser recalçada (Q) se dá em função do tempo de funcionamento, além do volume de água desejado que seja manipulado.

Já a altura manométrica se baseia na diferença dos níveis envolvendo o ponto inicial e final do transporte do fluido e o comprimento e diâmetro das tubulações de sucção.

Figura 4 - Curva de uma bomba hidráulica da altura manométrica em função da vazão



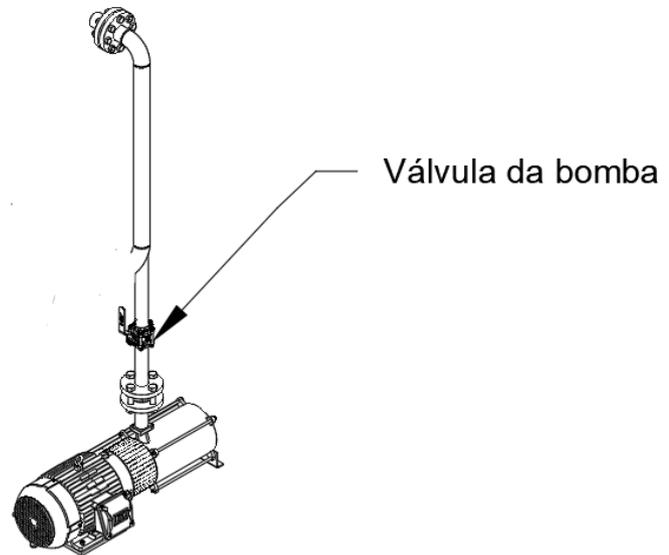
B - Monostágio

Fonte: JUNIOR, 2021

Nota-se que quanto maior a altura de bombeamento menor a vazão fornecida pelo equipamento e vice-versa. Ademais, temos uma relação entre potência e essas duas variáveis na qual quanto maior a potência maior a vazão ou maior a altura de bombeamento (JUNIOR, João B. Tolentino, 2021).

Tendo em vista as caldeiras, as bombas hidráulicas são de fundamental importância uma vez que possuem a função de injetar a água que produzirá o vapor. Porém, vale destacar que os parâmetros de dimensionamento não se mostram significativos, visto que a bomba não trabalha em regime permanente, sendo acionada somente quando o nível de água abaixa. Já para a altura manométrica, há apenas um pequeno desnível que deve ser vencido, onde geralmente gira em torno de 2 metros. Portanto, normalmente se utiliza uma bomba hidráulica do tipo centrífuga com uma potência de 12,5 cv, que cumpre perfeitamente a função e que está simbolizada na figura 5.

Figura 5 - Bomba hidráulica em uma caldeira



Fonte: Autor, 2022

2.3. MOTORES ELÉTRICOS

Basicamente, um motor elétrico é um dispositivo que possui a capacidade de converter energia elétrica em energia mecânica. Nos dias atuais, os motores elétricos se mostram presente e de fundamental importância na indústria de diversos setores diferentes, sendo responsável pelo consumo de 70% de toda a energia utilizada no setor industrial (WEG,2022). Esses motores são utilizados para produzir uma força motriz apta a mover praticamente todas as máquinas.

Existem alguns tipos de motores que se destacam perante aos outros, na qual os motores de corrente contínua, os síncronos e os de indução são os mais conhecidos.

Os motores CC, como o próprio nome diz, utilizam da corrente contínua para funcionarem, sendo bastante comuns até a década de 60. Atualmente, são encontrados em carros, tratores e aeronaves. Sua principal característica e motivo de uma grande popularidade é a regulação de velocidade, que se dá apenas com uma alteração da tensão de alimentação, processo esse que é extremamente viável e fácil.

O seu desuso foi causado devido a uma evolução da tecnologia com o advento dos inversores de frequências juntamente com os motores de indução, trazendo diversos benefícios e vantagens em relação ao motor CC (CHAPMAN, 2013).

Já para máquinas de corrente alternada, temos os motores síncronos e os motores de indução. Os síncronos são motores cuja corrente de campo magnético é fornecida por uma fonte de potência CC separada, e devido às suas características especiais, sendo a velocidade constante para diferentes cargas uma de grande destaque, são utilizados para aplicações específicas. A eficiência em aplicações onde são exigidos, a correção do fator de potência, altos torques e baixas correntes de partida, velocidade constante em variações de carga, baixo custo de operação e manutenção, são os principais motivos que resultam na escolha dos motores síncronos para acionamento de diversos tipos de cargas (WEG, 2022), apesar de serem consideravelmente mais caros que os motores de indução.

E por último os motores de indução trifásico que em geral são os mais utilizados, principalmente no setor industrial, muito por causa do baixo preço, baixa demanda manutenção, melhor rendimento e a independência em relação ao fornecimento de corrente CC para seu funcionamento, necessitando somente da corrente CA (CHAPMAN, 2013).

Os motores de indução são assíncronos, isto é, possui uma velocidade de rotação menor do que a velocidade do campo girante, sendo essa diferença em porcentagem, chamado de escorregamento, como na equação abaixo:

$$s = \frac{(N_s - N)}{N_s} * 100$$

s = Escorregamento do motor em porcentagem (%)

N_s = Velocidade síncrona do motor em RPM

N = Velocidade medida no rotor em RPM

No sistema de funcionamento da caldeira utiliza-se motores de indução trifásico com diferentes potências e diferentes tipos de partida. Os motores com maiores potências são o exaustor e o insuflador.

2.4. MOTOREDUTORES

O motoredutor é um equipamento mecânico que possui a função de diminuir a velocidade de rotação de um motor, oferecendo assim, um torque mais elevado. Com esse tipo de característica, este equipamento pode-se mostrar extremamente útil em diversos setores, além de ser ideal a sua utilização para motores de menor potência. Além disso, não demandam uma conexão elétrica, somente sendo acoplado ao motor de indução (WEG-CESTARI, 2019).

Para a escolha de um dispositivo desse modelo, leva-se em consideração a velocidade final desejada, o torque que é oferecido, além da potência, que normalmente será a mesma do motor em que está sendo acoplado.

Nas caldeiras, utiliza-se os motoredutores no sistema de alimentação de lenha para a queima, composto por 3 motores de baixa potência responsáveis pela porta guilhotina, carro alimentador e descarga de lenha. Como esses motores demandam uma baixa rotação, além de um torque elevado, uma vez que movimentam cargas pesadas, esse dispositivo se mostra fundamental.

2.5. INVERSORES DE FREQUÊNCIA

Como já foi dito anteriormente, os motores de indução trifásico são os mais utilizados atualmente, e para fazer o seu controle de velocidade, necessita-se de um inversor de frequência. Tanto o motor CC, quanto o MIT em conjunto com o inversor de frequência oferecem a possibilidade de variação de velocidade, porém a segunda opção se mostra mais viável por disponibilizar mais recursos, como por exemplo:

- Proteção disponibilizada pelo próprio inversor contra sobrecorrente, curto-circuito, subtensão, sobretensão, além de suportar maiores quedas de tensão (FRANCHI, 2013).
- Mantém o conjugado mesmo com a variação de velocidade (FRANCHI, 2013);
- Diferentes alternativas para o acionamento, podendo ter velocidades pré-selecionadas ou então uma rampa de aceleração e desaceleração (FRANCHI, 2013);
- Controle PID de alguma máquina ou processo (FRANCHI, 2013);

- Automatização, segurança e flexibilidade em processos industriais (FRANCHI, 2013).

A construção física do inversor é dividida em partes que realizam certas funções que demonstram o processo de funcionamento desse equipamento. O primeiro bloco e mais básico é a Unidade Básica de processamento (CPU), na qual essencialmente é formado por um microcontrolador que armazena e processa todos os dados e parâmetros fundamentais para o correto funcionamento do inversor, através de uma memória. Os elementos como potência nominal do motor, rampa de aceleração e desaceleração, *multispeed* são todos controlados pela CPU. Além disso, gera pulsos de disparo para os IGBT's que são primordiais para o funcionamento do inversor (FRANCHI, 2013).

O outro bloco é a Interface Homem-Máquina (IHM), um dispositivo que pode variar o seu modelo de um fabricante para outro, porém tem a função de visualizar e manipular os dados e parâmetros do inversor. Geralmente possui um display e cursores que permitem essa interação com o inversor, alterando e verificando tensão, corrente, frequência, parâmetros de programação, velocidade nominal, etc. (FRANCHI, 2013).

As interfaces são também um conjunto importante dos inversores na qual complementam e aprimoram a utilização deste equipamento. Essas interfaces são representadas pelas entradas analógicas e digitais que através de uma programação pré-determinada, podem realizar funções extremamente versáteis.

As entradas analógicas são responsáveis por captar sinais de tensão (0 a 10 Vcc ou 10 a 0 Vcc) ou corrente (4 a 20 mA ou 20 a 4 mA ou 0 a 20 mA) que podem ser atribuídas a variação de velocidade proporcionalmente, ou seja, para um motor com a velocidade nominal de 1735 rpm, um sinal de 0 a 10 Vcc representaria:

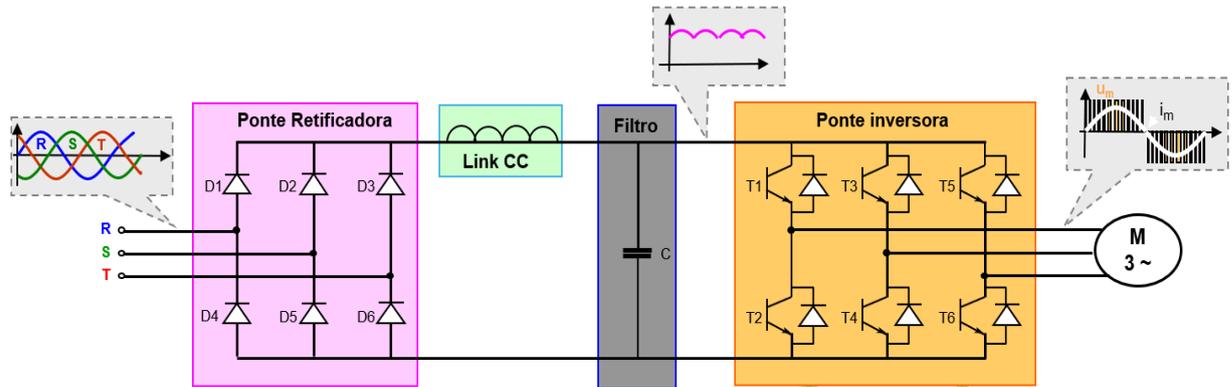
$$0 \text{ Vcc} = 0 \text{ rpm e } 10 \text{ Vcc} = 1735 \text{ rpm}$$

Já as entradas digitais permitem uma programação que pré-determinam uma função, podendo ser desde um simples alerta de falha no motor ou status de ligado, até a configuração de velocidade.

Essas entradas, tanto as analógicas quanto as digitais trabalham em conjunto com as saídas que realizam comandos de acordo com as suas entradas.

E por último temos a etapa de potência, apresentada na figura 6, que diz muito sobre o princípio de funcionamento e construção do inversor, na qual é dividida em ponte retificadora, barramento CC e ponte inversora.

Figura 6 - Processo de funcionamento de um inversor de frequência



Fonte: Página de suporte da *Schneider Electric*³

No primeiro estágio, há uma ponte retificadora de onda completa, conceito bem básico da eletrônica de potência, na qual a partir de uma certa disposição de diodos, uma onda senoidal trifásica com frequência fixada em 60 Hz é transformada em uma tensão CC pulsante com valor aproximadamente 1,41 vezes maior que a tensão RMS da rede. Isso se dá porque o diodo só permite a passagem de corrente em um único sentido, sempre conduzindo somente dois ao mesmo tempo, tendo assim uma tensão CC (HART,2012).

No segundo estágio denominado de barramento CC, temos um filtro capacitivo com a função de suavizar as oscilações (*ripple*) tornando o sinal mais próximo de ser contínuo e elevando a tensão de pico.

Após a suavização da tensão, o bloco inversor atua, sendo composto por transistores IGBT, que serão capazes de modificar a tensão CC de volta para CA, possibilitando a variação de velocidade do motor. Isso se dá graças ao arranjo de 6 transistores IGBT, que sempre atuam em trios, ocorrendo a inversão no sentido da corrente, tornando a corrente contínua em alternada. Porém, como fica ocorrendo essa inversão, a corrente e conseqüentemente a tensão apresentará uma forma de

³ O que é um inversor de frequência? Como é o seu funcionamento? Disponível em: <<https://blog.se.com/br/automacao-industrial/2020/10/22/o-que-e-um-inversor-de-frequencia-e-como-escolher-a-melhor-opcao/>>. Acesso em: 5 jun. 2022.

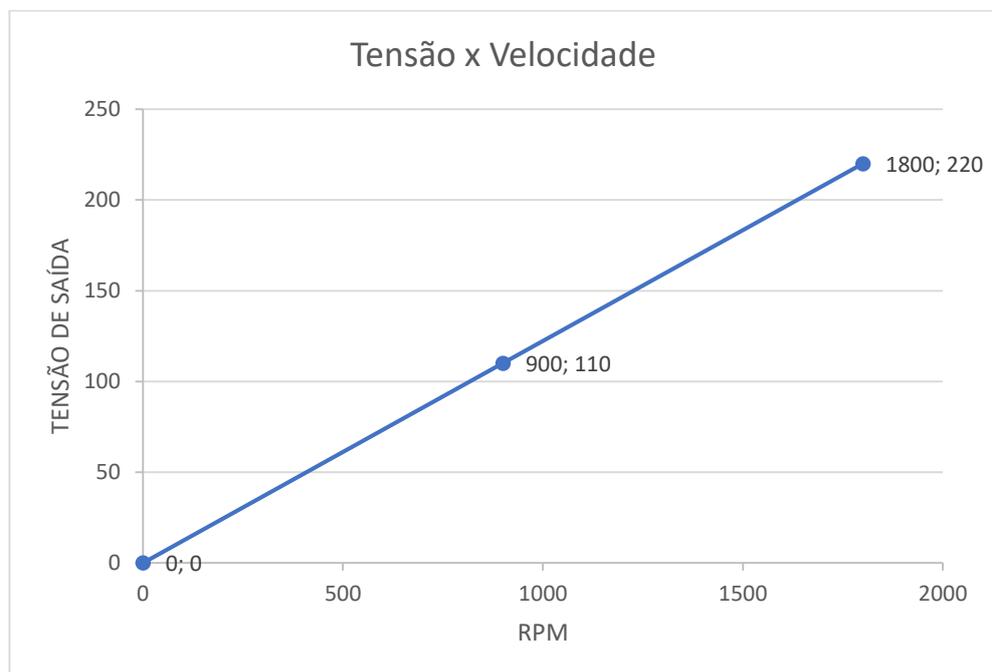
onda quadrada, que será manipulada em senoidal através da modulação por largura de pulso (PWM) (FRANCHI, 2013).

De acordo com o chaveamento dos transistores, pode-se obter diferentes larguras de pulso proporcionando uma variação na tensão que replicará na variação de velocidade, devido à tensão e frequência variáveis que foram criadas.

Para controlar a velocidade, os inversores possuem diferentes tipos de controle, que são classificados em:

- Controle escalar: Controla a velocidade do motor através de uma proporcionalidade que sempre é mantida entre tensão e frequência. São indicados para processos mais simples onde não são exigidas respostas rápidas de velocidade e torque, além do controle desta última variável. Em relação ao vetorial, são mais baratos.

Figura 7 - Controle Escalar para um motor trifásico de 220 Vca e 4 polos



Fonte: Autor, 2022

- Controle vetorial: Ideal para situações na qual necessita-se de uma maior dinâmica e rigor durante o processo. Recomendado para partidas que requerem grande precisão na velocidade, seja em partidas pesadas, ou em baixa rotação ou até mesmo onde há

variações bruscas de carga. Além disso, possui a função de controlar o torque também.

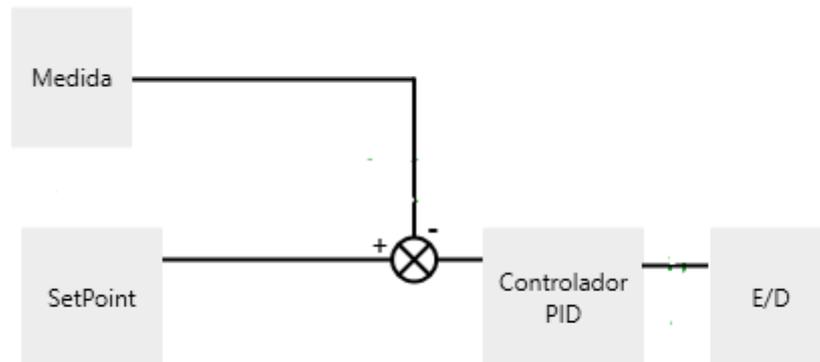
Com todas essas aplicabilidades, o inversor se mostra essencial para ser utilizado na partida dos motores do exaustor e do insuflador. Isso porque esses motores demandam uma modulação da velocidade de acordo com a pressão apresentada na caldeira, ou seja, quando estiver com pouca pressão, os motores estarão girando em suas rotações máximas, enquanto que quando a pressão for considerada alta, estarão com uma rotação menor.

Como dito acima, esse processo de variação de velocidade é dependente da pressão, portanto é utilizado um sensor na entrada analógica do inversor que viabiliza esse processo. Com esse sinal 4-20 mA desse sensor, o inversor trabalha com um controle PID (*Proportional, Integral, Derivative*), que ainda é um dos sistemas de controle mais utilizados atualmente. Resumidamente, o PID é um controle de processos baseados em 3 termos nomeados como proporcional, derivativa e integral, que tem como objetivo manter uma variável, seja temperatura, pressão ou umidade, próximo a um valor desejado que é chamado de *SetPoint*.

O proporcional representa o ganho que é necessário para sair do estágio inicial e chegar no almejado. O integral tem como função fazer uma dosagem em relação ao ganho para que este nem ultrapasse demais ou fique longe do *SetPoint*, ou seja, ele auxilia a variável a se manter próximo do valor desejado. Já o derivativo age para extinguir um erro acumulado na integral, fazendo assim com que diminua a oscilação em torno do *SetPoint*.

Além disso, o controle PID pode ser direto ou reverso, ou seja, quando escolhido a primeira opção, para aumentar a variável do processo, nesse caso sendo a pressão da caldeira, deve-se aumentar a velocidade do motor. Já o tipo reverso, para aumentar a pressão, a velocidade é diminuída.

Figura 8 - Sistema de controle em malha do PID



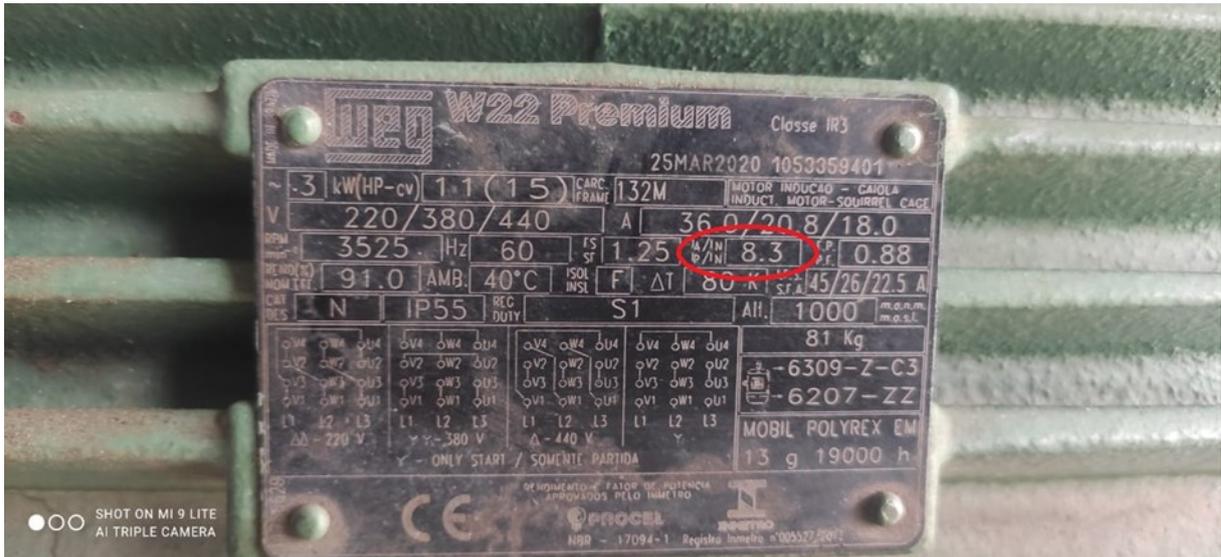
Fonte: Autor, 2022

2.6. SOFT STARTER

A *soft starter* é um dispositivo de comando destinado a acionar motores, na qual sua principal vantagem é a opção de se utilizar rampas de aceleração, através da elevação gradual da tensão, a fim de amenizar os picos de corrente durante a partida. Além disso, esse equipamento oferece proteção para o motor, identificando principalmente uma falta de fase, uma subcorrente ou uma sobrecorrente (FRANCHI, 2008).

Em comparação com uma partida direta, na qual se utiliza somente um sistema de proteção, seja com fusíveis em conjunto com relé térmico ou um disjuntor motor, com um contator para acionar o motor, a *soft starter* se sobressai justamente pela diminuição da corrente de partida, que dependendo da aplicação, haverá uma maior eficiência energética, economizando com gastos de energia, além de uma menor manutenção, uma vez que os equipamentos não serão expostos a uma corrente muito grande. Utilizando-se um motor de 15 cv de potência com seus dados de placa apresentado na figura 9 como exemplo, nota-se que para a partida direta, a corrente de partida é até 8,3 vezes maior que a nominal. Com uma corrente nominal de 20,8 A em uma tensão de 380V, têm-se uma corrente de partida próxima a 170 A, um valor que é extremamente elevado e que pode com o tempo, ir desgastando o motor, os cabos, etc.

Figura 9 - Dados de placa de um motor com destaque para a corrente de partida



Fonte: Autor, 2022

Tomando como base um modelo de *soft starter* *AltiStart22* da fornecedora *Schneider Eletric*, nota-se um dado importante disponibilizado em seu manual referente à corrente de partida para um motor de 15cv, sendo o valor de somente 3,5 vezes maior que a corrente nominal o que daria aproximadamente 73 A.

Figura 10 - Folha de dados do produto - Altistart 22

Folha de dados do produto

Especificações



Green Premium

Partida suave eletrônica ATS22 - 47 A - 200-440 VAC

ATS22D47Q

Principal	
Linha de produto	Altistart 22
Tipo de produto ou componente	Acionador suave
Destino do produto	Motores assíncronos
Aplicação específica do produto	Bombas e ventiladores
Nome do componente	ATS22
Número de fases da rede	Trifásico
Tensão nominal de alimentação [Us]	230..0,440 V - 15...10 %
Alimentação do motor kW	11 kW 230 V 22 kW 400 V 22 kW 440 V
Corrente definida de fábrica	42 A
Dissipação de alimentação em W	48 W para aplicações padrão
Categoria de uso	CA -53A
Tipo de início	Iniciar com controle de torque (corrente limitada a 3.5 In)

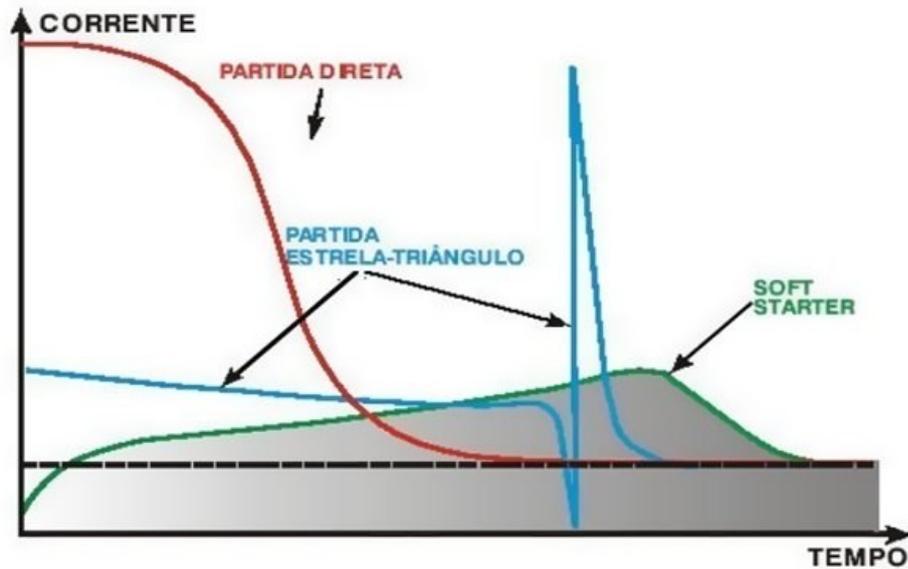
Se não for o caso, o cliente deve ser informado para determinar a adequação ou confiabilidade de seus produtos para aplicações específicas

Fonte: Página de suporte da *Schneider Electric*⁴

Além disso, percebe-se na imagem abaixo um gráfico bastante comum comparando as correntes em função do tempo de alguns métodos de partida, inclusive da partida direta e da partida suave.

⁴ ATS22D47Q - Partida suave eletrônica ATS22 - 47 A - 200-440 VAC | Schneider Electric Brasil. Disponível em: <<https://www.se.com/br/pt/product/ATS22D47Q/partida-suave-eletr%C3%B4nica-ats22-47-a-200440-vac/>>. Acesso em: 12 jul. 2022.

Figura 11 - Gráfico de corrente x tempo para alguns métodos de acionamentos



Fonte: COLASSANTE,2015 ⁵

2.7. CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL (CLP)

Um CLP é um dispositivo que pode ser considerado um computador industrial e foi criado a fim de facilitar os processos industriais por meio da programação. Uma das vantagens dessa melhoria é a menor utilização de cabos nos painéis e um sistema elétrico físico mais simples, uma vez que o CLP realizará funções que deveriam ser feitas por relés. Segue abaixo uma definição de CLP originada da IEC (*International Electrotechnical Commission*) na qual esclarece bem o que ele realmente é (FRANCHI, 2008).

Sistema eletrônico operando digitalmente, projetado para uso em um ambiente industrial, que usa uma memória programável para a armazenagem interna de instruções orientadas para o usuário para implementar funções específicas, tais como lógica, sequencial, temporização, contagem e aritmética, para controlar, através de entradas e saídas digitais ou analógicas, vários tipos de máquinas ou processos. O controlador programável e seus periféricos associados são projetados para serem facilmente integráveis em um sistema de controle industrial e facilmente usados em todas suas funções previstas (IEC, 2003).

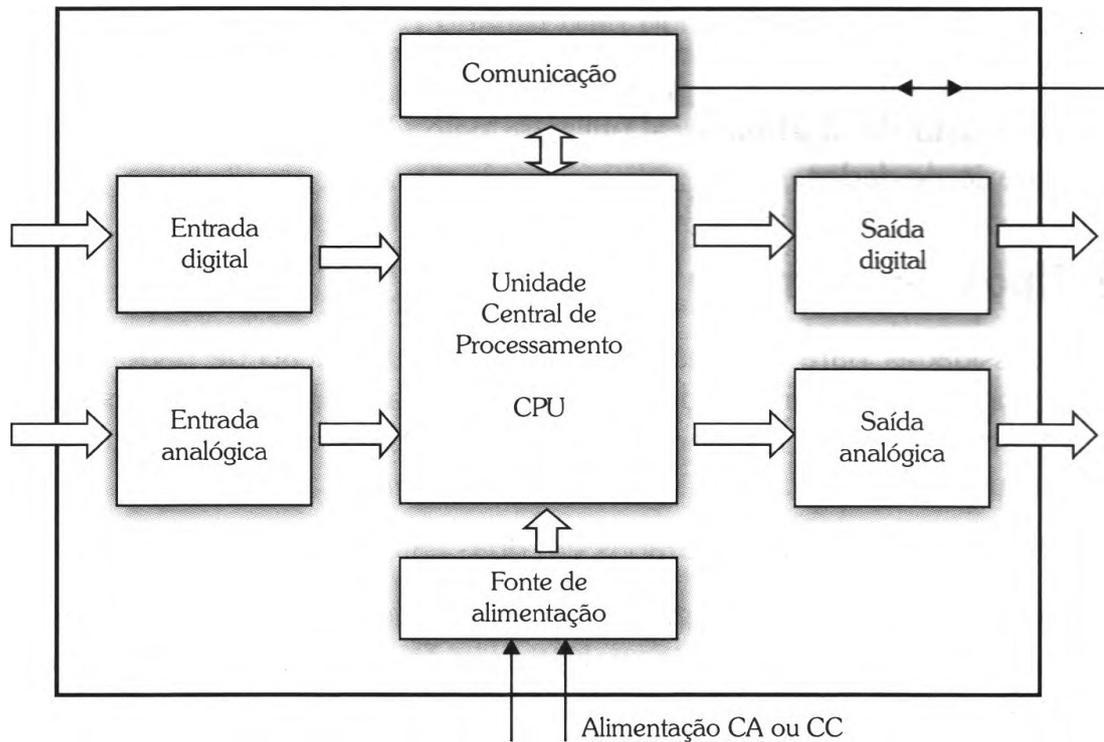
⁵ Soft Starter. Disponível em: <<https://profcolassante.blogspot.com/2015/06/soft-starter.html>>. Acesso em: 12 jul. 2022.

Basicamente, o CLP pode ser dividido em três partes que são essenciais, sendo elas: Unidade Central de Processamento, interface de entradas e saídas e a unidade de comunicação. Como já demonstrado presente nos inversores, a unidade central de processamento (CPU) é composta principalmente de microprocessadores e de diferentes tipos de memórias que possibilitam o armazenamento de informações e dados que são manipulados para a execução de certos comandos e ciclos desejados (FRANCHI, 2008).

Como a própria definição que a IEC traz, uma característica que esses equipamentos possuem são as interfaces que os inversores de frequência também apresentam como entradas e saídas, tanto digitais como analógicas. A diferenciação das interfaces do CLP em relação a do inversor se dá principalmente pela maior gama de funcionalidades e aplicações que é possível ser feito. Enquanto as entradas e saídas do inversor são baseadas em funções para este equipamento, as do CLP podem envolver todo um sistema elétrico.

Outro bloco essencial nesse equipamento são as unidades de comunicação na qual possuem a função de interligar o CLP com outros dispositivos a fim de incorporá-los e funcionarem em conjunto, como por exemplo a IHM que é conectada ao CLP através de uma porta Ethernet e possui o papel de implementar graficamente algumas funcionalidades a serem executadas. Atualmente, os CLPs possuem diversos protocolos de comunicação como *CanOpen*, *CanBus*, *ModBus*, *WebServer*, etc. (FRANCHI, 2008).

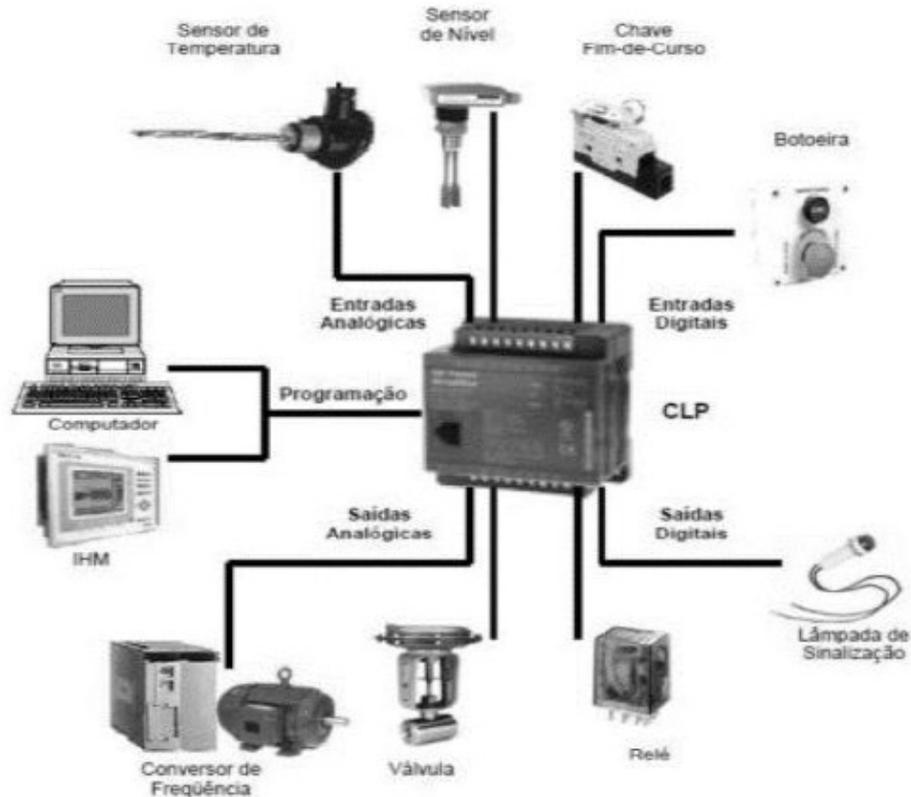
Figura 12 - Processo de funcionamento de um CLP



Fonte: Franchi, Claiton Moro, 2008

Baseado nisso, o CLP envolverá dois tipos de equipamentos que serão manipulados através de uma lógica para determinado fim. O primeiro são os transdutores que possuem a função de converterem um parâmetro físico em um sinal elétrico, como por exemplo, o sensor de pressão que é utilizado nas caldeiras. Já o segundo são os atuadores que captam o sinal elétrico das entradas e converte em uma ação física podendo ser um acionamento de um motor. Na figura 13 pode-se visualizar os possíveis dispositivos que podem ser encontrados

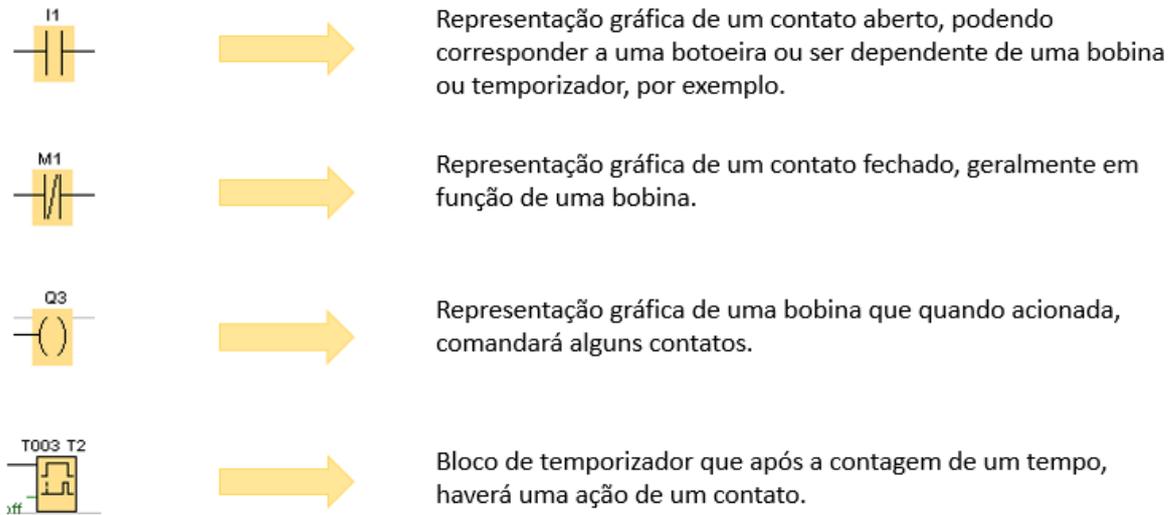
Figura 13 - Itens sujeitos a serem encontrados nas entradas e saídas do CLP



Fonte: Autor, 2022

Para que o controlador lógico programável realize os processos desejados, deve haver uma programação prévia na qual será feita uma lógica que irá controlar os dispositivos conectados. A linguagem de programação de CLPs é a *Ladder*, que pode ser definida como uma representação gráfica de um diagrama elétrico utilizando contatos e bobinas. Portanto, nota-se que é uma linguagem bem intuitiva para profissionais da área elétrica (FRANCHI, 2008).

Figura 14 - Alguns blocos de funções da linguagem Ladder



Fonte: Autor, 2022

A aplicação do CLP na caldeira pode ser enorme, sendo quase que totalmente automatizada ou empregar para algum setor específico. No caso desse projeto elétrico, este equipamento se responsabilizará pela manutenção de um ciclo de um bloco da caldeira chamado de descarga de fundo.

2.8. PRESSOSTATO

O pressostato é um equipamento que pode ser considerado um dispositivo de proteção e sua presença na caldeira é essencial. Basicamente, ele trabalha com um *setpoint* máximo de pressão ajustado manualmente, que quando ultrapassado, um contato normalmente aberto é atracado podendo criar um alerta através de um sistema de sinalização, ou até interrompendo a alimentação de motores, como é no caso da caldeira.

3. PROJETO ELÉTRICO

3.1. INFORMAÇÕES GERAIS DO PROJETO

Como caldeiras são comuns no ambiente industrial, o painel elétrico se localizará dentro de um espaço que comporta a grande maioria dos quadros que controlam os processos presente naquela indústria, ou próximo ao equipamento para que a operação possa ser feita corretamente.

Além disso, um quadro geral de baixa tensão (QGBT) sempre se mostra presente nas fábricas com o objetivo de coletar a energia advinda da subestação e distribuí-la pelos diversos CCM's, que são painéis que possuem dispositivos de proteção, seccionamento e controle de motores. Sendo assim, o painel da caldeira será alimentado pelo QGBT por uma tensão trifásica de 380V, com um disjuntor geral instalado de acordo com a corrente demandada.

No total, a caldeira possui 7 motores com diferentes potências que determinará o valor do disjuntor geral. Para isso, deve-se calcular a corrente nominal de cada motor através da equação (2):

$$P = \sqrt{3} * V_L * I_L * fp * N \quad (1)$$

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3} * V_L * fp * N} \quad (2)$$

O motor com maior potência é o exaustor com 20 cv, que possui a função de coletar os gases provenientes da queima do combustível e eliminá-lo no ambiente. Tomando como base um motor da marca WEG e da linha W22, que são recomendados para ventiladores, temos um fator de potência de 0,81 e uma eficiência de 93% a plena carga (WEG, 2022). Outro detalhe é que para a equação (2), a unidade de potência é dada em *watts*, portanto, deve-se converter cavalo-vapor para *watts* multiplicando o valor por 736.

Sendo assim, pode-se obter a corrente nominal do motor.

$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3} * V_L * fp * N}$$

$$I_L = \frac{20 * 736}{\sqrt{3} * 380 * 0,81 * 0,93}$$

$$I_L = 29,7 A$$

Outro motor que está presente é o insuflador que possui uma potência de 15 cv. Levando em conta o procedimento acima, sua corrente nominal é de 22,27 A.

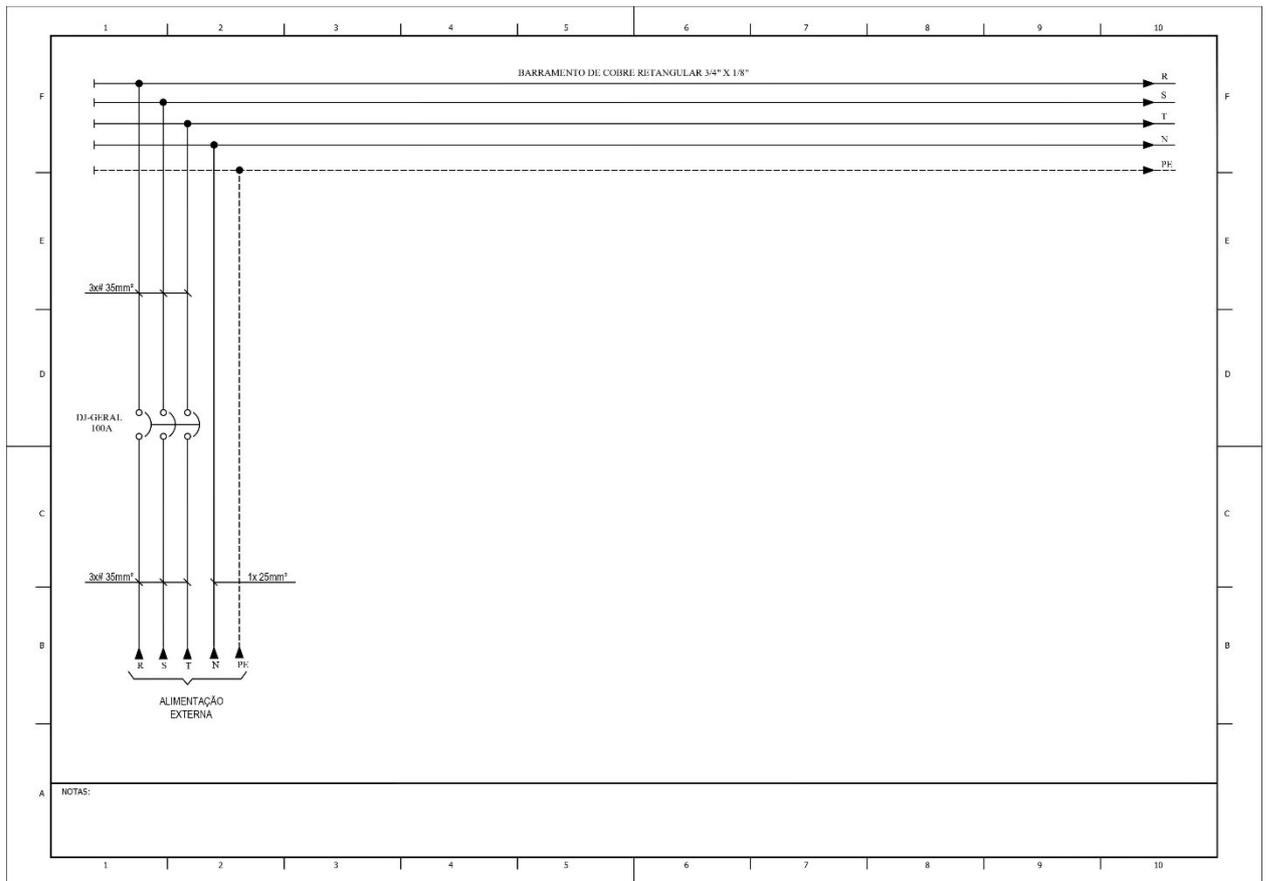
Um bloco presente na caldeira é o seu sistema de alimentação de lenha que é composto por 3 motores, um da porta guilhotina, na qual abre e fecha a porta da fornalha da caldeira, um do carro alimentador que transporta lenha, e um da descarga de lenha, sendo esses de potências iguais no valor de 3 cv. Todos esses itens somam uma corrente total de aproximadamente 13,36 A.

Como já descrito anteriormente, a caldeira possui uma bomba d'água que introduz água em seu corpo para que este vire vapor. Portanto, utilizando uma bomba com motor de 12,5 cv, sua corrente nominal será de 18,55 A.

O último motor que é de baixa potência, apenas 1 cv, e que não terá uma grande influência no dimensionamento do disjuntor geral é o do multiclone que apresentará uma corrente nominal de 1,48 A.

Portanto, somando todas as correntes, consta uma corrente de aproximadamente 85,36 A, sendo assim, demandando um disjuntor geral de 100 A, que é a primeira corrente nominal acima do valor calculado nos disjuntores comercialmente distribuídos.

Figura 15 - Disjuntor geral de 100 A corretamente dimensionado



Fonte: Autor, 2022

Além disso, há outros dois itens que são dimensionados em função do disjuntor geral, a bitola dos cabos de alimentação e o barramento de cobre, sendo este último bastante comum em painéis elétricos para facilitar as conexões dos dispositivos presente no mesmo. Isso se dá pelo fato que os cabos e o barramento devem possuir uma capacidade de condução de corrente maior que o disjuntor, uma vez que devem suportar mais corrente elétrica do que o equipamento de proteção para que não haja fusão do seu material constituinte, o cobre.

Portanto, foi escolhido de acordo com a norma NBR-5410, na qual dita todas as condições adequadas para uma instalação elétrica de baixa tensão, ou seja, até 1000 volts para corrente alternada, um cabo de 50mm² multipolar que se encontra inserido em uma eletrocalha, com 4 condutores carregados, tolerando uma corrente de 118 A. Além disso, o cabo possui uma isolação de PVC, significando assim que possui uma temperatura máxima de 70°C.

Após o disjuntor geral, o projeto elétrico pode ser dividido entre parte de potência e comando, na qual o primeiro apresenta as ligações dos dispositivos de proteção e acionamento do motor, enquanto o segundo compreende as conexões que possibilitam ligar e desligar o motor, sinalização, além de condições especiais que cada motor possui para seu funcionamento.

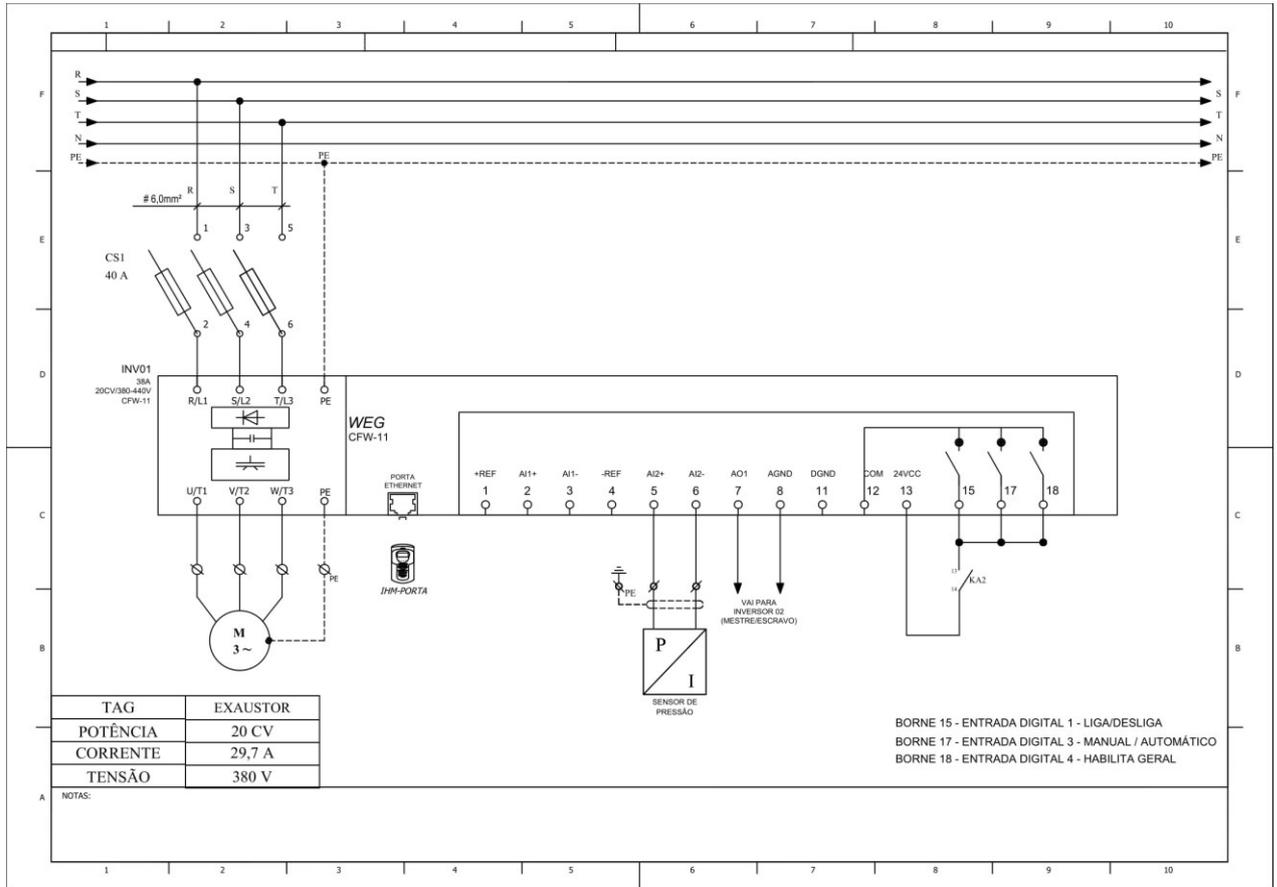
3.2. CIRCUITO DE POTÊNCIA

Começando com o motor do exaustor, em que possui um acionamento através de um inversor de frequência, devido a necessidade de variação de velocidade de acordo com um sinal de 4-20 mA proveniente de um sensor de pressão. Portanto, foi avaliado um inversor com corrente de saída de 38 A, para uma tensão de 380V/440V da fabricante WEG, cujo modelo é o CFW-11.

O uso do inversor para ventiladores nessa situação se mostra vantajoso uma vez que tendo uma variação de velocidade de acordo com a demanda da caldeira, haverá uma grande economia de energia comparada à partida direta por exemplo, já que a potência absorvida será menor com a redução da frequência e consequentemente da velocidade.

Como o inversor de frequência já possui proteção contra sobrecorrente, foi determinado uma chave seccionadora fusível para a proteção contra curto-circuito. O recomendado é utilizar fusíveis do tipo contato faca (Tipo NH) do modelo ultrarrápido aR com corrente de 40 A, visto que são ideais para semicondutores e equipamentos eletrônicos como os inversores, além de se mostrarem com atuação mais precisa que o disjuntor termomagnético.

Figura 16 – Acionamento do exaustor com proteção e suas interfaces.



Fonte: Autor, 2022

Para o circuito de comando do inversor, são utilizadas as suas interfaces através das entradas e saídas, tanto digitais como analógicas. Conforme a figura 16, nota-se que foram utilizadas 3 entradas digitais com alimentação de 24 Vcc disponibilizada pelo próprio inversor, que devem ser configuradas corretamente para exercerem certas funções. A entrada DI1 envia o comando de ligar e desligar. A entrada DI3 possui a função de alternar o modo de funcionamento de manual para automático, fazendo com que o processo PID possa funcionar, ou seja, o inversor ajustará automaticamente o valor instantâneo da variável, no caso o sensor de pressão, para o valor colocado no *SetPoint*. Já a entrada DI4 habilitará todos os comandos. Essas entradas digitais estão todas dependentes de um contato NA do contator auxiliar KA2, portanto, assim que a bobina de KA2 ser energizada, todas as entradas digitais se habilitam, exercendo os comandos parametrizados.

Dado que está se utilizando um inversor WEG do modelo CFW-11, para parametrizar a entrada digital 1 que se encontra no pino 15 da régua de borne de

comando do equipamento, basta alterar o parâmetro P0263 de 0 para 1. Para a entrada digital 3, no pino 17, deve-se modificar o parâmetro P0265 para 22. E por último, o parâmetro P0266, referente a entrada digital 4, deve ser fixado em 2 (WEG, 2020).

Tabela 1 - Parametrização das entradas digitais

PARÂMETRO	DESCRIÇÃO	FUNÇÃO
P0263 = 1	Função da entrada digital 1	Liga e Desliga
P0265 = 22	Função da entrada digital 3	Manual ou automático
P0266 = 2	Função da entrada digital 4	Habilita Geral

Fonte: WEG,2020

Além das entradas digitais, há também a entrada analógica 2, onde está conectado o sensor de pressão que emite um sinal de 4-20 mA, que possibilitará o controle PID. O sensor é interligado conforme a Figura 16, com o polo positivo na porta AI2+, e o polo negativo na AI2-. Ademais, é recomendado o uso de cabo blindado para sua ligação, visto que possibilitam uma proteção contra interferências magnéticas que podem ocasionar erros na transmissão desse sinal (WEG, 2020).

A última ligação diz respeito a saída analógica que detêm a atribuição de transmitir a variável do processo do inversor do exaustor para o do insuflador tornando-os mestre e escravo respectivamente, ou seja, a mesma variação de velocidade de um refletirá no outro. Com isso, deve-se configurar a saída analógica 1, através de parâmetro P0251, atribuindo-o para 6, que transmitirá o sinal de 4-20mA para a entrada analógica do inversor escravo (WEG, 2020).

Tabela 2 - Parametrização das entradas e saídas analógicas

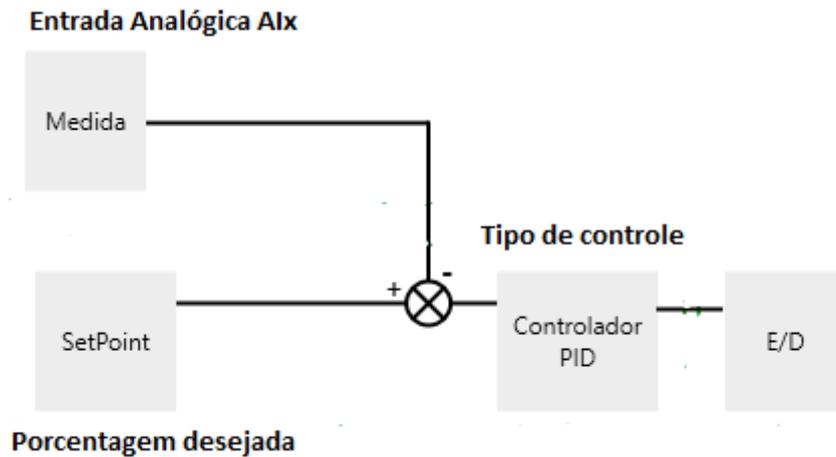
PARÂMETRO	DESCRIÇÃO	FUNÇÃO
P0236 = 3	Função da entrada analógica 2	Variável do processo
P0238 = 1	Tipo de sinal na entrada analógica 2	4-20 mA
P0251 = 6	Função da saída analógica 1	Variável do processo

Fonte: WEG,2020

Para finalizar a configuração do regulador PID, deve-se configurar alguns parâmetros referentes ao controle em si. Na adaptação da figura 17, pode-se notar

algumas variáveis fundamentais para cada bloco do sistema e logo abaixo a tabela com os parâmetros utilizados para a configuração.

Figura 17 - Sistema de controle em malha do PID com variáveis



Fonte: Autor, 2022

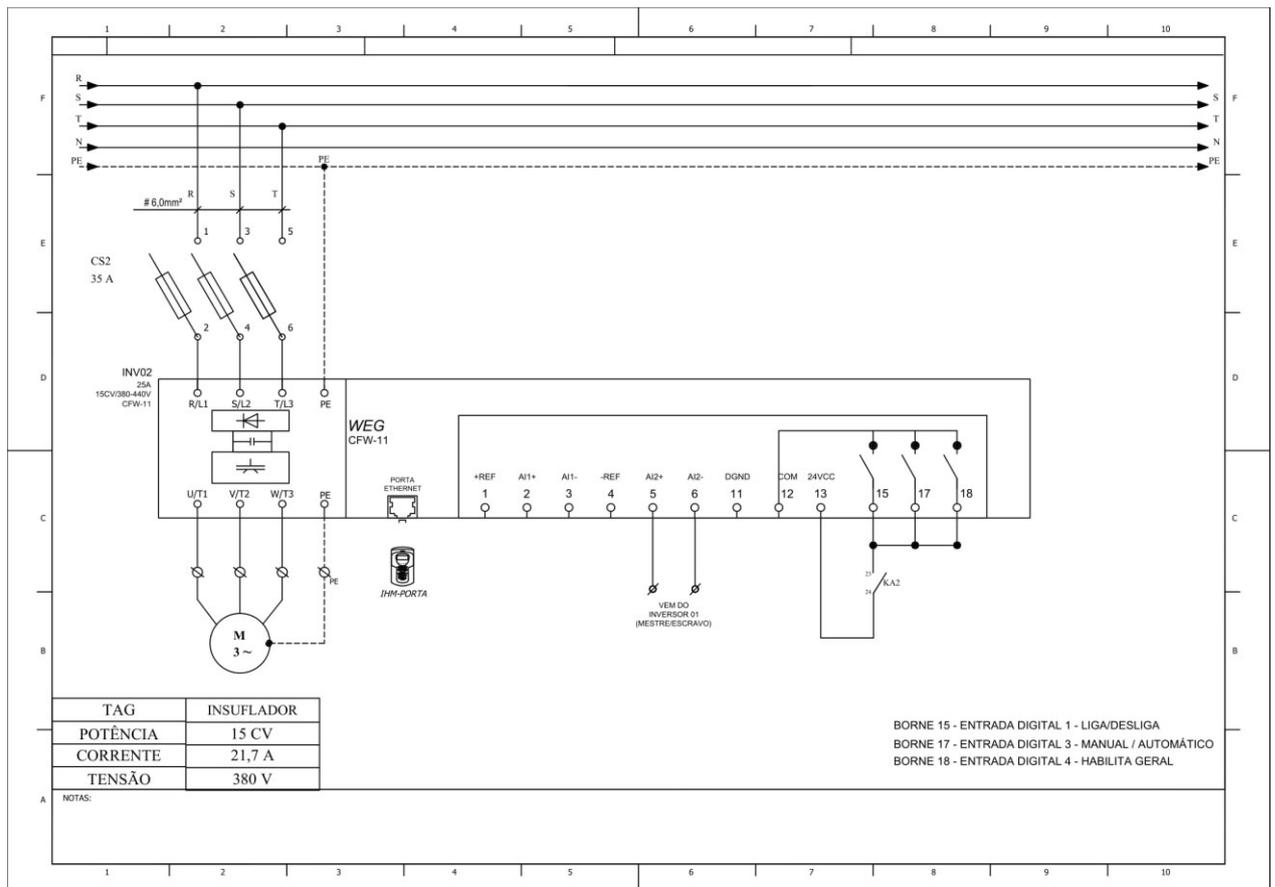
Tabela 3 - Parametrização do controle PID

PARÂMETRO	DESCRIÇÃO	FUNÇÃO
P0203 = 1	Seleção da função PID	Habilitar o controle PID
P0536 = 1	Ajuste automático para o <i>Setpoint</i>	Habilitar o controle PID
P0527 = 0	Tipo de ação do PID	Ação direta
P0524 = 1	Entrada AI2 como realimentação	Sensor de pressão como variável do processo
P0220 = 1	Operação em situação remoto	Escolha do <i>Setpoint</i> pela IHM do inversor
P0222 = 0	Seleção da referencia	Escolha do <i>Setpoint</i> pela IHM do inversor
P0525 = x %	<i>Setpoint</i> PID	Escolha de uma porcentagem desejada para o <i>Setpoint</i>

Fonte: WEG,2020

Considerando todo o conteúdo descrito para o acionamento do motor do exaustor, o mesmo pode ser válido para o insuflador, uma vez que possuem partidas e condições idênticas, como pode observado pela figura 17 e 18. Portanto todas as colocações no tocante a proteção, conexões e programação são pertinentes para o insuflador, excetuando-se o valor do fusível que passa a ser de 35 A, além da parametrização referente à saída analógica que não existe nesse inversor.

Figura 18 - Acionamento do insuflador com proteção e suas interfaces.



Fonte: Autor, 2022

O próximo motor a ser considerado é o da bomba d'água, na qual possui um acionamento com *soft starter*, em razão da grande quantidade de partidas que deve ser realizado para encher o tanque da caldeira. Dessa maneira, foi selecionado uma soft starter para um motor de 12,5 cv com corrente de saída equivalente a 24 A para uma tensão de 380/440V da marca WEG e modelo SSW07.

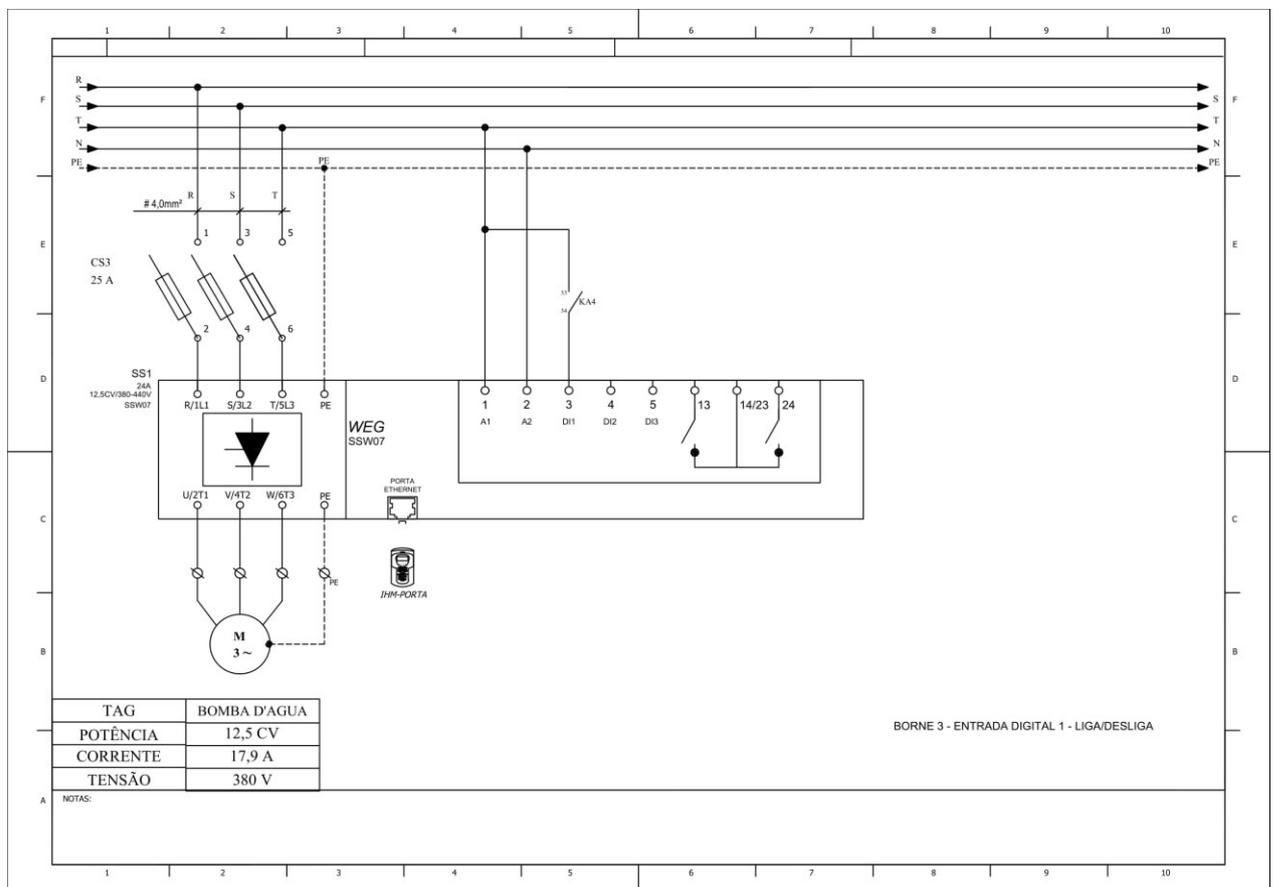
No sistema de proteção assim como nos inversores é adotado os fusíveis ultrarrápidos por também se tratar de um equipamento eletrônico, porém com uma corrente nominal de 25 A.

O circuito de comando se apresenta mais simples, em razão de que só será necessário ligar e desligar o motor, demandando desta forma somente uma entrada digital. Diferente do inversor, nesse equipamento é necessário alimentar a sua interface de comando, nesse caso, com 220 VCA.

A configuração da programação da *soft starter* se restringe à parametrização da entrada digital 1, através do código P263 que deve ser colocado em 1.

Na figura 19, visualiza-se o esquema de ligação para o acionamento da bomba d'água.

Figura 19 - Acionamento da bomba d'água com proteção e suas interfaces.



Fonte: Autor, 2022

Para o sistema de alimentação de lenha da caldeira, há dois tipos diferentes de acionamento, sendo estes a partida direta com e sem reversão. A necessidade de se utilizar uma partida reversora se dá pelo fato de que a porta guilhotina requer uma abertura e fechamento e que o carro transportador de lenha precisa avançar e recuar,

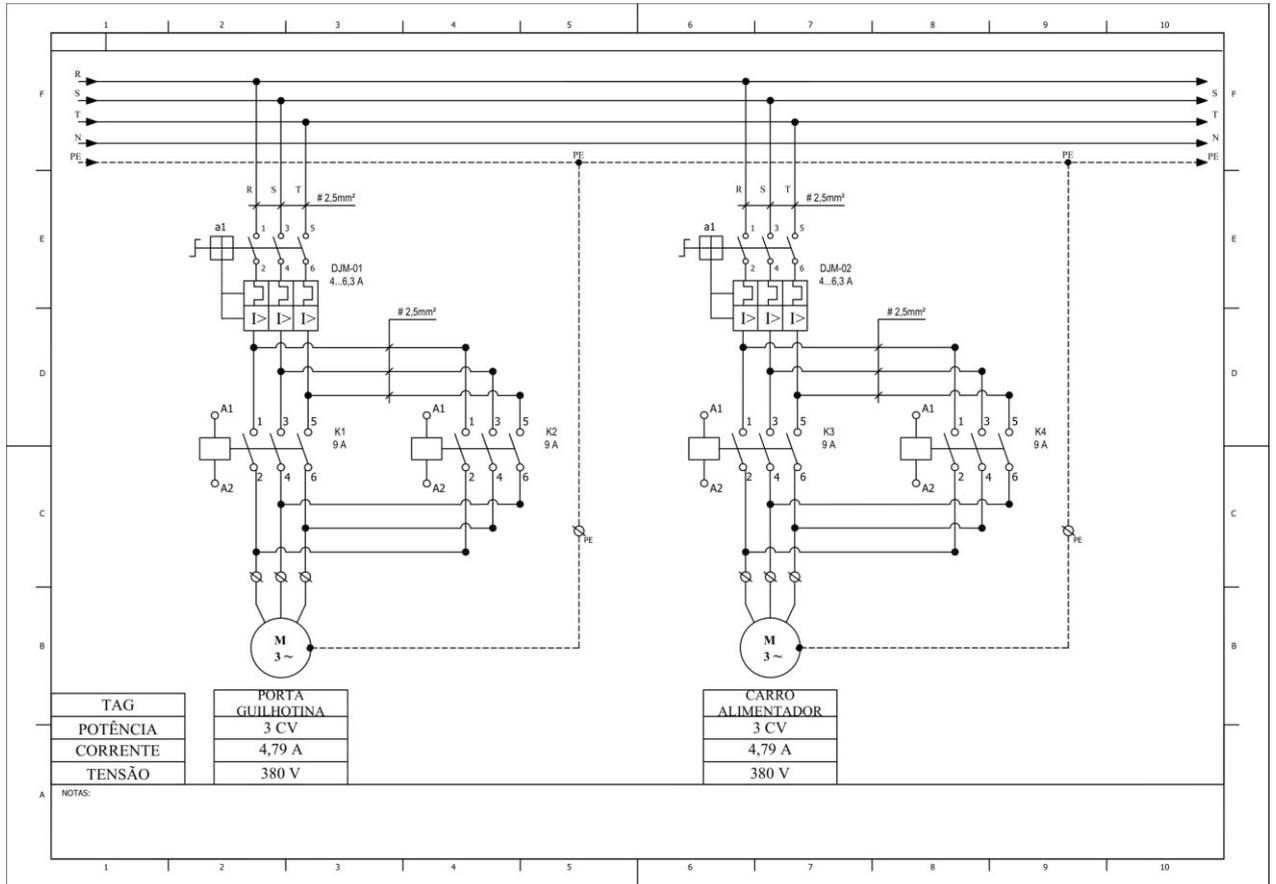
exigindo que o motor gire para duas direções diferentes. Já para o mult ciclone e a descarga de lenha, somente a partida direta simples já é o suficiente.

Portanto, o circuito de potência é constituído por um disjuntor-motor termomagnético que protegerá o sistema de sobrecorrentes e de curtos-circuitos, além de contator de potência que será o responsável pelo fechamento de contatos que energizará o motor. No caso da partida com reversão, se mostra necessário a utilização de dois contadores para que seja possível o funcionamento bidirecional.

O dimensionamento desses equipamentos citados acima se dá em função da potência do motor e conseqüentemente sua corrente nominal. Comercialmente, os fabricantes disponibilizam disjuntores-motores com uma faixa de corrente, desse modo, a corrente nominal do motor deve se encontrar em algum intervalo de corrente desses dispositivos. Nesse caso, para os motores de 3 cv e 4,45 A, foi dimensionado o disjuntor motor de 4 até 6,3 A, e para o motor de 1 cv e 1,48 A, o espaço selecionado foi de 1,6 até 2,5 A. Já para o contator, deve-se levar em conta a corrente nominal juntamente com a corrente de partida. Como nesse caso a corrente é consideravelmente pequena, foi selecionado um contator de 9 A que já se mostra suficiente.

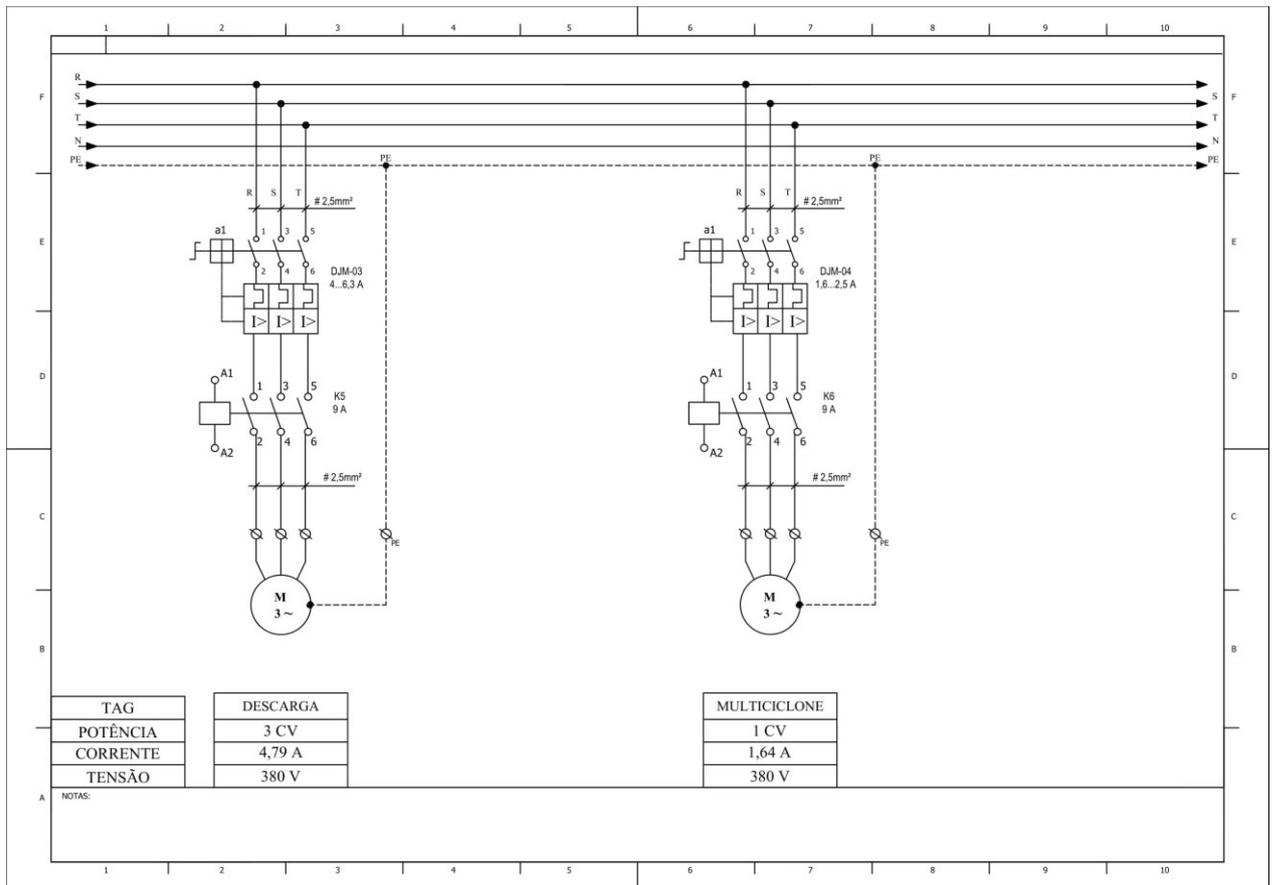
Nas figuras 20 e 21 são expostos os acionamentos da porta guilhotina, do carro alimentador, da descarga e do mult ciclone.

Figura 20 - Acionamento da porta guilhotina e do carro alimentador



Fonte: Autor, 2022

Figura 21 - Acionamento da descarga e do multiciclone



Fonte: Autor, 2022

O esquema de ligação da partida direta com reversão é simples sendo necessário apenas uma inversão de fase na saída do segundo contator, fazendo assim que o motor gire para o lado contrário.

3.3. CIRCUITO DE COMANDO

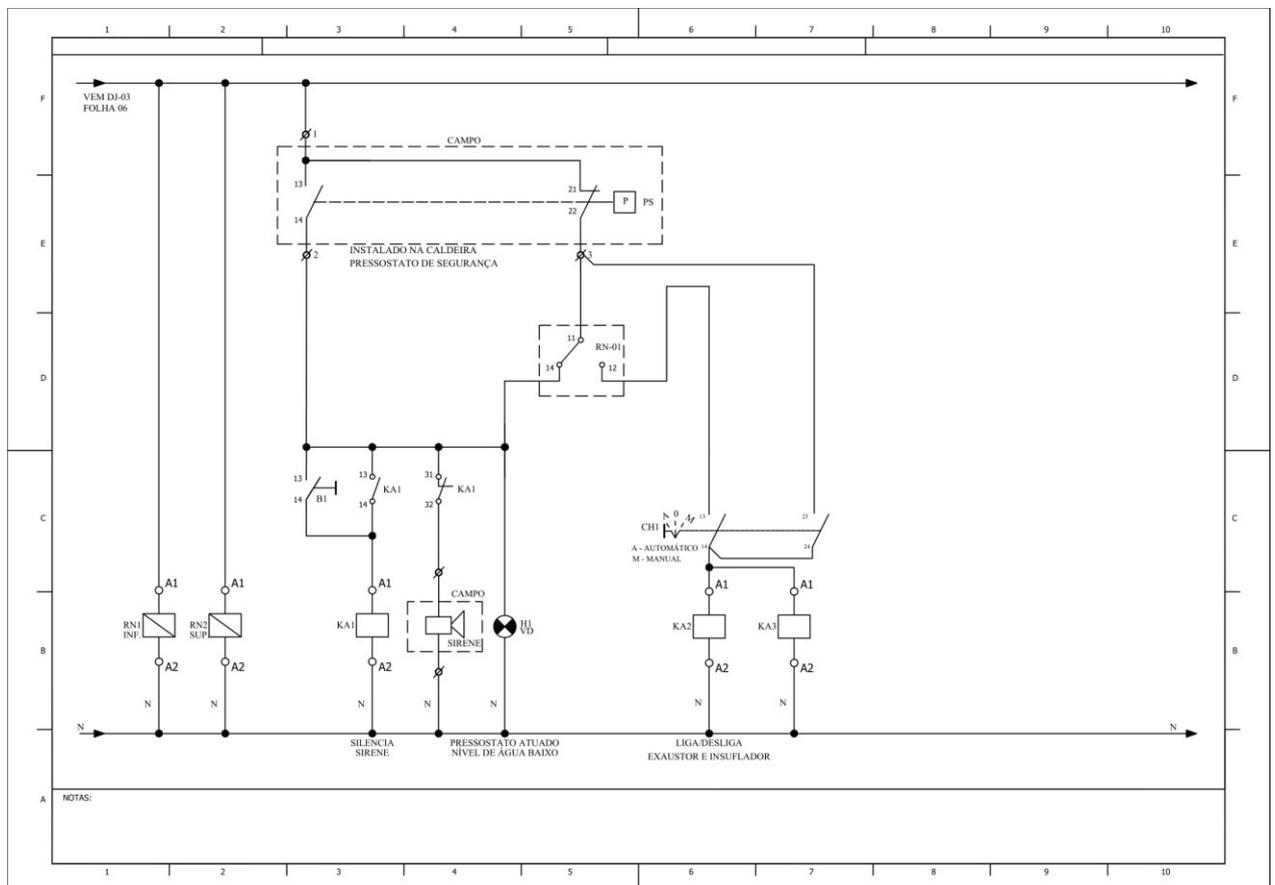
Com todos os circuitos de potência já explicitados, deve-se elaborar o circuito de comando visando partir de fato esses motores, além de obedecer às condições para o funcionamento correto da caldeira. Como já citado anteriormente, as caldeiras são ditadas pela NR-13, e nela há disposições que interferem diretamente no seu projeto elétrico, entre elas:

- Sistema automático de drenagem rápida de água, conhecido como descargas de fundo, para evitar o acúmulo de substâncias;

- Processo automático de alimentação de água na caldeira no momento em que o nível pode ser considerado baixo, interferindo diretamente no comando da bomba d'água;
- Proteção contra nível baixo de água e contra pressão alta, ocasionando em um desligamento de todos os motores da caldeira, exceto a bomba d'água;

Em razão disso, utiliza-se um pressostato visando a pressão alta e relés de nível para o nível baixo de água.

Figura 22 – Comando com pressostato de segurança e relé de nível.



Fonte: Autor, 2022

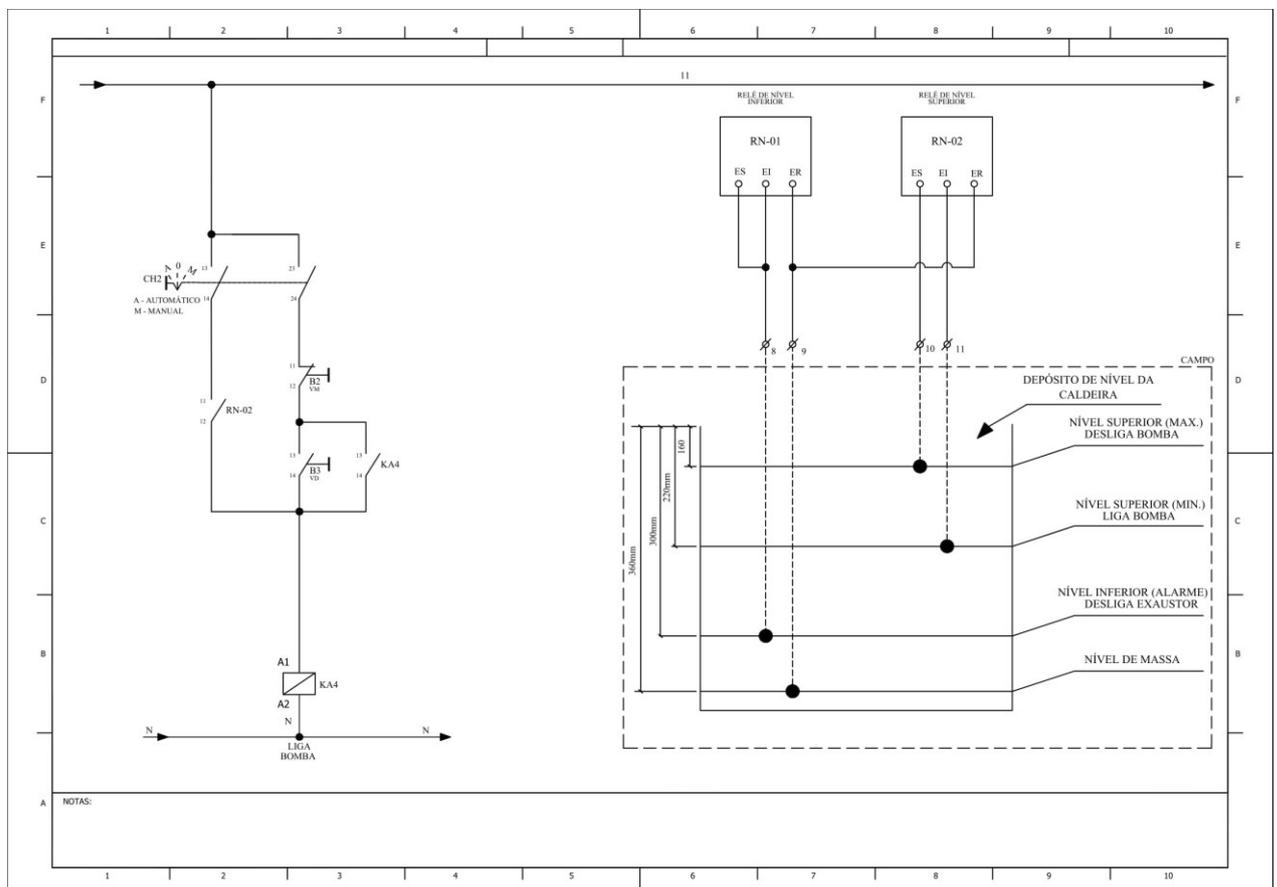
O pressostato possui um contato NA e um contato NF, sendo que esses contatos atacam no momento em que a pressão ultrapassa um valor previamente determinado. Nas entradas 13 e 14 que simbolizam o contato NA, é conectada uma sirene que será acionada quando a caldeira estiver com uma pressão consideravelmente alta, um led sinalizando esse alarme, além de um botão para desligar essa mesma sirene. Já no contato NF, é ligado um contato NAF de um relé

de nível que mudará sua configuração quando o nível estiver baixo. Além disso, há duas bobinas de contadores auxiliares, KA2, que liga e desliga os inversores do exaustor e do insuflador, e o KA3 que pode interromper o fornecimento para o comando de acionar os motores da porta, carrinho, descarga e multiciclone.

Portanto, quando o pressostato atua, uma sirene é tocada para alertar a pressão alta, um led é ligado para enfatizar o problema e todos os motores da caldeira, são desligados, exceto a bomba d'água. O mesmo ocorre quando o relé de nível 1, que monitora o nível baixo de água, atua, cobrindo assim tanto a proteção para a pressão alta, quanto para o nível baixo de água, como pode ser visualizado pela figura 22.

Para satisfazer a condição da norma, o comando da bomba d'água deve contar com um acionamento manual e um automático, como representado na figura 23. Portanto, para que o sistema fique automático, o comando é feito com o auxílio de um relé de nível que ligará a bomba quando atingir em um certo ponto e desligará quando encher a caldeira.

Figura 23 - Comando da bomba d'água e eletrodos de níveis



Fonte: Autor, 2022

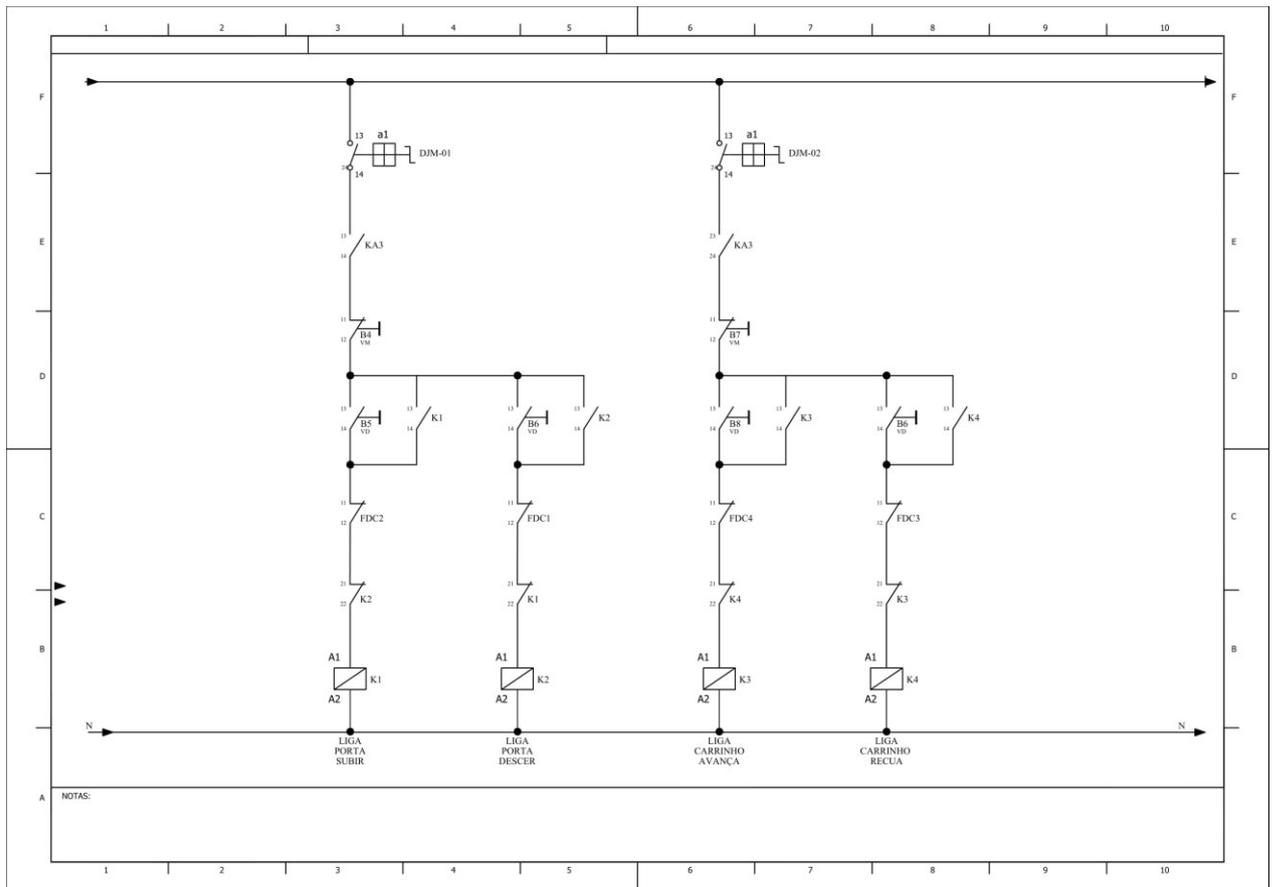
No modo manual, há um acionamento simples idêntico ao de uma partida direta, porém com um contator auxiliar que fechará o selo quando pressionado o botão de ligar. Um contato NA desse contator está posicionado na entrada digital 1 da soft starter, fazendo assim com que o motor ligue. Já o automático, está em função do contato aberto do relé de nível que em conjunto com os eletrodos que captam o nível da água, irá ligar e desligar a bomba automaticamente.

Seguindo o projeto, é exibido o comando das partidas diretas com reversão, que é realizado através de botoeiras liga e desliga, sendo um conjunto desse para cada direção. Quando pressionado o botão de ligar, é energizado a bobina do contator que através de um selo com um contato aberto, mantêm-se energizada e com o motor em funcionamento. Já o botão de desliga que é um contato NF, quando pressionado, interrompe a alimentação da bobina do contator, desligando o motor.

Como são dois contadores, deve haver um intertravamento entre as bobinas desses equipamentos para que ambos não sejam acionados simultaneamente. Por isso, é conectado um contato NF do contator primário logo antes da bobina do contator secundário e vice-versa. Outro travamento que também se mostra importante é o do fim de curso, que interrompe o fornecimento de tensão através de um contato NF, quando este dispositivo é acionado mecanicamente.

Todo esse esquema é demonstrado na figura 24, englobando tanto o comando da porta guilhotina, quanto do carro alimentador.

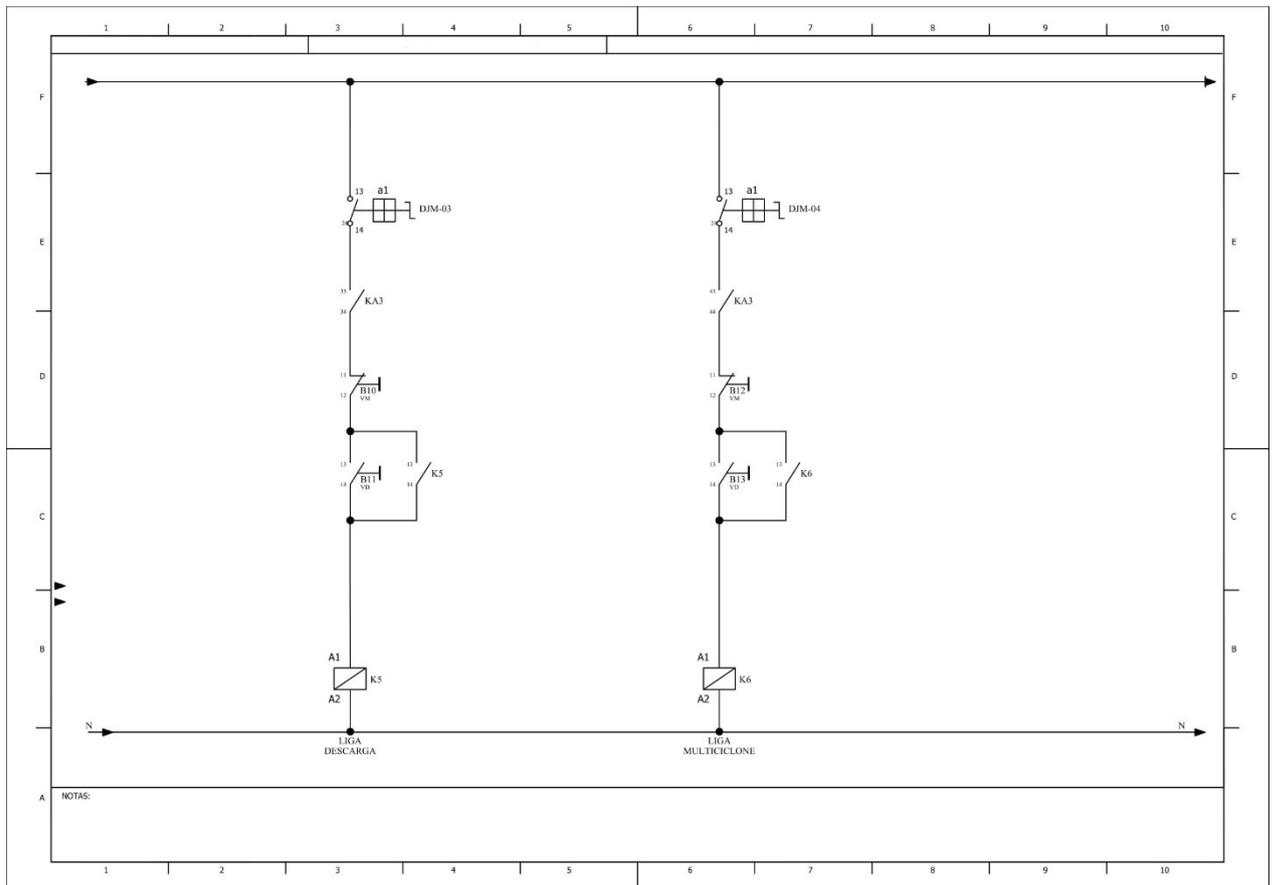
Figura 24 - Comando das partidas diretas com reversão



Fonte: Autor, 2022

A estrutura do acionamento para a partida direta sem a reversão se assemelha bastante quando há a reversão, utilizando praticamente os mesmos conceitos, porém para apenas um contator, como pode ser visualizado na figura 25.

Figura 25 - Comando das partidas diretas sem reversão.

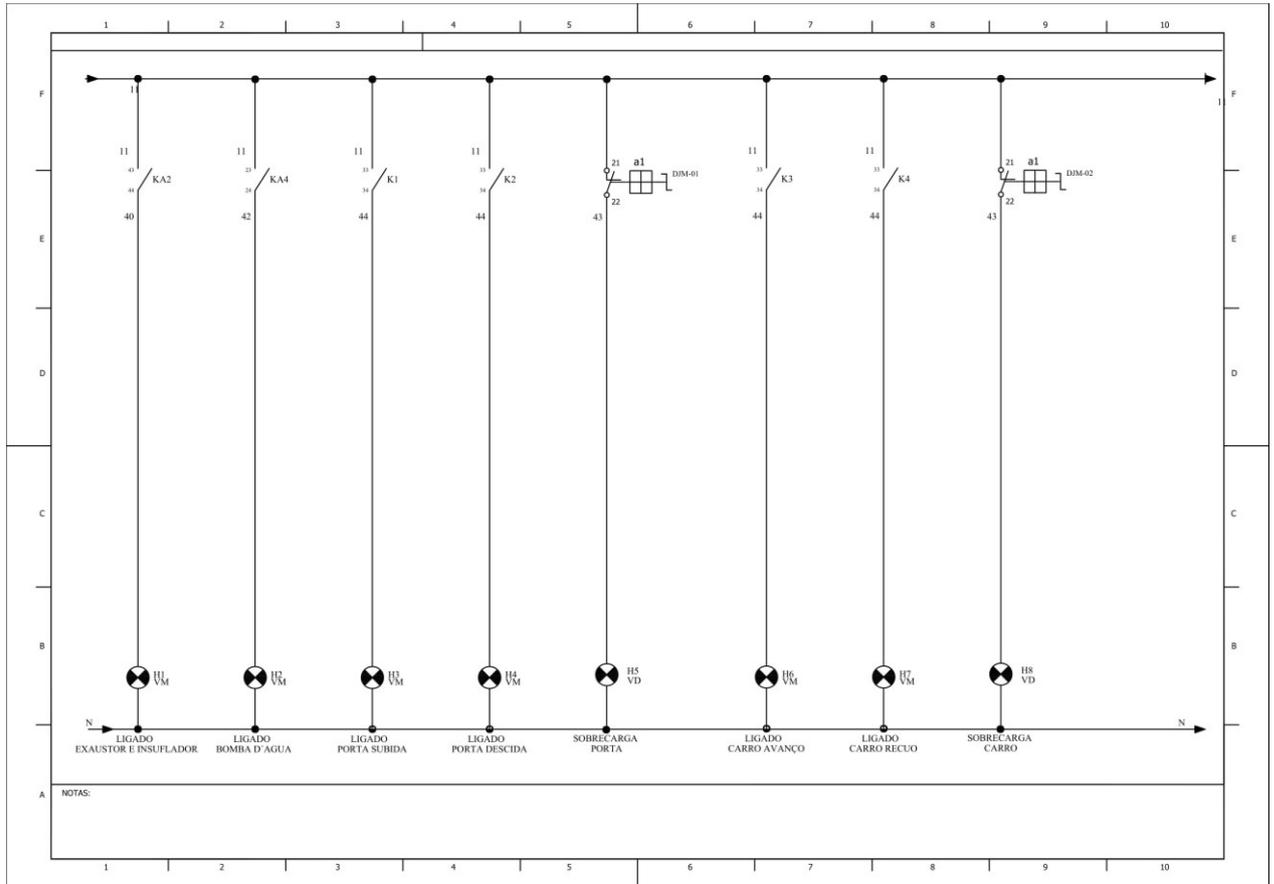


Fonte: Autor, 2022

Como citado anteriormente, um dos tópicos fundamentais do circuito de comando são as sinalizações. Deste modo, há leds que cumprem essa função, e dependendo das cores, possuem significados diferentes. Nesse trabalho em específico, foi determinado luz vermelha para o status de ligado do motor e verde para sobrecarga. Para a condição de motor acionado, emprega-se um contato NA do contator em questão, enquanto que para a sobrecarga, também se utiliza um contato NA, entretanto, pertencente ao disjuntor-motor.

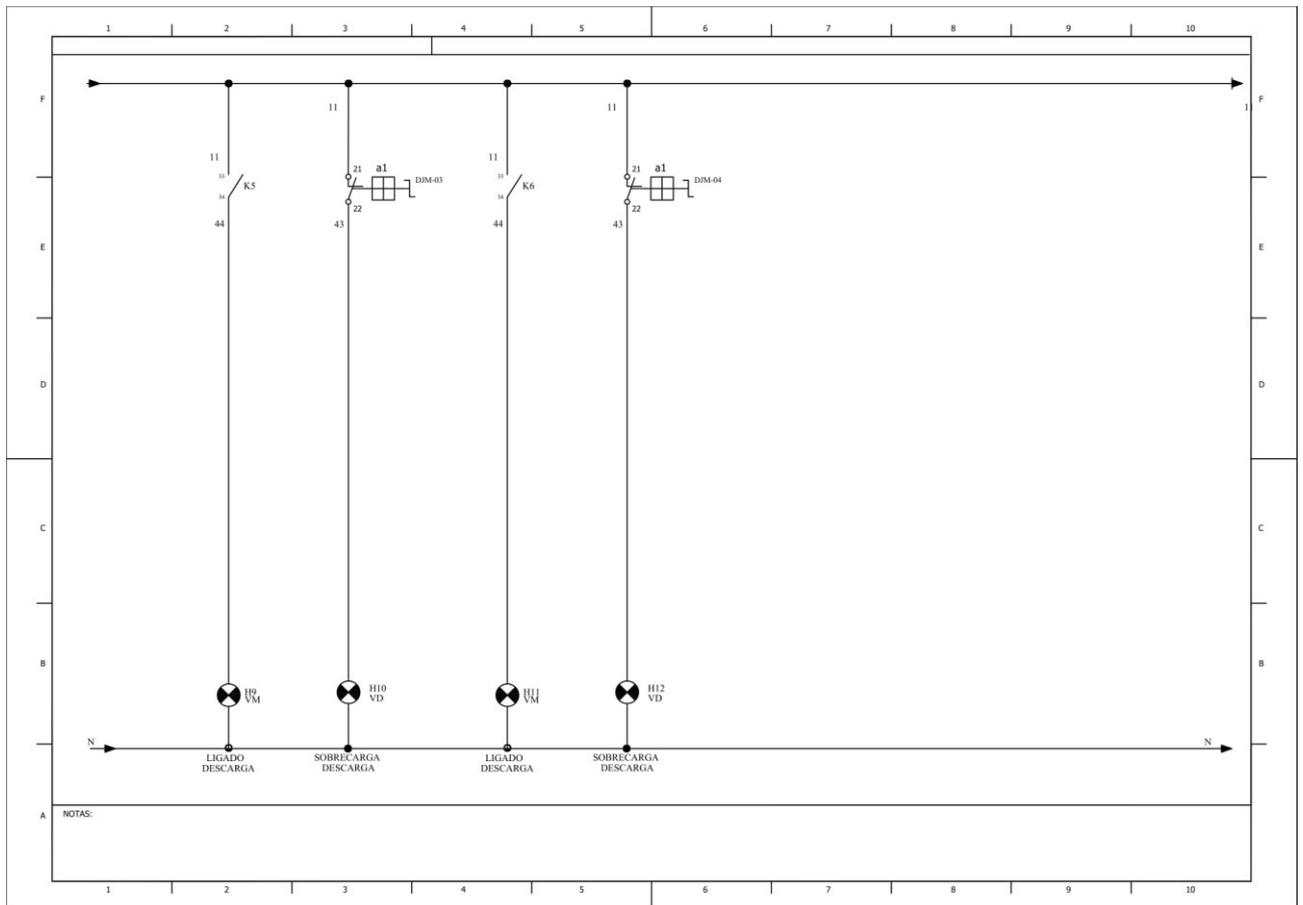
Portanto, nota-se pelas figuras 26 e 27 que foi feito sinalizações para todos os motores do conjunto da caldeira.

Figura 26 - Sinalização de motor funcionando e de sobrecarga



Fonte: Autor, 2022

Figura 27 - Sinalização de motor funcionando e de sobrecarga

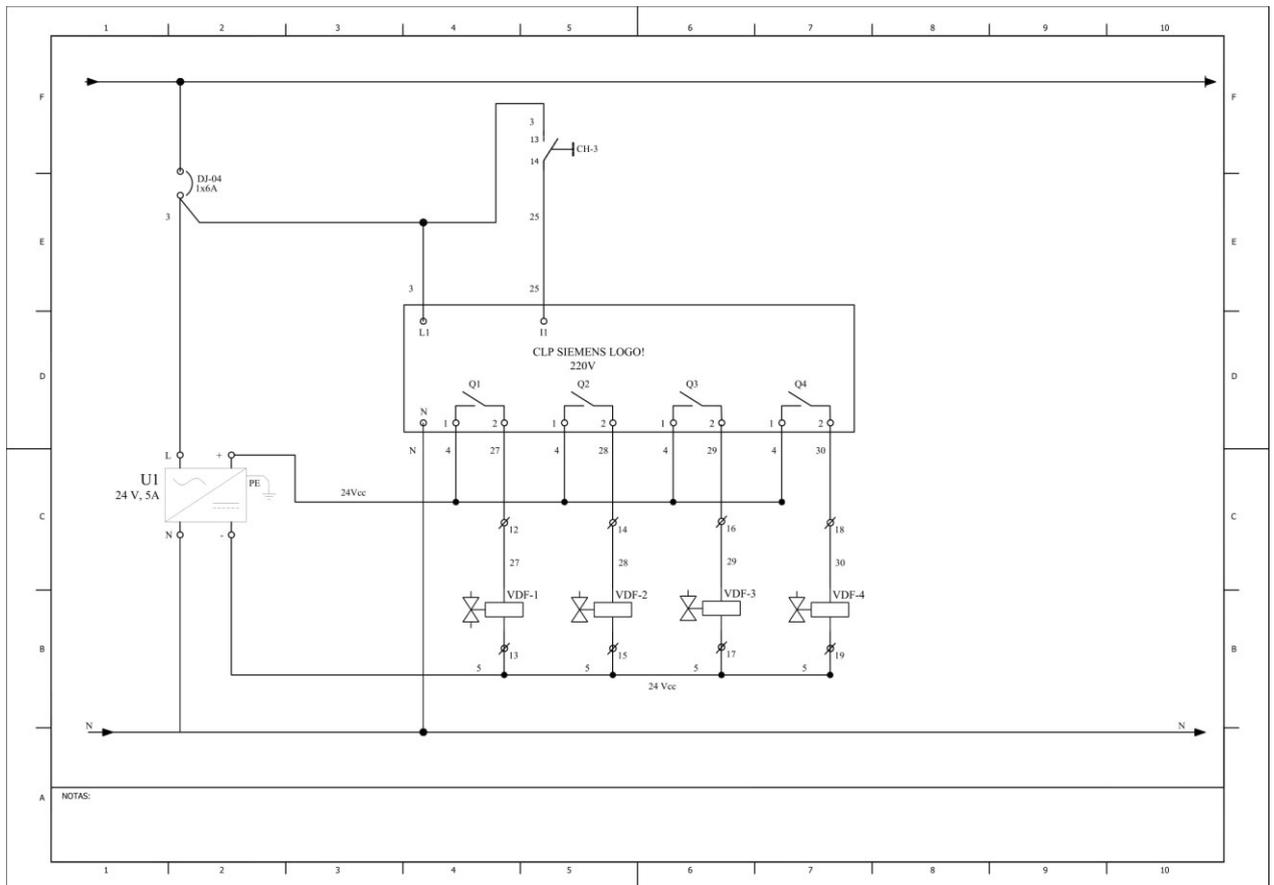


Fonte: Autor, 2022

Outra exigência da norma é que o sistema das descargas de fundo seja automático após o acionamento do operador. Essas drenagens são realizadas em um ciclo que possui intervalos, geralmente de 15 minutos, com ações rápidas de 5 a 7 segundos, podendo assim atender todas as localidades de depósito de resquícios.

Dessa maneira, como demonstrado na figura 28, utiliza-se um CLP que através de suas saídas digitais, acionará válvulas solenoides, permitindo assim a passagem de água. Esse tipo de válvula é composto pelo seu corpo e pela bobina solenoide, sendo muito comum no meio industrial, podendo ter aplicações com gases, água, óleos e até vapor. Assim que a bobina é energizada, uma força é gerada movimentando o êmbolo da válvula.

Figura 28 - CLP e válvulas solenoides



Fonte: Autor, 2022

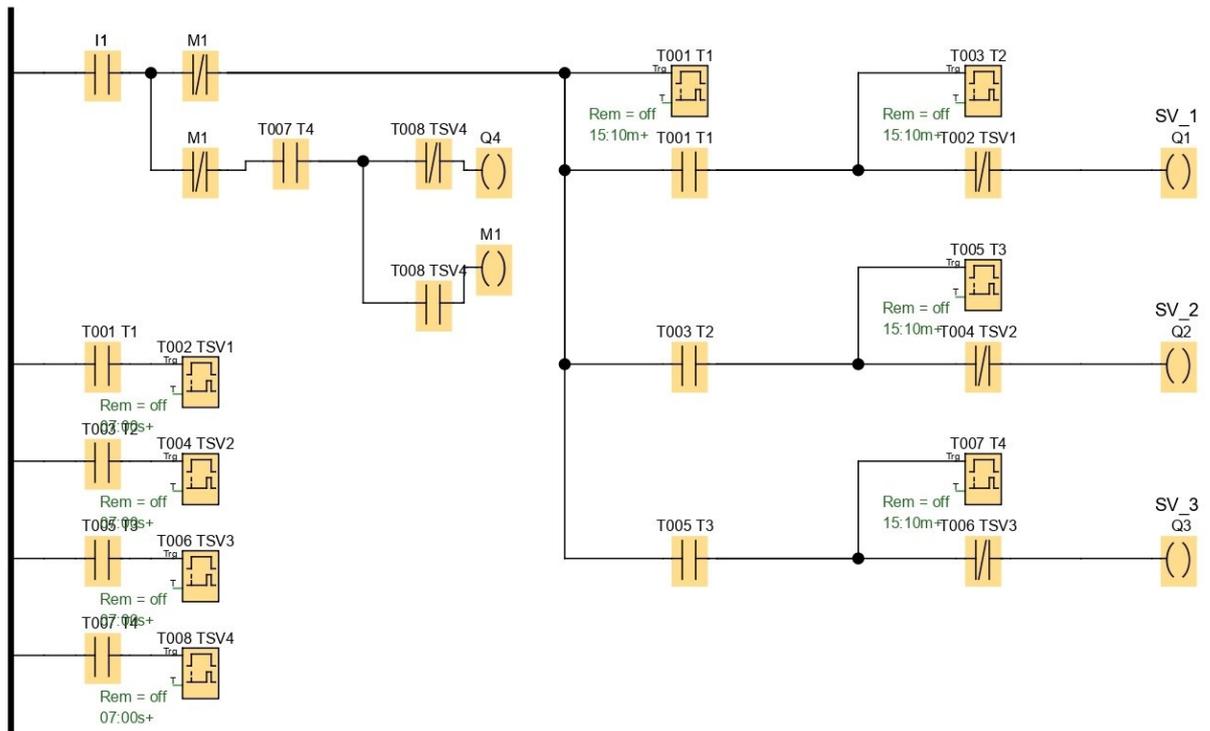
3.4. PROGRAMAÇÃO DA AUTOMAÇÃO NO CLP

Para que essa automação seja possível, deve-se desenvolver uma programação com linguagem *Ladder* no *software* específico do controlador. Para esse trabalho, foi utilizado um CLP simples da fabricante Siemens e da linha LOGO!, possuindo 8 entradas digitais e 4 saídas digitais. Em uma dessas entradas, é utilizado uma chave comutadora de 2 posições, cujo dever é apenas ligar ou desligar o ciclo de descargas. Já as válvulas são conectadas nas saídas digitais e serão acionadas assim que liberadas pela lógica do programa.

A programação é elaborada no *software* LOGO! Soft Comfort e conta com somente alguns elementos da linguagem *Ladder*, que remetem a componentes de circuitos elétricos como contatos abertos e fechados, bobinas, temporizadores, etc., com o intuito de acionar uma válvula de cada vez por um certo tempo e com um intervalo programável entre elas.

Portanto, a partir do momento que a chave comutadora alimentar a entrada digital, começa a contar um tempo para que a primeira válvula seja acionada. Após expirado a contagem, o contato da saída digital fecha e aciona outro temporizador que será referente ao tempo que a válvula em questão ficará aberta. Com isso, o mesmo vai se repetindo até encerrar e reiniciar o ciclo.

Figura 29 - Automação realizada para o CLP a partir de linguagem *Ladder*.



Fonte: Autor, 2022

4. CONCLUSÃO

Com a tecnologia cada vez mais se desenvolvendo, sistemas automatizados vêm sendo cada vez mais requisitados no mercado, uma vez que possui inúmeros benefícios, como uma melhor operação, menor interferência humana, maior eficiência energética, maior segurança, etc.

Considerando essas vantagens, o objetivo deste trabalho foi abordar como o sistema elétrico contribui para o desenvolvimento de uma máquina que nesse caso foi uma caldeira. Para cumprir essa meta, foi apresentado os conceitos de funcionamento de um maquinário desse tipo e como dispositivos eletrônicos podem atuar em cada uma de suas partes, destacando o porquê de seu uso, além das vantagens. Além disso, foi realizado o dimensionamento correto dos aparelhos elétricos para que não seja desperdiçada energia além do funcionamento ocorrer sem problemas.

Portanto, conclui-se que, a vista de todos os fundamentos teóricos apresentados, destacando os diferentes tipos de acionamentos, os equipamentos de segurança e de monitoração utilizados, além da automação, a caldeira funcionaria de maneira eficiente, energeticamente falando, com uma operação simplificada, com maior segurança, e mais importante, dentro das condições impostas pela norma regente.

5. REFERÊNCIAS

JUNIOR, João B. Tolentino. Estações de bombeamento: Bombas Hidráulicas. In: JUNIOR, João B. Tolentino. Hidráulica Agrícola. Universidade Federal de Santa Catarina: [s. n.], 2021. cap. 7. Disponível em: <https://hidraulica.tolentino.pro.br/>. Acesso em: 27 fev. 2022.

Eficiência Energética - Índices de Rendimento | WEG. Disponível em: <https://www.weg.net/institutional/BR/pt/solutions/energy-efficiency/efficiency-index>. Acesso em: 2 jun. 2022.

MOTORES Síncronos. In: GRUPO WEG (Jaraguá do Sul - SC - Brasil). Motores Síncronos. 7.0. Revisão 7. ed. Jaraguá do Sul - SC - Brasil, 14 set. 2020. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h13/h7e/WEG-motores-sincronos-50005369-catalogo-portugues-br.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2022.

GRUPO WEG (Jaraguá do Sul - SC - Brasil). W22: Motor Trifásico. 15. Jaraguá do Sul - SC - Brasil, Dez 2020. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hb7/h10/WEG-w22-motor-trifasico-50025536-brochure-portuguese-web.pdf>. Acesso em: 2 jun. 2022.

WEG-CESTARI REDUTORES E MOTORREDUTORES S.A. (Monte Alto/São Paulo - Brasil). Manual de Instruções: Linha Motorreduzores. 01. [S. l.], jun 2019. Disponível em: <http://www.wegcestari.com.br/index.php/pt/downloads/manuais-tecnicos?download=14:manual-motorreduzores-pt>. Acesso em: 2 jun. 2022.

FRANCHI, Claiton Moro. Inversores de Frequência: Teoria e Aplicações. 2ª Edição. ed. São Paulo: Editora Érica, 2013.

Tudo que você precisa saber sobre Inversor de Frequência. Disponível em: <https://macrotec.ind.br/tudo-que-voce-precisa-saber-sobre-inversor-de-frequencia/>. Acesso em: 5 jun. 2022.

O que é um inversor de frequência? Como é o seu funcionamento? Disponível em: <https://blog.se.com/br/automacao-industrial/2020/10/22/o-que-e-um-inversor-de-frequencia-e-como-escolher-a-melhor-opcao/>. Acesso em: 5 jun. 2022.

COMO FUNCIONA UM INVERSORES DE FREQUÊNCIA - ServiceDrive. Disponível em: <<https://www.servicedrive.com.br/manutencao-de-inversores-de-frequencia/>>. Acesso em: 5 jun. 2022.

CHAPMAN, Stephen J. Motores Síncronos. *In*: Fundamentos de máquinas elétricas [recurso eletrônico] / Stephen J. Chapman ; tradução: Anatólio Laschuk. – 5. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre : AMGH, 2013, cap. 5, p. 271-307, cap. 6, p. 307-311.

CHAPMAN, Stephen J. Motores de Indução. *In*: Chapman, Stephen J. Fundamentos de máquinas elétricas [recurso eletrônico] ; tradução: Anatólio Laschuk. – 5. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre : AMGH, 2013, cap. 6, p. 307-311.

HART, Daniel W. Retificadores de onda completa. *In*: Hart, Daniel W. Eletrônica de Potência: Análise e Projetos de Circuitos; tradução: Romeu Abdo; revisão técnica: Antônio Pertence Júnior – Porto Alegre; AMGH, 2012, cap. 4, p.144-149 .

FRANCHI, Claiton Moro. Controladores Lógicos Programáveis - Sistemas Discretos / Claiton Moro Franchi, Valter Luís Arlindo de Camargo. - 1. ed. - São Paulo: Érica, 2008.

PETRUZELLA, Frank D. Controladores lógicos programáveis [recurso eletrônico] / Frank D. Petruzella; tradução: Romeu Abdo; revisão técnica: Antônio Pertence Júnior. – 4. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre: AMGH, 2014.

FRANCHI, Claiton Moro. Chaves de Partidas Eletrônicas. *In*: Acionamentos Elétricos. 4º Edição. ed. São Paulo: Editora Érica, 2008, cap. 6, p.181-195

ATS22D47Q - Partida suave eletrônica ATS22 - 47 A - 200-440 VAC | Schneider Electric Brasil. Disponível em: <<https://www.se.com/br/pt/product/ATS22D47Q/partida-suave-eletr%C3%B4nica-ats22-47-a-200440-vac/>>. Acesso em: 12 jul. 2022.

Soft Starter. Disponível em: <<https://profcolassante.blogspot.com/2015/06/soft-starter.html>>. Acesso em: 12 jul. 2022.

NR-13 CALDEIRAS, VASOS DE PRESSÃO, TUBULAÇÕES E TANQUES METÁLICOS DE ARMAZENAMENTO. [s.l: s.n.]. Disponível em:

<<https://www.gov.br/trabalho-e-previdencia/pt-br/composicao/orgaos-especificos/secretaria-de-trabalho/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-13.pdf>>. Acesso em 25 jul. 2022.

KETLIN. Importância das caldeiras para geração de vapor na indústria farmacêutica e alimentícia - XH MAR BETHLEHEM. Disponível em: <<https://xhmarbethlehem.com.br/blog/caldeiras-para-geracao-de-vapor-na-industria-farmaceutica-e-alimenticia/#:~:text=Import%C3%A2ncia%20das%20caldeiras%20para%20gera%C3%A7%C3%A3o%20de%20vapor%20na%20ind%C3%BAstria%20farmac%C3%AAutica%20e%20aliment%C3%ADcia,-por%20Ketlin%20%7C%20abr&text=Caldeiras%20para%20gera%C3%A7%C3%A3o%20de%20vapor%20s%C3%A3o%20equipamentos%20imprescind%C3%ADveis%20em%20diversos,com%20o%20m%C3%A1ximo%20de%20seguran%C3%A7a.>>>. Acesso em: 26 jul. 2022.

BRANDE, A. Tudo o que você precisa saber sobre caldeiras - XH MAR BETHLEHEM. Disponível em: <<https://xhmarbethlehem.com.br/blog/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-caldeiras/>>. Acesso em: 26 jul. 2022.

REGULADOR PID. In: WEG EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS S.A. CFW-11: Manual de Programação. [S. l.: s. n.], 2020. cap. 20, p. 255-261. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h2b/h91/WEG-cfw11-manual-de-programacao-0899.5654-2.0x-manual-portugues-br.pdf>. Acesso em: 2 ago. 2022..

Válvula Solenoide Como Funciona, Para que Serve e Modelos. Disponível em: <<https://www.jefferson.ind.br/conteudo/valvula-solenoide.html>>. Acesso em: 3 ago. 2022.