

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA - CAMPUS JARAGUÁ DO SUL - RAU
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA

ODIRLEI EWALD

ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DAS
ESTEIRAS DAS EXTRUSORAS DE UMA FÁBRICA DE TINTAS EM PÓ

JARAGUÁ DO SUL

JULHO DE 2021

ODIRLEI EWALD

ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DAS
ESTEIRAS DAS EXTRUSORAS DE UMA FÁBRICA DE TINTAS EM PÓ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica do Campus Jaraguá do Sul – Rau, do Instituto Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do diploma de Tecnólogo em Fabricação Mecânica.

Orientador: John Jefferson Antunes Saldanha, Me.

JARAGUÁ DO SUL

JULHO DE 2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor

Ewald, Odirlei

Título: Estudo de eficiência energética no sistema de refrigeração das esteiras das extrusoras de uma fábrica de tintas em pó /Odirlei Ewald;

orientação de John Jefferson Antunes Saldanha. Jaraguá do Sul, SC, 2021.

47 p.

Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul – Rau. Tecnologia em Fabricação Mecânica.

Inclui referências.

1. Automação Industrial 2. Eficiência Energética. 3. Sistema de Refrigeração. I. John Jefferson Antunes Saldanha. II. Instituto Federal de Santa Catarina. III. Título.

ODIRLEI EWALD

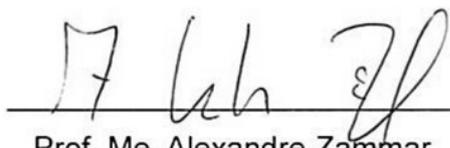
ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DAS
ESTEIRAS DAS EXTRUSORAS DE UMA FÁBRICA DE TINTAS EM PÓ

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Tecnólogo em
Fabricação Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo
indicada.

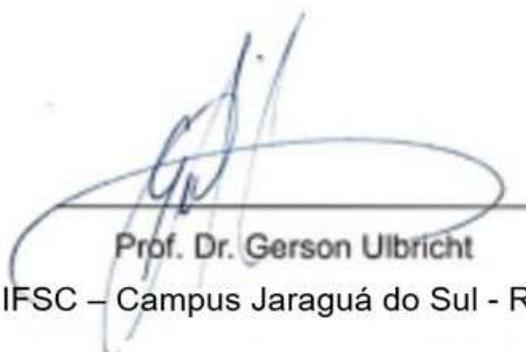
Jaraguá do Sul, 29 de julho de 2021.



Prof. Me. John Jefferson Antunes Saldanha
Orientador
IFSC - Campus Jaraguá do Sul - Rau



Prof. Me. Alexandre Zammar
IFSC – Campus Jaraguá do Sul - Rau



Prof. Dr. Gerson Ulbricht
IFSC – Campus Jaraguá do Sul - Rau

Dedico este trabalho aos meus pais, Oswaldo e Iris, e a
minha esposa Andréia, pelo total apoio para realização
desta graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meus pais, Oswaldo e Iris pelo total apoio e incentivo para iniciar esta graduação.

Agradeço a minha esposa, Andréia pelo incentivo, apoio e compreensão em todos os momentos desta graduação.

Agradeço ao meu orientador John, por toda dedicação e principalmente por toda parceria neste trabalho de conclusão de curso.

Agradeço a todos os professores, por todo conhecimento repassado ao longo desta trajetória.

RESUMO

O elevado consumo de energia elétrica em uma fábrica de tintas em pó é um dos fatores que influencia diretamente nos custos de seus produtos acabados. Uma das formas de evitar o desperdício de recursos é através do estudo da eficiência energética no sistema de refrigeração das esteiras das extrusoras desta fábrica. Dessa forma, este trabalho tem por objetivo identificar desperdícios no sistema de refrigeração das esteiras das extrusoras, que utiliza amônia para refrigerar a água deixando sua temperatura em 7°C. Esse sistema refrigera 6 esteiras compactas de 6 extrusoras da fábrica de tintas em pó. Com a identificação desses pontos este trabalho propõe um sistema automatizado que fecha as alimentações de água gelada das esteiras quando estão paradas. Além disso, também varia a rotação das bombas de água gelada conforme a real necessidade, considerando paradas de setup, preparações e acerto de cor, não necessitando de refrigeração quando parada. Os resultados obtidos mostram que a automação proposta pode gerar uma redução de aproximadamente 67% de consumo de energia elétrica no sistema de refrigeração. Além disso, verifica-se que este trabalho apresenta resultados satisfatórios para serem implantados no sistema.

Palavras-Chave: Automação Industrial. Eficiência Energética. Sistema de Refrigeração.

ABSTRACT

The high consumption of electricity in a powder paint factory is one of the factors that directly influence the costs of its finished products. One of the ways to avoid wasting resources is through the study of energy efficiency in the cooling system of the extruder mats at this factory. Thus, this work aims to identify waste in the cooling system of extruder mats, which uses ammonia to cool the water to a temperature of 7°C. This system cools 6 compact mats of 6 extruders from the powder paint plant. With the identification of these points, this work proposes an automated system that closes the cold water supplies of the mats when they are stopped. In addition, it also varies the rotation of the chilled water pumps according to the real need, considering setup stops, preparations and color adjustment, not requiring refrigeration when stopped. The results obtained show that the proposed automation can generate a reduction of approximately 67% of electricity consumption in the refrigeration system. Furthermore, it is verified that this work presents satisfactory results to be implemented in the system.

Keywords: Energy Efficiency. Industrial Automation. Refrigeration System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Motores elétricos trifásicos WEG.	13
Figura 2 - Motor elétrico trifásico explodido.....	14
Figura 3 - Bomba Centrífuga MARK acoplada no motor trifásico WEG.	16
Figura 4 - Bomba centrífuga explodida.	17
Figura 5 - Trocador de calor a placas.....	17
Figura 6 - Fluxo interno no trocador de calor a placas.	18
Figura 7 - Inversor de frequência WEG.....	19
Figura 8 - Controlador lógico programável (CLP).....	20
Figura 9 - Transdutor de pressão Wika.	21
Figura 10 - Válvula de esfera com atuador pneumático.	22
Figura 11 - Sistema atual de refrigeração das esteiras das extrusoras.....	23
Figura 12 - Painel de força.	24
Figura 13 - Painel de acionamento.....	24
Figura 14 - Bombas centrífugas Mark.	24
Figura 15 - Trocador a placas Alfa Laval.	25
Figura 16 - Isolamento térmico das tubulações.....	25
Figura 17 - Isométrico sistema de refrigeração.	26
Figura 18 - Sistema fechado de refrigeração das esteiras das extrusoras.....	26
Figura 19 – Tinta entrando nas calandras.	27
Figura 20 – Tinta laminada e triturada.....	27
Figura 21 – Extrusora e esteira de refrigeração.	28
Figura 22 – Sistema proposto de refrigeração das esteiras das extrusoras.....	30
Figura 23 – Fluxo proposto de funcionamento elétrico.....	32
Figura 24 – Placa do motor bomba principal.....	35
Figura 25 – Gráfico comparativo de corrente entre os três cenários.....	42
Figura 26 – Gráfico comparativo de potência entre os três cenários.	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados medidos no cenário 1.	35
Tabela 2 – Dados medidos no cenário 2.	36
Tabela 3 – Dados medidos no cenário 3.	37
Tabela 4 – Dados resumidos do cenário 1.	39
Tabela 5 – Dados resumidos do cenário 2.	40
Tabela 6 – Dados resumidos do cenário 3.	41
Tabela 7 – Consumo de energia elétrica por período, em kWh.....	43

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivo geral	12
1.2 Objetivos específicos	12
1.3 Estrutura do trabalho	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1 Motor elétrico	13
2.2 Bomba centrífuga	15
2.3 Trocador de calor a placas	17
2.4 Inversor de frequência	18
2.5 CLP – controlador lógico programável	20
2.6 Transdutor de pressão	21
2.7 Válvula esfera com atuador pneumático	22
3 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO EXISTENTE DAS ESTEIRAS DAS EXTRUSORAS	23
3.1 Informações do processo produtivo	27
4 PROPOSTA PARA O SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DAS ESTEIRAS DAS EXTRUSORAS	29
4.1 Descrição do sistema proposto	29
4.2 Funcionamento proposto do sistema	32
5 ANÁLISE E MÉTODOS DO ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DAS ESTEIRAS DAS EXTRUSORAS	34
5.1 Método aplicado para construção dos cenários	34
5.1.1 Cenário 1	35
5.1.2 Cenário 2	36
5.1.3 Cenário 3	37
5.2 Método para cálculo teórico	38
6 RESULTADOS	39
6.1 Cálculo cenário 1	39
5.2 Cálculo cenário 2	39
5.3 Cálculo cenário 3	40
5.4 Comparação dos resultados	41
6 CONCLUSÃO	45
REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

Independente do setor da economia que uma empresa atua, se tornou fundamental a utilização de recursos tecnológicos a fim de reduzir os custos de seu processo industrial. Com isso, é possível tornar a empresa mais competitiva e lucrativa.

No setor da indústria de tintas, um dos fatores que deve ser constantemente aprimorado é a redução no consumo de energia elétrica, pois busca-se garantir a sustentabilidade econômica da empresa. Uma das formas de melhorar a lucratividade da empresa, evitando o desperdício de recursos, é através do dimensionamento do sistema de refrigeração de trocador a placas.

O sistema de refrigeração de trocador a placas, refrigera a água através da troca térmica com a amônia, permitindo que a água seja transportada até as extrusoras com uma temperatura de 7°C. Esse sistema está sujeito a desperdício de energia elétrica quando as extrusoras não estão operando devido a preparação da máquina, acerto de cor, manutenção e limpeza, não necessitando o uso da água gelada.

Diante desse propósito, uma empresa da região norte de Santa Catarina autorizou o estudo de eficiência energética dentro da sua unidade de fabricação de tintas em pó. Entre os estudos, o trabalho iniciará com um levantamento das condições atuais do sistema de refrigeração das esteiras das extrusoras, identificado possíveis ganhos com a automação do sistema no acionamento das bombas. Com o auxílio do corpo técnico da manutenção, será estudado um projeto de acionamento das bombas de refrigeração através do controle da pressão do sistema, fazendo que o inversor de frequência controle a velocidade das bombas conforme a necessidade.

O uso da automação industrial no sistema de refrigeração das esteiras das extrusoras, permite a variação da frequência do motor elétrico da bomba que está em operação, por exemplo. Essa variação de frequência faz com que o motor altere a velocidade da bomba conforme a pressão necessária de água no sistema que é controlado por um pressostato.

Tomando isso como base, esse trabalho tem por objetivo, o uso da automação industrial como forma de reduzir o consumo de energia elétrica no sistema de refrigeração. Para alcançar o objetivo, serão executados vários testes práticos, simulando a automatização do sistema de refrigeração, que poderá operar sem perder a eficiência de refrigeração nas extrusoras. Por fim, propõe-se a automatização do

sistema para garantir a economia de energia esperada.

1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo principal analisar o sistema de refrigeração das esteiras compactas da extrusoras da fábrica de tintas em pó e propor uma solução para diminuir o consumo de energia elétrica do sistema.

1.2 Objetivos específicos

Para alcançar o objetivo geral deste trabalho, são definidos os seguintes objetivos específicos:

- Pesquisar sobre tipos, aplicações e características de componentes para uso na automação industrial;
- Obter dados e dimensionamentos do sistema de refrigeração de trocador a placas;
- Obter dados sobre a eficiência atual do sistema de refrigeração;
- Propor uma solução para a redução do consumo de energia elétrica;
- Analisar a eficiência da solução proposta.

1.3 Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado, além da introdução, conforme descrito a seguir. O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, onde abordam-se os conceitos necessários para embasar o desenvolvimento. No capítulo 3, o sistema de refrigeração existente das esteiras das extrusoras é exposto, definindo seus componentes e seu funcionamento. O capítulo 4 apresenta a proposta para o sistema de refrigeração das esteiras das extrusoras, descrevendo seu funcionamento. O capítulo 5 apresenta a análise e o método utilizado no estudo da eficiência energética do sistema de refrigeração das esteiras das extrusoras. No capítulo 6, os resultados obtidos são expostos e comparados. Por fim, o capítulo 7 apresenta as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são abordados os principais equipamentos utilizados no projeto, de forma a embasar os assuntos abordados no desenvolvimento do trabalho.

2.1 Motor elétrico

Os motores elétricos são muito utilizados no dia a dia. Entre as diferentes aplicações cita-se o seu uso em furadeiras, eletrodomésticos e pequenas automações, sendo estes monofásicos, normalmente. Entretanto, quando necessita-se de motores com mais de 2 CV, torna-se viável o uso de motores elétricos trifásicos. Assim, os motores trifásicos são amplamente encontrados nas indústrias, em linhas de produção e máquinas elétricas, por conta de sua alta eficiência e vastas aplicações. A Figura 1 apresenta uma foto de um motor elétrico trifásico.

Figura 1 - Motores elétricos trifásicos WEG.



Fonte: WEG (2021).

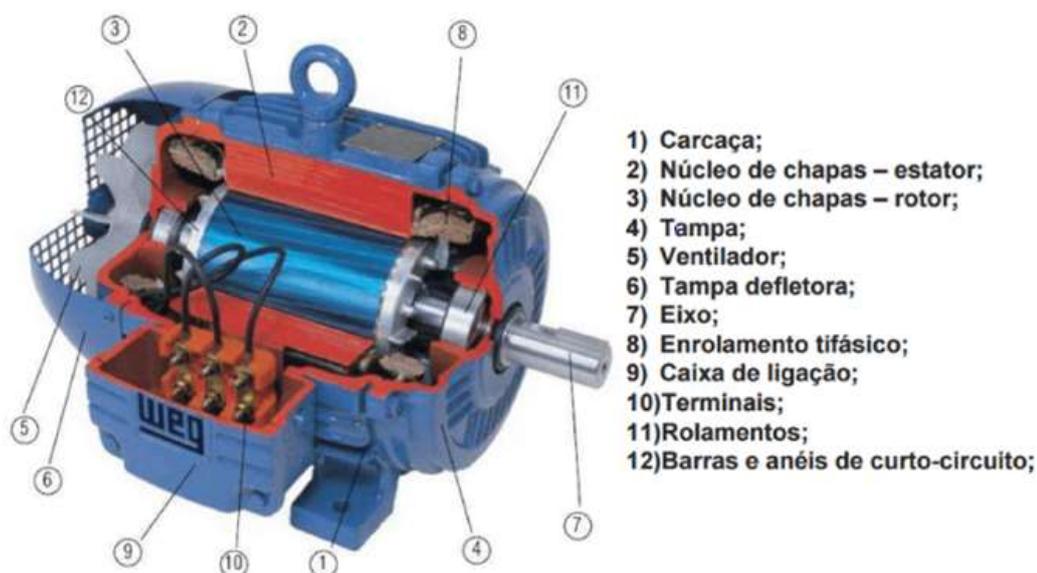
Existem diversos tipos de motores elétricos trifásicos e, no geral, a maioria deles possui componentes em comum, que são:

- Rotor: parte girante do motor, fixada a um eixo. Ele fica encaixado entre o estator, já que a interação dos dois faz o motor girar;
- Estator: parte fixa do motor elétrico, onde ficam as bobinas. Quando energizadas, as bobinas geram os campos eletromagnéticos capazes de fazer o rotor girar;
- Mancal: sistema de rolamentos que tem como função prender o eixo na carcaça do motor evitando também infiltrações de água, conforme a certificação do motor;

- Carcaça: comporta todos os componentes do motor. Possui furos para fixação e alça para carregar o motor, sendo que normalmente também possui estrutura projetada para dissipar o calor da máquina;
- Ventilador: auxilia na circulação de ar no interior do motor, garantindo uma boa dissipação de calor;
- Caixa com ligações: recebe os cabos de conexão do motor e faz a ligação deles com as bobinas.

A Figura 2 exemplifica as partes de um motor elétrico trifásico.

Figura 2 - Motor elétrico trifásico explodido.



Fonte: Santos (2016).

A velocidade síncrona do motor trifásico, ou seja, a velocidade do campo girante do estator, depende de dois fatores:

- Frequência da rede elétrica, normalmente 60 Hz;
- Polos magnéticos gerados no interior do motor.

Esta velocidade é determinada através da equação (1).

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (1)$$

Onde N_s é a velocidade síncrona do motor elétrico, em RPM; f é a frequência elétrica, em Hz; e P é o número de polos do motor.

A partir da equação (1) verifica-se que alterando a frequência, varia-se a velocidade do motor. Logo, como o inversor de frequência permite variar esta grandeza, a sua utilização possibilita controlar a velocidade do motor. Assim, comumente, inversores de frequência são ligados em conjunto com motores elétricos trifásicos, para controlar a sua velocidade (FILIPPO FILHO, 2013).

2.2 Bomba centrífuga

A bomba centrífuga é um tipo de bomba d'água utilizada para a transferência de volumes de fluidos, sendo empregada para irrigação, abastecimento, saneamento, controle de reservatórios e em processos produtivos das indústrias. Neste último caso, a bomba é fundamental para o deslocamento de líquidos como a água potável e outros resíduos.

Normalmente, esta transferência é realizada através de uma tubulação preparada próxima ao ponto onde acontecerá a captação. A bomba é colocada em funcionamento através de um motor (elétrico, combustão ou vapor), que permite um aumento de pressão e altura do líquido durante o processo.

O funcionamento da bomba ocorre através de impulsos vindo de um rotor ligado ao motor por meio de um eixo motriz, que está dentro de uma carcaça. Esse rotor possui palhetas que giram rapidamente em espiral e, com essa ação, cria-se uma zona de alta pressão que faz a bomba sugar o fluido, aumentando o seu fluxo de rotação.

Assim, o volume é transferido, bombeando da entrada para uma voluta dentro da carcaça, que atua como contentor do líquido. Este volume é levado para um bocal de saída, onde é escoado para as tubulações. A Figura 3 apresenta um modelo de bomba centrífuga acoplada a um motor elétrico (FILIPPO FILHO, 2015).

Figura 3 - Bomba Centrífuga MARK acoplada no motor trifásico WEG.



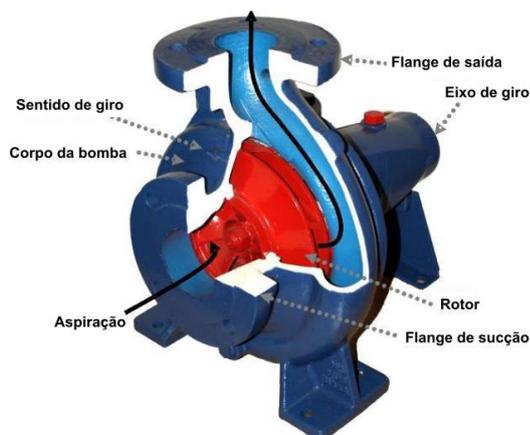
Fonte: MARK (2021).

As bombas centrífugas possuem alguns tipos de rotores, conforme apresentado a seguir:

- Rotores fechados: são indicados para líquidos limpos, pois possuem passagens estreitas. Caso sejam usados para escoar algum líquido que contenha partes sólidas, podem ocorrer entupimentos.
- Rotores abertos: são recomendados para líquidos viscosos em suspensão contendo partículas sólidas, pois têm passagens mais livres que evitam entupimentos. As suas palhetas costumam sofrer um desgaste maior, por causa do contato direto com sólidos.
- Rotores semiabertos: possuem um dos seus lados livre. O seu uso mescla materiais sólidos e líquidos.
- Rotores semifechados: possuem pás na parte das costas da cobertura. O seu uso também mescla materiais sólidos e líquidos.

A Figura 4 exemplifica as partes de uma bomba centrífuga.

Figura 4 - Bomba centrífuga explodida.



Fonte: LEMAQUI (2021).

2.3 Trocador de calor a placas

O trocador de calor a placas convencional utiliza placas para transferência de calor entre dois fluidos. Ele possui gaxetas para vedação dos canais formados entre as placas e para direcionar os fluidos por canais alternados no interior do trocador.

Este tipo de trocador de calor é amplamente utilizado em aplicações industriais, buscando garantir maior eficiência no aquecimento, resfriamento, recuperação de energia, condensação e evaporação. A Figura 5 apresenta um modelo de trocador a placas.

Figura 5 - Trocador de calor a placas.

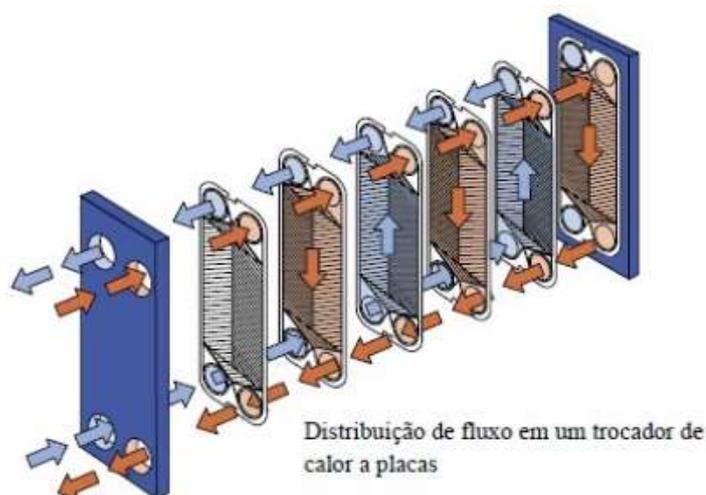


Fonte: ALFA Engenharia (2021).

A transferência de calor ocorre ao aproximar dois fluidos a temperaturas diferentes, desta forma um fluido aquece ou resfria o outro.

O trocador de calor consiste em uma série de finas placas corrugadas com gaxetas. Estas placas são comprimidas em uma estrutura criando canais de passagem paralelos. Os dois fluidos fluem por canais alternados, no qual está a área de troca necessária para transferir a energia de um fluido a outro, conforme verifica-se na Figura 6.

Figura 6 - Fluxo interno no trocador de calor a placas.



Fonte: Loureiro et al. (2015).

Os canais são desenvolvidos para induzir a máxima turbulência em ambos os fluxos, garantindo a máxima eficiência na transferência de calor entre os dois fluidos. O fluxo é contracorrente, no qual um dos fluidos entra no trocador pela conexão superior, enquanto que o outro entra pela conexão inferior, garantindo melhores resultados nos sistemas de aquecimento ou resfriamento (BERGMAN; LAVINE, 2019).

2.4 Inversor de frequência

O inversor de frequência é um dispositivo capaz de controlar a velocidade de rotação de um motor elétrico trifásico por meio do controle da frequência elétrica entregue para o motor. A Figura 7 referencia um modelo de inversor de frequência.

Figura 7 - Inversor de frequência WEG.



Fonte: WEG (2021).

A principal vantagem do inversor de frequência é controlar a velocidade de motores elétricos. Ao comparar a partida direta de um motor e através de um inversor de frequência, é possível observar benefícios proporcionados por este último, como a redução do pico de corrente na partida. Uma partida direta exige em torno de seis a sete vezes a corrente elétrica nominal do motor para fazer a partida. Já o inversor consegue limitar a corrente de partida em aproximadamente 1,5 vezes a corrente elétrica nominal.

Portanto, a partida de motores utilizando um inversor de frequência é mais suave. O fato da partida direta provocar uma mudança abrupta gera estresses mecânicos na máquina que o motor controla. O correto é, utilizando um inversor de frequência, fazer o motor dar a partida em baixa rotação e ir aumentando a velocidade. Isso evita danos mecânicos precoces e aumenta a vida útil do motor.

O inversor também pode ser um grande aliado para a economia de energia em motores elétricos. Um exemplo disso é em aplicações de bombeamento de água, ventilação e compressão, que representam cerca de 80% dos motores elétricos em operação. Assim, são nessas aplicações que é possível reduzir a energia consumida, substituindo sistemas padrão, que utilizam partida direta e controle de vazão por meio de válvulas por um acionamento com inversor de frequência. Dessa forma, é possível ajustar a vazão ou pressão de água controlando a velocidade do motor e garantindo a eficiência energética do sistema (ATHOS ELECTRONICS, 2021).

Entre as diferentes vantagens do uso de inversores de frequência, citam-se:

- Substituir os variadores mecânicos;
- Substituição de variadores eletromagnéticos;
- Automação dos processos das indústrias;
- Controle simplificado de motores elétricos;
- Eliminação de outros sistemas para comportar a partida do motor;
- Aumento da vida útil dos motores elétricos e sistemas mecânicos ligados a ele;
- Evita partidas extremamente bruscas;
- Redução do nível de ruído dos sistemas;
- Regulação de pressão e vazão, em caso de bombas ou compressores;
- Economia de energia elétrica.

2.5 CLP – controlador lógico programável

O CLP (controlador lógico programável), apresentado na Figura 8, é um computador capaz de executar funções específicas através de programas criados conforme a necessidade, sendo responsável pelo controle de todo o processo. O CLP recebe sinais de entrada do processo, executando-os e enviando sinais de saída ou de comando para os atuadores. Ele é um computador capaz de executar funções específicas através de programas criados conforme a necessidade do processo. Um exemplo de CLP é apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Controlador lógico programável (CLP).



Fonte: WEG (2021).

O CLP possui os módulos de entradas e saídas, que são responsáveis por fazer a conexão entre os atuadores e sensores. É importante destacar que as entradas e saídas podem ser tanto digitais como analógicas, de acordo com as características dos CLPs.

2.6 Transdutor de pressão

O transdutor de pressão é um dispositivo que recebe uma pressão do meio a ser medido através de uma conexão padrão ligada no processo. Esta pressão é lida pelo elemento sensorial interno que converte a pressão em um sinal elétrico filtrado. Os valores mais comuns são os sinais de 4-20 mA e de 0-10 V. Este sinal elétrico de saída é entregue para o processo através de um conector padronizado ou diretamente por cabos dependendo do modelo do fabricante. O transdutor de pressão também pode ser chamado, de acordo com alguns fabricantes, de: sensor de pressão ou transmissor de pressão. Um exemplo de transdutor é apresentado na Figura 9.

Figura 9 - Transdutor de pressão Wika.



Fonte: WIKA (2021).

Os transdutores de pressão trabalham com diversas faixas de pressão. As mesmas devem ser escolhidas conforme a necessidade do processo. O transdutor da Figura 9, possui uma faixa de trabalho de 0-10 bar e sinal elétrico de saída de 4-20 mA. Esse sinal de saída possibilita a leitura exata da faixa de pressão do processo quando interligado a algum instrumento de indicação ou controle (WIKAI, 2021).

2.7 Válvula esfera com atuador pneumático

Nos mais variados segmentos da indústria, o uso de válvula esfera com atuador pneumático tem sido cada vez mais necessário. Isso se deve ao fato de que a junção desses dois itens proporciona uma excelente aplicação na automação das válvulas em indústrias.

A válvula da Figura 10 tem a função de bloqueio de fluxo de fluidos diversos que pode ser aberta ou fechada e o atuador pneumático é capaz de atuar com rapidez conforme a necessidade do processo.

Figura 10 - Válvula de esfera com atuador pneumático.



Fonte: Soluções industriais (2021).

O equipamento pode ser utilizado em qualquer sistema que necessite de suas funções, respeitadas as condições de temperatura e pressão de cada modelo. Esse produto é fundamental em diversos setores da indústria, sendo necessário que seja de acordo com as dimensões das tubulações de destinos e que tenha uma instalação correta (DYNAMICATEC, 2021).

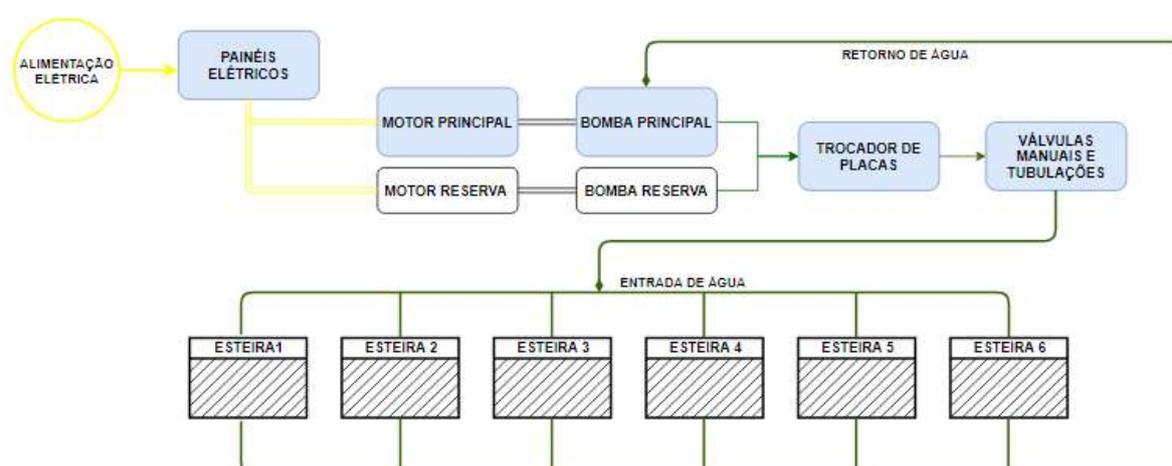
No próximo capítulo, apresentam-se o sistema de refrigeração existente das esteiras das extrusoras e as informações sobre o processo produtivo.

3 SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO EXISTENTE DAS ESTEIRAS DAS EXTRUSORAS

O sistema de refrigeração é um conjunto de equipamentos que visa a refrigeração das esteiras das extrusoras de uma fábrica de tintas em pó. Esse sistema é responsável pela circulação de água gelada nas esteiras das extrusoras à uma temperatura média de 7°C.

O sistema atual de refrigeração das esteiras das extrusoras possui os componentes apresentados na Figura 11.

Figura 11 - Sistema atual de refrigeração das esteiras das extrusoras.



Fonte: O autor (2021).

Conforme ilustrado na Figura 11, o sistema de refrigeração é composto por:

- Painéis elétricos WEG: a) painel de força, onde constam os componentes necessários para o acionamento dos motores elétricos de 50 CV através de partidas estrela triângulo, conforme ilustrado na Figura 12. b) painel de acionamento, onde constam as botoeiras de acionamento e os controladores de temperatura do sistema, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 12 - Painel de força.



Fonte: O autor (2021).

Figura 13 - Painel de acionamento.



Fonte: O autor (2021).

- Dois conjuntos de motor elétrico e bomba centrífuga, sendo um conjunto principal e um conjunto reserva. As bombas são do fabricante Mark e modelo GM-16, possuindo vazão de 161,3 m³/h. Os motores elétricos trifásicos são do fabricante WEG, com as seguintes características principais: 50 CV, 2 polos, 380 V e corrente nominal de 68 A, conforme ilustrado na Figura 14.

Figura 14 - Bombas centrífugas Mark.



Fonte: O autor (2021).

- Um trocador de calor a placas da Alfa Laval, modelo MK15.BWFGE, com pressão máxima de trabalho de 16 bar, capacidade calorífica de 600.000 Kcal e refrigerado por amônia (NH³), conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 - Trocador a placas Alfa Laval.



Fonte: O autor (2021).

- Tubulações de entrada e saída do sistema de 6", isoladas com poliuretano injetado e revestido com tubulação calandrada de alumínio, conforme ilustrado na Figura 16.

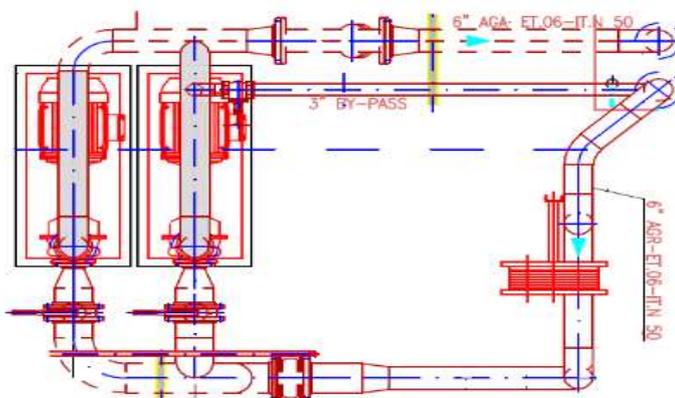
Figura 16 - Isolamento térmico das tubulações.



Fonte: O autor (2021).

- Válvulas manuais, válvulas de retenção, flanges e outras conexões, conforme ilustrados no isométrico da Figura 17.

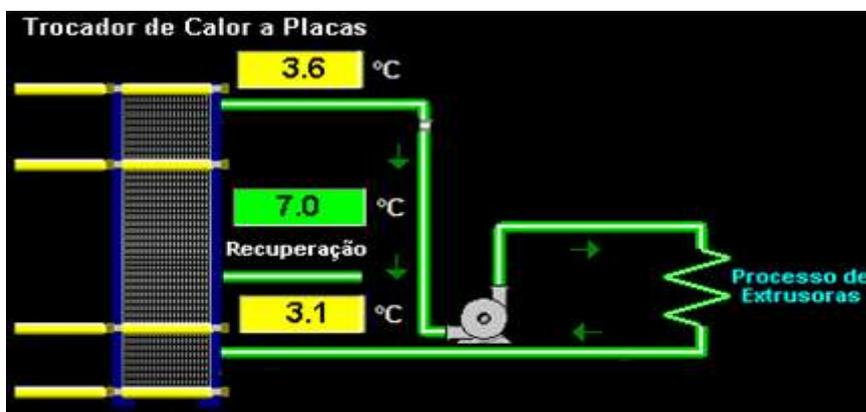
Figura 17 - Isométrico sistema de refrigeração.



Fonte: O autor (2021).

Conforme ilustrado na Figura 18, o sistema de refrigeração das esteiras das extrusoras é um sistema fechado, ou seja, um sistema que apresenta baixa perda líquida no processo, pois a água que circula no processo sempre retorna ao trocador de calor. Esse sistema é abastecido com água da rede potável.

Figura 18 - Sistema fechado de refrigeração das esteiras das extrusoras.



Fonte: O autor (2021).

O sistema de refrigeração é responsável pelo resfriamento das calandras das esteiras através da circulação de água gelada em seu interior. As calandras são rolos de aço revestidos com cromo que possuem a função de refrigerar e compactar a tinta que sai, inicialmente a uma temperatura de 150°C, dos canhões das extrusoras. Esta tinta é transformada em uma lâmina fina que é triturada e direcionada para o próximo processo, conforme ilustrado nas Figuras 19 e 20.

Figura 19 – Tinta entrando nas calandras.



Fonte: O autor (2021).

Figura 20 – Tinta laminada e triturada.



Fonte: O autor (2021).

3.1 Informações do processo produtivo

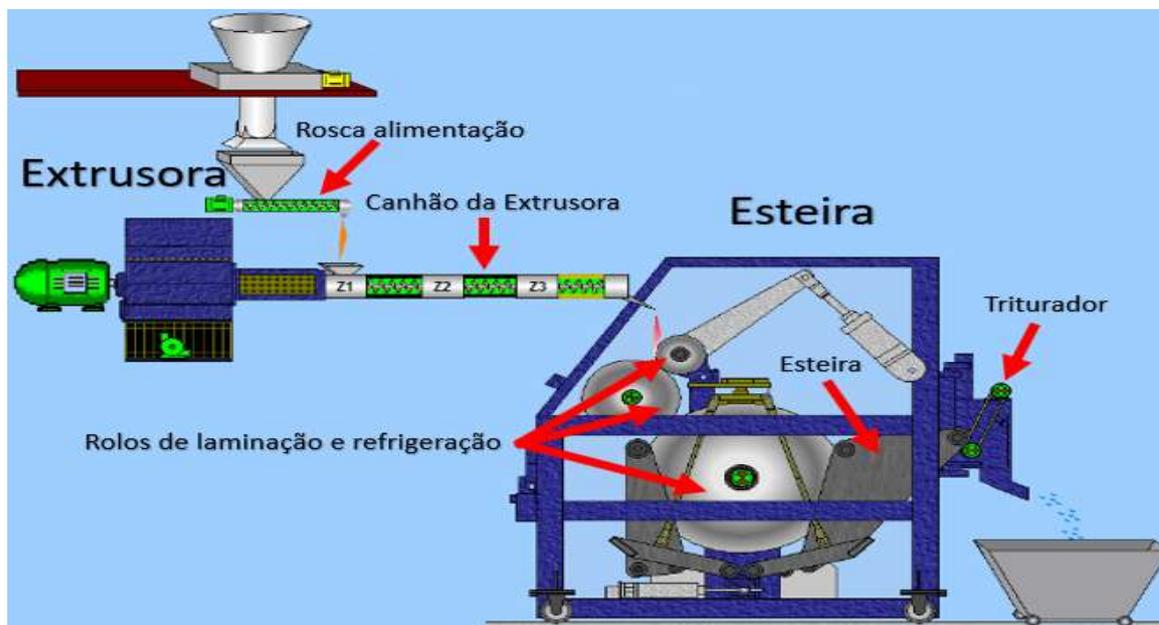
Para o presente estudo, foi analisado o processo produtivo dos equipamentos que são resfriados pelo sistema de refrigeração das esteiras das extrusoras, buscando um melhor entendimento da necessidade de cada equipamento.

Um dos processos de fabricação da tinta em pó é a extrusão. Neste processo, a matéria-prima da tinta entra no canhão da extrusora com o auxílio de uma rosca. No canhão, ela é forçada a passar através de um conjunto de elementos que transporta, comprime, cisalha e mistura a tinta em uma temperatura média de 150°C. Ao sair do canhão, a tinta está pastosa com a mesma temperatura que foi extrusada.

O próximo processo é feito na esteira da extrusora, onde a tinta é laminada, resfriada e triturada. Essa esteira tem rolos laminadores refrigerados com água a 7°C vindo do sistema de refrigeração. A tinta, ao cair nos rolos, é laminada e resfriada. Após este processo, ela vai através de uma esteira para a trituração, que é feita através de um triturador acoplado na esteira. A Figura 21 ilustra o funcionamento da extrusora com a esteira.

Na fábrica de tintas em pó, existem dois sistemas de refrigeração que resfria as esteiras das extrusoras. O sistema analisado atende as seis primeiras esteiras das extrusoras, trabalhando em média 124 horas semanais. Porém, as extrusoras não processam tinta 100% do tempo disponível, pois dentro do seu processo produtivo tem várias interferências que influenciam diretamente no tempo que a extrusora está processando tinta.

Figura 21 – Extrusora e esteira de refrigeração.



Fonte: O autor (2021).

As paradas das extrusoras variam conforme o equipamento e a tinta a ser extrusada. Os maiores fatores que influenciam na parada de uma extrusora são:

- Aquecimento para iniciar a extrusão;
- Teste de cor;
- Acerto de cor;
- Manutenção corretivas;
- A limpeza e a preparação da máquina para próximo lote.

Apresenta-se no próximo capítulo, a proposta de automação para o sistema de refrigeração das esteiras das extrusoras.

4 PROPOSTA PARA O SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DAS ESTEIRAS DAS EXTRUSORAS

As alterações propostas neste estudo de eficiência energética visam a redução dos gastos com a energia elétrica no sistema de refrigeração das esteiras das extrusoras. O principal objetivo da proposta é a mitigação dos desperdícios no sistema, que atualmente não possui nenhum controle automatizado. Dessa forma, o sistema trabalha sempre na sua capacidade total.

4.1 Descrição do sistema proposto

A proposta consiste na implantação de um sistema automatizado que controla o fluxo de água das esteiras, através da abertura e fechamento de válvulas e varia a velocidade de rotação dos motores das bombas do sistema de refrigeração, conforme a demanda do processo.

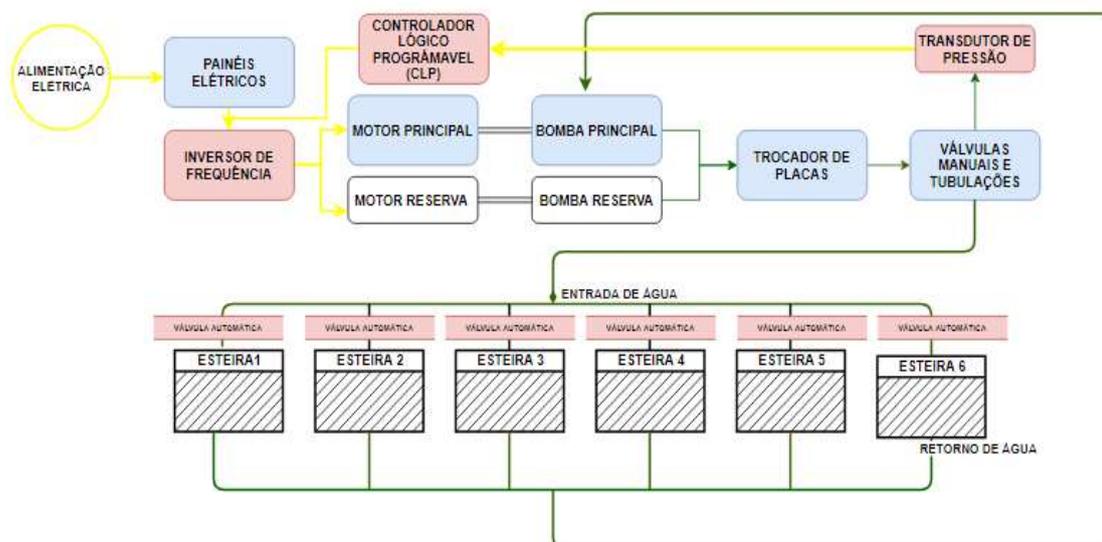
Conforme apresentado no trabalho de Polese (2010), o elevado consumo de energia elétrica no setor de saneamento fez o autor avaliar a possibilidade de aumentar a eficiência energética dos sistemas de abastecimento de água. No estudo, utilizou-se o método de controle da variação de frequência e controle de vazão de fluidos. Com a variação da frequência dos motores das bombas, as mesmas conseguem manter a vazão constante do sistema diminuindo o consumo de energia elétrica. Dessa forma, a utilização do inversor de frequência para realizar este controle possibilitou obter resultados significativos na redução do consumo entre 44 e 57%. Assim, obteve-se o aumento da eficiência energética dos sistemas de bombeamento.

Como citado por Birck (2015), o inversor de frequência permite obter diferentes benefícios, como: reduzir os níveis de queda de tensão e picos de corrente na partida e auxiliar na variação de velocidade das máquinas, possibilitando uma economia de energia elétrica. O trabalho utiliza o controle da vazão das bombas. Este controle é feito através de um transmissor de pressão que gera um sinal analógico para um CLP. O CLP comanda os acionamentos dos motores das bombas, sendo que um motor é acionado por uma *Soft-Starter* (mantendo a velocidade fixa) e o outro através do inversor de frequência (variando a velocidade do motor conforme necessidade do processo). Assim, o sistema permanece com a vazão necessária reduzindo os desperdícios.

Para este trabalho, a automatização é realizada através da instalação de um conjunto de componentes no sistema atual de refrigeração. Estes componentes irão controlar a abertura e o fechamento da alimentação de água das esteiras quando as extrusoras estiverem paradas por qualquer evento de produção. Com esse controle, o sistema apresentará variação de pressão de água. Dessa forma, possibilita-se o ajuste da velocidade de rotação das bombas visando estabilizar o sistema conforme a demanda de água requisitada para as esteiras.

O esquema geral da proposta para o sistema de refrigeração das esteiras das extrusoras é apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Sistema proposto de refrigeração das esteiras das extrusoras.



Fonte: O autor (2021).

Conforme ilustrado, os seguintes componentes foram adicionados na proposta para o sistema de refrigeração:

- 6 válvulas de esfera automáticas, consistindo em válvulas de esfera de 2", normalmente fechadas com atuador pneumático comandado por uma válvula eletropneumática;
- 1 transdutor de pressão, com uma faixa de trabalho de 0-10 bar e sinal elétrico de saída de 4-20 mA;
- 1 CLP (controlador lógico programável) PLC300 da WEG;
- 1 Inversor de frequência CFW11 da WEG.

As válvulas de esferas automáticas serão instaladas na entrada de água de cada esteira das extrusoras, fazendo com que as esteiras não tenham fluxo de água quando estiverem paradas por qualquer evento da produção. Com o fechamento de qualquer uma das válvulas, conseqüentemente, a pressão de água do sistema de refrigeração aumentará, fazendo com que a vazão aumente nos outros pontos (esteiras) que estão com as válvulas abertas.

Para não aumentar desnecessariamente a vazão nos outros pontos do sistema, pode-se diminuir a velocidade de rotação das bombas. Com isso, estabiliza-se a pressão conforme o valor nominal do sistema. Em adição, a partir da redução da velocidade de rotação, reduz-se o consumo de energia elétrica do sistema de refrigeração das esteiras das extrusoras.

A redução da velocidade de rotação das bombas é possível através da instalação de um inversor de frequência. O inversor atua controlando a velocidade dos motores elétricos que movimentam as bombas. No sistema atual, as mesmas trabalham na velocidade nominal de 3600 RPM.

Para que o inversor de frequência consiga controlar a velocidade de rotação da bomba, é necessário instalar no sistema mais dois componentes: transdutor de pressão e controlador lógico programável (CLP).

O transdutor de pressão será instalado na tubulação principal do sistema (saída da bomba). Esse componente é responsável pela medição real da pressão do sistema e envio dessa informação, através de um sinal analógico de 4 - 20 mA, para o CLP.

O CLP, conforme apresentado no capítulo 2, é um equipamento eletrônico digital capaz de executar funções específicas através de programas. Para este projeto, deve-se criar um programa específico para fazer o controle automático da pressão do sistema de refrigeração das esteiras das extrusoras. O CLP é responsável por receber os sinais de entrada do processo e enviar sinais de saídas para acionamento e controle de componentes. Esses sinais (entrada e saída) podem ser digitais ou analógicos, conforme a necessidade do projeto.

Na automatização da proposta, utilizam-se entradas e saídas do CLP, sendo:

- 1 entrada analógica, que será o sinal informado pelo transdutor de pressão;
- 6 entradas digitais, que serão os sinais das botoeiras de liga, desliga, bomba principal, bomba reserva, sistema em automático (inversor de

frequência) ou sistema em *stand by* (partida estrela triângulo);

- 1 saída analógica, que fará o envio de informação para o inversor de frequência;
- 5 saídas digitais, que serão responsáveis por acionar os componentes do painel que irá ligar a bomba principal ou a bomba reserva em modo automático operando pelo inversor de frequência, ou em modo *stand by* operando pela partida estrela triângulo.

4.2 Funcionamento proposto do sistema

O sistema de refrigeração proposto vai funcionar em modo automático ou *stand by*. Uma dessas opções deverá ser escolhida pelo operador do sistema, assim como a seleção de uma das bombas (principal ou reserva) que entrará em operação no sistema. Essas informações são enviadas para as entradas digitais do CLP. Já o sinal de pressão de água do sistema é enviado para a entrada analógica do CLP sem a interferência do operador. Com esses dados, o CLP, através de seu programa, enviará sinais digitais e analógicos para as suas saídas, colocando o sistema em operação nas condições selecionadas, conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 23 – Fluxo proposto de funcionamento elétrico.



Fonte: O autor (2021).

No modo automático, o motor da bomba selecionada irá ligar através do inversor de frequência. O mesmo irá aumentar a rotação do motor da bomba de água até que o sistema alcance a pressão estabelecida no programa do CLP.

Como as válvulas eletropneumáticas serão controladas de acordo com a utilização das esteiras das extrusoras, a pressão do sistema proposto não será fixa como no sistema atual. Com isso, tem-se uma grande variação na pressão de água do sistema. O transdutor de pressão fará constantemente a leitura real da pressão de água, enviando um sinal analógico de 4-20 mA para a entrada do CLP. Esta informação de pressão, por sua vez, será processada constantemente pelo programa do CLP, que enviará através da sua saída analógica, a informação para o inversor de frequência controlar a rotação do motor da bomba selecionada, mantendo a pressão do sistema sempre constante no valor desejado.

O modo *stand by* será utilizado em caso de uma manutenção corretiva imediata no inversor de frequência. Ou seja, se ocorrer algum problema no inversor, qualquer um dos motores das bombas do sistema poderá ser acionado através de uma partida estrela triângulo, fazendo com que o sistema de refrigeração não pare a produção das extrusoras.

No próximo capítulo, apresentam-se a análise e o método utilizado no estudo da eficiência energética do sistema de refrigeração das esteiras das extrusoras.

5 ANÁLISE E MÉTODOS DO ESTUDO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO DAS ESTEIRAS DAS EXTRUSORAS

O presente estudo analisa a aplicação do uso da automação industrial, visando o aumento da eficiência energética no sistema de refrigeração das esteiras das extrusoras. Para isso, optou-se por realizar análises comparativas através de testes e medições efetuadas no sistema de refrigeração, assim como o uso da teoria. Nas seções a seguir, apresenta-se a metodologia aplicada, o desenvolvimento e as análises.

5.1 Método aplicado para construção dos cenários

Para avaliar a eficiência do uso da automação industrial no sistema de refrigeração das esteiras das extrusoras, optou-se pela comparação do consumo de energia elétrica necessária para atender a três cenários, sendo eles:

- a) Cenário 1 (sistema atual) – motor da bomba operando na rotação nominal de 3565 RPM, pressão de água do sistema fixa e todas as válvulas das esteiras das extrusoras abertas;
- b) Cenário 2 – motor da bomba operando na rotação nominal de 3565 RPM, abertura e fechamento manual das válvulas das esteiras das extrusoras, simulando as mesmas em operação ou parada e pressão de água do sistema variando;
- c) Cenário 3 – inversor de frequência variando a rotação do motor da bomba, abertura e fechamento manual das válvulas das esteiras das extrusoras, simulando as extrusoras em operação ou parada e a pressão de água do sistema fixa.

Para acompanhar os resultados obtidos em cada cenário, foram efetuadas medições de corrente elétrica na entrada do painel de força do sistema de refrigeração e também verificou-se a pressão de água do sistema no manômetro de saída da bomba. Todos os testes foram efetuados com a bomba principal do sistema de refrigeração das esteiras das extrusoras.

5.1.1 Cenário 1

O objetivo do cenário 1 é verificar o consumo de energia elétrica do sistema de refrigeração na condição original. Ou seja, sem nenhum controle automatizado que permita a variação da rotação das bombas, a variação da pressão de água e o controle de abertura ou fechamento das válvulas de entrada de água gelada das esteiras das extrusoras. Na Tabela 1, apresentam-se os dados coletados neste cenário.

Tabela 1 – Dados medidos no cenário 1.

Nº da simulação	Situação das válvulas das esteiras das extrusoras						Dados medidos		
	Ext.01	Ext.02	Ext.03	Ext.04	Ext. 05	Ext. 06	Pressão (bar)	Frequência (Hz)	Corrente (A)
Cenário 1	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	5,0	60	45

Fonte: O autor (2021).

No cenário 1, não existe nenhuma variação no sistema de refrigeração, sendo que a rotação do motor é fixa em 3565 RPM, pois não se tem a variação da frequência elétrica, que neste caso é 60 Hz. Outro fator constante no sistema é a corrente elétrica de trabalho do motor, medida em 45 A. Observa-se que a corrente de trabalho está abaixo da corrente nominal do motor que é de 68 A, conforme apresentado nos dados de placa na Figura 24. Isso indica que o motor pode estar sobre dimensionado.

Figura 24 – Placa do motor bomba principal.



Fonte: O autor (2021).

A pressão de água do sistema também não sofre alteração, ficando fixa em 5,0 bar. Esta pressão não altera, pois, as válvulas de refrigeração das esteiras das extrusoras ficam sempre abertas mesmo quando não há necessidade de refrigeração.

5.1.2 Cenário 2

Neste cenário, objetiva-se verificar o consumo de energia elétrica do sistema de refrigeração, mas aplicando uma variação da pressão que ocorreu ao fechar manualmente alguns pontos de entrada de água das esteiras.

Para efetuar essa simulação, foram realizadas 9 combinações diferentes simulando a parada das esteiras. Ou seja, fechou-se as entradas de água das esteiras simulando as paradas que podem ser decorrentes de uma manutenção, do acerto de cor e de outros eventos que fazem com que a extrusora não necessite de refrigeração.

Com isso, observa-se um aumento da pressão de água no sistema e redução da corrente elétrica no motor da bomba. A Tabela 2 mostra os resultados obtidos no cenário 2, onde compara-se com o cenário 1.

Tabela 2 – Dados medidos no cenário 2.

Nº da simulação	Situação das válvulas das esteiras das extrusoras						Dados medidos		
	Ext.01	Ext.02	Ext.03	Ext.04	Ext. 05	Ext. 06	Pressão (bar)	Frequência (Hz)	Corrente (A)
01	Fechada	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	6,0	60	41,2
02	Fechada	Fechada	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	6,2	60	39,4
03	Fechada	Fechada	Fechada	Aberta	Aberta	Aberta	6,6	60	37,2
04	Fechada	Fechada	Fechada	Fechada	Aberta	Aberta	6,8	60	35,6
05	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	Fechada	Fechada	6,4	60	39,1
06	Aberta	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	Fechada	5,8	60	41,1
07	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	5,8	60	42,2
08	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	Fechada	5,6	60	43
09	Aberta	Fechada	Fechada	Fechada	Aberta	Aberta	6,8	60	42
Cenário 1	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	5,0	60	45

Fonte: O autor (2021).

Como pode ser observado nas simulações do cenário 2, a pressão da água aumenta conforme as válvulas de alimentação de água das esteiras vão sendo fechadas. Conseqüentemente, a corrente elétrica do motor da bomba reduz, indicando que o motor precisa fornecer uma menor potência para deixar a bomba operando o sistema.

Porém, nota-se que o aumento da pressão pode trazer alguns problemas futuros no sistema de refrigeração e nos equipamentos ligados nela, como: vazamentos nas conexões, desgastes no trocador a placas, vazamento nos selos das bombas, entre outros.

5.1.3 Cenário 3

O objetivo deste cenário é igual aos cenários anteriores, onde busca-se verificar o consumo de energia elétrica do sistema. Entretanto, neste cenário, além de simular as 9 combinações diferentes que indicam a parada das extrusoras, instalou-se um inversor de frequência que possibilita a variação da rotação do motor da bomba. Dessa forma, é possível manter a pressão de água fixa em 5,0 bar no sistema de refrigeração e alterar a rotação do motor através da frequência elétrica.

Para realizar essa simulação foram utilizados os parâmetros de fechamento de válvulas utilizados no cenário 2. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos no cenário 3, comparando com o cenário 1.

Tabela 3 – Dados medidos no cenário 3.

Nº da simulação	Situação das válvulas das esteiras das extrusoras						Dados medidos		
	Ext.01	Ext.02	Ext.03	Ext.04	Ext. 05	Ext. 06	Pressão (bar)	Frequência (Hz)	Corrente (A)
01	Fechada	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	5,0	50,1	23
02	Fechada	Fechada	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	5,0	45,5	18,1
03	Fechada	Fechada	Fechada	Aberta	Aberta	Aberta	5,0	43,3	15,2
04	Fechada	Fechada	Fechada	Fechada	Aberta	Aberta	5,0	43,6	15
05	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	Fechada	Fechada	5,0	35,5	10,9
06	Aberta	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	Fechada	5,0	35	11,0
07	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	Fechada	Fechada	5,0	35	12,0
08	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	Fechada	5,0	37	12,4
09	Aberta	Fechada	Fechada	Fechada	Aberta	Aberta	5,0	42	14,1
Cenário 1	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	5,0	60	45

Fonte: O autor (2021).

Como pode ser observado nas simulações do cenário 3, a pressão de água do sistema de refrigeração das esteiras das extrusoras foi fixada em 5,0 bar. As variações resultantes neste cenário foram a frequência elétrica do motor da bomba e o fechamento e abertura das válvulas de entrada de água das esteiras das extrusoras.

Com estas variações, a rotação da bomba foi alterada de forma a manter a pressão constante pré-estabelecida.

A variação da frequência proporcionou uma redução na corrente elétrica. Conseqüentemente, conforme será apresentado posteriormente, obteve-se uma redução significativa no consumo de energia elétrica do sistema. Assim, esta proposta mostra-se como adequada para traçar um projeto de eficiência energética para o sistema de refrigeração das esteiras das extrusoras.

5.2 Método para cálculo teórico

Para avaliar a eficiência energética através do método teórico, utiliza-se o cálculo do consumo de energia elétrica em kWh. Ou seja, a potência elétrica vezes o intervalo de tempo.

No momento da coleta de dados para o presente estudo, não se tinha em mãos um aparelho específico para efetuar as medições de potência (kW) e/ou energia (kWh). Assim, utilizou-se o método de medição de corrente elétrica (A) para que, através de cálculos, consiga-se obter a potência elétrica. Para tal, consideraram-se os dados obtidos nos três cenários apresentados na seção 5.1 e os dados de placa do motor elétrico da bomba principal.

Além dos dados do motor elétrico, necessita-se calcular a potência elétrica através da equação (2) (ALEXANDER; SADIKU, 2013).

$$P = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot FP \quad (2)$$

Onde: P é a potência trifásica, em watts (W); V é a tensão de linha, em volts (V); I é a corrente de linha, em ampère (A); e FP é o fator de potência (dado de placa do motor).

No próximo capítulo, apresentam-se os resultados obtidos na aplicação do método por medição de corrente elétrica nos três cenários.

6 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos através dos métodos descritos anteriormente. Em adição, os resultados também são comparados, comprovando a melhoria da eficiência energética do sistema proposto em relação ao sistema atual.

6.1 Cálculo cenário 1

Aplica-se o método de cálculo descrito anteriormente para determinar a potência elétrica no cenário 1. Os dados de medição do cenário 1 são apresentados na Tabela 4, onde o valor da corrente elétrica será utilizado para calcular a potência.

Tabela 4 – Dados resumidos do cenário 1.

Nº da simulação	Dados medidos		
	Pressão (bar)	Frequência (Hz)	Corrente (A)
Cenário 1	5,0	60	45

Fonte: O autor (2021).

A potência elétrica para este caso é obtida através da equação (2), obtendo o seguinte resultado:

$$P = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 45 \cdot 0,87 = 25,77 \text{ kW}.$$

Para obter o valor do consumo de energia elétrica, basta multiplicar a potência pelo intervalo de tempo em horas. Neste caso, o objetivo é saber a energia consumida, sendo igual a 25,77 kWh.

Neste cenário, não houve variação da frequência elétrica, da corrente elétrica e da pressão de água no sistema.

5.2 Cálculo cenário 2

Utiliza-se a mesma base de cálculos do cenário 1 para determinar a potência elétrica no cenário 2. Neste cenário, obtiveram-se 9 simulações diferentes onde registraram-se as correntes elétricas conforme a Tabela 5.

Tabela 5 – Dados resumidos do cenário 2.

Nº da simulação	Dados medidos		
	Pressão (bar)	Frequência (Hz)	Corrente (A)
1	6,0	50,1	41,2
2	6,2	45,5	39,4
3	6,6	43,3	37,2
4	6,8	43,6	35,6
5	6,4	35,5	39,1
6	5,8	35,0	41,1
7	5,8	35,0	42,2
8	5,6	37,0	43,0
9	6,8	42,0	42,0
Média de corrente =			40,08

Fonte: O autor (2021).

Para obter o resultado do cenário 2, optou-se em utilizar a média aritmética simples das correntes elétricas das 9 simulações efetuadas. A partir da equação (2), obteve-se a seguinte potência elétrica:

$$P = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 40,08 \cdot 0,87 = 22,95 \text{ kW}.$$

Para este cenário, o consumo de energia elétrica é de 22,95 kWh.

Neste cenário, houve variação de corrente elétrica assim como a variação de pressão de água, porém não houve variação da frequência elétrica na alimentação do motor do sistema.

5.3 Cálculo cenário 3

Utiliza-se a mesma base de cálculos dos cenários 1 e 2 para determinar a potência elétrica no cenário 3. Neste cenário, também obtiveram-se as 9 simulações, onde registraram-se as correntes elétricas conforme exposto na Tabela 6.

Tabela 6 – Dados resumidos do cenário 3.

Nº da simulação	Dados medidos		
	Pressão (bar)	Frequência (Hz)	Corrente (A)
1	5,0	50,1	23,0
2	5,0	45,5	18,1
3	5,0	43,3	15,2
4	5,0	43,6	15,0
5	5,0	35,5	10,9
6	5,0	35,0	11,0
7	5,0	35,0	12,0
8	5,0	37,0	12,4
9	5,0	42,0	14,1
Média de corrente =			14,63

Fonte: O autor (2021).

Para obter o resultado do cenário 3, utilizou-se a média aritmética simples das correntes elétricas registradas nas 9 simulações efetuadas.

A partir da equação (2), calcula-se a potência:

$$P = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 14,63 \cdot 0,87 = 8,38 \text{ kW}.$$

A exemplo dos outros cenários, o objetivo é saber o consumo de energia, sendo este igual a 8,38 kWh.

Neste cenário, houve variação de corrente elétrica assim como a variação da frequência na alimentação do motor, porém a pressão de água do sistema manteve-se fixa na pressão estabelecida.

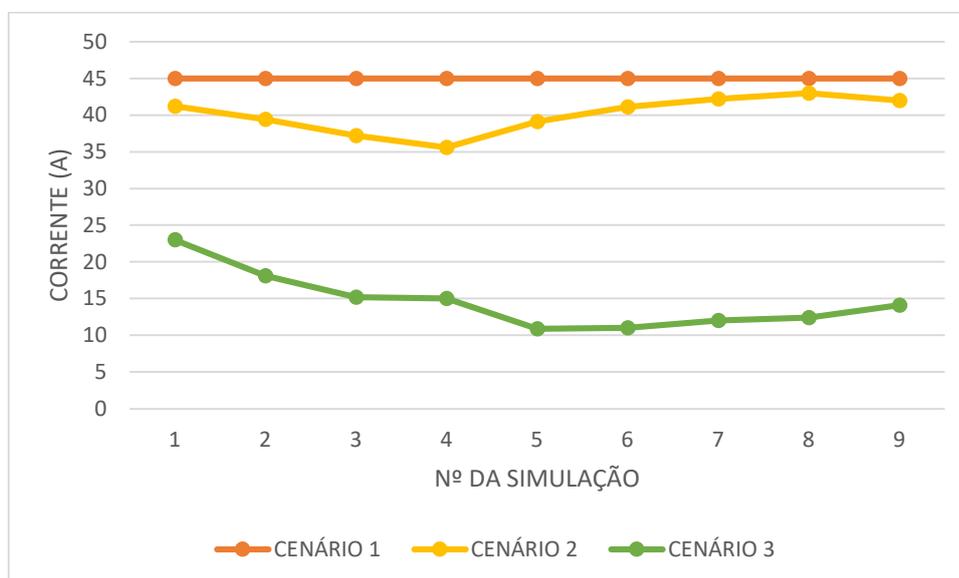
5.4 Comparação dos resultados

Através dos resultados obtidos nas 9 simulações e a partir das médias das correntes elétricas, percebe-se uma redução de aproximadamente 12% no consumo de energia elétrica comparando o cenário 2 com o cenário 1. Entre o cenário 3 e o cenário 1, verifica-se uma redução ainda maior de aproximadamente 67%.

Para fins de comparação, o gráfico ilustrado na Figura 25 apresenta a corrente medida para cada simulação em cada cenário. Percebe-se a grande variação da corrente elétrica entre os três cenários. A partir das curvas, verifica-se que em todas

as simulações do cenário 3 (sistema proposto por este trabalho), a corrente elétrica foi menor que os outros cenários.

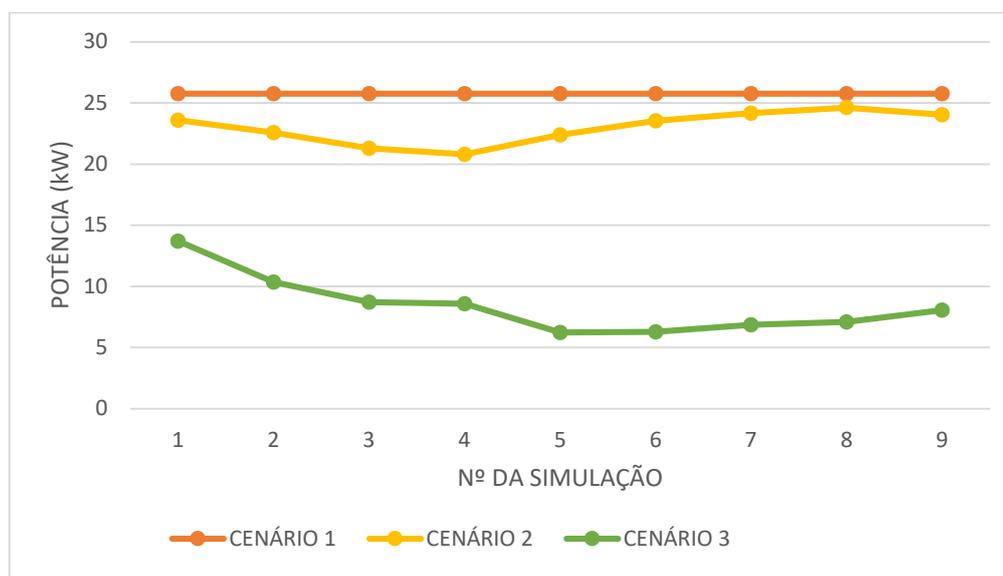
Figura 25 – Gráfico comparativo de corrente entre os três cenários.



Fonte: O autor (2021).

Comparando os cálculos de potência elétrica entre os cenários, conforme apresentado na Figura 26, verifica-se uma melhor eficiência energética do cenário 3 em relação aos outros cenários. Observa-se também que as curvas da Figura 26 ficaram similares as curvas da Figura 25.

Figura 26 – Gráfico comparativo de potência entre os três cenários.



Fonte: O autor (2021).

Portanto, a proposta de automatização do sistema de refrigeração das esteiras das extrusoras simulado no cenário 3, mostra-se eficiente, pois terá uma redução estimada de 67% no consumo de energia em relação cenário 1 que é o sistema atual instalado.

Através da comparação entre os resultados obtidos pelos cálculos entre os cenários 1, 2 e 3, obtém-se os seguintes resultados de consumo de energia elétrica (kWh):

- Cenário 1: consumo de 25,77 kWh;
- Cenário 2: consumo de 22,95 kWh;
- Cenário 3: consumo de 8,38 kWh.

Conforme descrito na seção 3.1, o sistema de refrigeração das esteiras das extrusoras opera em média 124 horas por semana. Para a base de cálculo dos resultados de consumo anual em cada cenário, considera-se que a fábrica opera 50 semanas no ano, totalizando 6.200 horas de trabalho ao ano.

A Tabela 7 indica o consumo que cada cenário pode alcançar em determinados períodos.

Tabela 7 – Consumo de energia elétrica por período, em kWh.

Simulação	Hora	Dia	Semana	Ano
Cenário 1	25,77	618,48	3.195,48	159.774
Cenário 2	22,95	550,80	2.845,80	142.290
Cenário 3	8,38	201,12	1.039,12	51.956

Fonte: O autor (2021).

Fazendo uma comparação dos resultados entre o cenário 1, que é o sistema atual, e o cenário 3, que o sistema proposto, observa-se uma redução anual de aproximadamente 107.818 kWh. Ou seja, 67% de economia de energia elétrica no sistema de refrigeração das esteiras das extrusoras.

A fim de exemplificação, essa redução de consumo de energia elétrica estimada é o suficiente para abastecer 22 residências que apresentam um consumo mensal médio de 400 kWh no mesmo período.

Desta forma, estes resultados demonstram que a automatização do sistema com o uso da automação industrial atende as expectativas de redução de energia elétrica, contribuindo para a eficiência energética da indústria.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma proposta de redução no consumo de energia elétrica de uma fábrica de tintas em pó. A proposta foi desenvolvida para melhorar a eficiência energética do sistema de refrigeração das esteiras das extrusoras da fábrica. Para isso, buscou-se alcançar o objetivo através do uso da automação industrial para controlar a pressão de água e a rotação da bomba do sistema.

Por intermédio deste trabalho e buscando entender melhor o processo, analisaram-se os componentes instalados no sistema atual, assim como os componentes que poderiam ser implantados na proposta de automação.

O estudo e a avaliação foram baseados em três cenários, que serviram para avaliar a sensibilidade do sistema frente as condições diversas provocadas nos testes executados. Em todas as avaliações, foi possível demonstrar a diferença do consumo de energia elétrica, mostrando que é viável a implantação de um projeto de automação industrial neste sistema.

A simulação do uso da automação industrial apresentou resultados significativos, como valores estimados de 67% de redução do consumo de energia em relação ao sistema atual. Com isso, estimou-se uma economia possível de 107.818 kWh por ano. Este resultado satisfaz a questão de pesquisa e atende ao objetivo deste trabalho.

Este estudo será apresentado para a diretoria da empresa, que por sua vez, irá definir sobre a implantação do projeto da automação industrial no sistema de refrigeração das esteiras das extrusoras.

Como sugestão de trabalho futuro, recomenda-se realizar uma avaliação geral em todos os sistemas de refrigeração e exaustão existentes a fim de reduzir o consumo de energia elétrica em toda a empresa.

REFERÊNCIAS

ALEXANDER, Charles K.; SADIKU, Matthew N. O.. **Fundamentos de circuitos elétricos**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

ALFA Engenharia. **Trocadores de calor a placas gaxetados alfa laval linha industrial**. 2021. Disponível em: <https://www.alfaengenharia.com.br/trocadores-calor-placas-gaxetados-industriais>. Acesso em: 14 jul. 2021.

ATHOS Electronics. **Inversor de frequência – O que é e como funciona**. 2021. Disponível em: <https://athoselectronics.com/inversor-de-frequencia/>. Acesso em: 14 jul. 2021.

BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adrienne S.. **Incropera fundamentos de transferência de calor e de massa**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

BIRCK, Cleiton. **Estudo do controle de vazão de bombas de água para redução de custo de processo industrial**. 2015. 97 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2015.

DYNAMICATEC. **Válvula esfera com atuador pneumático**. 2021. Disponível em: <https://www.dynamicatec.ind.br/valvula-esfera-atuador-pneumatico>. Acesso em: 14 jul. 2021.

FILIPPO FILHO, Guilherme. **Bombas, ventiladores e compressores: fundamentos**. São Paulo: Érica, 2015.

FILIPPO FILHO, Guilherme. **Motor de indução**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2013.

LEMAQUI. **Bomba centrífuga - Entenda o que é e como funciona**. 2021. Disponível em: <https://www.lemaquui.com.br/news/Bomba-centrifuga---Entenda-o-que-e-e-como-funciona-39/>. Acesso em: 14 jul. 2021.

LOUREIRO, Alberto Mendonça *et al.* Análise e modificação em trocador de calor para atender ensaio de motores ciclo OTTO em dinamômetro. In: SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA, 12., 2015, Resende. **Anais [...]**. Resende: SEGeT, 2015. p. 1-8.

MARK. **Bombas Mark**. 2021. Disponível em: <https://www.bombasmk.com.br/>. Acesso em: 14 jul. 2021.

POLESE, Everton Luis. **Eficiência energética em sistema de bombeamento: uso do variador de frequência**. 2010. 71 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

SANTOS, Aristóteles Paulinele Medeiros dos. **Estudo da influência da tensão na partida e operação dos motores de indução, utilizando o ATPDraw**. 2016. 72 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de Pernambuco, Recife, 2016.

Soluções industriais. **Atuador de válvula pneumática**. 2021. Disponível em: <https://www.solucoesindustriais.com.br/>. Acesso em: 14 jul. 2021.

WEG. **WEG**. 2021. Disponível em: <https://www.weg.net>. Acesso em: 14 jul. 2021.

WIKA. **Transmissor de pressão de alta qualidade**. 2021. Disponível em: https://www.wika.com.br/s_10_pt_br.WIKA. Acesso em: 14 jul. 2021.