



CENTRO UNIVERSITÁRIO RITTER DOS REIS

ÂNIMA EDUCAÇÃO

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ADELQUE GRANVILLA DE OLIVEIRA

**AUTOMAÇÃO DO CONTROLE DE TEMPERATURA DA ÁGUA GELADA DA
METALIZADORA**

Canoas/RS

2023

ADELQUE GRANVILLA DE OLIVEIRA

**AUTOMAÇÃO DO CONTROLE DE TEMPERATURA DA ÁGUA GELADA DA
METALIZADORA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharel em Engenharia Mecânica do Centro Universitário Ritter dos Reis, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Jean de Dieu Briand Minsongui Mveh

Canoas/RS

2023

ADELQUE GRANVILLA DE OLIVEIRA

**AUTOMAÇÃO DO CONTROLE DE TEMPERATURA DA ÁGUA GELADA DA
METALIZADORA**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário Ritter dos Reis.

Canoas/RS, ____ de junho de 2023.

Professor e Orientador Dr. Jean de Dieu Briand Minsongui Mveh
Centro Universitário Ritter dos Reis

Professor e Coordenador Me. Adriano Menezes da Silva
Centro Universitário Ritter dos Reis

Dedico este trabalho a todos que me apoiaram e estiveram presentes na minha trajetória durante o bacharelado, os quais me incentivaram emocionalmente nos momentos difíceis e proporcionaram todo suporte para que eu não desistisse, conseguindo concluir, com êxito, minha formação.

AGRADECIMENTOS

À minha família, em especial aos meus pais que me deram a vida e sempre me incentivaram a estudar, às minhas irmãs Virgínia, Vanina e Verônica, ao meu irmão Arthur e não menos importante à mulher da minha vida Vanessa, os quais me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam minha ausência enquanto me dedicava à realização deste trabalho. Também gostaria de ressaltar meus avós, que muito me apoiaram emprestando o carro para que eu pudesse ir na faculdade.

Ao meu orientador Dr. Jean de Dieu Briand Minsongui Mveh, pelas correções, dedicação, paciência e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional e na conclusão deste trabalho.

Aos meus amigos, de universidade e de vida, que me proporcionaram momentos únicos durante toda minha trajetória, com muitas risadas e momentos de descontração.

Aos meus professores da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e do Centro Universitário Ritter dos Reis (UniRitter), que, sem dúvidas, tiveram grande participação na construção do meu ensino superior.

RESUMO

No presente trabalho foi realizada uma análise dos problemas de instabilidade do processo de produção do filme de polipropileno biorientado (BOPP) metalizado. Através deste estudo foi possível diagnosticar uma falha no controle de temperatura da água gelada fornecida pela área de Utilidades da empresa. Com isso, sucedeu-se o estudo de caso para resolver esse problema de engenharia através do desenvolvimento da análise, em conjunto com a apresentação de propostas para corrigir ou minimizar os problemas de instabilidade do processo. Desta forma, realizou-se um estudo dos conceitos básicos sobre trocadores de calor industrial, seus modelos e suas aplicações, bem como os conceitos de automação e o que a compõem. Também foi apresentada a história dos filmes de BOPP e alguns dos indicadores-chave de produção (KPI's). Para a solução do problema avaliou-se a necessidade de automatizar as válvulas de retorno do trocador de calor, trazendo como consequência eliminar o fator humano na parte operacional. O projeto foi dividido em várias etapas, onde num primeiro momento foi realizada a instalação dos instrumentos de controle, após a instalação deles foi realizada uma série de testes de funcionamento e alguns ajustes conforme necessidade de operação. Após a instalação do projeto, apresentou-se como consequência a disponibilidade de máquina e o ganho de produtividade. Diante disso, não há outra conclusão para este trabalho senão o entendimento de que todas as expectativas propostas foram atendidas, visto que foi apresentado um estudo de caso para a solução do problema de variação da temperatura da água gelada no processo de metalização, onde foram consideradas todas as circunstâncias que o compõe, bem como apresentada sugestão de tratativa para esse problema.

Palavras-chave: Filme BOPP. Metalizadora. Automação. Temperatura. Instabilidade.

ABSTRACT

In the present work, an analysis of the instability problems in the production process of metallized bioriented polypropylene film (BOPP) will be carried out. Through this study it will be possible to diagnose a failure in the temperature control of the cold water supplied by the company's Utilities area. Consequently, a case study will be elaborated to solve this engineering problem, through the development of the analysis together with the presentation of proposals to correct or minimize the instability problems in the process. Thus, a study of the basic concepts of industrial heat exchangers, their models and applications, as well as the concepts of automation and its components will be carried out. The history of BOPP films and some key production indicators (KPIs) will also be presented. To solve the problem, the need to automate the heat exchanger return valves was evaluated, which would imply eliminating the human factor in the operational part. The project was divided into several stages, where initially the installation of the control instruments was carried out. After their installation, a series of operational tests and some adjustments were carried out according to the operational needs. Once this stage was completed, a control spreadsheet was created in which the temperature variation was recorded for approximately 15 days, with 4 daily readings. Based on these readings, it was possible to conclude that the process was completely controlled and there were no longer any temperature fluctuations. As a result, machine availability and increased productivity were achieved. In consequence, no other conclusion can be reached in this work other than the understanding that all the expectations raised were met, since a case study was presented to solve the problem of cold water temperature variation in the metallization process, taking into consideration all relevant circumstances and suggesting approaches to address this issue.

Keywords: BOPP Film. Metallizer. Automation. Temperature. Instability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Classificação dos trocadores de calor.....	20
Figura 2 - Torre de resfriamento tiragem natural.....	21
Figura 3 - Torre de resfriamento tiragem forçada.....	22
Figura 4 - Trocador de calor duplo tubo.....	24
Figura 5 - Trocador de calor casco e tubo.....	25
Figura 6 - Princípio de funcionamento - trocador de calor casco e tubo.....	25
Figura 7 - Trocadores de calor de placa.....	26
Figura 8 - Trocadores de calor de placa aletada.....	27
Figura 9 - Trocadores de calor de tubo aletado.....	28
Figura 10 - Trocadores de calor de corrente paralelas.....	30
Figura 11 - Trocadores de calor de contracorrente.....	31
Figura 12 - Trocadores de calor de contracorrente.....	32
Figura 13 - Trocadores de calor de contracorrente.....	32
Figura 14 - Esteiras de transporte de bebidas.....	38
Figura 15 - Operação do processo via supervisório.....	40
Figura 16 - Diagrama ilustrando controle de processos.....	41
Figura 17 - Pirâmide da automação.....	42
Figura 18 - Sensor de Pressão.....	45
Figura 19 - Sensor de Temperatura.....	46
Figura 20 - Sensor de Nível.....	46
Figura 21 - Sensor de Vazão.....	47
Figura 22 - Sensor de Indutivo.....	47
Figura 23 - Atuador Pneumático.....	49
Figura 24 - Atuador Elétrico.....	50
Figura 25 - Símbolo triangular da reciclagem do BOPP.....	57
Figura 26 - Esquema de processo do BOPP.....	58
Figura 27 - Filme de BOPP Opaco.....	60
Figura 28 - Filme de BOPP Transparente.....	60
Figura 29 - Filme de BOPP Fosco.....	61
Figura 30 - BOPP Metalizado.....	62
Figura 31- Indicadores de Desempenho.....	63

Figura 32 - Imagem aérea da Polo Films	71
Figura 33 - Linha de produção 1	72
Figura 34 - Máquina de corte de filmes	73
Figura 35 - Imagem máquina de metalização	74
Figura 36 – CLP CPX-E /-EX1E	75
Figura 37 - Unidade de Indicação de Controle CDPX-X-A-S-10	76
Figura 38 - Módulo de Saída Digital CPX-E-8DO.....	77
Figura 39 - Módulo de Entrada Digital CPX-E-16DI	77
Figura 40 - Módulo de Entrada Analógico CPX-E-4AI-U-I.....	78
Figura 41 - Módulo de Saída Analógico CPX-E-4AI-U-I	79
Figura 42 - Posicionador CMSX-P-S-C-U-F1-S-50-A.....	80
Figura 43 - Atuador Semi-rotativo DFPD-240-RP-90-RS60-F0710.....	81
Figura 44 - Filtro Regulador MS6-LFR-1/2-D7-ERV-AS.....	81
Figura 45 – Filtro MS6-LF-1/2-CRV.....	82
Figura 46 - Válvula de Abertura e Fechamento MS6-EM1-1/2-S	83
Figura 47 - Válvula de Abertura e Fechamento MS6-EE-1/2-10V24-S	83
Figura 48 - Termoresistência PT100	84
Figura 49 - Lista de materiais	84
Figura 50 - Fluxograma do sistema.....	88
Figura 51 - Ilustração do fluxograma do sistema.....	89
Figura 52 - Fluxo do sistema fechado retorno	90
Figura 53 - Fluxo do sistema fechado entrada do trocador	90
Figura 54 - Fluxo do sistema fechado saída do trocador	91
Figura 55 - Fluxo do sistema aberto entrada e saída do trocador	92
Figura 56 - Antes do projeto	93
Figura 57 - Depois do projeto	93
Figura 58 - Posicionador e atuador	94
Figura 59 - Painel de Controle e bloco de válvulas pneumático.....	94
Figura 60 - Resultado HPC de janeiro até novembro/22.....	96
Figura 61 - Resultado HPC ano 2022	96
Figura 62 - Gráfico de leituras antes do projeto	98
Figura 63 - Gráfico de leituras depois do projeto.....	99
Figura 64 - Gráfico de leituras depois do projeto.....	100

Figura 65 – Tabela de impacto financeiro	101
Figura 66 - Tabela de retorno de investimento.....	102
Figura 67 - Tabela de retorno de investimento.....	103

LISTA DE ABREVIATURAS

BOPP - *Bi Oriented Polypropylene*

KPI's - *Key Performace Indicators*

EPI's – Equipamentos de Proteção Individuais

OEE - *Overall Equipment Effectiveness*

MTBF - *Mean Time Between Failures*

MTTR - *Mean Time to Repair*

TDO – *Transverse Stretch Zone*

LSZ – *Longitudinal Stretch Zone*

PULL ROLL – Rolo de Puxar

CHILL ROLL – Rolo de Refrigeração

CLP's - Controlador Lógico Programável

SDCD's - Sistema Digital de Controle Distribuído

SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition*

IHM - *Interface Homem Máquina*

MES - *Manufacturing Execution Systems*

PIMS - *Plant Information Management System*

RFI - Interferência de Rádio-Frequência

EMI - Interferência Eletromagnética

PLC - *Programmable Logic Controller*

DCS – *Distributed Control System*

RTD – *Resistive Thermal Devices*

DVM - *Domain Variability Model*

DMM - *Maturity in Data Management*

MEMS - Sistemas Microeletromecânicos

SI – Sistema Internacional

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA.....	15
1.2	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA	16
2	OBJETIVOS DA PESQUISA	17
2.1	OBJETIVO GERAL.....	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2.3	JUSTIFICATIVA	17
3	REVISÃO DE LITERATURA	19
3.1	TROCADORES DE CALOR	19
3.1.1	Classificação dos trocadores de calor	20
3.1.1.1	Classificação quanto ao modo de transferência de calor	21
3.1.1.2	Classificação quanto ao tipo de construção	23
3.1.1.2.1	<i>Trocadores de calor tubular tipo duplo tubo</i>	<i>24</i>
3.1.1.2.2	<i>Trocadores de calor tipo casco e tubos.....</i>	<i>24</i>
3.1.1.2.3	<i>Trocadores de calor de placa</i>	<i>26</i>
3.1.1.2.4	<i>Trocadores de calor de placa aletada</i>	<i>27</i>
3.1.1.2.5	<i>Trocadores de calor de tubo aletado.....</i>	<i>27</i>
3.1.1.2.6	<i>Trocadores de calor regenerativos.....</i>	<i>28</i>
3.1.1.3	Classificação quanto a compacticidade.....	29
3.1.1.4	Classificação quanto à disposição das correntes.....	30
3.1.1.4.1	<i>Trocador de calor de correntes paralelas.....</i>	<i>30</i>
3.1.1.4.2	<i>Trocador de calor de contracorrente.....</i>	<i>31</i>
3.1.1.4.3	<i>Trocador de calor de correntes cruzadas.....</i>	<i>31</i>
3.1.1.4.4	<i>Trocador de calor de escoamento multipasse.....</i>	<i>32</i>
3.1.1.5	Classificação quanto aos mecanismos de transferência de calor	33
3.1.1.5.1	<i>Condensadores.....</i>	<i>33</i>
3.1.1.5.2	<i>Geradores de Vapor (Caldeiras).....</i>	<i>34</i>
3.1.1.5.3	<i>Radiadores de usinas de força espaciais.....</i>	<i>34</i>
3.1.2	Aplicando conceitos termodinâmicos.....	34

3.1.2.1	Balanceamento de Energia	35
3.1.2.2	Transferência de Energia	35
3.2	AUTOMAÇÃO	36
3.2.1	Tipos de automação	37
3.2.1.1	Automação Fixa.....	38
3.2.1.2	Automação Programável.....	39
3.2.1.3	Automação Flexível.....	39
3.2.2	Processo de automação	41
3.2.2.1	Pirâmide da Automação Industrial.....	41
3.2.2.1.1	<i>Nível 1 – Dispositivos de campo, instrumentos de medição e atuadores..</i>	<i>43</i>
3.2.2.1.2	<i>Nível 2 – Controle do processo</i>	<i>43</i>
3.2.2.1.3	<i>Nível 3- Supervisão e monitoramento</i>	<i>43</i>
3.2.2.1.4	<i>Nível 4- Gerenciamento da planta industrial.....</i>	<i>44</i>
3.2.2.1.5	<i>Nível 5- Administração de recursos e gestão financeira.....</i>	<i>44</i>
3.2.3	Sensores	44
3.2.3.1	Sensores de Pressão	45
3.2.3.2	Sensores de Temperatura	45
3.2.3.3	Sensores de Nível	46
3.2.3.4	Sensores de Vazão	46
3.2.3.5	Sensores Indutivos.....	47
3.2.3.6	Sensores Capacitivos.....	48
3.2.4	Atuadores.....	48
3.2.4.1	Atuadores Pneumáticos	48
3.2.4.2	Atuadores Hidráulicos	49
3.2.4.3	Atuadores Elétricos	50
3.2.5	Transmissores	51
3.2.5.1	Transmissor de Temperatura	51
3.2.5.2	Transmissor de Pressão.....	51
3.2.5.3	Transmissor de Vazão.....	52
3.2.6	Controladores	53
3.2.6.1	Controle ON-OFF ou LIGA-DESLIGA ou de histerese.....	53
3.2.6.2	Controle Proporcional ou P	54
3.2.6.3	Controle Proporcional + integral ou PI.....	54

3.2.6.4	Controle Proporcional + Derivativo ou PD	55
3.2.6.5	Controle Proporcional + Integral + Derivativo ou PID	55
3.3	FILMES DE POLIPROPILENO BIORIENTADO – BOPP	55
3.3.1	Filme de BOPP opaco	59
3.3.2	Filme de BOPP transparente	60
3.3.3	Filme de BOPP fosco	61
3.3.4	Filme de BOPP metalizado	61
3.4	INDICADORES DE PRODUÇÃO KPI's (<i>KEY PERFORMANCE INDICATORS</i>)	63
3.4.1	Aplicação de KPI's	65
3.4.2	Tipos de indicadores de produção	66
3.4.2.1	OEE (Overall Equipment Effectiveness).....	66
3.4.2.2	Eficácia de produção	67
3.4.2.3	MTBF (Mean Time Between Failures).....	67
3.4.2.4	MTTR (Mean Time to BRepair)	68
3.4.2.5	Disponibilidade (UPTIME)	69
4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	70
4.1	CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA	70
4.1.1	Local de trabalho (história da empresa).....	70
4.1.2	Lista de materiais utilizados no projeto	74
4.1.2.1	Sistema de automação.....	74
4.1.2.2	Unidade de indicação e controle	75
4.1.2.3	Módulo de saída digital.....	76
4.1.2.4	Módulo de entrada digital	77
4.1.2.5	Módulo de entrada analógico	78
4.1.2.6	Módulo de saída analógico.....	78
4.1.2.7	Posicionador.....	79
4.1.2.9	Atuador Semi-rotativo elétrico	80
4.1.2.10	Filtro regulador	81
4.1.2.11	Filtro	82
4.1.2.12	Válvula de Abertura e Fechamento	82
4.1.2.13	Válvula de abertura e fechamento.....	83
4.1.2.14	Termoresistência PT100	84

4.2	TÉCNICAS DE INSTRUMENTOS DE COLETA DE DADOS	86
4.2.1	Desenvolvimento do sistema de controle	86
4.2.2	Diagrama do Sistema	88
4.2.2.1	Construção do Sistema	89
4.2.2.10	Layout antes do projeto	92
4.2.2.11	Layout depois do projeto	93
4.2.3	Linguagem de Programação de Controle	95
4.2.3.1	Simulação do projeto	95
4.2.3.2	Indicadores	95
5	RESULTADOS	98
5.1	ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE DADOS	98
5.2	DISCUSSÃO	99
5.2.1	Viabilidade econômica	99
5.2.1.1	Custos do projeto	100
5.2.1.2	Estimativas de perdas	101
5.2.1.3	Retorno do investimento	102
5.3	VANTAGENS	103
5.4	DESVANTAGENS	104
6	CONCLUSÃO	105
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	107
	REFERÊNCIAS	108

1 INTRODUÇÃO

Desde a Revolução Industrial, a implantação de técnicas de produção e consumo de matéria prima vem provocando um grande impacto no meio ambiente. O desenvolvimento econômico também induz a maior produção que, por sua vez, torna o consumo cada vez mais elevado.

Primar por melhorias que beneficiem o meio ambiente é uma necessidade da sociedade e, na indústria, isso ocorre em etapas de melhoramento nas suas diversas operações. Estudar o processo industrial com o intuito de buscar a diminuição de retrabalho, descarte excessivo de matéria prima são as formas mais objetivas de encontrar soluções para tais processos.

Em uma indústria voltada para a produção de filmes polipropileno biorientado (BOPP), em que parte desses filmes produzidos é submetida ao processo de metalização, evitar o desperdício de matéria prima é essencial. O principal fator é o custo alumínio para a produção do filme metalizado, uma vez gerado o defeito esse filme deverá ser descartado e vendido como sucata com baixo valor agregado. Além dos gastos com o alumínio, também existem os impactos gerados com gasto de energia elétrica, hora homem de produção, retrabalhos e baixa eficiência de produção. O maior controle das variáveis em voga, que hoje não ocorre, é a solução para a melhor eficiência do processo.

Estudar os processos da indústria, desenvolver práticas sustentáveis e economicamente viáveis, portanto, soluções para a diminuição de consumo de insumos e desperdícios de produção, agregam um melhor retorno financeiro e a diminuição de resíduos gerados para o meio ambiente.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

No presente trabalho será realizada uma análise dos problemas de instabilidade gerados no processo de metalização do filme BOPP, ocasionado pelo mau controle de temperatura da água gelada fornecida pela área de Utilidades. Com isso, será elaborado o estudo de caso para resolver esse problema de engenharia, feito através do desenvolvimento da análise e trazendo propostas para corrigir ou

minimizar os problemas de instabilidade no processo produtivo dos filmes de BOPP metalizados.

1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Essa pesquisa tem como objetivo estudar os tipos de trocadores de calor e suas aplicações, a importância da automação nos processos industriais, os tipos de filmes BOPP e suas aplicações, a utilização de indicadores de produção KPI's para medir os resultados obtidos e por fim eliminar ou minimizar os problemas de instabilidade do processo de produção dos filmes metalizados.

2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Com base no problema da pesquisa em questão, essa seção define os objetivos gerais e específicos que são abordados no trabalho.

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho será eliminar ou minimizar a variação de temperatura da água gelada do processo, fornecida pela área de Utilidades. Como consequência uma redução dos problemas de instabilidade no processo produtivo dos filmes BOPP metalizados.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Esse trabalho tem como objetivos específicos:

- a) Estudar os tipos de trocadores de calor, os tipos de controle de automação dos processos em geral, a aplicação dos filmes BOPP na indústria e a aplicação dos indicadores de controle de produção;
- b) Apresentar os problemas de instabilidade gerados no processo produtivo dos filmes BOPP, devido a falha do controle de temperatura da água gelada do processo de metalização;
- c) Propor soluções para o problema, e aplicar uma delas, visando corrigir a falha.

2.3 JUSTIFICATIVA

Esse trabalho traz como propósito o aprimoramento e aprofundamento dos conceitos adquiridos no curso de engenharia mecânica, principalmente envolvendo conceitos de transferência de calor.

O engenheiro mecânico que possa vir a trabalhar nessa área, tem como grande desafio aprender e obter experiência durante sua carreira profissional, pois esse ramo da engenharia é considerado complexo. Por se tratar de sistemas únicos, embora eles possam ser parecidos na sua forma de analisar e realizar os cálculos, nunca um sistema será igual ao outro. Isso se deve a diversos fatores que o compõem. Justificando, assim, a necessidade de haver profissionais qualificados para estarem aptos a desenvolverem e resolverem projetos de engenharia relacionados ao tema em questão.

O trabalho contribuirá para um maior entendimento quanto a aplicação de trocadores de calor de maneira geral, como também as falhas que o compõem, e ainda a importância de automatizar processos na indústria, a fim de minimizar perdas de produção. Diante disso, pode-se prever o comportamento do sistema e garantir circunstâncias que aperfeiçoem sua operação, sem prejudicar o conjunto de modo geral.

Para desenvolver a presente pesquisa, foram utilizados como referência trabalhos acadêmicos e artigos, os quais abordavam o assunto escolhido, a fim de obter consistência e relevância à esta pesquisa.

3 REVISÃO DE LITERATURA

Para o desenvolvimento deste trabalho, inicialmente foram estudados os conceitos básicos sobre trocadores de calor industrial, seus modelos e suas aplicações, bem como os conceitos de automação e o que a compõe, também foi apresentado a história dos filmes de BOPP e alguns dos indicadores de produção KPI's. Com base nas informações será desenvolvido o estudo da automação do controle de temperatura da água gelada da metalizadora, a fim de eliminar ou minimizar os problemas de instabilidades gerados no processo produtivo.

3.1 TROCADORES DE CALOR

Os trocadores de calor são dispositivos que facilitam a transferência de calor entre dois ou mais fluidos em diferentes temperaturas. Muitos tipos de trocadores de calor foram desenvolvidos para uso em vários níveis de complexidade e tamanho tecnológico, como para usinas a vapor, plantas de processamento químico, aquecimento e resfriamento de edifícios, refrigeradores domésticos, radiadores de veículos automotivos, radiadores de veículos espaciais etc. (BANDEIRA, 2017, p.12)

Os trocadores de calor são divididos em diversos tipos, como trocadores de calor de casco e tubo e radiadores de automóveis, onde a transferência de calor ocorre principalmente por condução e convecção, de um fluido quente para um fluido frio, separados por uma parede de metal. Essa separação é feita em caldeiras e condensadores onde a transferência de calor por ebulição e condensação é de grande importância. Em alguns tipos de trocadores de calor, como as torres evaporativas, um fluido quente como a água, é resfriada por mistura direta com um fluido frio, como o ar, ou seja, a água é pulverizada através de bicos aspersores, entrando em contato com a corrente de ar induzida e é resfriada por convecção e evaporação. Já em caldeiras e condensadores o processo de transferência de calor ocorre por ebulição e condensação. (BANDEIRA, 2017, p.12)

O projeto de trocadores de calor é um tópico complexo, sendo assim, a transferência de calor e queda de pressão, avaliação de tamanho, desempenho e economia desempenham papéis importantes no projeto final, por exemplo: embora as

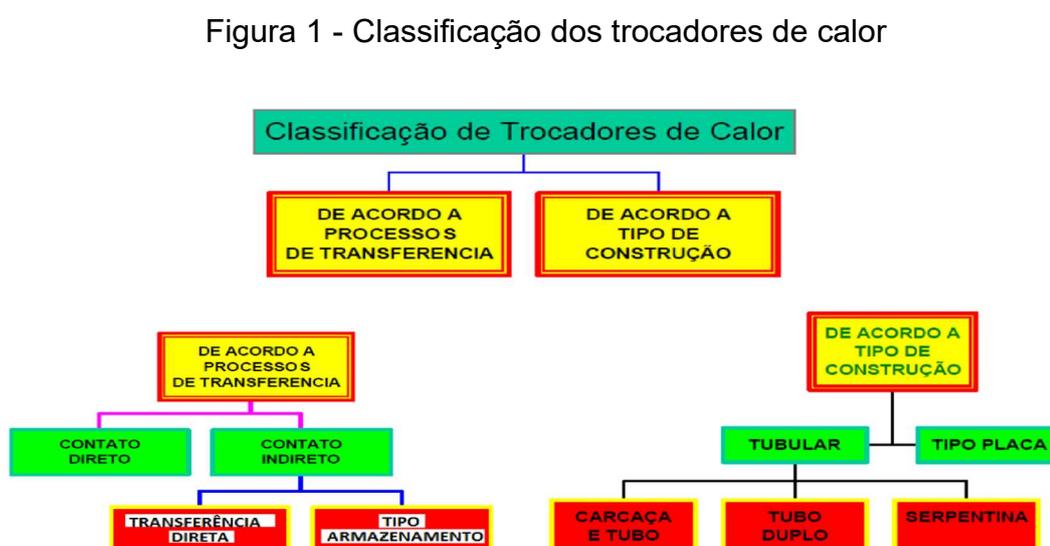
considerações de custo sejam muito importantes em grandes aplicações, como energia elétrica e plantas de processamento químico, as considerações de peso e tamanho são o fator de projeto dominante na escolha do projeto para aplicações aeronáuticas e espaciais. (BANDEIRA, 2017, p. 14)

3.1.1 Classificação dos trocadores de calor

Os trocadores de calor são projetados com tipos, tamanhos, configurações e arranjos de fluxo, com uma categorização, mesmo que arbitrária, mas necessária para seu estudo. Kakaç (2012) classifica os trocadores de calor, podendo estes serem classificados de diferentes formas:

- Quanto ao modo de transferência de calor;
- Quanto ao tipo de construção.
- Quanto a compacticidade;
- Quanto à disposição das correntes;
- Quanto ao mecanismo de transferência de calor. (BOHORQUEZ, 2013, p.02)

Na Figura 1, pode-se observar a classificação dos trocadores de calor:

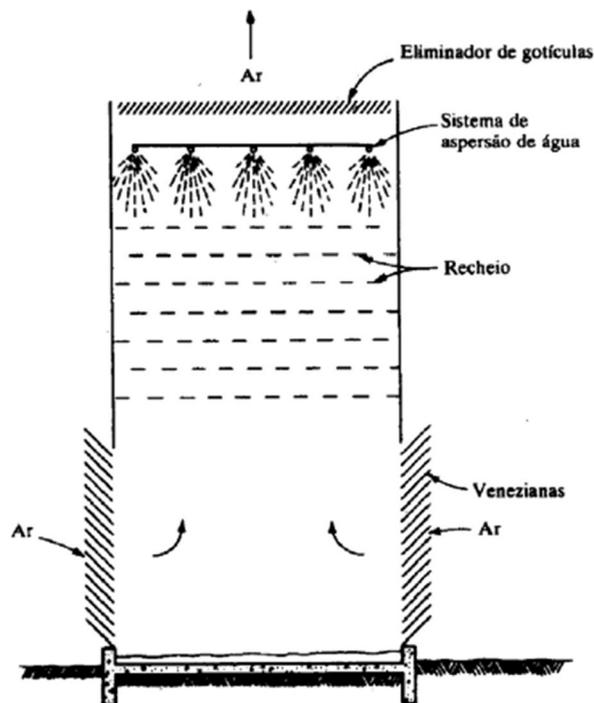


Fonte: GROUP, 2021.

3.1.1.1 Classificação quanto ao modo de transferência de calor

Os trocadores de calor podem ser classificados quanto ao tipo de contato: direto ou indireto. No tipo de contato direto, a troca térmica ocorre entre dois fluídos que não se misturam, ou seja, estão em estados diferentes um gasoso e um líquido, que entram em contato direto. As torres de resfriamento, condensadores, que utilizam pulverizadores de água, são exemplos típicos de trocadores por contato direto. As torres de resfriamento são muito utilizadas nos processos industriais para realizarem a troca de térmico entre fluídos, lançando o calor na atmosfera, ao invés de um rio, lago ou no oceano. Os tipos mais comuns incluem as torres de resfriamento com tiragem natural e as torres com tiragem forçada. No tipo com tiragem natural, ilustrada na Figura 02, a água é pulverizada na corrente de ar que ascende através da torre por convecção térmica. (OZISIK, 1990, p.2)

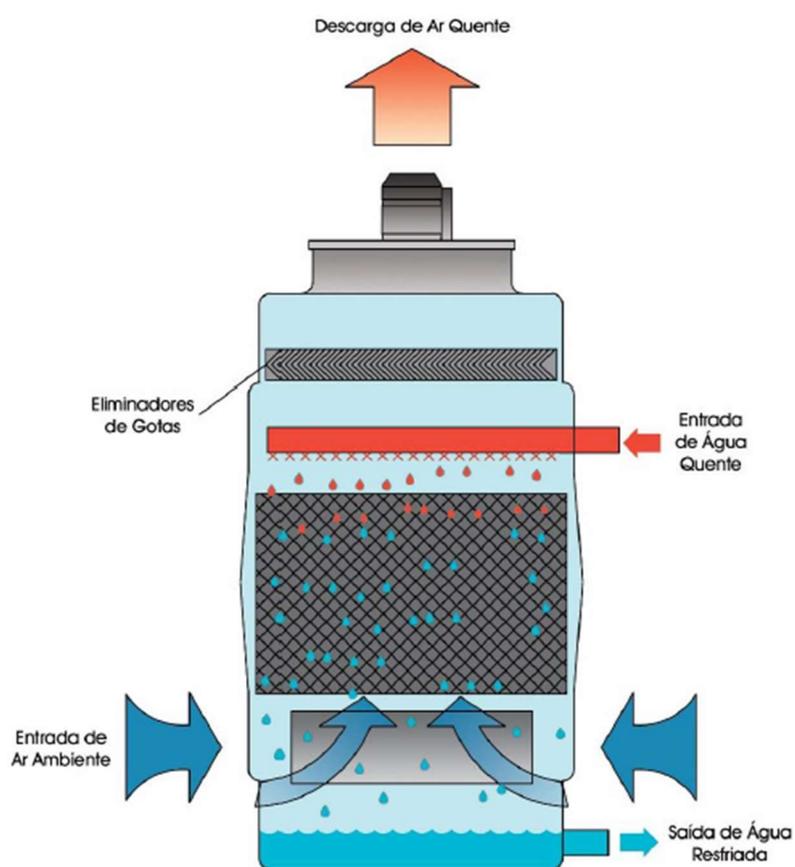
Figura 2 - Torre de resfriamento tiragem natural



Fonte: ÖZISIK, 1990.

Nesse tipo de tiragem, ilustrada na Figura 3, a água é pulverizada através de bicos aspersores, fazendo com que essa água caia em forma de gotas. Desta forma essas gotas irão se chocar com o recheio ou enchimento existente dentro da torre, isso faz com que a velocidade de queda dessas gotas diminua, aumentando assim o tempo de exposição contra a corrente de ar que está circulando, ou seja, a água é resfriada pela convecção e evaporação. Já em uma torre de resfriamento com tiragem forçada, a principal diferença do processo é que existe um ventilador na parte superior da torre que aspira o ar do interior para cima. Com isso, a capacidade de troca térmica aumentada consideravelmente, desta forma temos um sistema muito mais eficiente comparado ao sistema de tiragem natural. (OZISIK, 1990, p.2)

Figura 3 - Torre de resfriamento tiragem forçada



Fonte: GROUP, 2021.

Nos trocadores de calor de contato indireto, os fluidos estão separados por uma parede intransponível, dessa forma não há contato entre eles e a troca térmica ocorre através do contato entre a superfície, ou seja, por condução. Também são conhecidos

como trocadores de calor de recuperação. Existem vários tipos, o mais comum no dia a dia são os radiadores de veículos automotores. O processo de troca térmica é muito abrangente, mas podemos destacar alguns aspectos referente a transferência de calor:

- **Permuta:** é quanto ocorre a troca de calor sensível entre duas correntes de processo.
- **Aquecimento:** é quando o aquecimento (calor sensível) ocorre através de um fogo, porém não há contato direto da chama com o fluido, por exemplo, caldeiras a vapor, aquecedores de fluido térmico.
- **Resfriamento:** também chamado de refrigeração, é quando ocorre a remoção do calor sensível de uma corrente do processo, por exemplo, chillers (resfriadores) que utilizam água ou fluido refrigerante para realizar a troca térmica.
- **Condensação:** é quando ocorre a remoção do calor latente durante a mudança de fase do processo, com ajuda de um meio frio, muito utilizado em sistemas de destilação.
- **Vaporização:** é quando ocorre a remoção do calor latente durante a mudança de fase do processo, com ajuda de um meio frio, muito utilizado em sistemas de destilação. (OZISIK, 1990, p.3)

3.1.1.2 Classificação quanto ao tipo de construção

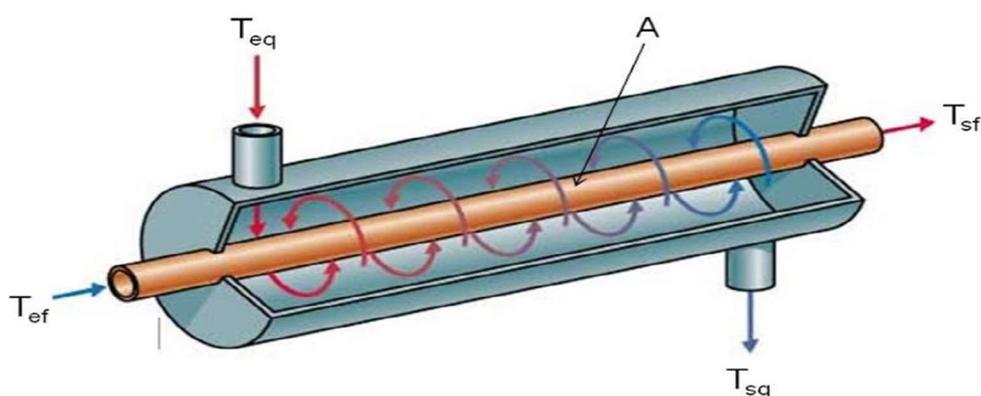
Os trocadores de calor podem ser classificados de acordo com as características construtivas. Os principais tipos são:

- Tipo tubulares;
- Tipo tubos aletados;
- Tipo de placas;
- Tipo de placa aletadas;
- Tipo regenerativos. (OZISIK, 1990, p.4)

3.1.1.2.1 Trocadores de calor tubular tipo duplo tubo

Os trocadores de calor tipo duplo tubo, ilustrado na Figura 4, são constituídos de dois tubos concêntricos, acoplados um dentro do outro, com isso formam dois espaços para o escoamento do fluido em uma direção de contrafluxo, um por dentro do tubo interno e outro entre os dois tubos, ou seja, entre o interno e o externo. Esse tipo de trocador é de manutenção muito simples, tem baixo custo de fabricação e muito utilizado em processos de baixa capacidade térmica. (OZISIK, 1990, p.4)

Figura 4 - Trocador de calor duplo tubo



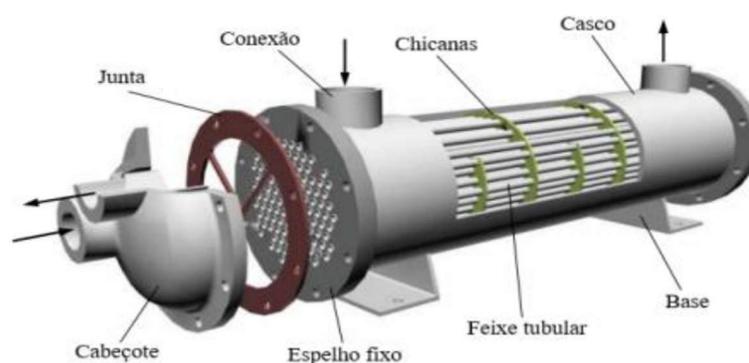
Fonte: GROUP, 2021.

3.1.1.2.2 Trocadores de calor tipo casco e tubos

Os trocadores casco e tubos, ilustrado na Figura 5, são constituídos basicamente de um tubo cilíndrico ou carcaça, onde é embutido na parte interna um feixe de tubos cilíndricos, com os eixos paralelos ao casco. Desta forma, um dos fluidos circula pelo casco e outro pelo feixe de tubos. São amplamente utilizados na indústria e fabricados em diversos tamanhos, arranjos de escoamento e podem operar em diversos regimes de temperatura e pressão. Também são considerados de fácil fabricação e custo relativamente baixo, por isso são amplamente empregados nas aplicações de engenharia. Os principais componentes são o feixe de tubos, o casco, os cabeçotes e as chicanas. As chicanas sustentam os tubos, dirigem a corrente do fluido na direção normal aos tubos, aumentam a turbulência do fluido no casco e a

troca térmica. Existem vários tipos de chicanas, e a escolha do tipo de chicana, da geometria e do espaçamento depende da vazão, da perda de carga permitida no lado do casco, das exigências da sustentação dos tubos e das vibrações induzidas pelo escoamento. (OZISIK, 1990, p.4)

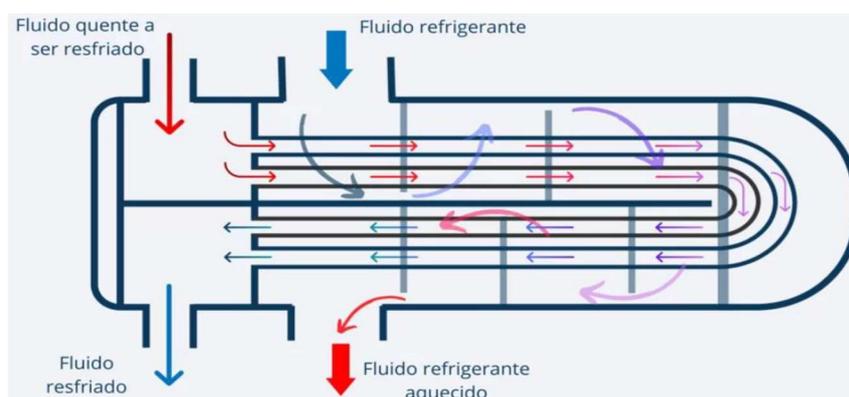
Figura 5 - Trocador de calor casco e tubo



Fonte: GROUP, 2021.

Na Figura 6, pode-se observar que princípio de funcionamento é muito simples, o fluido refrigerante circula entre o casco e o feixe de tubos, ou seja, entra o fluido refrigerante resfriado em uma das extremidades e após realizar a troca térmica com o fluido a ser resfriado sai aquecido na outra extremidade. O processo é exatamente o mesmo para o fluido a ser resfriado, porém ele entra e circula no feixe de tubos: (OZISIK, 1990)

Figura 06 - Princípio de funcionamento - trocador de calor casco e tubo



Fonte: GROUP, 2021.

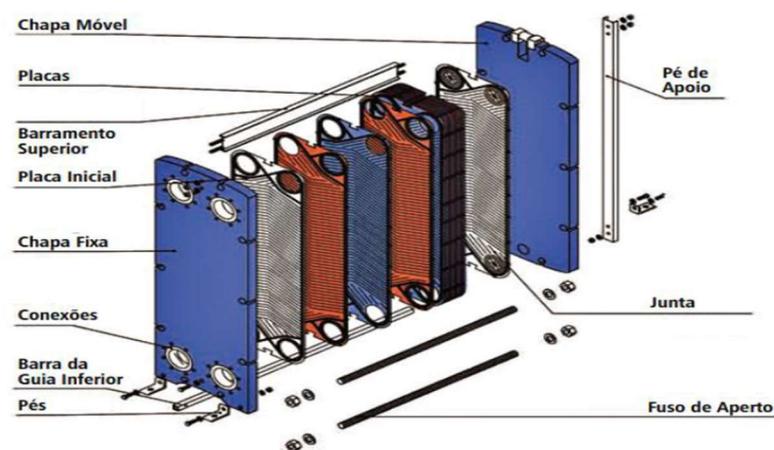
Quanto ao tipo dos fluídos, podemos classificá-los como:

- **Líquido para líquido:** são de aplicações mais comuns, ambos os fluídos serão bombeados por meio do trocador e a transferência de calor ocorre por convecção forçada.
- **Líquido para gás:** geralmente aplicado em casos em que as aletas no lado do tubo em flui o gás, tem um coeficiente de transferência de calor baixo.
- **Gás para gás:** neste caso são aplicados em exaustores de gás, recuperadores de pré-aquecimento de ar nos sistemas de turbinas a gás, sistemas criogênicos de liquefação de gás, e em fornos de aço. Muitos utilizados com aletas internas e externas nos tubos, para aumentar a troca térmica. (OZISIK, 1990)

3.1.1.2.3 Trocadores de calor de placa

O trocador de calor do tipo placa, ilustrado na Figura 7, é geralmente constituído de placas planas, lisas ou onduladas. Devido a geometria das placas, não pode suportar pressões ou diferenças de temperaturas muito elevadas, se comparado aos trocadores tubulares, ou seja, foram projetados para valores de temperatura e pressão moderados. Também são considerados do tipo compactos, onde a razão entre a área de superfície de transferência de calor e o volume do trocador é maior que $700\text{m}^2/\text{m}^3$. (OZISIK, 1990)

Figura 7 - Trocadores de calor de placa.

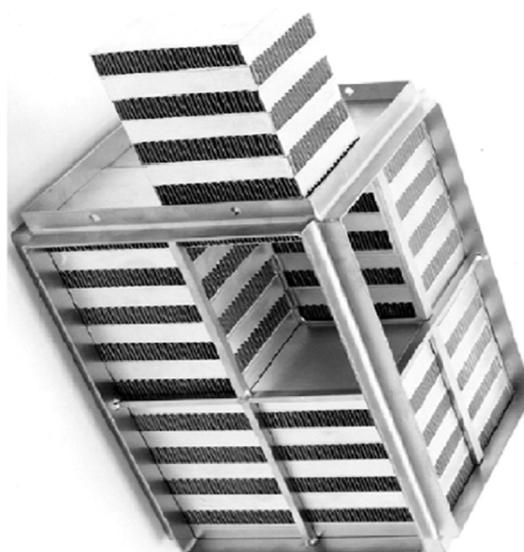


Fonte: GROUP, 2021.

3.1.1.2.4 Trocadores de calor de placa aletada

Os trocadores de placa aletada, ilustrado na Figura 8, são constituídos de aletas planas ou onduladas, ficando separados por chapas planas. Operam em regimes de correntes cruzadas, contracorrente e correntes paralelas, esses são os arranjos possíveis. Geralmente utilizados nas trocas de calor de um gás para outro, mas em situações de baixa pressão, recomenda-se não ultrapassar 10 atm. As temperaturas de operação são limitadas a aproximadamente 800°C, também é conhecido pelo fator de compacticidade, ou seja, pode ser aumentada significativamente (até cerca de 6.000 m²/m³), muito empregado em sistemas criogênicos. (OZISIK, 1990)

Figura 8 - Trocadores de calor de placa aletada.



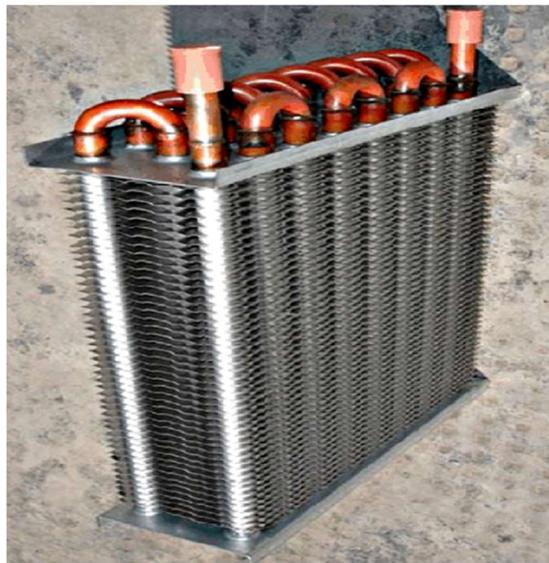
Fonte: GROUP, 2021.

3.1.1.2.5 Trocadores de calor de tubo aletado.

Os trocadores de calor de tubo aletado, ilustrado na Figura 9, são constituídos de tubos cilíndricos ou chatos onde serão instaladas aletas. A principal característica é a capacidade de suportar altas pressões de trabalho, podem suportar em torno de 30 atm. e operam em regimes de baixas temperaturas (criogênicas) e altas

temperaturas (em torno de 870°C). O fator de compacticidade é cerca de 330 m²/m³, menor que a dos trocadores de placa aletada. Largamente aplicados em sistemas de refrigeração, em automóveis e aeroplanos, sistemas criogênicos, condicionadores de ar, turbinas de gás, reatores nucleares etc. (OZISIK, 1990)

Figura 9 - Trocadores de calor de tubo aletado.



Fonte: GROUP, 2021.

3.1.1.2.6 Trocadores de calor regenerativos.

Os trocadores de calor regenerativos são classificados em estáticos ou dinâmicos.

- **Regenerador do tipo estático:** este tipo não possui componentes móveis é formado por uma massa porosa (por exemplo, bolas, seixos, pós etc.), dessa forma os fluídos quentes e frios circulam alternadamente no seu interior. Durante o escoamento do fluido quente, o calor é transferido do fluido quente para o miolo do trocador regenerativo. Depois, o escoamento do fluido quente é interrompido, e inicia o escoamento do fluido frio. Durante a passagem do fluido frio, transfere-se calor do miolo para o fluido frio. Os regeneradores de tipo estático podem ser pouco compactos, para o uso em alta temperatura (900

a 1.500°C), como nos pré-aquecedores de ar, na fabricação de coque e nos tanques de fusão de vidro.

- **Regenerador do tipo dinâmico:** este tipo é constituído por um miolo, no formato de um tambor que gira em torno de um eixo de tal forma que hora uma parte passa através da corrente quente, hora passa através da corrente fria. Desta forma, o calor será armazenado no miolo da corrente quente será transmitido para a parte corrente fria. Os regeneradores rotativos podem operar em temperaturas até 870°C, em situações que se deseja alcançar valores mais altos de temperatura é utilizado o miolo em material cerâmico. Outro fator importante dos regeneradores rotativos é que troca térmica deve ser realizada entre dois gases, pois somente eles têm a capacidade calorífica para a troca de calor. (OZISIK, 1990, p.07)

3.1.1.3 Classificação quanto a compacticidade

A definição de compacticidade é tema bastante relativo. A razão entre a área da superfície de transferência de calor, num dos lados do trocador de calor, e o volume pode ser empregada como medida da compacticidade do trocador de calor. Um trocador de calor com densidade de área superficial, em um dos lados, maior do que cerca de 700m²/m³, é classificado, arbitrariamente, como trocador de calor compacto, independentemente de seu projeto estrutural. Por exemplo, os radiadores de automóvel, com uma densidade de área superficial da ordem de 1.100 m²/m³, e os trocadores de calor de cerâmica vítrea, de certos motores a turbina de gás, que têm uma densidade de área superficial da ordem de 6.600 m²/m³, são trocadores de calor compactos. No outro extremo da escala de compacticidade, os trocadores de calor do tipo tubular plano e os do tipo casco e tubos têm densidade da área superficial na faixa de 70 a 500m²/m³, e não são considerados compactos. (OZISIK, 1990, p.08)

O incentivo para se utilizar trocadores de calor compactos está em que um alto valor da compacticidade reduz o volume do trocador de calor para um desempenho especificado. Quando os trocadores de calor se destinam a automóveis, a motores marítimos, a aviões ou a veículos aeroespaciais, a sistemas criogênicos, a aparelhos de refrigeração ou de condicionamento de ar, o peso e o volume (portanto, a

compactidade) são importantes. Para aumentar a eficiência ou a compactidade dos trocadores de calor, empregam-se aletas. Num trocador de calor de gás para líquido, por exemplo, o coeficiente de transferência de calor do lado do gás é uma ordem de grandeza mais baixo do que o do lado do líquido. Por isso, usam-se aletas no lado do gás para se ter um projeto equilibrado; a superfície de transferência de calor do lado do gás torna-se muito mais compacta. (OZISIK, 1990, p.09)

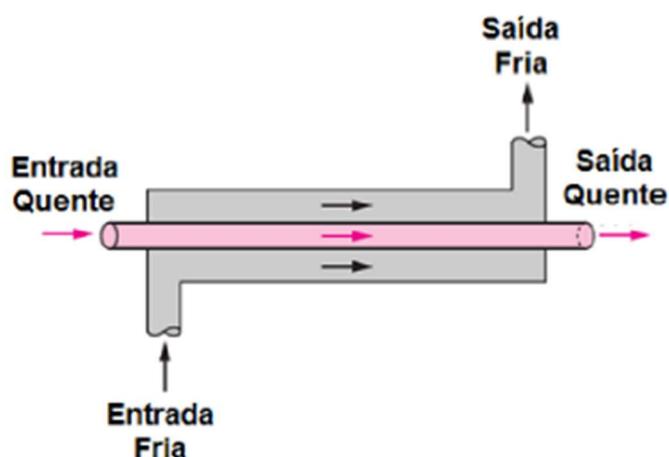
3.1.1.4 Classificação quanto à disposição das correntes

Existem diversas possibilidades para a disposição dos fluxos de escoamento nos trocadores de calor. Seguem os mais utilizados: (OZISIK, 1990, p.09)

3.1.1.4.1 Trocador de calor de correntes paralelas.

Na Figura 10, pode-se observar que os fluídos quentes e frios entram na mesma extremidade do trocador de calor, fluem na mesma direção, e saem juntos na outra extremidade, dessa forma a troca térmica não é muito eficiente se comparados a outros tipos. (OZISIK, 1990, p.10)

Figura 10 - Trocadores de calor de corrente paralelas.

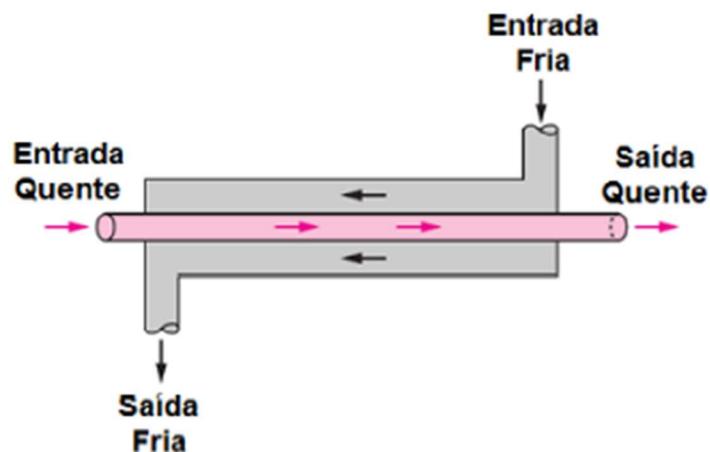


Fonte: GROUP, 2021.

3.1.1.4.2 Trocador de calor de contracorrente.

Os fluídos quentes e frios entram em extremidades opostas do trocador de calor e fluem em direções opostas, conforme ilustrado a Figura 11, com isso proporciona uma maior troca térmica no sistema. (OZISIK, 1990, p.10)

Figura 11 - Trocadores de calor de contracorrente.



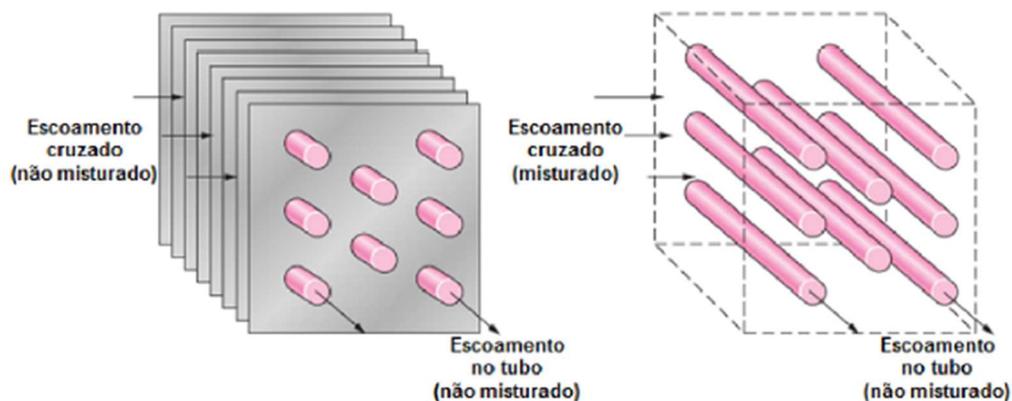
Fonte: GROUP, 2021.

3.1.1.4.3 Trocador de calor de correntes cruzadas.

No trocador com correntes cruzadas, ilustrado na Figura 12, os dois fluídos fluem perpendicularmente um ao outro. Na disposição com correntes cruzadas, o escoamento pode ser misturado ou não misturado, dependendo do projeto. Neste tipo podemos ter três configurações ideais para o escoamento, entre elas:

1. Ambos os fluídos estão não-misturados;
2. Um fluído está misturado e o outro está não-misturado;
3. Ambos os fluídos estão misturados. (OZISIK, 1990, p.10)

Figura 12 - Trocadores de calor de contracorrente.

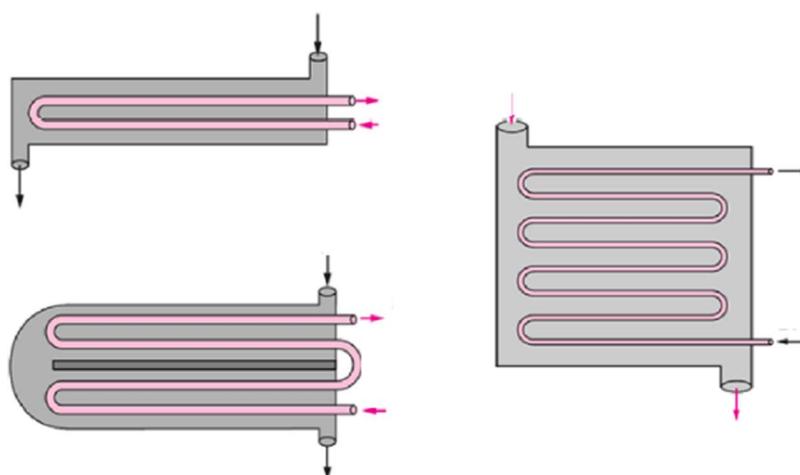


Fonte: GROUP, 2021.

3.1.1.4.4 Trocador de calor de escoamento multipasse.

A configuração de escoamento com passes múltiplos é empregada frequentemente, pois a multipassagem intensifica a eficiência global, acima das eficiências individuais, de acordo com a ilustração da Figura 13. É possível grande variedade de configurações das correntes com passes múltiplos. (OZISIK, 1990, p.11)

Figura 13 - Trocadores de calor de contracorrente.



Fonte: GROUP, 2021.

3.1.1.5 Classificação quanto aos mecanismos de transferência de calor

Existem algumas possibilidades quanto ao mecanismo de transferência de calor, onde é necessária uma combinação de quaisquer dois, tais como:

1. Convecção forçada ou convecção livre monofásica;
2. Mudança de fase (ebulição ou condensação);
3. Radiação ou convecção e radiação combinadas. (OZISIK, 1990, p.12)

Em todos os casos discutidos anteriormente, consideramos a convecção forçada monofásica em ambos os lados do trocador de calor. Condensadores, caldeiras e radiadores de usinas de força espaciais incluem mecanismos de condensação, de ebulição e de radiação, respectivamente, sobre uma das superfícies do trocador de calor. (OZISIK, 1990, p.12)

3.1.1.5.1 Condensadores.

Os condensadores são utilizados em várias aplicações, como usinas de força a vapor de água, plantas de processamento químico e usinas nucleares elétricas de veículos espaciais. Os principais tipos incluem os condensadores de superfície, os condensadores a jato e os condensadores evaporativos. O tipo mais comum é o condensador de superfície, que tem a vantagem de o condensado ser devolvido à caldeira através do sistema de alimentação de água uma vez que a pressão do vapor, na saída da turbina, é de somente 1,0 a 2,0 polegadas de mercúrio absolutas, a densidade do vapor é muito baixa e a vazão do fluido é extremamente grande. Para minimizar a perda de carga, na transferência do vapor da turbina para o condensador, o condensador é montado ordinariamente abaixo da turbina e ligado a ela. A água de resfriamento flui horizontalmente no interior dos tubos, enquanto o vapor flui verticalmente para baixo, entrando por uma grande abertura na parte superior, e passa transversalmente sobre os tubos. Há um dispositivo de aspiração do ar, este dispositivo é importante, pois a presença de gás não condensável no vapor reduz o coeficiente de transferência de calor na condensação. (OZISIK, 1990, p.12)

3.1.1.5.2 Geradores de Vapor (Caldeiras).

As caldeiras a vapor de água constituem uma das primitivas aplicações dos trocadores calor. O termo gerador de vapor é muitas vezes aplicado às caldeiras nas quais a fonte de calor é uma corrente de fluido quente em vez de produtos da combustão. Uma enorme variedade de caldeiras já foi construída. Existem caldeiras em pequenas unidades, para aquecimento doméstico, até unidades gigantescas, complexas e caras, para as modernas usinas de força. (OZISIK, 1990, p.13)

3.1.1.5.3 Radiadores de usinas de força espaciais.

A rejeição do calor residual do condensador de uma usina de força cuja finalidade é produzir eletricidade para o equipamento de propulsão, de orientação ou de comunicação de um veículo espacial acarreta sérios problemas mesmo com a usina produzindo uns poucos quilowatts de energia elétrica. O único modo com que se pode dissipar o calor residual de um veículo espacial é radiação térmica, aproveitando a vantagem da relação de quarta potência entre a temperatura absoluta superfície e o fluxo de calor radiativo. Portanto, na operação de algumas usinas de força de veículos espaciais, o ciclo termodinâmico se processa em temperaturas tão altas que o radiador trabalha aquecido ao rubro. Mesmo assim, é difícil manter a dimensão do radiador dentro de um casco razoável, nos veículos de lançamento. (OZISIK, 1990, p.13)

3.1.2 Aplicando conceitos termodinâmicos

Através de conceitos termodinâmicos podemos calcular a carga térmica dos equipamentos. Antes, precisa-se aplicar algumas definições como:

- Calor específico e a quantidade de calor necessária para aquecer 1g de uma determinada substância a 1°C.
- Vazão mássica é a massa de uma substância por unidade de tempo.
- Variação de temperatura.

Para determinar a carga térmica (Q) de um trocador de calor, deve-se multiplicar a vazão mássica (m) pelo calor específico do fluido (C_p) e pela variação de temperatura (Δt) do sistema, as unidades de medidas devem estar no Sistema Internacional (SI). Desta forma, segue a seguinte equação: (LOGIQUE, 2017)

$$Q = m \cdot C_p \cdot \Delta t$$

3.1.2.1 Balanceamento de Energia

A primeira Lei da Termodinâmica parte do princípio da conservação de energia, e diz que durante uma interação, a energia pode mudar de uma forma para outra, mas que a quantidade total permanece constante. Ou seja, a energia não pode ser criada ou destruída. Portanto, a energia que entra (Q_1) em um sistema é a mesma que sai (Q_2). (LOGIQUE, 2017)

$$Q_1 = Q_2$$

Em um sistema o calor cedido pelo fluido quente é totalmente absorvido pelo fluido frio, sendo essa a ordem de transferência de energia. (LOGIQUE, 2017)

3.1.2.2 Transferência de Energia

Os trocadores de calor depois de um certo tempo de operação normal, estão sujeitos ao acúmulo de deposição de impurezas nas suas superfícies, devido a formação de ferrugem, ou ainda outras reações entre o fluido e o material de fabricação da parede. Isso faz com que seja aumentada a resistência à transferência de calor entre os fluidos. Esse efeito pode ser levado em conta através da introdução de uma resistência térmica adicional, conhecida como fator de incrustação (ff). A fim de minimizar os efeitos são adicionadas aletas às superfícies expostas a um ou ambos os fluidos, com o intuito de aumentar a área superficial de contato, e assim reduzir a resistência térmica à transferência de calor por convecção. (LOGIQUE, 2017) Para

determinar o coeficiente global de transferência de calor (U), a equação pode ser expressa como:

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_1} + \frac{e}{k} + \frac{1}{h_2} + ff\right)}$$

onde h_1 é o coeficiente de convecção fluido, h_2 é o coeficiente de convecção fluido, e é a espessura, k condutividade térmica parede e o ff é o fator de incrustação, todas a unidades no Sistema Internacional - SI. (LOGIQUE, 2017)

3.2 AUTOMAÇÃO

A palavra automação é de origem grega (autômatos: mover-se por si ou sozinho), resumidamente é um sistema que realiza processos automáticos. É empregada em processos para comandar e controlar mecanismos para funcionamento próprio. Baseado, em máquinas mecânicas, pneumáticas, hidráulicas, eletrônicas e elétricas que executam uma programação lógica sem a intervenção humana. (LOGIQUE, 2017)

No decorrer da história da evolução humana ocorre um processo de redução de esforços necessários para determinados serviços. Dentro da automação industrial podem ser citados algumas fases:

- **Ferramentas manuais:** uso de ferramentas manuais para substituir as mãos. Esta ferramenta não substituiu o esforço humano, mas tornou este esforço mais eficiente.
- **Ferramentas acionadas:** energização das ferramentas manuais. A energia foi suprida através de vapor d'água, água, eletricidade, ar comprimido etc.
- **Quantificação da energia:** quantificação do uso da energia que aciona as ferramentas. Significa, por exemplo, colocar um cronômetro para medir o tempo de agitação, um termômetro para indicar o fim da reação etc. As variáveis indicadas ao operador ajudam a determinar o status do processo.
- **Controle programado:** programação da máquina para fazer uma sequência de operações, resultando em uma peça acabada. As operações são

automáticas e expansíveis para incluir outras funções. A máquina segue um programa predeterminado, com realimentação da informação. O operador deve observar a máquina para ver se tudo funciona bem.

- **Controle com realimentação:** uso da medição para corrigir a máquina através da realimentação. Tem-se uma medição e um ponto de referência e o sistema compara estes dois pontos e atua no processo para que eles sejam sempre iguais, próximos ou periodicamente iguais.
- **Controle Avançado:** uso de algoritmos mais complexos nos cálculos de controle. Uso de lógica e de técnicas robustas, adaptativas e preditivas.
- **Máquina criativa:** projeto de circuitos ou produtos nunca projetados pelas próprias máquinas. A máquina criativa procura soluções que seu programador não pode prever. (ROSÁRIO, 2009)

Ao implementar a automação nos processos industriais são apresentados diversos benefícios com relação a qualidade do produto e a economia de tempo de produção:

- Aumento da qualidade do produto;
- Aumento da quantidade de produção;
- Redução de desperdícios de material e tempo;
- Melhoria da segurança da produção. (AREVALO, 2019, p.52)

Dessa forma, diante de difíceis tarefas apresentadas pelas indústrias, o processo de automação se mostra de extrema importância para ajudar, principalmente quando se trata de tarefas repetitivas ou perigosas, aumentando a produtividade, melhor qualidade do produto e conseqüentemente a redução de custos. (AREVALO, 2019, p.52)

3.2.1 Tipos de automação

A evolução tecnológica vem permitindo a implantação de diversos conceitos de automação, principalmente para acompanhar os novos projetos de linhas de produção. Portanto, a automação foi dividida nos seguintes tipos:

- Automação fixa;
- Automação programada;

- Automação flexível. (TÜNKERS, 2017)

3.2.1.1 Automação Fixa

A automação fixa é caracterizada pela rigidez da configuração do controle dos equipamentos, uma vez que criada a lógica de programação e implementado o projeto, não será possível realizar alterações futuras sem que se realize um novo projeto. Mesmo com relativa inflexibilidade, esse tipo tem bons ganhos de produtividade e de eficiência, além de um menor custo por unidade produzida. É de grande aplicação em sistema de produção em contínua, como por exemplo, linhas de montagem automotivas, linhas de produção de bebidas, empresas do ramo logístico etc. A implementação desse tipo de automação é sempre voltada a realizar operações respetivas e definidas, com o foco em se obter altas taxas de produção, como ilustrado na Figura 14. (TÜNKERS, 2017)

Figura 14 - Esteiras de transporte de bebidas.



Fonte: TÜNKERS, 2017.

Existem alguns aspectos típicos da automação fixa, são eles:

- Investimentos iniciais elevados em equipamentos específicos;

- Elevadas taxas de produção;
- Impossibilidade em geral de prever alterações nos produtos.

Avaliando o ponto vista econômico quando se pretende obter uma produção em grande escala, este tipo de automação industrial se justifica. (FERSILTEC, 2022)

3.2.1.2 Automação Programável

A automação programável é muito utilizada em situações em que se necessita produzir produtos variados, ou seja, basta escolher um programa diferente no controlador para iniciar a produção de um novo produto, proporcionando uma facilidade para a produção de produtos diferentes. No entanto, a reconfiguração da programação para a produção de um novo produto leva um certo tempo, e isso não é o ideal, porque tempo é dinheiro. Por essa razão é fundamental um bom planejamento de produção, sempre evitando setup desnecessários e priorizando o maior volume de produção possível com determinada configuração. Esse modelo é muito utilizado em processos de produção por batelada, onde o volume de produção está entre o mediano e o elevado e uma receita costuma ser seguida com certa periodicidade.

Existem alguns aspectos típicos da automação programável, são eles:

- Elevado investimento em equipamento genérico;
- Taxas de produção inferiores à automação fixa;
- Flexibilidade para alterações na configuração da produção. (FERSILTEC, 2022)

3.2.1.3 Automação Flexível

A automação flexível, ilustrada na Figura 15, é uma extensão da automação programável, mas ainda está em evolução. Esse sistema de automação fornece o equipamento de controle automático que oferece uma grande flexibilidade para modificações no design do produto. Essas mudanças podem ser realizadas de forma ágil via supervisor, através receitas fornecidas pela área de engenharia de processo, em que os próprios operadores realizam a alteração do programa. Um sistema flexível

de produção é capaz de gerar uma determinada variedade de produtos, sem perda significativa de tempo de produção para ajustes em eventos de adição de novos produtos. Assim, o sistema pode produzir várias combinações de produtos sem a necessidade de organizá-los em lotes separados. (FERSILTEC, 2022)

Figura 15 - Operação do processo via supervisório.



Fonte: FERSILTEC, 2022.

Este sistema é comumente utilizado em aplicações com pouca variedade de serviços e uma configuração de volume produtivo de médio para alto. Também é utilizada em processos de batelada, e tarefas que exigem uma grande variedade de produto, com escalas produtivas baixa para média. Nesse caso, há possibilidade de produzir diversos produtos com diferentes mercados alvo, já que é baseada em um processo unificado, ao invés de ser um processo segmentado. Existem alguns aspectos típicos da automação programável, são eles:

- Elevados investimentos no sistema global;
- Produção contínua de misturas variáveis de produtos;
- Taxas de produção média;
- Flexibilidade de ajustamento às variações no tipo dos produtos. (FERSILTEC, 2022)

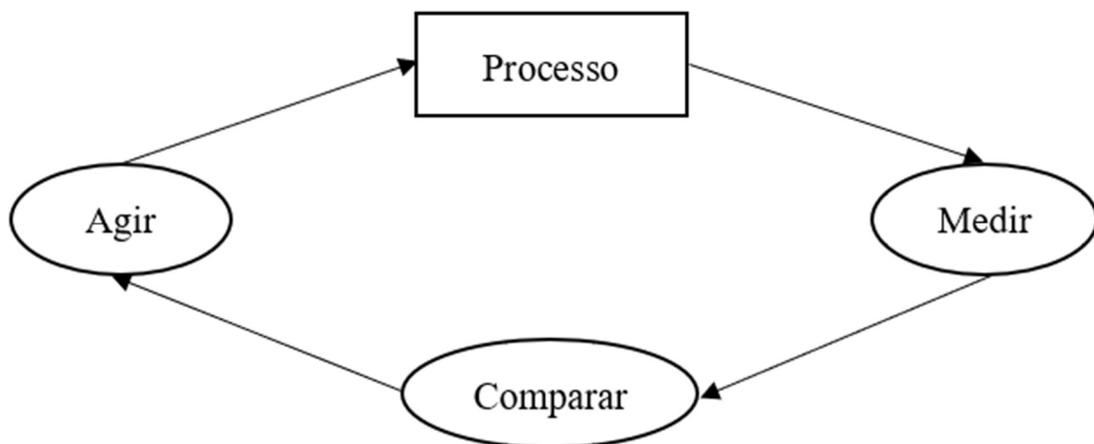
3.2.2 Processo de automação

As indústrias estão investindo em sistemas de controle de automação. Manter o controle de um processo significa ter alguma de suas variáveis em uma determinada condição:

- Sempre igual a um valor almejado;
- Próxima do valor almejado;
- Oscilando próxima do valor almejado; (ROGGIA e FUENTES, 2016)

O processo de automação, ilustrado no fluxograma da Figura 16, consiste em medir a variável que se deseja controlar, abrir uma comparação desse resultado de medição com o valor almejado e agir para que qualquer diferença seja diminuída. (ROGGIA e FUENTES, 2016)

Figura 16 - Diagrama ilustrando controle de processos



Fonte: IFSC, 2014.

3.2.2.1 Pirâmide da Automação Industrial

A pirâmide de automação industrial é uma representação visual que visa organizar e ilustrar, de forma hierárquica, os cinco níveis de controle e de trabalho existentes no setor industrial e como funciona na prática. É possível observar que os níveis mais baixos se relacionam com os equipamentos utilizados “em campo”, que

tem contato direto com o ambiente de produção. Em contrapartida, os níveis superiores tratam do gerenciamento dos processos e da planta. Dessa maneira, fica mais organizada a estruturação de todo o processo produtivo, e uma melhor compreensão dos diferentes níveis de controle, e assim poder monitorar todo o ciclo produtivo de forma mais precisa. Analisar cada nível da pirâmide é importante, pois todos são independentes. Diante disso, conforme vamos atingindo o topo da pirâmide os dados coletados vão sofrendo uma avaliação melhor, ou seja, ao decorrer do processo as informações ganham mais qualidade e significado. Na Figura 17 serão mostrados os cinco níveis da pirâmide de automação industrial e suas características:

- Nível 1 – Dispositivos de campo, instrumentos de medição e atuadores;
- Nível 2 – Controle do processo;
- Nível 3- Supervisão e monitoramento;
- Nível 4- Gerenciamento da planta industrial;
- Nível 5- Administração de recursos e gestão financeira. (LOGIQUE, 2017)

Figura 17 - Pirâmide da automação



Fonte: LOGIQUE, 2017.

3.2.2.1.1 Nível 1 – Dispositivos de campo, instrumentos de medição e atuadores

O nível 1 representa a coleta de dados e controle manual. É composto então por máquinas e dispositivos de campo, atuadores, sensores, transmissores dentre outros componentes presentes na planta. É também conhecido como “chão de fábrica”, por possuir um nível mais baixo de inteligência envolvida. Neste nível o tipo de comunicação mais comum é a 4-20mA. (DUTRA, 1995)

3.2.2.1.2 Nível 2 – Controle do processo

No nível 2 ficam os equipamentos que controlam automaticamente os processos produtivos da planta. Para isso, é necessário o uso de dispositivos com um considerável nível de inteligência, podendo indicar as diretrizes de automação do sistema de controle. Estes podem ser CLP's (Controlador Lógico Programável), SDCD's (Sistema Digital de Controle Distribuído) e relés (chaves eletromecânicas). (DUTRA, 1995)

3.2.2.1.3 Nível 3- Supervisão e monitoramento

O nível 3 é onde se faz toda a supervisão dos processos da planta, bem como a otimização. Nesse nível é realizado todo armazenamento de dados do processo de produção, como por exemplo, resultados de produtividade e algoritmos de otimização. Utiliza-se ferramentas de controle de supervisão remota (supervisório), e exigem o uso de protocolos próprios como Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA), Interface Homem Máquina (IHM) e Workstation, para garantir a perfeita harmonia dos sistemas. (DUTRA, 1995)

3.2.2.1.4 Nível 4- Gerenciamento da planta industrial

No nível 4 está conectado a controle fabril total. É responsável pela programação, planejamento dos processos, produção e logística dos recursos. Nesse nível a tecnologia já é bem mais avançada e o compartilhamento de dados tem objetivo corporativo, ou seja, voltados a área de vendas, negócios e gestão financeira e geração de lucro. São desenvolvidos relatórios coletados no nível, por meio de ferramentas como Manufacturing Execution Systems (MES) e Plant Information Management System (PIMS). (DUTRA, 1995)

3.2.2.1.5 Nível 5- Administração de recursos e gestão financeira

Por fim, no topo da Pirâmide, temos o nível 5. Refere-se ao planejamento estratégico e gerenciamento corporativo, lugar em que fica toda a parte administrativa do processo como a gestão dos recursos da empresa, com auxílio de softwares para a tomada de decisões. Este nível se desprende das ferramentas fabris e foca na administração dos recursos da empresa. (DUTRA, 1995)

3.2.3 Sensores

Os sensores para automação industrial são dispositivos responsáveis por detectar as movimentações em máquinas utilizadas no ambiente fabril. Capazes de captar tudo o que acontece na linha de produção sem a necessidade do contato físico de um operador, servem principalmente para a verificação e contagem de material, assim como para controlar a direção, velocidade, nível, temperatura, posição, ph, dentre outros aspectos, garantindo maior segurança aos funcionários e aumentando a eficiência do processo produtivo. Se os sensores forem elétricos, também é possível analisar a tensão ou corrente. Empregados em diversos ambientes e condições, os sensores são classificados em diferentes tipos, tais como:

- Pressão;
- Temperatura;

Figura 19 - Sensor de Temperatura



Fonte: ANCHIETA, 2016.

3.2.3.3 Sensores de Nível

A função do sensor de nível, ilustrado na Figura 20, serve para controlar líquidos ou sólidos granulados mantidos em reservatórios, silos e tanques, que podem ser abertos ou pressurizados. (HI TECNOLOGIA, 2021)

Figura 20 - Sensor de Nível



Fonte: HI TECNOLOGIA, 2021.

3.2.3.4 Sensores de Vazão

Os sensores de vazão, ilustrado na Figura 21, são responsáveis por determinar a quantidade de gases, líquidos e sólidos que passam por um local em um determinado intervalo de tempo. (HI TECNOLOGIA, 2021)

Figura 21 - Sensor de Vazão



Fonte: HI TECNOLOGIA, 2021.

3.2.3.5 Sensores Indutivos

Os sensores indutivos, ilustrado na Figura 22, são úteis na detecção de componentes metálicos, desde o ferro, o alumínio, o aço e o aço inox até o latão. Os modelos mais modernos contam com iluminação traseira, garantindo mais visibilidade na comutação e facilitando a identificação de problemas. (HI TECNOLOGIA, 2021)

Figura 22 - Sensor de Indutivo



Fonte: HI TECNOLOGIA, 2021.

3.2.3.6 Sensores Capacitivos

Os sensores capacitivos podem ser utilizados para a detecção do nível de líquidos e sólidos, mas principalmente para a detecção de materiais não metálicos como resinas, plásticos e madeiras, já que são excelentes para detectar qualquer tipo de massa. (HI TECNOLOGIA, 2021)

3.2.4 Atuadores

São dispositivos responsáveis por produzir movimento. E, para fazer isso, eles vão converter uma energia que pode ser elétrica, hidráulica ou pneumática. E, a partir desse processo de transformação dessas energias que se obtêm o movimento, que podemos chamar de energia mecânica (fluido, ar ou eletricidade). (BOMGÁS, 2019)

A energia mecânica, que é gerada pelos atuadores, é um recurso fundamental para alimentar diversos processos, participando na operação de máquinas e equipamentos e, principalmente, na atuação de válvulas. E, para fazer isso, os atuadores podem se apresentar em 3 diferentes tipos. Que são associados, é claro, ao tipo de energia convertida por ele. Sendo assim, os atuadores se apresentam da seguinte forma:

- Atuadores Pneumáticos;
- Atuadores Hidráulicos;
- Atuadores Elétricos. (BOMGÁS, 2019)

3.2.4.1 Atuadores Pneumáticos

É preciso lembrar que, assim como os atuadores hidráulicos, ou pneumáticos também necessitam de um fluido para serem acionados. Porém, diferente do hidráulico que faz uso do óleo pressurizado, os atuadores pneumáticos utilizam o ar, também pressurizado, para gerar a energia mecânica. (ENGENORMA, 2018)

No que diz respeito ao seu acionamento, quando comparado com o hidráulico, existem diversas semelhanças, exceto quando se fala na capacidade de retenção da

pressão do fluido, sendo nesse caso muito menor. Para funcionar, o atuador pneumático conta com um pistão que se situa dentro de um cilindro oco. A partir dessa composição, uma bomba externa aplica uma pressão que move o pistão para dentro do cilindro. Ocorre que, à medida que essa pressão aumenta, o cilindro se move e o resultado disso é a geração da energia mecânica. (ENGENORMA, 2018)

Existem grandes vantagens na utilização de atuadores pneumáticos, tais como:

- Atuadores pneumáticos são bastante leves;
- Podem ser utilizados em diversos tipos de ambientes;
- A necessidade de manutenção é muito baixa;
- Seus componentes têm uma duração bastante alta. (ENGENORMA, 2018)

Na Figura 23, foi ilustrada um atuador pneumático.

Figura 23 - Atuador Pneumático



Fonte: ENGENORMA, 2018.

3.2.4.2 Atuadores Hidráulicos

Tanto os atuadores hidráulicos, quanto os pneumáticos, requerem um certo fluido para serem acionados. E, quando falamos do hidráulico, o fluido utilizado é, normalmente, o óleo que, por sua vez, é pressurizado a fim de gerar movimento. Atuadores hidráulicos são utilizados quando existe uma necessidade de manipular cargas elevadas, onde são produzidas grandes forças. (NEPIN, 2022)

3.2.4.3 Atuadores Elétricos

Existem os atuadores elétricos, conforme demonstrado na ilustração da Figura 24, nesse caso, o componente necessário para acioná-lo é a energia elétrica. É a partir da conversão dessa energia elétrica que se obtém a energia mecânica aplicada na operação de máquinas e atuação de válvulas. Trata-se de um tipo de atuador que pode ser compreendido de maneira bastante simples. Ele funciona como motor ou interruptor, cuja operação pode ser realizada à distância, o que lhe garante uma série de aplicações que vão desde controladores de portas a atuação em válvulas de processos maquinários. E, no que diz respeito a esse uso, estamos falando de um tipo de atuador que se destaca em muitas situações, quando comparado aos demais. Isso se dá, em grande parte, devido aos atuadores elétricos contarem com uma transmissão de potência mais simples, sendo assim a energia é limpa e eficiente. Além disso, existem outras vantagens em relação à utilização de atuadores elétricos, tais como:

- Possuem grande precisão do ponto de vista funcional;
- Fazem pouquíssimo barulho;
- As chances de vazamento são praticamente nulas. (NEPIN, 2022)

Figura 24 - Atuador Elétrico



Fonte: FESTO, 2023.

3.2.5 Transmissores

Um transmissor industrial é um equipamento ideal para aplicações industriais em geral, oferecendo melhor auxílio de medição. Dentre os transmissores existem três principais importantes para esse trabalho, sendo eles:

- Transmissor de Temperatura;
- Transmissor de Pressão;
- Transmissor de vazão. (TESTO BE SURE, 2023)

3.2.5.1 Transmissor de Temperatura

Os transmissores são usados para enviar um sinal de um sensor de temperatura para um dispositivo de medição ou controle. Esse transmissor amplifica e condiciona o sinal gerado pelo sensor antes de transmiti-lo novamente para o dispositivo de gravação. Um transmissor de termopar está normalmente ligado a uma fonte de alimentação não regulada com dois terminais de fio de cobre. Os cabos servem para alimentar o transmissor assim como transportar a corrente de saída para um dispositivo de gravação. O transmissor recebe um sinal do termopar, processa e envia a corrente de saída, que é diretamente proporcional à entrada em milivolts do termopar. O sinal começa em 4 mA para temperaturas na parte inferior do intervalo e aumenta para 20 mA para aquelas na extremidade superior. O transmissor pode ser montado na superfície ou no interior de uma cabeça de proteção. Dois fios de cobre, usados para transmitir o sinal de 4 a 20 mA e fornecer tensão CC para o transmissor, substituem os cabos de extensão de termopares. (OMEGA, 2017)

3.2.5.2 Transmissor de Pressão

O Transmissor de pressão é um dispositivo que fornece uma saída elétrica de baixo nível oriunda dos sensores de pressão para sinais de nível mais alto que são adequados para transmissão e processamento. Em geral, um transmissor é um conversor de sinal para traduzir o sinal em algo que pode ser enviado a distância. A

transmissão pode ser por meio de um sinal analógico, como 4 a 20mA ou 0 a 10V ou ainda mesmo um sinal digital como o protocolo TCP-IP. O transmissor de pressão pode usar várias tecnologias diferentes a fim de medir a pressão de líquidos e/ou gases. Estes tipos incluem ainda dispositivos de deflexão mecânica, como:

- Diafragmas;
- Tubos de Bourdon;
- Pistões ou cilindros selados;
- Medidores de tensão;
- Dispositivos piezoresistivos;
- Transmissores de pressão piezoelétricos;
- Dispositivos de filme fino;
- Sistemas Microeletromecânicos (MEMS);
- Capacitância variável;
- Elementos de vibração. (SILVEIRA, 2018)

3.2.5.3 Transmissor de Vazão

Um transmissor de vazão, como o nome sugere, é uma ferramenta que mede o fluxo de uma substância específica. Como vários princípios físicos são usados para a medição, ela pode ser feita de várias maneiras diferentes. O fluxo é uma métrica muito importante para a indústria e afeta diretamente aspectos da produção, como a qualidade. Quando falamos dessa medida, estamos nos referindo ao tempo que um determinado fluido leva para escoar pelo sistema. A medição precisa do fluxo é muitas vezes necessária, pois estão envolvidas matérias-primas e produtos diferentes. Por esta razão, um dispositivo especial foi desenvolvido para determinar o grau de descarga. Diante disso, temos cinco principais tipos de medidores de vazão:

- Medidor de Vazão Eletromagnético;
- Medidor de Vazão de área variável (Rotâmetro);
- Medidor de Vazão Ultrassônico;
- Medidor de Vazão mássica Coriolis;
- Medidor de Vazão Vórtex. (CONAUT, 2016)

3.2.6 Controladores

Na automação industrial, um controlador é um dispositivo que controla um processo industrial ou parte dele por meio de algoritmos de controle específicos. O principal objetivo dos controladores de nível industrial é o controle dos processos de produção por peso ou volume. O controle pode ser feito por medição, e quanto mais eficiente for a medição, maiores serão os resultados em termos de rendimento da produção. Há principalmente 5 tipos básicos de controladores usados largamente na indústria. São eles:

- Controle ON-OFF;
- Controle Proporcional ou P;
- Controle Proporcional e Integral ou PI;
- Controle Proporcional e Derivativo ou PD;
- Controle Proporcional, Integral e Derivativo ou PID. (ROSÁRIO, 2009, p.06)

3.2.6.1 Controle ON-OFF ou LIGA-DESLIGA ou de histerese

Esta é a forma mais simples de controlador que existe e consiste em um circuito comparador que compara um sinal de entrada com dois sinais de referência chamados limites inferior e superior. Quando o sinal de entrada cai abaixo do limite inferior, a saída do controlador se torna ativa e o atuador é acionado com potência máxima. Quando o sinal de entrada excede o limite superior, a saída é desligada e o atuador é desligado. A diferença entre os limites superior e inferior é chamada de histerese. A histerese geralmente pode ser ajustada de modo que o ponto de ajuste esteja entre os limites inferior e superior. Desta forma, a regulagem oscila de máximo a mínimo e nunca atinge um valor específico. Este é um controlador de nível de água com níveis máximos e mínimos. No nível mínimo, o atuador (neste caso, a bomba de água) é acionado e o reservatório de água é enchido com água. Ao atingir o nível máximo, a saída é desligada e o atuador (neste caso a bomba) é desligado. O consumo de água faz com que o nível caia, retorne a um nível mais baixo e o ciclo se repita. A grande vantagem deste sistema é que é um sistema muito econômico, liga e

desliga somente quando o atuador atinge seu valor limite, e quase não há desgaste no controlador e no atuador. (ROSÁRIO, 2009, p.06)

3.2.6.2 Controle Proporcional ou P

O controle proporcional é mais sofisticado do que o controle ON-OFF porque a resposta do controle é proporcional ao sinal de entrada. Se o sinal na entrada for pequeno, a resposta também será pequena. Quanto maior a entrada, maior a saída. Portanto, o controlador proporcional é na verdade um amplificador. Neste caso, a saída será um sinal que é K vezes a entrada. No entanto, como possui limites inferior e superior, o sinal de saída não pode crescer infinitamente. Quando esses limites são atingidos, diz-se que o sistema está saturado. Então existe uma região onde o sinal responde proporcionalmente ao sinal de entrada e outra região onde o sistema satura e o sinal de entrada ainda aumenta, impedindo que o sistema ultrapasse aquele limite. Muitos controladores têm ajustes de banda proporcional. A melhor prática é observar a resposta do sistema o mais longe possível da banda proporcional. Caso contrário, a configuração deve ser reduzida até que o desempenho seja adequado. (ROSÁRIO, 2009, p.07)

3.2.6.3 Controle Proporcional + integral ou PI

Um controlador PI é uma combinação de ação proporcional e integral. O integrador pode definir o erro do regime de caso anterior como zero em suas propriedades. O erro pode ser pequeno, mas é porque com o tempo o integrador vai somando e a saída vai aumentando até conseguir acionar o atuador. Portanto, quando o erro é grande, o proporcional dá uma grande saída e domina o integrador. No entanto, a resposta proporcional torna-se cada vez mais fraca à medida que o sistema se aproxima do alvo porque o erro se torna menor. A partir deste ponto, o domínio passa a ser o do integrador. (ROSÁRIO, 2009, p.08)

3.2.6.4 Controle Proporcional + Derivativo ou PD

Assim como o controle PI era uma combinação de controle proporcional e integral, o controle PD é uma combinação de controle proporcional e derivativo. Uma derivada é um bloco cuja saída é proporcional à variação do erro. Em outras palavras, se o erro mudar muito rapidamente, ele atuará fortemente para minimizar ou eliminar essa variação. É, portanto, um bom bloco para sistemas que requerem ataques rápidos em flutuações de erro. No entanto, se houver um erro grande, mas de variação lenta, o sinal de saída derivativo será baixo. Derivativos, portanto, só funcionam quando o erro muda rapidamente, portanto, nunca são usados sozinhos. (ROSÁRIO, 2009, p.09)

3.2.6.5 Controle Proporcional + Integral + Derivativo ou PID

Um controlador PID parece uma opção ideal, mas é a opção mais cara e a mais difícil de configurar, pois requer o ajuste de três ganhos (K, KI e KD). Uma combinação de configurações pode determinar se o sistema oscila e se o sistema é rápido ou lento. A modelagem e simulação levando em consideração os parâmetros de desempenho do sistema (cancelamento máximo, tempo de acomodação, erro de regime etc.) levam a uma boa decisão de ajuste. (ROSÁRIO, 2009, p.10)

3.3 FILMES DE POLIPROPILENO BIORIENTADO – BOPP

O Filme de Polipropileno Biorientado (BOPP), é utilizado em embalagens flexíveis, sendo considerado um plástico ecológico e recomendado para estar em contato com alimentos e utensílios de cozinha por sua inocuidade, podendo também ser utilizado em produtos de higiene, limpeza e indústria. Num geral não representa risco à saúde ou segurança, desde que seja empregado para fins adequados com um severo controle de qualidade, de impurezas e higiene no processo de fabricação. (CARVALHO, 2008)

Diante do estiramento na extrusão do processo do BOPP, tanto na vertical, quanto na horizontal, ele pode ter aparência transparente, metalizada, branca-opaca e fosco, com espessuras que variam conforme a demanda do cliente. Nas características desse produto de destacam a proteção e a barreira contra umidade, bem como as propriedades ópticas para estampar a marca solicitada pelo cliente. Ele pode se dividir em micro espessuras com até cinco camadas totalmente independentes. (CARVALHO, 2008)

Existem vantagens que tornam filme de BOPP um material em expansão para a fabricação de embalagens flexíveis, como:

- Baixo custo;
- Elevada resistência química a solventes;
- Fácil moldagem;
- Fácil coloração;
- Alta resistência a quebras por flexão ou fadiga;
- Boa resistência a temperatura e ótima estabilidade térmica;
- É totalmente impermeável;
- Fácil reciclagem;
- Não apresenta perigo em seu manuseio e não é tóxico. (COSTA, 2014)

Quando colocado esse produto à exposição do fogo, observa-se que não é inflamável, mas pode queimar quando exposto à chama, liberando fumaça prejudicial à saúde, a qual não deve ser inalada. Os incêndios envolvendo filmes de BOPP podem ser apagados por qualquer extintor de incêndio comum, devendo sempre ser armazenado em locais com alto risco de incêndio. Na estocagem, não é recomendável que sejam expostos diretamente ao sol ou à chuva, sendo recomendado seu armazenamento em temperatura entre 20°C e 30°C, conjuntamente com a proteção contra o pó e poeira, embora seja aconselhável o uso em até seis meses após a fabricação da embalagem. Durante o manuseio dos filmes de BOPP, toda vez que a bobina for manuseada, é necessário o uso de EPIs, como botas de segurança, óculos de proteção. As bobinas apresentam alta resistência à perfuração e rasgamento, no entanto, uma vez iniciado o rasgo, o filme de BOPP se rasga facilmente. A reciclagem do BOPP é tão importante quanto a produção do produto. Infelizmente algumas empresas não se preocupam em serem ecologicamente corretas alegando inviabilidade no processo da reciclagem. Por outro lado, cooperativas afirmam que o

BOPP pode ser reciclado várias vezes por extrusão ou incineração (inclusive para obtenção de energia térmica ou elétrica). (COSTA, 2014)

Na Figura 25, pode-se observar a simbologia que indica que o material é reciclável.

Figura 25 - Símbolo triangular da reciclagem do BOPP.



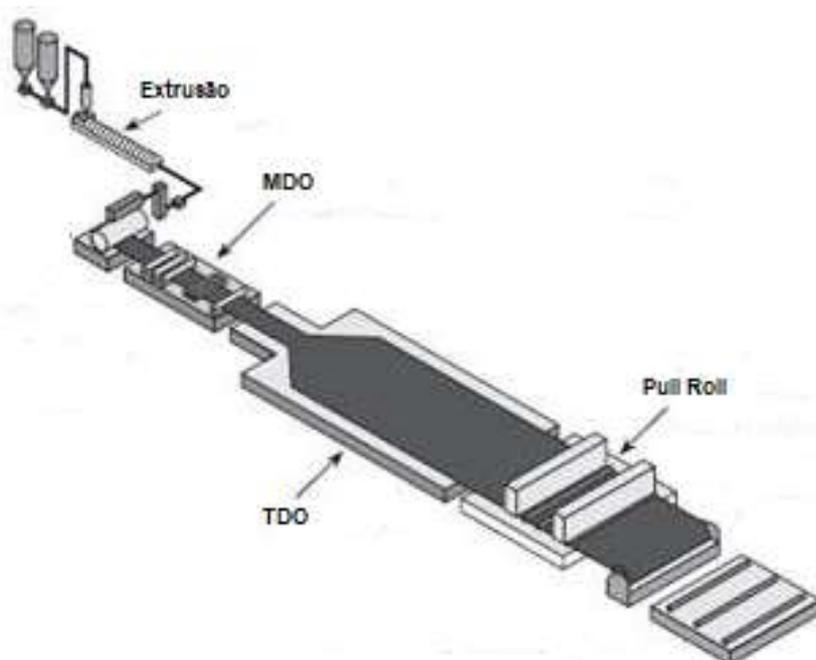
Fonte: POLO FILMS, 2023.

Os filmes de BOPP não são solúveis em água, sendo sua degradação nos aterros sanitários muito lenta, porém não liberam substâncias prejudiciais ao meio ambiente durante seu período de degradação, caso seja descartado de forma inadequada no meio ambiente. (COSTA, 2014)

O filme de BOPP é o produto de finas camadas plásticas resultantes do processo de extrusão e estiramento de resina granulada de polipropileno. O produto resultante é uma bobina de peso e tamanho variáveis conforme a aplicação. (CARVALHO, 2008)

O processo para obtenção do BOPP é dividido em extrusão e conformação, LSZ (Zona de Estiramento Longitudinal), TDO (Zona de Estiramento Transversal) e Pull-Roll (Zona de tratamentos e acondicionamento), que está ilustrado na Figura 26. (MIGUEL, 2003)

Figura 26 - Esquema de processo do BOPP



Fonte: MIGUEL, 2003.

O esquema da Figura 26 possibilita a melhor visualização do processo de fabricação do BOPP, desde o início na extrusão passando pelos estiramentos (MDO e TDO), até a chegada ao Pull Roll, onde é tratado e bobinado para as próximas etapas do processo. (MIGUEL, 2003)

A zona de extrusão e conformação é formada por uma extrusora principal e quatro coextrusoras. A principal produz o filme de camada central e as coextrusoras produzem os filmes de camadas externas. Um rolo resfriado (chill roll) auxilia na formação de uma única camada uniforme e de grande espessura. (CARVALHO, 2008)

Na zona de estiramento longitudinal (LSZ), o filme passa por diversos rolos. Nos primeiros, o filme é aquecido a uma temperatura adequada para o estiramento e, então, passa por rolos menores que giram em velocidades diferentes e constantes, estirando o filme longitudinalmente. (COSTA, 2014)

Na zona de estiramento transversal (TDO), o filme é aquecido e estirado transversalmente em um grande forno. No pull roll, o filme recebe diversos tratamentos superficiais e é bobinado. Com isso, na zona em voga, o filme já no tamanho final é condicionado aos tratamentos Chama e Corona, que agem na superfície do filme

gerando microfissuras, que servirão de pontos de ancoragem para aplicação da metalização, tintas ou adesivos. (CARVALHO, 2008)

O tratamento Corona é a aplicação de energia elétrica à superfície do filme. Tal processo acontece por meio da aplicação de um elevado potencial entre os eletrodos e o filme, onde ocorre a ionização do oxigênio presente que polariza a superfície do filme. Somente a face voltada aos eletrodos é tratada, melhorando a qualidade de revestimento do filme. (MIGUEL, 2003)

O tratamento Chama é a exposição do filme à energia térmica, resultante da combustão de gás metano que, por meio de um espaço de ar, aplica uma chama na superfície do filme. Após esse processo, o filme é arrefecido em um rolo resfriado, finalizando o tratamento. Somente a face voltada para a chama é tratada, melhorando a qualidade da superfície do filme para processos posteriores. (COSTA, 2014)

Os tratamentos Chama e Corona são importantes para a continuidade do processo nos filmes metalizados, pois sem tais tratamentos não há viabilidade técnica para a metalização. Após passar por eles, o filme de BOPP está apto a receber uma fina camada de metal, devido às microfissuras que servirão de pontos de fixação para e deposição da película metálica. (KANTOVISCKI, 2011)

Os filmes de BOPP são distribuídos em quatro famílias distintas que são: transparentes, opacos, foscos, os quais serão apresentados de forma sucinta e metalizados, que será apresentado de forma mais aprofundada, pois será o objeto específico de estudo deste trabalho. Cada uma das famílias possui características específicas. Já os filmes metalizados são destinados à embalagem de produtos alimentícios secos. (COSTA, 2014)

3.3.1 Filme de BOPP opaco

Tem propriedades de base branca e opaca, conforme a Figura 27, é termoestável em dois estágios, com temperatura de início de selagem de 105°C no estágio bruto. Dessa forma é adequado para impressão de rótulos de refrigerantes, biscoitos, balas, sorvetes, chocolates. (GRAVAPAC, 2022)

Figura 27 - Filme de BOPP Opaco



Fonte: GRAVAPAC, 2023.

3.3.2 Filme de BOPP transparente

O transparente, conforme a Figura 28, termoestável em dois estágios, e a temperatura inicial de selagem a quente no estágio não tratado é de 105°C. Ideal para embalagens flow pack que não exigem de barreira de luz e necessitam de janela para visualização de produtos como biscoitos, salgadinhos, massas, sorvetes, cigarros, CD's e DVD's. (COSTA, 2014)

Figura 28 - Filme de BOPP Transparente



Fonte: GRAVAPAC, 2023.

3.3.3 Filme de BOPP fosco

Os filmes foscos, conforme a Figura 29, e possui aspecto mais aveludado e são utilizados em laminações de embalagens flexíveis. O acabamento fosco dos filmes de BOPP é obtido através de aditivos utilizados já no processo de extrusão do filme base. Tipicamente estes filmes são produzidos em três camadas onde uma camada externa é modificada para se obter o acabamento fosco. (COSTA, 2014)

Figura 29 - Filme de BOPP Fosco



Fonte: GRAVAPAC, 2023.

3.3.4 Filme de BOPP metalizado

A metalização de filmes de BOPP, conforme a Figura 30, ocorre a partir da deposição térmica de alumínio por meio de atmosfera controlada. Para esse processo estão envolvidas diversas tecnologias. Sendo assim, o referente item descreve o processo de metalização e as técnicas associadas, além de abordar os conceitos de eficiência energética que podem ser aplicados ao processo. Tem propriedades moderadas de barreira à luz e tem uma temperatura de selagem de 105°C. Adequado para embalagens flow pack de produtos fotossensíveis, sensíveis à luz, proporcionando uma barreira protetora. Excelente proteção contra penetração de vapor e gases. É indicado para embalagens que precisam manter o produto crocante por muito tempo, geralmente utilizada em salgadinhos, biscoitos, cereais. (COSTA, 2014)

Figura 30 - BOPP Metalizado



Fonte: GRAVAPAC, 2023.

A metalização de filmes BOPP consiste na deposição de alumínio no filme em uma câmara de vácuo, obtendo fina camada de substrato de alumínio, normalmente entre 1600 e 2000nm. Este processo aumenta em 20 a 100 vezes as propriedades de barreira do produto. (APPLIED TOP MET, 2004)

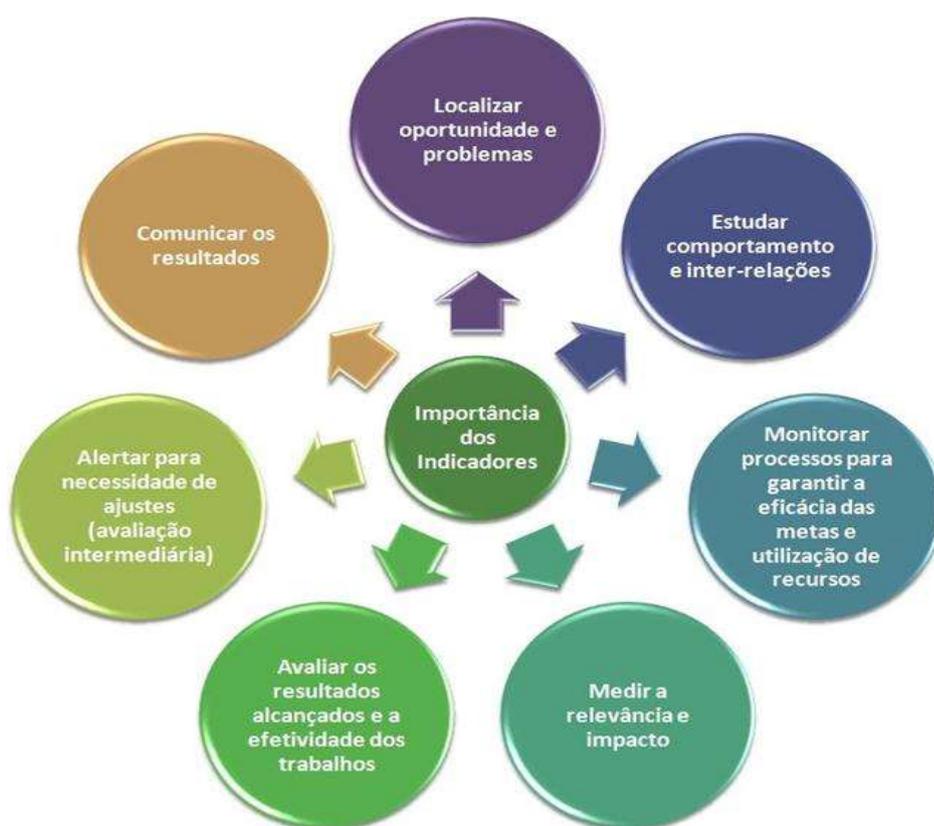
Os filmes de BOPP metalizados possuem boas características mecânicas e de barreira a gases e umidade, o que se traduz em capacidade de proteção contra oxigênio, umidade e radiação UV. Isso os torna excelentes opções para embalagens alimentícias, como as de biscoitos, salgadinhos e barras de cereais. (MUELLER e WEISSER, 2002)

Para o processo de metalização há diversas máquinas no mercado, dentre as quais se destacam a Applied Top Met, a BOBST e a Galileo. O estudo em voga tratará particularmente da primeira metalizadora de BOPP, uma vez que está presente no estudo de caso desenvolvido. Apesar das particularidades existentes entre as diferentes metalizadoras, os processos envolvidos em todas estas são muito semelhantes e serão explorados a seguir. (APPLIED TOP MET, 2004)

3.4 INDICADORES DE PRODUÇÃO KPI'S (KEY PERFORMANCE INDICATORS)

Os KPI's (Key Performance Indicators), ou nomenclatura comumente conhecida em português como indicadores-chave de performance, conforme a Figura 31, são usados por indústrias de todos os setores para identificar quais são seus objetivos principais e as métricas mais consideráveis, quantificando o que está sendo entregue, seja por um processo, por uma equipe ou por um colaborador, diante disso esses indicadores fazem a comparação entre o que foi consumido e o que foi entregue. (BOURAHLI, 2019)

Figura 31- Indicadores de Desempenho



Fonte: BOURAHLI, 2019.

O processo mais difícil na elaboração de um KPI talvez seja a determinar as metas que se pretende alcançar. Segundo Padoveze (2010):

Podemos definir indicador de desempenho como um conjunto de medidas financeiras e não financeiras preestabelecidas pela administração, que servirão como metas a serem alcançadas ou superadas, para controle de desempenho da empresa e dos gestores divisionais.

No mundo dos negócios, os Indicadores de desempenho são mensurados para verificar se os objetivos estão sendo cumpridos. Por consequência, os KPIs propõem se é necessário aplicar maneiras diferentes que aperfeiçoam os resultados atuais. Os KPI's de produção devem ser trocado se os propósitos primários de uma organização também sofrer modificações. De acordo com Padoveze (2010):

As empresas sempre utilizaram indicadores ou medidas de desempenho para avaliar seus processos e atividades. De um modo geral, essas medidas eram aplicadas pontualmente para avaliar os processos fabris e comerciais, sem uma preocupação específica em integrá-los com os dados financeiros e com os objetivos estratégicos.

A aplicação dos indicadores-chave de desempenho foi estendida a diversas áreas de negócios. Com as disponibilidades de software, hardware e tecnologia, esses indicadores podem ser gerados a qualquer parte do processo para medir o seu resultado. Além das métricas tradicionais financeiras, passam também a medir o desfecho das etapas nas organizações. A ligação de indicadores pode marcar o sucesso e o fechamento de um objetivo estratégico de uma empresa, assim se caso sua aplicação for correta. Os indicadores representam formas quantificáveis de produtos e processos, são utilizados para melhorar e realizar o acompanhamento dos resultados. Os tipos de indicadores são:

- **Indicadores de Produtividade:** medem os recursos consumidos relacionados com as saídas de processos.
- **Indicadores de Qualidade:** priorizam a satisfação dos clientes e as características de produtos ou serviços.
- **Indicadores de Efetividade:** identificam as consequências dos produtos ou serviços.
- **Indicadores da Capacidade:** analisa a capacidade de resultado no processo através de suas entradas e saídas por unidade de tempo.
- **Indicadores Estratégicos:** informam quanto à organização se encontra na direção dos seus objetivos, refletindo no desempenho em relação aos fatores decisivos de sucesso. (PADOVEZE, 2010)

3.4.1 Aplicação de KPI's

Os KPI's são aplicados a uma variedade de questões relacionados a negócios em várias empresas. Eles podem ser desenvolvidos para mensurar qualquer estágio do processo ou produção de uma empresa. Com os recursos de informática, software e hardware disponíveis, é possível gerar indicadores para cada fase de um procedimento e medir seu resultado. Ele começa a medir o sucesso dos processos de uma empresa além das métricas financeiros tradicionais. A harmonia dos indicadores pode indicar o sucesso da aplicação e o alcance dos objetivos estratégicos da organização. (PADOVEZE, 2010)

A utilização de indicadores de desempenho permite ver se os processos estão sob controle e onde são necessárias melhorias nos processos, permite atuar contra as causas que geram o desempenho bem como identificar tendências de perda futura de desempenho, como demonstra KIYAN (2001, p.25):

A medição dos indicadores de desempenho possui diversas finalidades, tais como: comunicar a estratégia e clarear valores; identificar problemas e oportunidades; diagnosticar problemas; entender o processo; definir responsabilidade; melhorar o controle e planejamento; identificar quando e onde a ação é necessária; guiar e mudar comportamentos; tornar o trabalho realizado visível; favorecer o envolvimento das pessoas; servir de base para um sistema de remuneração; e tornar mais fácil o processo de delegação de responsabilidade.

Importante destacar que todo indicador é uma métrica, mas nem toda métrica é um Indicador de Desempenho. Alguns deles são os Indicadores de Esforço, ou seja, medem o volume de trabalho, tempo ou dinheiro investido em um determinado processo ou atividade, mas não necessariamente refletem os resultados que a empresa está atingindo com este esforço. (PADOVEZE, 2010)

Segundo Neves, algumas empresas utilizam o termo KPI (*Key Performance Indicators*) e métricas (ou indicadores) de desempenho indistintamente. Isso é errado, pois um KPI é uma métrica, mas nem toda métrica é um KPI. A diferença básica é que um KPI sempre deverá refletir vetores ou direcionadores (*drivers*) de valor planejado enquanto uma métrica apenas representa uma medida de desempenho de uma determinada tarefa, na maioria das vezes estritamente operacional e com pouco ou nenhum impacto sobre os resultados esperados pela empresa. KPIs são "veículos de

comunicação". É permitido que os executivos de alto nível compartilhem a missão e visão da empresa aos mais baixos graus hierárquicos, abrangendo diretamente todos os colaboradores ao realizar os objetivos estratégicos da empresa. (NEVES, 2012)

KPIs são "veículos de comunicação". Permitem que os executivos do alto escalão comuniquem a missão e visão da empresa aos mais baixos níveis hierárquicos, envolvendo diretamente todos os colaboradores na realização dos objetivos estratégicos da empresa. (NEVES, 2012)

Além do cuidado em separar os KPI's de outras métricas, para que haja uma boa estrutura de medição de desempenho, é necessário que os *Key Performance Indicators* sejam capazes de indicar onde estão principais problemas organizacionais. Para uma boa implementação de KPI's é preciso que a empresa se reestruture para garantir as informações e comprometimento dos profissionais envolvidos, iremos desenvolver esse assunto no próximo tópico. (NEVES, 2012)

3.4.2 Tipos de indicadores de produção

Através da implementação dos Indicadores de Produção, se torna possível conduzir um seguimento mais eficaz e produtivo das empresas em geral, garantindo um real acompanhamento dos objetivos. Sendo assim, se torna mais fácil de serem analisados os pontos positivos e negativos, proporcionando as devidas correções que fazem parte do processo. Dessa forma, serão citados alguns tipos de Indicadores de Produção diante de seus conceitos gerais, seus modos de aplicação e como são calculados, sendo eles: Indicador OEE; Indicador de Eficácia de Produção; Indicador de MTBF (Tempo Médio Entre Falhas); Indicador de MTTR (Tempo Médio para Solução de Falhas); Indicador de Disponibilidade (Uptime). (PADOVEZE, 2010)

3.4.2.1 OEE (Overall Equipment Effectiveness)

Esse índice, chamado OEE (Overall Equipment Effectiveness) ou Eficiência Global do Equipamento, serve para realizar a comparação de capacidade de produção que um equipamento tem com a quantidade entregue por ele, sendo assim, ele é considerado um indicador capaz de traduzir a eficiência das máquinas em uma

fábrica, medindo a capacidade de fabricação, pois faz a relação entre os resultados obtidos e os recursos empregados: fazer da melhor maneira utilizando a menor quantidade de recursos. Com essa métrica se consegue ter a noção de quanto tempo é gasto na produção. Fazer esse cálculo de OEE é indispensável para diminuir desperdícios e aumentar o desempenho das máquinas, melhorando a operação. Para calcular o OEE é necessário medir 3 índices de máquinas, linhas, células: Disponibilidade, Desempenho e Qualidade. São valores percentuais de cada índice que compõem o OEE. O cálculo do OEE é feito simplesmente multiplicando estes 3 índices. A fórmula que representa o cálculo é: (CARDOSO, 2013, p.08)

$$\text{OEE} = \text{disponibilidade} \times \text{qualidade} \times \text{performance}$$

3.4.2.2 Eficácia de produção

Esse indicador apresenta a relação entre os resultados obtidos e os resultados pretendidos, em outras palavras, ele busca fazer da melhor maneira para que se busque atingir os resultados esperados. De forma geral, podemos dizer que é a missão da equipe, a busca pelo esforço para atingir os resultados dentro das melhores condições, dessa forma é nítido que a eficácia e a eficiência de produção têm suas diferenças, mas devem andar juntas. (VEDOIS, 2015)

3.4.2.3 MTBF (Mean Time Between Failures)

O MTBF traduzindo a sigla para o português, significa o tempo médio entre falhas, ou seja, a métrica que ele se refere é a média de tempo entre um evento e outro. Desta forma, podemos afirmar que quanto maior for o tempo entre falhas, melhor é resultado, maior é a disponibilidade de máquina. Em geral, para calcular MTBF se utiliza o conceito de “Falha Funcional” onde:

- Falha Funcional – parada completa do equipamento como ele deveria estar em operação, ou equipamento operando em velocidade/condição diferente da de Projeto. (TORELL, 2004, p.06)

A utilização do conceito acima requer um cálculo manual com várias variáveis ou utilização de um sistema sofisticado de coleta de informações. Para a ABI, simplificaríamos esse processo e utilizaríamos o conceito de falha como descrito abaixo.

- Falha (ABI) – Condição anormal de operação que tem como consequência a completa parada do equipamento. (TORELL, 2004, p.06)

Existe uma fórmula muito simples para calcular o MTBF, aplicamos tempo total de desempenho natural (TD) durante um ciclo pré-determinado, menos o tempo de manutenção (TM), dividido pelo número de paradas (P) ocorridos durante esse período, como demonstra a fórmula. (TORELL, 2004, p.06)

$$MTBF = \frac{(TD - TM)}{P}$$

O MTBF além de medir o tempo médio entre falhas, traz uma série de benefícios para os processos produtivos, como por exemplo, um MTBF alto indica uma clara qualidade nos processos de gestão e controle, bem como trará maior credibilidade e confiança em seus produtos. Logo, aumento do MTBF mostra que os métodos de manutenção preventivas estão assertivos, entre eles: os planos preventivos, inspeções de rotas, lubrificação, análise preditivas etc. Isso tudo, somado com uma execução de alta qualidade realizada pelas equipes de manutenção. (TORELL, 2004, p.07)

3.4.2.4 MTTR (Mean Time to BRepair)

O MTTR traduzindo a sigla para o português, significa o tempo médio para reparo, ou seja, a métrica que ele se refere é a média de tempo levado para realizar a manutenção do equipamento. Desta forma, podemos afirmar que quanto menor for o tempo de reparo melhor é resultado, maior é a disponibilidade de máquina e mais eficiente é a equipe de manutenção, sendo assim o cálculo é realizado se utilizando a soma do tempo de reparação total (TR) para cada falha ao longo de um intervalo de tempo dividido pelo número de falha (QF), em relação ao mesmo intervalo de tempo, como demonstra a fórmula. (WING, 1990)

$$MTTR = \frac{TR}{QF}$$

A resposta desse cálculo nos fornece o tempo médio que o equipamento ficou parado, para atuação da equipe de manutenção, ou seja, a soma do tempo total de reparo é igual ao tempo total das falhas do equipamento, em um período. (WING, 1990)

3.4.2.5 Disponibilidade (UPTIME)

Em um mundo ideal as máquinas e equipamentos deveriam estar 100% disponíveis, ou seja, nunca pararem de produzir, mas sabemos que existem vários eventos que acabam impossibilitando. Entre eles:

- Paradas para manutenções corretivas;
- Paradas programas manutenção preventivas;
- Paradas para limpeza de máquinas;
- Setups de processo;
- Erro humano durante a operação do equipamento;
- Falta de matéria prima;
- Paradas geradas por acidentes;
- Baixa venda de produtos etc. (WING, 1990)

Desta forma, devemos sempre minimizar os eventos listas acima, visando garantir a maior disponibilidade de máquina possível, usando como referência o benchmarking de outras empresas do mesmo seguimento. (WING, 1990)

O cálculo da disponibilidade de máquina pode ser realizado através da divisão do MTBF, pela soma MTBF mais o MTTR, conforme a seguinte equação:

$$\text{Disponibilidade} = \frac{MTBF}{(MTBF + MTTR)}$$

ou ainda podemos fazer a seguinte relação, o tempo total disponível, menos o tempo total perdido, dividido pelo tempo total disponível, menos o tempo total de parada programada, conforme a seguinte equação:

$$\text{Disponibilidade} = \frac{(\text{Tempo Total} - \text{Tempo Perdido})}{(\text{Tempo Total} - \text{Tempo de Parada Programada})}$$

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O procedimento metodológico utilizado para a realização da pesquisa foi a apresentação de um projeto de melhoria para o funcionamento da máquina metalizadora.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA PESQUISA

A pesquisa do presente trabalho se caracterizará com a apresentação do local de trabalho em que foi realizada o projeto, mencionando uma breve história da empresa Polo Films, bem como a listagem de materiais utilizados no projeto com suas características específicas e por fim serão apresentados técnicas e instrumentos da coleta de dados de toda a pesquisa.

4.1.1 Local de trabalho (história da empresa)

A empresa Polo Filmes nasceu em Varginha (MG), a partir de uma joint venture entre a British American Tobacco e a extinta Hércules, lançando a primeira linha no ano de 1980. No ano de 1988, inaugurou mais uma linha de produção, também em Varginha (MG), aumentando a capacidade produtiva, o número de colaboradores e a estrutura física. Com quinze anos de atuação no mercado, no ano de 1995, a Polo Films foi incorporada pelo Grupo Unigel e expandiu suas fronteiras em posteriores cinco anos (2000), inaugurando a operação da primeira Linha Tenter-Frame (processo plano) em Montenegro (RS), ilustrada na Figura 32, logo já ampliando a capacidade ao implementar a segunda Linha Tenter-Frame de alta velocidade em Montenegro (RS), no ano de 2005 e a terceira linha em Montenegro (RS) no ano de 2008, aumentando a capacidade de produção nominal dessa unidade para 78.000 t/ano. Em

2009 foi o ano em que a empresa concentrou as operações em Montenegro e se despediu da cidade onde nasceu, Virgínia (MG), logo atualizando as linhas de produção e investindo em novas tecnologias e equipamentos de ponta, no ano de 2011, para otimizar processos, ganhar mais qualidade e velocidade. No ano de 2017 a Geribá Investimentos incorporou a Polo Films e não muito distante, em 2019, a Polo Films modernizou a marca, expressando seriedade, qualidade, dinamismo e inovação. Diante disso, no atual ano de 2023 a empresa completa 43 anos de história. (POLO FILMS, 2023)

A Polo Films tem como seu produto principal os filmes de polipropileno biorientado, também conhecido como BOPP, por haver estiramento na extrusão em seu processo, tanto no sentido vertical, quanto no horizontal em seu fluxo. Esses filmes podem ter aparências transparente, metalizada, branca-opaca e mate, com espessuras que podem variar conforme a necessidade do cliente, na qual nas suas características se destacam a proteção e a barreira contra umidade, também propriedades ópticas para estampar a marca do cliente, devido em seu processo haver um sistema de tecnologia que permite dividir o filme com micros de espessura em até 5 camadas totalmente independentes. Os filmes são aplicados na indústria alimentícia, produtos de higiene, limpeza e industrial, baseado nisso deve haver um severo controle de qualidade, impurezas e higiene no seu processo de fabricação. A produção do filme segue rígidas normas de BPF e a fábrica é certificada em ISO9001 e FSSC22000. (POLO FILMS, 2023)

Figura 1 - Imagem aérea da Polo Films



Fonte: POLO FILMS, 2023.

A Polo Films é composta por 3 linhas de produção, onde ambas são capazes de produzirem filmes BOPP, porém cada linha possui suas particularidades como, capacidade de produção, tipos de filmes que podem ser produzidos e quantidade de camada por filmes, como por exemplo, a linha 1, ilustrada da Figura 33, só é capaz de produzir filmes de 3 camadas de espessura enquanto as demais podem produzir filmes de até 5 camadas de espessura. Isso se dá quantidade de coextrusoras existentes em cada linha de produção, ou seja, 2 coextrusoras e mais uma extrusão principal, produzem filmes de 3 camadas, em outra configuração se tem 4 extrusoras mais uma extrusão principal, com capacidade de produzir filmes de 5 camadas. As camadas de espessura irão determinar as propriedades mecânicas de cada filme, ou seja, um filme de 5 camadas possui mais propriedades mecânicas, como consequência obtém-se um filme muito mais versátil para o cliente. Mas essas propriedades podem variar dependendo da aplicação dos filmes e das exigências feitas pelos clientes. (POLO FILMS, 2023)

Figura 2 - Linha de produção 1



Fonte: Fotografado pelo autor.

A Polo Films também é composta de 3 máquinas de corte, ilustrado na Figura 34, e 5 máquinas de recorte. Esse setor da fábrica é responsável por realizar o corte/recorte dos filmes de acordo com a necessidade dos clientes, ou seja, corta as bobinas maiores produzidas nas linhas de produção em bobinas menores de diversos tamanhos, desta forma os clientes conseguem utilizar no seu processo produtivo. (POLO FILMS, 2023)

Figura 3 - Máquina de corte de filmes



Fonte: Fotografado pelo autor

A Polo Films conta com duas máquinas metalizadoras, ilustrado na Figura 35, esse tipo de equipamento tem capacidade de produzir filmes metalizados, muito utilizados em alimentos que há necessidade de barreira microbiológica muito alta, como por exemplo, bolachas, salgadinhos etc. O projeto em questão será executado nesta máquina, devido ao alto valor agregado neste tipo filme, a empresa busca sempre minimizar desperdícios. Então, notou-se que havia uma ineficiência no sistema de resfriamento da água do processo, causando instabilidades, maior tempo de vácuo e problemas de rejeição. (POLO FILMS, 2023)

Figura 4 - Imagem máquina de metalização



Fonte: Fotografado pelo autor.

4.1.2 Lista de materiais utilizados no projeto

Para a construção do projeto de controle da temperatura da água gelada da metalizadora, foi necessário realizar a automação das válvulas de retorno do trocador de calor. Desta forma, foi realizado um estudo em campo junto com a equipe de engenharia da Polo Films e também com o suporte técnico da Festo, após a avaliação do estudo em campo foram mapeados uma série de materiais para a execução do projeto. Abaixo serão apresentados os principais materiais necessários para a construção do projeto de automação do trocador de calor, bem como suas referências de fabricação.

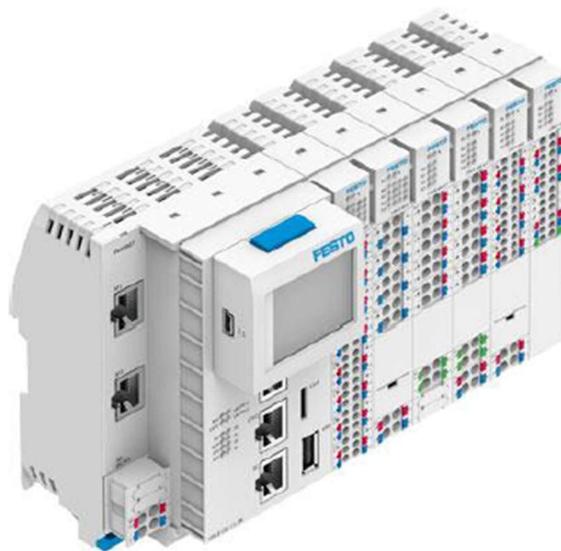
4.1.2.1 Sistema de automação

O CLP, ilustrado na Figura 36, tem a função de receber todas as informações das variáveis de processo, e analisar os dados conforme a lógica do programa e enviar

comandos de atuação para os equipamentos de controle, garantindo assim a harmonização de todo o processo. A seguir algumas características dele:

- Compacto, baixo custo e poderoso (dualcore 766 MHz, 512 MB RAM);
- Modular;
- Footprint menor (Siemens e Beckhoff);
- Padronizado CODESYS V3 (ferramenta livre);
- Portas MicroSD e USB para armazenamento;
- Principal PLC Festo (facilidade em spareparts e suporte técnico).

Figura 5 – CLP CPX-E /-EX1E



Fonte: FESTO, 2023.

4.1.2.2 Unidade de indicação e controle

O IHM, ilustrado na Figura 37, é a interface entre a máquina processadora e o operador, e exibir as informações operacionais quase em tempo real, ou seja, traduz as variáveis complexas do processo em informações úteis e factíveis. Através dele é possível visualizar valores de temperatura do processo, verificar o percentual de abertura das válvulas e realizar a alteração de setpoint. A seguir algumas características dele:

- Display TFT de 10,4”;
- Frontal montado IP65;
- Resolução SVGA (800x600);
- Ferramenta de programação livre;
- Principal IHM Festo (facilidade em spareparts e suporte técnico).

Figura 6 - Unidade de Indicação de Controle CDPX-X-A-S-10



Fonte: FESTO, 2023.

4.1.2.3 Módulo de saída digital

A função do Módulo de Saída Digital, ilustrado na Figura 38, é converter os sinais dos instrumentos de controle em números que ficaram depositados na memória interna do CLP, sendo assim, essa conversão é realizada através de conversores. A seguir algumas características dele:

- Classe a resistência a corrosão KBK;
- Tipo de fixação com trilho;
- Grau de proteção IP20;
- Dimensões L x C x A: 18,9 x 76,6 x 124,3 mm.

Figura 7 - Módulo de Saída Digital CPX-E-8DO



Fonte: FESTO, 2023.

4.1.2.4 Módulo de entrada digital

O Módulo de Entrada Digital, ilustrado na Figura 39, é um equipamento que permite a conexão com sensores e atuadores para a automação da sua empresa. Esse tipo de equipamento possui uma finalidade bem específica quando se trata de coletar sinais binários do chão de fábrica. Ele trabalha em conjunto com CLP's ou Remotas. A seguir algumas características dele:

- Classe a resistência a corrosão KBK;
- Tipo de fixação com trilho;
- Grau de proteção IP20;
- Dimensões L x C x A: 18,9 x 76,6 x 124,3 mm.

Figura 8 - Módulo de Entrada Digital CPX-E-16DI



Fonte: FESTO, 2023.

4.1.2.5 Módulo de entrada analógico

O Módulo de Entrada Analógica, ilustrado na Figura 40, é um equipamento dos quais recebem os sinais elétricos analógicos emitidos pelos sensores e os transformam em sinais que a CPU possa interpretar. Esses módulos transformam os sinais elétricos de controle interno em valores reais que possam ser exibidos para o usuário final. A seguir algumas características dele:

- Classe a resistência a corrosão KBK;
- Tipo de fixação com trilho;
- Grau de proteção IP20;
- Dimensões L x C x A: 18,9 x 76,6 x 124,3 mm.

Figura 9 - Módulo de Entrada Analógico CPX-E-4AI-U-I



Fonte: FESTO, 2023.

4.1.2.6 Módulo de saída analógico

O módulo de Saída Analógico, ilustrado na Figura 41, permite que o valor de uma unidade numérica, armazenada e processada pela CPU do CLP, converta-se em tensão ou intensidade de corrente através de uma conversão digital analógica. A seguir algumas características dele:

- Classe a resistência a corrosão KBK;
- Tipo de fixação com trilho;
- Grau de proteção IP20;

- Dimensões L x C x A: 18,9 x 76,6 x 124,3 mm.

Figura 10 - Módulo de Saída Analógico CPX-E-4AI-U-I



Fonte: FESTO, 2023.

4.1.2.7 Posicionador

O Posicionador, ilustrado na Figura 42, é responsável por realizar o controle da operação do atuador, que por sua vez irá controlar e posicionar a válvula borboleta do processo. Em uma condição normal de operação de uma válvula comum, o operador somente contra de a válvula está aberta ou fechada, já com o auxílio do posicionador é possível controlar o percentual de abertura da válvula. A seguir algumas características dele:

- Para atuadores rotativos ou lineares;
- Sinal de entrada de tensão ou corrente;
- Simples ou dupla ação;
- Sinal de feedback analógico (4-20mA), proporcionando um circuito em malha fechada;
- Pressão de operação de 3 a 8 bar (43,5 a 116 psi);
- Vazão até 130 l/min;
- Corpo em polímero.

Figura 11 - Posicionador CMSX-P-S-C-U-F1-S-50-A



Fonte: FESTO, 2023.

4.1.2.9 Atuador Semi-rotativo elétrico

O Atuador Semi-rotativo, ilustrado na Figura 43, é responsável pelo acionamento da válvula borboleta, ou seja, ele realiza o movimento radial de abertura e fechamento. A seguir algumas características dele:

- Modelo: DFPD-240-RP-90-RS60-F0710;
- Interfaces NAMUR (VDI/VDE 3845);
- Ajuste de posições finais;
- Pressão de operação de 3 a 8 bar (43,5 a 116 psi);
- Estrutura de cremalheira e pinhão;
- Funcionamento simples ação;
- Disponibilidade de spareparts para manutenção/reparo.

Figura 12 - Atuador Semi-rotativo DFPD-240-RP-90-RS60-F0710



Fonte: FESTO, 2023.

4.1.2.10 Filtro regulador

O Filtro Regulador, ilustrado na Figura 44, tem a função de manter a pressão do circuito pneumático regulada, conforme o parâmetro de processo, neste caso aproximadamente 4 bar. A seguir algumas características dele:

- Filtro regulador com faixa de regulação de 0,5 a 12 bar e grau de filtragem de 40µm com dreno automático.

Figura 13 - Filtro Regulador MS6-LFR-1/2-D7-ERV-AS



Fonte: FESTO, 2023.

4.1.2.11 Filtro

A função do Filtro, ilustrado na Figura 45, é remover as impurezas como partículas, óleo, água e outros contaminantes, com intuito de evitar a falha dos componentes pneumáticos do processo. A seguir algumas características dele:

- Grau de filtragem de 5 μ m com dreno automático;
- Pressão operacional 0,5 a 12 bar;
- Quantidade máxima de condensado 38 ml;
- Vazão nominal 3200 l/min.

Figura 14 – Filtro MS6-LF-1/2-CRV



Fonte: FESTO, 2023.

4.1.2.12 Válvula de Abertura e Fechamento

A função da Válvula de abertura e fechamento, ilustrada na Figura 46, é para controlar o fluxo de ar em um sistema pneumático. Pode ser usada para iniciar ou parar o fluxo de ar e regulá-lo até um certo grau. A seguir algumas características dela:

- Pressão operacional 0 a 18 bar;
- Vazão nominal 8700 l/min.
- Válvula de abertura e fechamento manual.

Figura 15 - Válvula de Abertura e Fechamento MS6-EM1-1/2-S



Fonte: FESTO, 2023.

4.1.2.13 Válvula de abertura e fechamento

A função da Válvula de Abertura e Fechamento, ilustrada na Figura 47, é para controlar o fluxo de ar em um sistema pneumático. Pode ser usada para iniciar ou parar o fluxo de ar e regulá-lo até um certo grau. A seguir algumas características dela:

- Pressão operacional 4 a 10 bar;
- Vazão nominal 7000 l/min.
- Válvula de abertura e fechamento elétrica.

Figura 16 - Válvula de Abertura e Fechamento MS6-EE-1/2-10V24-S



Fonte: FESTO, 2023.

4.1.2.14 Termoresistência PT100

A função Termoresistência PT100, ilustrada na Figura 48, é medir as variações de temperatura do processo e enviar um sinal para o CLP. O sensor temperatura PT100 tem como princípio de medição a verificação de variações na resistência elétrica. A seguir algumas características dela:

- Com cabeçote conversor de sinal analógico de 4 a 20 mA;
- Conexão elétrica de ½" NPT;
- Rosca ao processo G ½";
- Elemento de medição PT100 classe A (IEC 60751).

Figura 17 - Termoresistência PT100



Fonte: FESTO, 2023.

A Figura 49 apresenta a lista total dos materiais necessários para a construção do projeto, bem como as quantidades, modelos, descrições e fabricante de cada item.

Figura 18 - Lista de materiais

(continua)

QTD	MODELO	DESCRIÇÃO	FABRICANTE
10	Cabo Manga 4x22AWG SH	Cabo Manga 4x22AWG com shield - vias numeradas	Div. manufacturer

(continuação)

1	COL.PLACA LOGO GRANDE	Placa de inox 140x44mm	Colorpac
2	DND 80030	Canaleta Aberta com Recorte Aberto - 30x80mm	Elesys
20	PUN-H-8X1,25-BL	Tubo flexível de plástico	Festo
1	CPX-E-8DO	Módulo de saída digital	Festo
1	CPX-E-4AI-U-I	Módulo de entrada analógico	Festo
1	CPX-E-4AO-U-I	Módulo de saída analógico	Festo
1	CPX-E-16DI	Módulo de entrada digital	Festo
2	CMSX-P-S-C-U-F1-S-50-A	Regulador de posição	Festo
2	QS-1/8-6-I	Conexão rápida	Festo
2	QS-1/8-8-I	Conexão rápida	Festo
1	CPX-E-CEC-C1	Controlador	Festo
15	PUN-H-12X2-BL	Tubo flexível de plástico	Festo
1	MS6-EE-1/2-10V24-S	Válvula de abertura e fechamento	Festo
1	MS6-EM1-1/2-S	Válvula de abertura e fechamento	Festo
3	MS6-WP	Cantoneira de fixação	Festo
2	QSL-1/2-12	Conexão rápida em L roscada	Festo
1	MS6-FRM	Módulo de derivação	Festo
1	CDPX-X-A-S-10	Unidade de indicação e controle	Festo
1	MS6-LF-1/2-CRV	Filtro	Festo
1	MS6-MV1	Módulo de união	Festo
1	MS6-LFR-1/2-D7-ERV-AS	Válvula reguladora de pressão - filtro	Festo
2	DFPD-240-RP-90-RS60-F0710	Atuador giratório	Festo
2	DARQ-K-P-A1-F05-30-R1	Ponte de montagem	Festo
2	QSL-1/4-6	Conexão rápida em L roscada	Festo
2	AMTE-M-H-G14	Silenciador	Festo
20	PUN-H-6X1-BL	Tubo flexível de plástico	Festo
2	B-1/8	Bujão	Festo
2	U-1/8-B	Silenciador	Festo
1	KMEB-1-24-2.5-LED	cabo com conector	Festo
1	NEBU-M8G3-K-5-LE3	Cabo de conexão	Festo
1	QSY-12-8	Conexão rápida em "Y"	Festo
1	IP 20 Patch cable Cat.6 1,5m 09 47 47 47 110	Cabo RJ 45 industrial	Harting
70	H05V-K 4510021	Cabo 0,5mm ² , azul - 750V	U.I. Lapp GmbH
1	L20-AR2-R	Sinaleiro vermelho, 22mm, 220Vca	Metaltext
1	KP0-20-3P	Chave Comutadora rotativa, 20A com manopla para cadeado	Metaltext
10	1,5mm ² -x-vm 23234803	Cabo 1,5mm ² , vermelho - 750V	Prysmian
10	1,5mm ² -x-az 23234306	Cabo 1,5mm ² , azul - 750V	Prysmian
10	1,5mm ² -x-pt 23234302	Cabo 1,5mm ² , preto - 750V	Prysmian
10	2,5mm ² -x-vd/am 23235314	Cabo 2,5mm ² , verde/amarelo - 750V	Prysmian

(conclusão)

15	1,0mm ² -x-az 23233806	Cabo 1,0mm ² , azul - 750V	Prysmian
1	5SL1 204-7 MB	Disjuntor bipolar curva C, 4A	Siemens AG
1	CX. CONF. DES.	Caixa conforme desenho	TPC Mrosler
1	TS 35X7.5/LL 2M/ST/ZN	Trilho de montagem DIN35	Weidmueller
20	PG9-K67 C906056.600I+Porca	Prensa cabo	Weidmueller
3	PG11-K67 C906057.600I+Porca	Prensa cabo	Weidmueller
1	PRO ECO 240W 24V 10A	Fonte de alimentação	Weidmueller
34	ZDU 2.5	Borne de passagem	Weidmueller
7	ZEW 35	Suporte final	Weidmueller
10	ZAP/TW 1	Placa final (terminais)	Weidmueller
11	ZPE 2.5	Borne terra	Weidmueller
6	ZDU 2.5/4AN	Borne de passagem	Weidmueller
2	ZAP/TW 3	Tampa final	Weidmueller
4	ZQV 2.5/10	Ponte	Weidmueller
8	ZDK 2.5	Borne duplo	Weidmueller
1	ZAP/TW ZDK2.5	Tampa final	Weidmueller
17	ZIA 1.5/3L-1S	Borne triplo para sensores	Weidmueller
1	ZAP/TW ZIA1.5/3L	Tampa final	Weidmueller
17	ZVL 1.5 BR	Plug jumper	Weidmueller
17	ZVL 1.5 BL	Plug jumper	Weidmueller
1	WIKA.TR10-H	Termorresistência sem poço de proteção - Cabeçote: KN4-A (alumínio)	WIKA
1	WIKA.TE 15.01	Transmissor de temperatura digital, para termorresistências	WIKA

Fonte: FESTO, 2023.

4.2 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE COLETA DE DADOS

A técnica utilizada é a aplicação de um projeto para implementar na máquina que apresenta indisponibilidade com o instrumento de coleta de dados disponibilizado pela empresa FESTO, a qual implementou o projeto na máquina.

4.2.1 Desenvolvimento do sistema de controle

Esse projeto visa mitigar a causa do maior evento de indisponibilidade da máquina APPLIED que ocorreu no ano de 2022, também manter o processo com maior

confiabilidade, não perdendo performance devido as unidades de criogenia estarem com ineficiência térmica, logo, maior tempo de vácuo.

Com isso, o objetivo é desenvolver um projeto para automatizar sistema de água gelada da metalizadora, garantindo que a temperatura da água de entrada da máquina trabalhe sempre em uma faixa de temperatura de 18 a 24°C. Essa faixa de temperatura é a ideal para suprir a carga térmica dos equipamentos (bombas de vácuo, unidade de refrigeração e criogenia etc.).

Abaixo serão apresentadas algumas variáveis do processo:

- Pressão da água de trabalho: 4 – 8bar;
- Queda de pressão mínima: 3bar;
- Fluxo máximo aproximado: 42m³/h;
- Fluxo médio aproximado 28 m³/h;
- Temperatura de entrada 18 – 22 °C;
- Temperatura de subida (em processo): 6°C.

Para execução do projeto foi criado um cronograma, onde nele foi dividido as 6 principais etapas, conforme a seguir:

Etapa 1: Estudo dos problemas gerados no processo devido a variação de temperatura, onde foram avaliados tempo de máquina parada (UPTIME) e eficiência de produtividade, pelo fato da máquina operar em alto vácuo, sempre que ocorre algum evento de parada, deve-se quebrar o vácuo e antes de entrar em processo produtivo fazer o vácuo novamente, durante esse período a máquina fica indisponível por um tempo aproximado de 30 minutos.

Etapa 2: Solicitado apoio do suporte técnico da Festo, para realizar o levantamento dos materiais necessários para automação do sistema e avaliado a mão de obra necessária para a consolidação do projeto.

Etapa 3: apresentação do projeto e orçamento para a gerência fabril e aguardar liberação do projeto.

Etapa 4: Implantação do projeto, nesta etapa foi realizado todo o planejamento de execução do projeto, envolvendo as áreas de Engenharia de Manutenção e Processo, PCP e Produção a fim de avaliarmos o melhor momento para iniciá-lo, devido ao tempo de máquina parada necessário para instalação de testes de funcionamento. Com isso, foi definido a execução durante a parada anual de 120 horas da máquina.

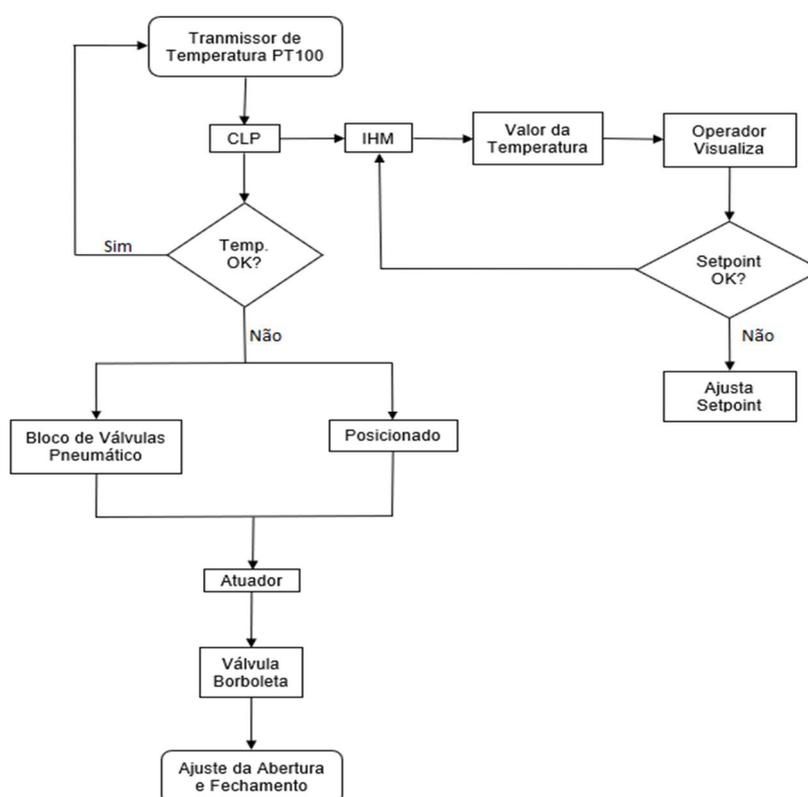
Etapa 5: Iniciada a fase de testes de funcionamento e possíveis ajustes de processo, após concluído será liberada a máquina para a produção.

- **Etapa 6:** avaliação do payback para a companhia.

4.2.2 Diagrama do Sistema

Foi montado um fluxograma, ilustrado na Figura 50, para ilustrar como funciona o controle do processo. Basicamente, a termoresistência PT100 realiza a leitura da temperatura do processo e envia um sinal para o CLP que está configurado com o range de operação de 18°C a 24°C, com base sinal recebido e no set point pré-estabelecido ele faz uma análise e avalia a necessidade de abrir ou fechar as válvulas de controle. Caso ocorra a necessidade de ajuste, o CPL manda um sinal para o posicionador que por sua vez controla o atuador semi-rotativo que realizará a abertura ou fechamento da válvula borboleta do processo.

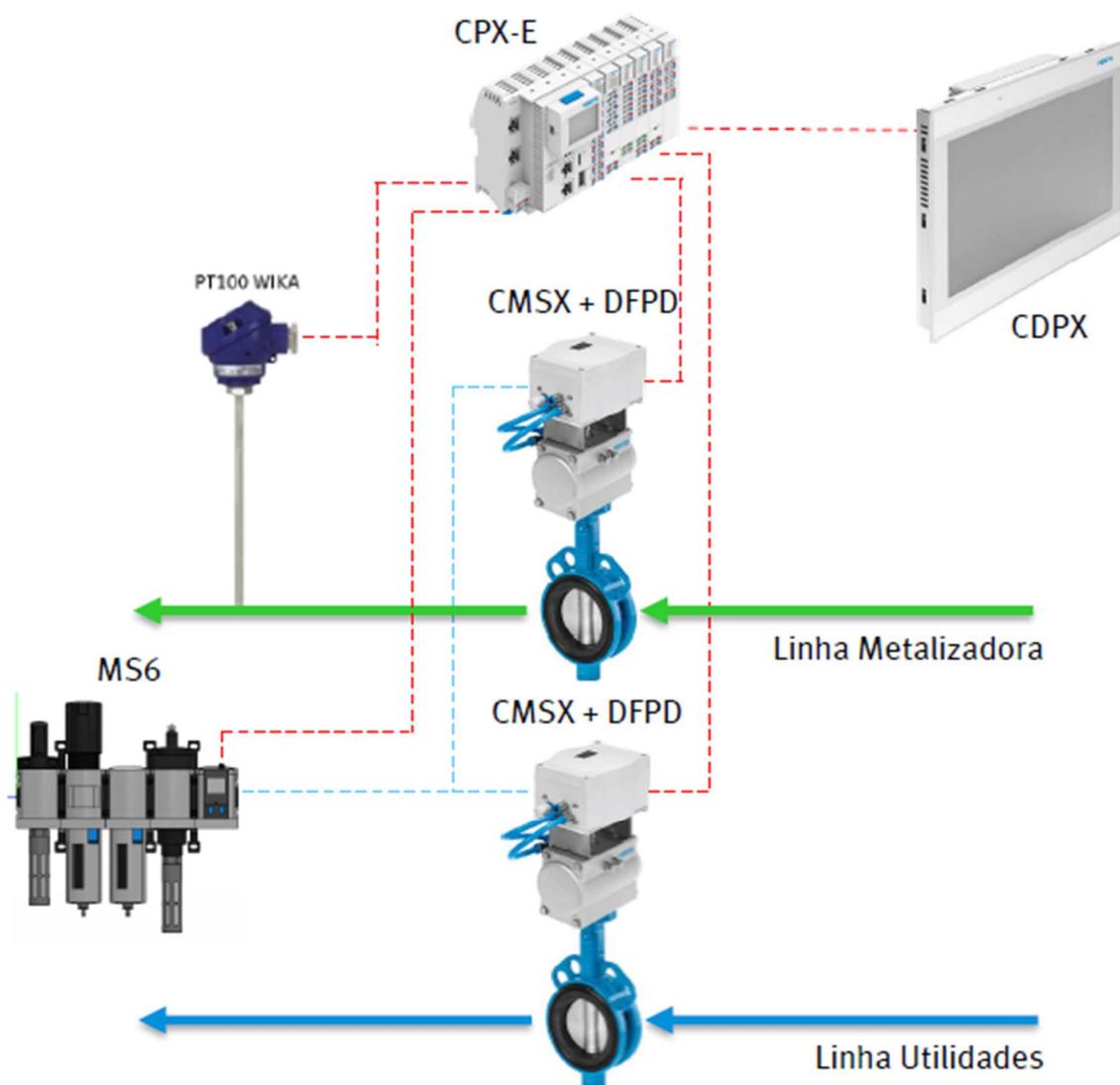
Figura 19 - Fluxograma do sistema



Fonte: Criado pelo autor.

Na ilustração da Figura 51, pode-se observar praticamente o mesmo processo demonstrado no fluxograma ilustrado na Figura 50, porém nela foi demonstrado com os instrumentos de controle do processo.

Figura 20 - Ilustração do fluxograma do sistema



Fonte: FESTO, 2023.

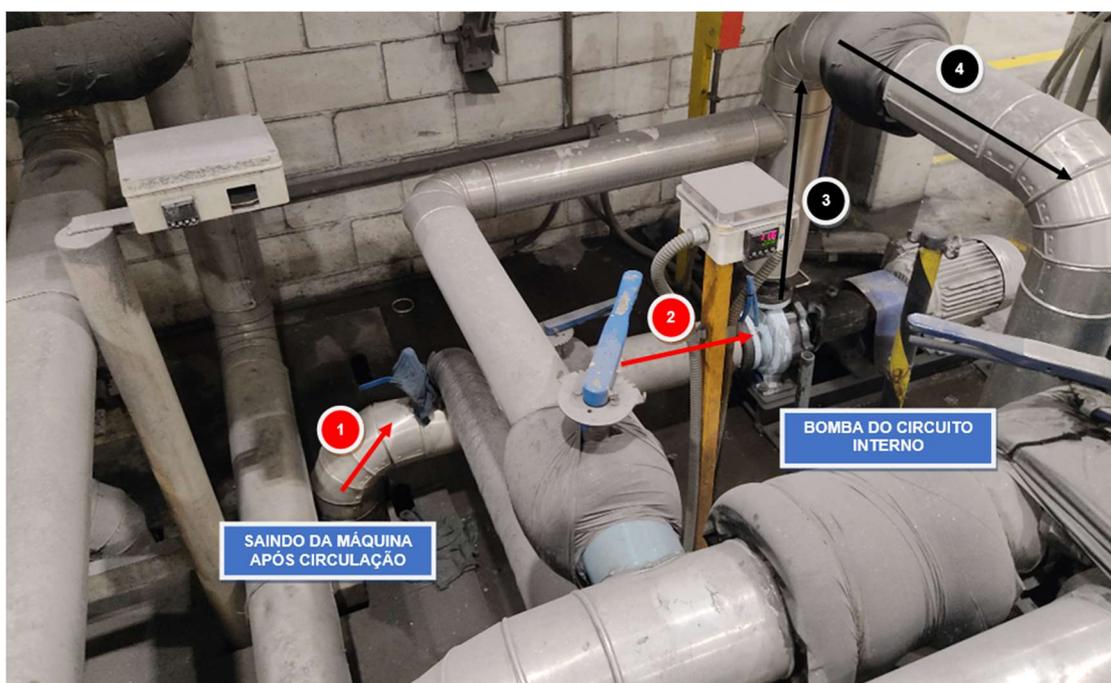
4.2.2.1 Construção do Sistema

O sistema basicamente é composto por dois circuitos de água um fechado e outro aberto. No circuito fechado da água realizada a troca térmica com os componentes mecânicos da máquina e retorna com uma temperatura superior, em

seguida a bomba succiona essa água e envia para o trocador de calor de calor tipo placas, onde será resfriada com a água gelada do processo, após realizar a troca térmica baixando a temperatura ela retorna para máquina e o processo se repete continuamente. Já no sistema aberto, a água é resfriada pelos chillers localizado da área de Utilidades e enviada para fábrica através de uma bomba centrífuga, onde parte desta água vai para a o resfriamento da água do sistema fechado da metalizadora. A seguir será explicado como é o fluxo de funcionamento do processo antes da realização do projeto.

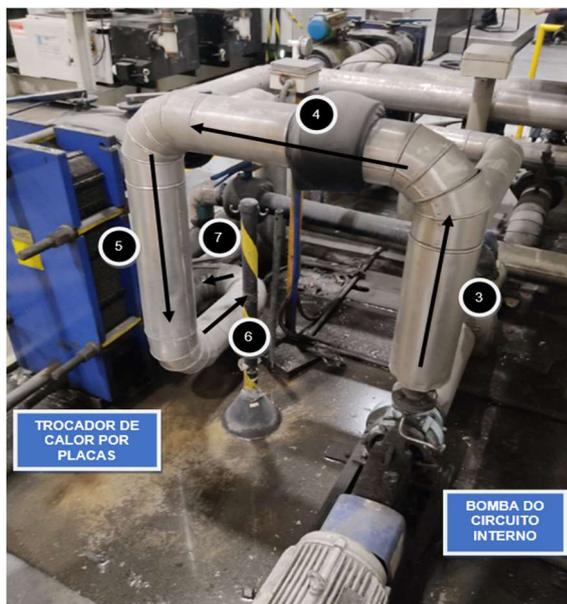
No fluxo em vermelho é sinalizado a região do retorno da máquina, conforme ilustrado na Figura 52 (1), após realizar a troca térmica dos componentes, a água retorna com uma temperatura superior, seguindo até a bomba do sistema (2). Após a bomba é sinalizado com cor preta, que a tubulação será direcionada até o trocador de calor ilustrada na figura 53 locais (3) (4) (5) (6) (7). Observe que no final há uma curva, após isso já entra no trocador de calor, possível analisar na segunda foto.

Figura 21 - Fluxo do sistema fechado retorno



Fonte: Fotografado pelo autor.

Figura 22 - Fluxo do sistema fechado entrada do trocador



Fonte: Fotografado pelo autor.

A água nessa tubulação está em um circuito fechado, sendo sempre a mesma quantidade, ao chegar no trocador de calor ela irá realizar a troca térmica e seguir o fluxo até acessar a máquina novamente, por uma entrada subterrânea, representação na cor azul (8) (9), conforme ilustrado na Figura 54.

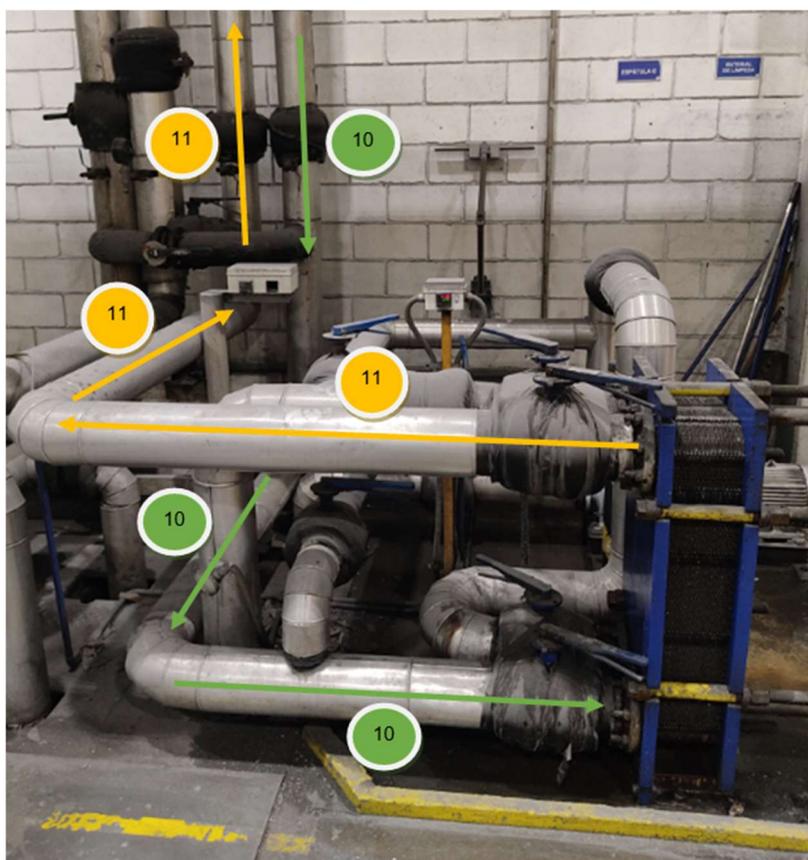
Figura 23 - Fluxo do sistema fechado saída do trocador



Fonte: Fotografado pelo autor.

O circuito aberto representado em verde na Figura 55 (10) é o percurso que entra a água da Utilidades até chegar no trocador de calor da metalizadora, e na cor amarela o fluxo de retorno da água após realizar a troca térmica, assim retornando para o circuito aberto da fábrica, na cor amarela (11).

Figura 24 - Fluxo do sistema aberto entrada e saída do trocador

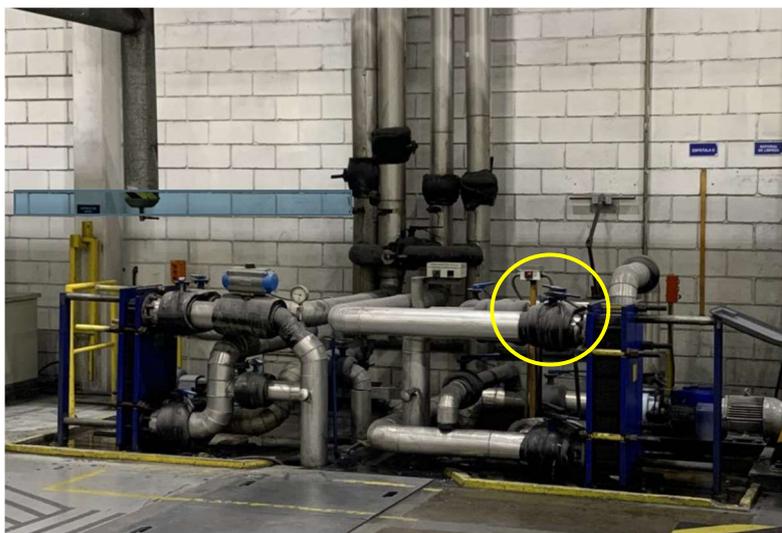


Fonte: Fotografado pelo autor.

4.2.2.10 Layout antes do projeto

A Figura 56 ilustra o layout antes da instalação do projeto, como pode ser visto as válvulas borboletas são operadas manualmente, ou seja, não existe nenhum sistema de controle automatizado, destacado em amarelo o local.

Figura 25 - Antes do projeto

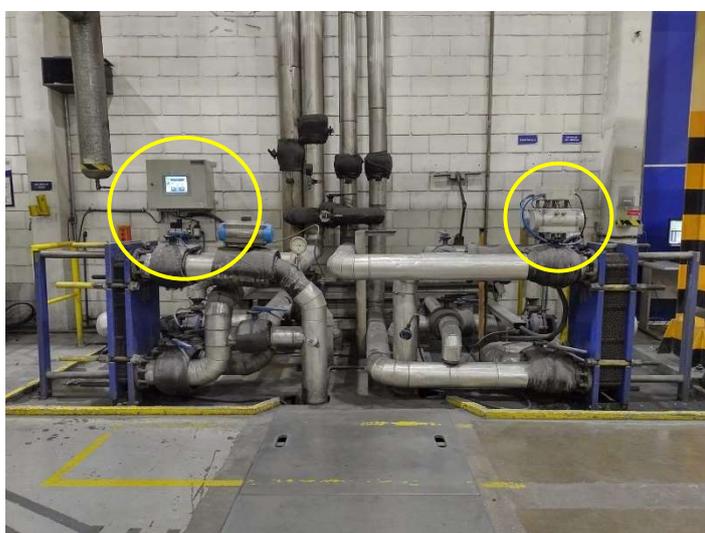


Fonte: Fotografado pelo autor.

4.2.2.11 Layout depois do projeto

A Figura 57 ilustra o layout depois da instalação do projeto, como pode ser visto as válvulas borboletas foram automatizadas, com a instalação de atuadores e posicionadores, também pode ser visto em evidência a instalação do painel de controle e logo abaixo dele a bloco de válvula pneumáticas, destacados em amarelo.

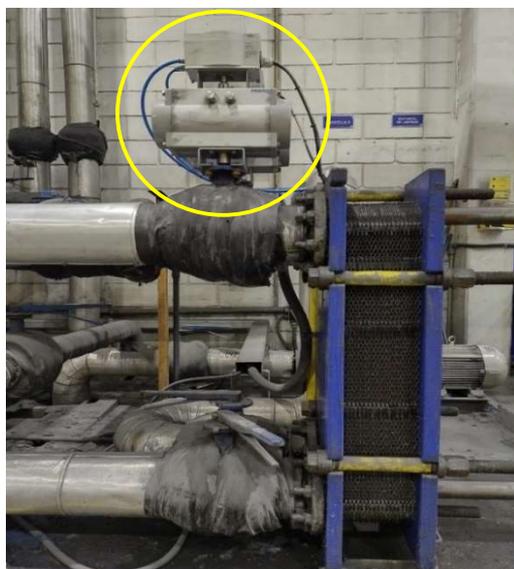
Figura 26 - Depois do projeto



Fonte: Fotografado pelo autor.

Na Figura 58, pode-se observar com mais clareza o posicionador e os atuador semi-rotativo.

Figura 27 - Posicionador e atuador



Fonte: Fotografado pelo autor.

Na Figura 59, pode-se observar com mais clareza o painel de controle e abaixo o bloco de válvulas pneumáticas.

Figura 28 - Painel de Controle e bloco de válvulas pneumático



Fonte: Fotografado pelo autor.

4.2.3 Linguagem de Programação de Controle

Para o projeto de automação das válvulas de água gelada, foi realizada a programação através do software Codesys e adotada linguagem de programação Ladder (Anexo I).

4.2.3.1 Simulação do projeto

O projeto foi realizado durante a parada anual de 120 horas da metalizadora, devido ao tempo necessário para instalação dos componentes e a necessidade de testes de funcionamento. Após a instalação dos equipamentos de controle, foi iniciada a fase de testes do sistema. Durante está etapa, foram constatados dois problemas:

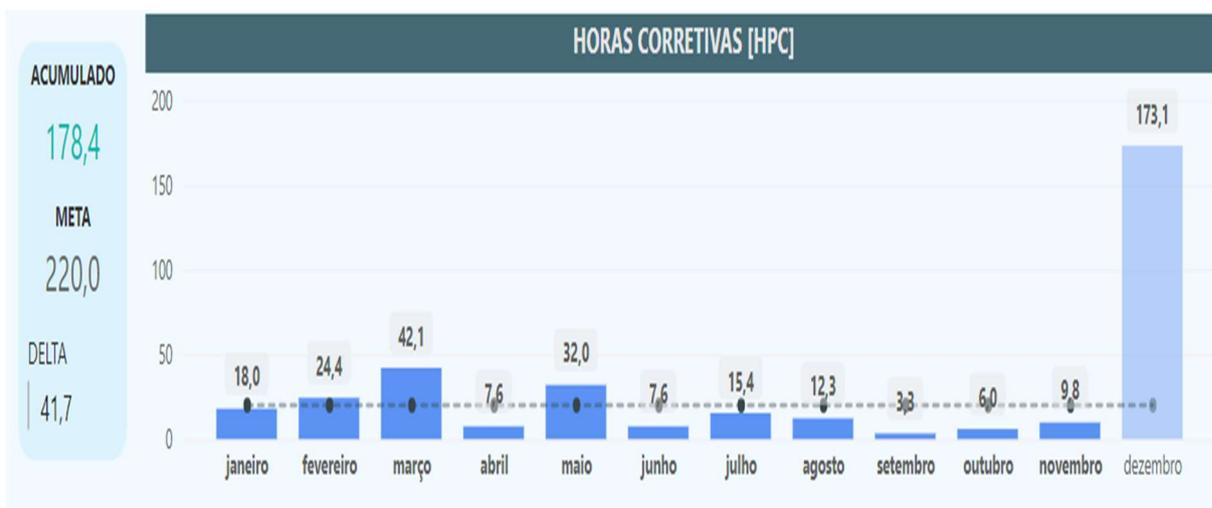
- O primeiro problema evidenciado foi em uma das válvulas borboletas automatizadas do processo, de acordo com a lógica do projeto deveria ficar na posição normalmente aberta (NA), porém ao realizar o teste de funcionamento isso não ocorreu, ela acabou ficando na posição normalmente fechada (NF), o que acabou ocasionando um superaquecimento do compressor e posteriormente o desarme do equipamento por alta pressão, devido à falta de fluxo de água do sistema.
- O segundo problema foi a automação das válvulas borboletas do processo, como a máquina foi instalação por volta de 2004, essas válvulas acabaram ficando muito tempo numa mesma posição, como consequência o movimento de abertura e fechamento estava parcialmente travado. Desta forma, foi necessário desmontá-las e realizar a troca dos reparos internos, limpeza e após a montagem ajustes de funcionamento, após instaladas e atuaram perfeitamente.

4.2.3.2 Indicadores

Os dados a seguir são referentes ao ano de 2022, onde até o mês novembro a máquina vinha com o UPTIME bem controlado, a disponibilidade do equipamento

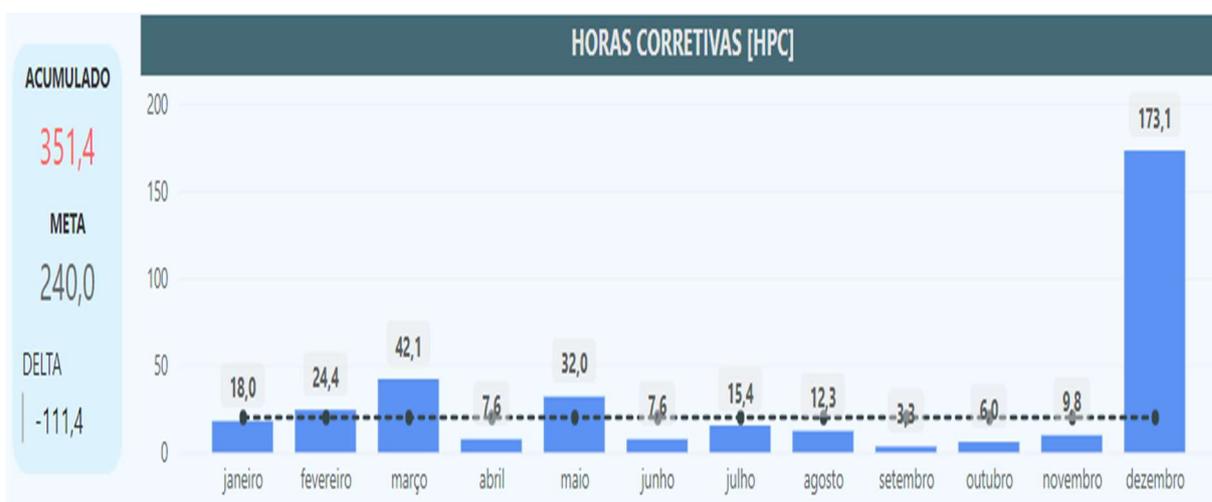
estava com saldo positivo de 41,7 horas. Porém no mês de dezembro um único evento no sistema de refrigeração ocasionou parada corretiva de manutenção de 163 horas, saindo do cenário ilustrado na Figura 60 para a Figura 61, além de ser necessária a compra de um compressor emergencial.

Figura 29 - Resultado HPC de janeiro até novembro/22



Fonte: Criado pelo autor.

Figura 30 - Resultado HPC ano 2022



Fonte: Criado pelo autor.

Foi utilizado inicialmente somente esse evento para análise do custo versus benefício desse projeto, porém pode-se utilizar paradas de menores proporção que estão diluídas ao longo do ano e, problemas de performance das unidades de criogenia.

- Downtime: 162,0 horas;
- Taxa de produtividade da metalizadora: 0,56 toneladas/hora;
- Margem de contribuição atualmente: R\$ 4.435,1/tonelada. (POLO FILMS, 2023)

Através das informações acima pode-se calcular quantas toneladas foram deixadas de produzir por causa deste evento e o impacto financeiro para a companhia. Aplicando a seguinte equação o volume produzido é igual ao Downtime multiplicado pela taxa de produtividade. (POLO FILMS, 2023)

Volume não Produzido = Downtime x Taxa de Produtividade

$$\text{Volume não Produzido} = 162 \text{ horas} \times 0,56 \frac{\text{toneladas}}{\text{hora}}$$

$$\text{Volume não Produzido} = 90,72 \text{ toneladas}$$

Já o impacto financeiro pode ser calculado pela multiplicação do volume não produzido pela margem de contribuição.

Impacto financeiro = Volume não Produzido x Margem Contribuição

$$\text{Impacto financeiro} = 90,72 \text{ toneladas} \times \frac{\text{R\$ } 4.435,10}{\text{tonelada}}$$

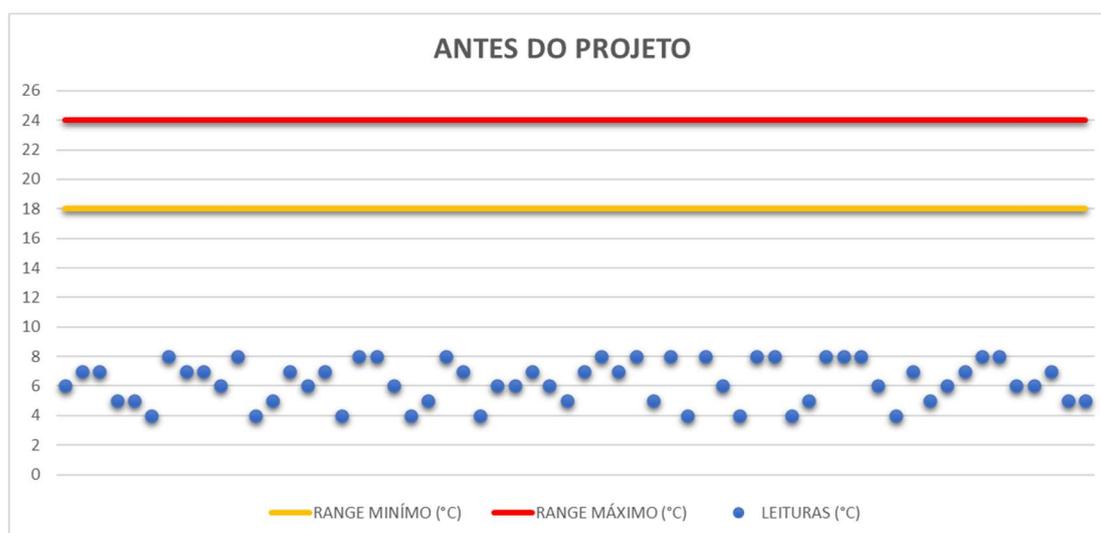
$$\text{Impacto financeiro} = \text{R\$ } 402.352,27$$

5 RESULTADOS

5.1 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DE DADOS

Inicialmente foi criado sistema de monitoramento das temperaturas antes do projeto (Apêndice 1), diante disso, foram registradas leituras das temperaturas do processo por um período de 15 dias. Realizou-se as leituras por quatro turnos distintos, sendo A e C do turno do dia e B e C do turno da noite, onde cada turno realizou duas leituras, após os dados foram compilados e analisados através de gráficos de dispersão, ilustrado na Figura 62. Observando-o fica claramente evidenciado que não era atingido o range ideal de operação do equipamento, o que acabava gerando instabilidade do processo. (POLO FILMS, 2023)

Figura 1 - Gráfico de leituras antes do projeto

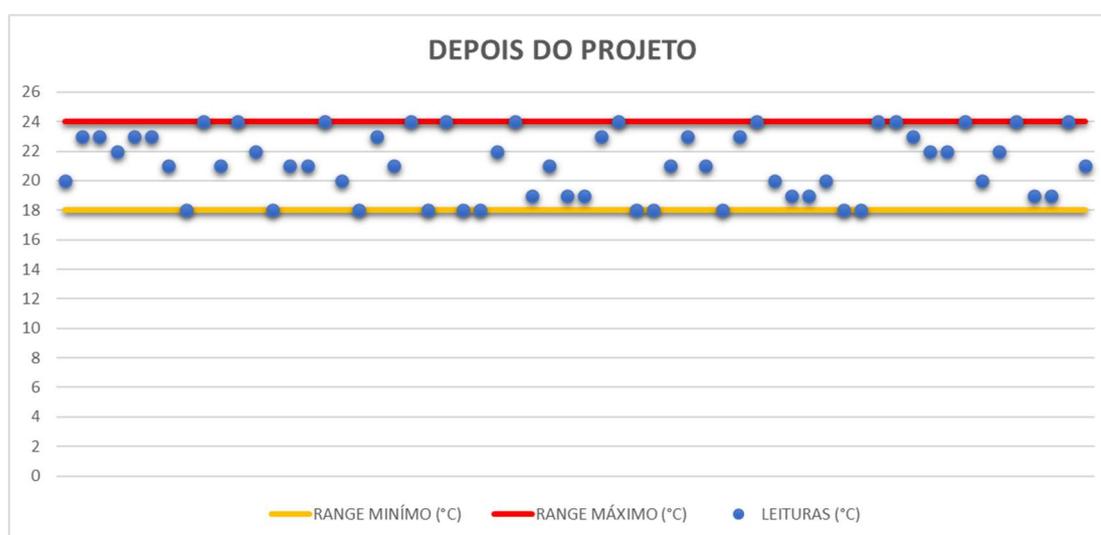


Fonte: Criado pelo autor.

Posteriormente a implantação do projeto foi criado outro sistema de monitoramento das temperaturas (Apêndice 2). Diante disso, foram registradas leituras das temperaturas do processo por um período de 15 dias. Realizou-se as leituras por quatro turnos distintos, sendo A e C do turno do dia e B e C do turno da noite, onde cada turno realizou duas leituras, após os dados foram compilados e

analisados através de gráficos de dispersão, ilustrado na Figura 63. Observando-o fica claramente evidenciado que não há nenhuma temperatura fora do set point de operação, ou seja, o processo está controlado e como consequência muito mais estável. (POLO FILMS, 2023)

Figura 2 - Gráfico de leituras depois do projeto



Fonte: Criado pelo autor.

5.2 DISCUSSÃO

Diante de todos os resultados foi importante entrar em pauta a discussão sobre a viabilidade econômica, deixando claros os pontos relacionados ao custo do projeto, às estimativas de perda e o retorno do investimento.

5.2.1 Viabilidade econômica

O projeto foi executado em parceria com a equipe técnica da Festo, dessa forma, foi elaborada uma proposta contendo todos os custos de mão de obra e materiais, totalmente fornecidos pela contratada.

5.2.1.1 Custos do projeto

De acordo com o orçamento foram definidas algumas premissas referentes aos serviços prestados, onde a montagem será realizada por técnicos especializados e com experiência na integração de tecnologias pneumática, elétrica, eletrônica e mecânica. Para a execução dos serviços foi previsto em horário comercial, ou seja, de 2ª a 6ª feira das 8h00 às 18h00, já que o tempo necessário para instalação do projeto de aproximadamente 4 dias. O valor orçado hora/homem na proposta foi de R\$ 128,66, considerando 4 diárias, dois técnicos e uma carga horária de 09:00 trabalhadas parada cada um, desconsiderando 1 hora de intervalo de almoço, o custo de mão de obra ficou em R\$ 9.263,52.

Referente aos materiais utilizados no projeto, a Figura 64 ilustra os materiais, bem como as quantidades, modelo, descrição, valor unitário e o valor total de cada item.

Figura 3 - Gráfico de leituras depois do projeto

QTD	MODELO	DESCRIÇÃO	VALOR UNITÁRIO	VALOR TOTAL
1	CPX-E-8DO	Módulo de saída digital	R\$ 2.660,40	R\$ 2.660,40
1	CPX-E-4AI-U-I	Módulo de entrada analógico	R\$ 6.748,57	R\$ 6.748,57
1	CPX-E-4AO-U-I	Módulo de saída analógico	R\$ 6.749,57	R\$ 6.749,57
1	CPX-E-16DI	Módulo de entrada digital	R\$ 3.257,72	R\$ 3.257,72
2	CMSX-P-S-C-U-F1-S-50-A	Regulador de posição	R\$ 1.104,00	R\$ 2.208,00
1	CPX-E-CEC-C1	Controlador	R\$ 9.051,05	R\$ 9.051,05
1	MS6-EE-1/2-10V24-S	Válvula de abertura e fechamento	R\$ 1.104,89	R\$ 1.104,89
1	MS6-EM1-1/2-S	Válvula de abertura e fechamento	R\$ 1.004,89	R\$ 1.004,89
1	MS6-FRM	Módulo de derivação	R\$ 640,59	R\$ 640,59
1	CDPX-X-A-S-10	Unidade de indicação e controle	R\$ 18.927,64	R\$ 18.927,64
1	MS6-LF-1/2-CRV	Filtro	R\$ 818,86	R\$ 818,86
1	MS6-MV1	Módulo de união	R\$ 54,65	R\$ 54,65
1	MS6-LFR-1/2-D7-ERV-AS	Válvula reguladora de pressão - filtro	R\$ 818,88	R\$ 818,88
2	DFPD-240-RP-90-RS60-F0710	Atuador giratório	R\$ 3.164,44	R\$ 6.328,88
1	5SL1 204-7 MB	Disjuntor bipolar curva C, 4A	R\$ 126,00	R\$ 126,00
1	PRO ECO 240W 24V 10A	Fonte de alimentação	R\$ 875,99	R\$ 875,99
1	WIKA.TR10-H	Termorresistência sem poço de proteção Cabeçote: KN4-A (alumínio)	R\$ 451,25	R\$ 451,25
1	MATERIAIS DIVEROS	Conexões, tubos flexíveis, cabos de alimentação, conectores etc.	R\$ 13.541,48	R\$ 13.541,48
TOTAL				R\$ 75.369,31

Fonte: Criado pelo autor.

Consolidando os valores mencionados acima, obtém-se um investimento total de R\$ 84.632,83 para implantação do projeto.

5.2.1.2 Estimativas de perdas

Foi realizado o levantamento de dados dos últimos 12 meses, estratificados os valores e o impacto financeiro gerado para a companhia. De acordo com a ilustração da Figura 65, tem-se as seguintes informações:

- Na coluna “parada de máquinas”, os valores em horas de indisponibilidade;
- Na coluna “taxa de produtividade”, os valores de produtividade em tonelada hora da máquina;
- Na coluna “volume não produzido”, os valores de máquina parada multiplicado pelo valor da taxa de produtividade;
- Na coluna “margem de contribuição”, o custo do filme para empresa;
- Na coluna “total”, os valores do volume não produzido multiplicado pela margem de contribuição.

Figura 4 – Tabela de impacto financeiro

IMPACTO FINACEIRO					
Meses/ Ano	Parada de Máquina (horas)	Taxa de Produtividade (tonelada/hora)	Volume Não Produzido (toneladas)	Margem de Contribuição (R\$)	Custo (R\$)
abr/22	7,2	0,56	4,032	R\$ 4.435,10	R\$ 17.882,32
mai/22	22,6	0,56	12,656	R\$ 4.435,10	R\$ 56.130,63
jun/22	15,3	0,56	8,568	R\$ 4.435,10	R\$ 37.999,94
jul/22	1,1	0,56	0,616	R\$ 4.435,10	R\$ 2.732,02
ago/22	4,4	0,56	2,464	R\$ 4.435,10	R\$ 10.928,09
set/22	6,2	0,56	3,472	R\$ 4.435,10	R\$ 15.398,67
out/22	12,9	0,56	7,224	R\$ 4.435,10	R\$ 32.039,16
nov/22	5,9	0,56	3,304	R\$ 4.435,10	R\$ 14.653,57
dez/22	162,0	0,56	90,72	R\$ 4.435,10	R\$402.352,27
jan/23	4,0	0,56	2,24	R\$ 4.435,10	R\$ 9.934,62
fev/23	28,0	0,56	15,68	R\$ 4.435,10	R\$ 69.542,37
mar/23	3,3	0,56	1,848	R\$ 4.435,10	R\$ 8.196,06
TOTAL	272,9	0,56	152,824	R\$ 4.435,10	R\$677.789,72

Fonte: Criado pelo autor.

Com base na Figura 65, devido aos eventos de indisponibilidade do período de março de 2022 a março de 2023, a empresa teve um volume 272,9 horas de máquina parada, 152,82 toneladas não produzidas, considerando a margem de contribuição de R\$ 4.435,10. Por tanto, pode-se calcular o prejuízo financeiro desse período, multiplicando o volume não produzido pela margem de contribuição.

Impacto financeiro = Volume não Produzido x Margem Contribuição

$$\text{Impacto financeiro} = 152,82 \text{ toneladas} \times \frac{\text{R\$ } 4.435,10}{\text{tonelada}}$$

$$\text{Impacto financeiro} = \text{R\$ } 677.758,72$$

5.2.1.3 Retorno do investimento

Na Figura 66, na coluna “custos”, considerando a média dos valores dos 12 meses sendo R\$ 56.482,48, o retorno do investimento seria de menos 2 meses com base no custo de instalação do projeto de R\$ 84.632,83, mencionado anteriormente.

Figura 5 - Tabela de retorno de investimento

RETORNO DE INVESTIMENTO					
Meses/Ano	Parada de Máquina (horas)	Taxa de Produtividade (tonelada/hora)	Volume Não Produzido (toneladas)	Margem de Contribuição (R\$)	Custo (R\$)
abr/22	7,2	0,56	4,032	R\$ 4.435,10	R\$ 17.882,32
mai/22	22,6	0,56	12,656	R\$ 4.435,10	R\$ 56.130,63
jun/22	15,3	0,56	8,568	R\$ 4.435,10	R\$ 37.999,94
jul/22	1,1	0,56	0,616	R\$ 4.435,10	R\$ 2.732,02
ago/22	4,4	0,56	2,464	R\$ 4.435,10	R\$ 10.928,09
set/22	6,2	0,56	3,472	R\$ 4.435,10	R\$ 15.398,67
out/22	12,9	0,56	7,224	R\$ 4.435,10	R\$ 32.039,16
nov/22	5,9	0,56	3,304	R\$ 4.435,10	R\$ 14.653,57
dez/22	162,0	0,56	90,72	R\$ 4.435,10	R\$ 402.352,27
jan/23	4,0	0,56	2,24	R\$ 4.435,10	R\$ 9.934,62
fev/23	28,0	0,56	15,68	R\$ 4.435,10	R\$ 69.542,37
mar/23	3,3	0,56	1,848	R\$ 4.435,10	R\$ 8.196,06
TOTAL	272,9	0,56	152,8	R\$ 4.435,10	R\$ 677.789,72
MÉDIA	22,7	0,56	12,7	R\$ 4.435,10	R\$ 56.482,48

Fonte: Criado pelo autor.

Porém, pode-se fazer uma outra análise, como o evento ocorrido em dezembro de 2022 gerou um tempo de máquina parada de 162 horas, considerá-lo no cálculo dos custos não é muito coerente, ou seja, pode ser avaliado como um dado que difere drasticamente dos outros. Desta forma, a média dos valores mais assertiva é R\$ 22.853,12, e o retorno do investimento ficaria em aproximadamente 4 meses, conforme ilustrado na Figura 67. (POLO FILMS, 2023)

Figura 6 - Tabela de retorno de investimento

RETORNO DE INVESTIMENTO					
Meses/Ano	Parada de Máquina (horas)	Taxa de Produtividade (tonelada/hora)	Volume Não Produzido (toneladas)	Margem de Contribuição (R\$)	Custo (R\$)
abr/22	7,2	0,56	4,032	R\$ 4.435,10	R\$ 17.882,32
mai/22	22,6	0,56	12,656	R\$ 4.435,10	R\$ 56.130,63
jun/22	15,3	0,56	8,568	R\$ 4.435,10	R\$ 37.999,94
jul/22	1,1	0,56	0,616	R\$ 4.435,10	R\$ 2.732,02
ago/22	4,4	0,56	2,464	R\$ 4.435,10	R\$ 10.928,09
set/22	6,2	0,56	3,472	R\$ 4.435,10	R\$ 15.398,67
out/22	12,9	0,56	7,224	R\$ 4.435,10	R\$ 32.039,16
nov/22	5,9	0,56	3,304	R\$ 4.435,10	R\$ 14.653,57
dez/22	0,0	0,56	0	R\$ 4.435,10	R\$ -
jan/23	4,0	0,56	2,24	R\$ 4.435,10	R\$ 9.934,62
fev/23	28,0	0,56	15,68	R\$ 4.435,10	R\$ 69.542,37
mar/23	3,3	0,56	1,848	R\$ 4.435,10	R\$ 8.196,06
TOTAL	110,9	0,56	62,1	R\$ 4.435,10	R\$275.437,45
MÉDIA	9,2	0,56	5,2	R\$ 4.435,10	R\$ 22.953,12

Fonte: Criado pelo autor.

5.3 VANTAGENS

A implantação do projeto é recente em torno de 1 mês, porém nesse período pode-se evidenciar uma série de vantagens para o processo produtivo dos filmes metalizados, tais como:

- Aumento da produtividade do processo;
- Diminuição da indisponibilidade de máquina;
- Maior confiabilidade do processo para equipe de operação;
- Diminuição dos problemas de instabilidade do processo;

- O painel de controle instalado tem capacidade de suportar outro projeto, ou seja, para um projeto futuro o custo de implantação será menor.

5.4 DESVANTAGENS

As desvantagens de instalação do projeto são poucos, porém de fácil maneira de contornar, tais como:

- Devido a automatização dos equipamentos o custo de manutenção e reparo é mais elevado;
- Necessidade de treinamento para equipe operacional, quanto ao uso do painel de controle;
- Para instalação do projeto foi necessário um tempo alto de máquina parada, por isso necessário conciliado com uma parada preventiva anual da máquina, que ocorre somente uma vez por ano.

6 CONCLUSÃO

No presente trabalho foi realizada uma análise dos problemas de instabilidade do processo de produção do filme BOPP metalizado, através deste estudo foi possível diagnosticar uma falha no controle de temperatura da água gelada fornecida pela área de Utilidades. Como a temperatura fornecida chegava na máquina entre 4°C e 8°C e a máquina precisa operar entre 18° e 24°C, esse delta de temperatura era muito alto, o que acabava ocasionando instabilidade no processo e na maioria das vezes indisponibilidade, como consequência perda de produtividade. Com isso, foi elaborado o estudo de caso para resolver esse problema de engenharia, feito através do desenvolvimento da análise, o qual trouxe propostas para corrigir ou minimizar os problemas de instabilidade do processo.

Desta forma, iniciou-se estudo dos conceitos básicos sobre trocadores de calor industrial, seus modelos e suas aplicações, bem como os conceitos de automação e o que compõem ela, também foi apresentado a história dos filmes de BOPP e alguns dos indicadores de produção KPI's. Com base nas informações foi desenvolvido um projeto de automação do controle de temperatura da água gelada da metalizadora, devido ao processo ser totalmente manual, ou seja, o operador ajustava a válvula de entrada de água gelada do trocador de calor manualmente, isso dependia muito filem de cada operador, o que não garantia uma confiabilidade.

Para a solução do problema, avaliou-se a necessidade de automatizar as válvulas de retorno do trocador de calor, como consequência eliminar o fator humano na parte operacional. Então, foi realizado o mapeamento de todos os materiais necessários para a automação do processo, através disso calculado todo o investimento necessário para implantação do projeto, e enquanto tempo seria o retorno financeiro deste investimento para companhia.

O projeto foi dividido em várias etapas, realizando, num primeiro momento, a instalação dos instrumentos de controle, entre eles: painel de controle composto de IHM, CLP, módulos de controle digital e analógico; termoresistência PT100; bloco de válvulas composto de filtro, regulador de pressão, válvulas de abertura e fechamento; posicionadores; atuadores semi-rotativos.

Após a instalação do projeto foi realizado uma série de testes de funcionamento e alguns ajustes conforme necessidade de operação, finalizada está etapa foi criada

uma planilha de controle, na qual foi registrada a variação da temperatura por um período de aproximadamente 15 dias com 4 leituras diárias, através destas leituras foi possível concluir que o processo ficou totalmente controlado, não havendo mais oscilações de temperatura, como consequência disponibilidade de máquina e ganhos de produtividade.

Para a implantação do projeto foram encontradas algumas dificuldades, a primeira foi conseguir a aprovação do projeto, mesmo se tratando de um custo relativamente baixo para companhia, foi necessário demonstrar para gerência a real importância da implantação do projeto para os ganhos de performance e disponibilidade da máquina. Em outro momento o maior desafio foi conciliar o tempo de máquina parada para a instalação dos instrumentos de controle e testes de funcionamento.

Diante disso, não há outra conclusão para este trabalho senão o entendimento de que todas as expectativas propostas foram atendidas, visto que foi apresentado um estudo de caso para a solução do problema de variação da temperatura da água gelada no processo de metalização em foram consideradas todas as circunstâncias que o compõe, bem como apresentada sugestão de tratativa para esse problema.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão de projeto, diante dos ótimos resultados obtidos em ganhos de produtividade e estabilidade do processo de metalização dos filmes BOPP, uma primeira sugestão de trabalho futuro é que a empresa realize a automação do sistema de água gelada da outra metalizadora existente na fábrica. Como o painel de controle adquirido no primeiro projeto tem capacidade para receber outros sinais de instrumentos e módulos de controle, o custo de instalação será relativamente menor, visando que o maior valor gasto para implementação do projeto foi adquirir o painel de controle.

REFERÊNCIAS

- ALFATRONIC. **Sensor Pressão Balluff**. Disponível em: <https://www.alfatronic.com.br/loja/detalhes/produtos-balluff/sensores-de-pressao/sensor-pressao-balluff-bsp-b010-dv004-a/> Acesso em: 28 mar. 2023.
- ANCHIETA. Peças. **Sensor de Temperatura**. Disponível em: <https://www.anchietapecas.com.br/sensor-de-temperatura-mercedes-benz-motor-om-447-todos-p1018973> Acesso em: 28 mar. 2023.
- APPLIED TOP MET. **Manual da Máquina. Guia do utilizador**. Applied Films GmbH & Co GK, 2004.
- APPLIED TOP MET. **Manual da Máquina. Instruções de operação**. Applied Films GmbH & Co GK, 2004.
- BOMGÁS. **Atuadores Pneumáticos: o que é, tipos e vantagens**. Disponível em: <https://bongas.com.br/atuador-pneumatico-o-que-e-tipos-vantagens/> Acesso em: 08 mai. 2023.
- BOURAHILI, Abdelkader. **Modelo de avaliação de desempenho logístico hospitalar**. 2019.
- CABRAL, Antonio Carlos Dantas *et al.* **Apostila de embalagem para alimentos**. Campinas, 1984.
- CARDOSO, Caique. **OEE na Prática**. Primeira Edição, 2013. p. 05.
- CARVALHO, Lídia Barbosa. **Produção de polipropileno bi-orientado (BOPP): tecnologia e aplicações**. Bragança: ESTiG, 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Instituto Politécnico de Bragança, 2008.
- COSTA, Felipe Silveira. **Análise de falhas de um processo de fabricação de filmes plásticos de BOPP utilizando os conceitos de confiabilidade**. Monografia (Engenharia de Produção), 2014. Disponível em: <http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/103743>. Acesso em: 14 mar. 2023.
- DEGASPERI, Francisco Tadeu. **Modelagem e análise detalhadas de sistemas de vácuo**. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP, 2002.
- DUTRA, Henrique. **Sistemas de Supervisão**. Apostila de Pós-Graduação em Automação Industrial. Disponível em: <https://www.passeidireto.com/arquivo/105472542/ss-aula-01-apostila> Acesso em: 28 mar. 2023.

ENGENORMA. **Cilindro Dupla Ação Normalizado**. Disponível em: <https://www.lojaengenorma.com.br/pneumaticos/atuadores-pneumaticos/cilindro-norm-dsbc-32-100-ppva-n3> Acesso em; 28 mar. 2023.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Consumo de energia elétrica caiu 1,1 em março**. Resenha mensal do mercado de energia elétrica. RESENHA. Ano XI, nº 127, 2018.

FERSILTEC. **Tipos de automação industrial**: qual o ideal para sua empresa? Automação Industrial. Disponível em: <https://fersiltec.com.br/blog/tipos-de-automacao-industrial-ideal-empresa/> Acesso em: 28 mar. 2023.

FESTO. **Atualização da máquina metalizadora**. Lista de materiais do projeto realizado pela empresa Festo em conjunto com a empresa Polo Films. 2023.

FESTO. **Atualização da máquina metalizadora**. Projeto de automação realizado pela empresa Festo em conjunto com a empresa Polo Films. 2023.

FESTO. **Catálogo de produtos**. Disponível em: https://www.festo.com/br/pt/c/produtos-id_pim1/. Acesso em: 08 mai. 2023.

FESTO. **Eixo elétrico**. Produto alternativo. Disponível em: <https://www.festo.com/br/pt/a/1470769/?q=~:sortByCoreRangeAndSp2020> Acesso em: 28 mar. 2023.

FREIRE, L. O., & ALVES DE ANDRADE, D. **On applicability of plate and shell heat exchangers for steam generation in naval PWR**. Nuclear Engineering and Design 280 (2014): 619-627.

GRAVAPAC. **Embalagens Flexíveis**. Disponível em: gravapac.com.br. Acesso em: 23 mar. 2023.

HI TECNOLOGIA. **Quais são os tipos de sensores industriais?** HI Tecnologia Automação Industrial. Disponível em: <https://www.hitecnologia.com.br/quais-sao-os-tipos-de-sensores-industriais/#:~:text=Os%20sensores%20para%20automa%C3%A7%C3%A3o%20industrial,m%C3%A1quinas%20utilizadas%20no%20ambiente%20fabril.> Acesso em: 28 mar. 2023.

J.F. O'Hanlon – **A User's Guide to Vacuum Technology**, John Wiley & Sons, 2003

KAKAÇ, S. et al. **Heat exchangers: selection, rating, and thermal design**. 3^a. ed. Boca Raton: CRC Press, 2012.

KANTOVISCKI, Adriano. **Materiais Poliméricos: processos de Transformação de Polímeros**. 2011. Disponível em <https://www.passeidireto.com/arquivo/35300361/materiais-polimericos-modulo-2> Acesso em: 14 mar. 2023.

KIYAN, F.M. (2001). **Proposta para desenvolvimento de indicadores de desempenho como suporte estratégico**. Dissertação (mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

LOGIQUE. **Pirâmide de automação industrial**: O que é? Inteligência em sistemas. Disponível em: <https://www.logiquesistemas.com.br/blog/piramide-de-automacao-industrial/> Acesso em: 28 mar. 2023.

MARK. H.F. et al. **Encyclopedia of Polymer Science and Engineering**, v.8, NY: J.Wiley & Sons, 1987.

MIGUEL, Paulo A. Cauchick et al. **Desdobramento da qualidade no desenvolvimento de filmes flexíveis para embalagens**. *Polímeros* [on-line]. 2003, vol.13, n.2, pp.87-94. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-14282003000200005&script=sci_abstract&lng=pt Acesso em: 14 mar. 2023.

MUELLER, K; WEISSER, H. **Pack tech Sci**. p.15- 29, 2002. Disponível em: <httpdx.doi.org/10.1002/pts.563>. Acesso em: 14 mar. 2023.

NEPIN. Acessórios Industriais. **Atuadores – O que são e para o que servem**. Disponível em: <https://www.nepin.com.br/blog/solucoes-industriais/atuadores-o-que-sao-e-para-o-que-servem/> Acesso em: 28 mar. 2023.

NEVES, Andreia. **O uso de indicadores chave de desempenho para avaliar a eficiência dos sistemas de gestão**. ISEC, abril de 2012;

PADOVEZE, 2010, apud RODRIGUES, Alessandra Candido; CANELADA, Mayale. **Utilização de KPI–Indicadores de desempenho na cadeia de suprimentos**. Um estudo de caso em indústria metalúrgica no setor da construção civil. 2015. p. 32 Disponível em: https://aberto.univem.edu.br/bitstream/handle/11077/1418/TCC%20Finalizado_Altera%c3%a7%c3%b5es%20banca.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em 15 mar. 2023.

PAIVA, Jadilson Alves de; SILVA, João Bosco de Aquino; JUNIOR, João Carlos de Lima. **Aplicações da Tecnologia do Vácuo em Engenharia Mecânica**. In: VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, João Pessoa – Paraíba, 2010.

POLO FILMS. **Blog Polo Films**. Disponível em: <https://polofilms.com.br/>. Acesso em: 10 mar. 2023.

POLO FILMS – Embalagens Flexíveis, Rótulos, Tabaco. **Reciclagem do BOPP**. Disponível em: <https://polofilms.com.br/>. Acesso em: 10 mar. 2023.

TESTO BE SURE. **Transmissores de temperatura e seu significado**. Disponível em: <https://www.testo.com/pt-BR/produtos/transmissor-de-temperatura> Acesso em: 08 mai. 2023.

TORELL, Wendy; AVELAR, Victor. **Mean time between failure**: Explanation and standards. white paper, v. 78, p. 6-7, 2004.

TÜNKERS. **Conheça a Diferença entre Automação Fixa, Programável, Flexível e Integrada**. Erfindergeist serienmäßig. Disponível em: <https://tuenkers.com.br/conheca-a-diferenca-entre-automacao-fixa-programavel-flexivel-e-integrada/> Acesso em: 28 mar. 2023.

VEDOIS TECNOLOGIA. **Qual a diferença entre eficácia e eficiência de produção industrial?** Disponível em: <https://vedois.com.br/site/qual-a-diferenca-entre-eficacia-e-eficiencia-de-producao-industrial/> Acesso em: 08 mai. 2023.

WING, Thomas E.; CROW, Larry H. A model for mean-time-to-repair and mean-logistics-delay-time at the system level. In: **Annual Proceedings on Reliability and Maintainability Symposium**. IEEE, 1990. p. 389-393.

YAPPI, Rodrigue Ngoumeni. **Kennametal Infrastructure**. Schongau Germany, Aincal Europe, 2014.

APÊNDICE A – Tabela de controle de temperaturas antes do projeto.

(continua)

Nº DIAS	TURNOS	Nº LEITURAS	LEITURAS (°C)	RANGE MÍNIMO (°C)	RANGE MÁXIMO (°C)
1	Turno do Dia	1º	6	18	24
		2º	7	18	24
	Turno da Noite	1º	7	18	24
		2º	5	18	24
2	Turno do Dia	1º	5	18	24
		2º	4	18	24
	Turno da Noite	1º	8	18	24
		2º	7	18	24
3	Turno do Dia	1º	7	18	24
		2º	6	18	24
	Turno da Noite	1º	8	18	24
		2º	4	18	24
4	Turno do Dia	1º	5	18	24
		2º	7	18	24
	Turno da Noite	1º	6	18	24
		2º	7	18	24
5	Turno do Dia	1º	4	18	24
		2º	8	18	24
	Turno da Noite	1º	8	18	24
		2º	6	18	24
6	Turno do Dia	1º	4	18	24
		2º	5	18	24
	Turno da Noite	1º	8	18	24
		2º	7	18	24
7	Turno do Dia	1º	4	18	24
		2º	6	18	24
	Turno da Noite	1º	6	18	24
		2º	7	18	24
8	Turno do Dia	1º	6	18	24
		2º	5	18	24
	Turno da Noite	1º	7	18	24
		2º	8	18	24
9	Turno do Dia	1º	7	18	24
		2º	8	18	24
	Turno da Noite	1º	5	18	24
		2º	8	18	24
10	Turno do Dia	1º	4	18	24
		2º	8	18	24

(conclusão)

	Turno da Noite	1º	6	18	24
		2º	4	18	24
11	Turno do Dia	1º	8	18	24
		2º	8	18	24
	Turno da Noite	1º	4	18	24
		2º	5	18	24
12	Turno do Dia	1º	8	18	24
		2º	8	18	24
	Turno da Noite	1º	8	18	24
		2º	6	18	24
13	Turno do Dia	1º	4	18	24
		2º	7	18	24
	Turno da Noite	1º	5	18	24
		2º	6	18	24
14	Turno do Dia	1º	7	18	24
		2º	8	18	24
	Turno da Noite	1º	8	18	24
		2º	6	18	24
15	Turno do Dia	1º	6	18	24
		2º	7	18	24
	Turno da Noite	1º	5	18	24
		2º	5	18	24

Fonte: Criado pelo autor.

APÊNDICE B – Tabela de controle de temperaturas depois do projeto

(continua)

Nº DIAS	TURNOS	Nº LEITURAS	LEITURAS (°C)	RANGE MÍNIMO (°C)	RANGE MÁXIMO (°C)
1	Turno do Dia	1º	20	18	24
		2º	23	18	24
	Turno da Noite	1º	23	18	24
		2º	22	18	24
2	Turno do Dia	1º	23	18	24
		2º	23	18	24
	Turno da Noite	1º	21	18	24
		2º	18	18	24
3	Turno do Dia	1º	24	18	24
		2º	21	18	24
	Turno da Noite	1º	24	18	24

(continuação)

		2º	22	18	24
4	Turno do Dia	1º	18	18	24
		2º	21	18	24
	Turno da Noite	1º	21	18	24
		2º	24	18	24
5	Turno do Dia	1º	20	18	24
		2º	18	18	24
	Turno da Noite	1º	23	18	24
		2º	21	18	24
6	Turno do Dia	1º	24	18	24
		2º	18	18	24
	Turno da Noite	1º	24	18	24
		2º	18	18	24
7	Turno do Dia	1º	18	18	24
		2º	22	18	24
	Turno da Noite	1º	24	18	24
		2º	19	18	24
8	Turno do Dia	1º	21	18	24
		2º	19	18	24
	Turno da Noite	1º	19	18	24
		2º	23	18	24
9	Turno do Dia	1º	24	18	24
		2º	18	18	24
	Turno da Noite	1º	18	18	24
		2º	21	18	24
10	Turno do Dia	1º	23	18	24
		2º	21	18	24
	Turno da Noite	1º	18	18	24
		2º	23	18	24
11	Turno do Dia	1º	24	18	24
		2º	20	18	24
	Turno da Noite	1º	19	18	24
		2º	19	18	24
12	Turno do Dia	1º	20	18	24
		2º	18	18	24
	Turno da Noite	1º	18	18	24
		2º	24	18	24
13	Turno do Dia	1º	24	18	24
		2º	23	18	24
	Turno da Noite	1º	22	18	24
		2º	22	18	24
14	Turno do Dia	1º	24	18	24
		2º	20	18	24

(conclusão)

	Turno da Noite	1 ^o	22	18	24
		2 ^o	24	18	24
15	Turno do Dia	1 ^o	19	18	24
		2 ^o	19	18	24
	Turno da Noite	1 ^o	24	18	24
		2 ^o	21	18	24

Fonte: Criado pelo autor.

ANEXO A – Linguagem de programação ladder

```

<Header>
<Version>3.5.14.0</Version>
<SymbolConfigObject settings="SupportOPCUA,
LayoutCalculator=OptimizedClientSideLayoutCalculator" profile="CODESYS V3.5
SP15
Patch 4+" Imm="3.5.15.0" compiler="3.5.15.40" libversion="3.5.15.20"
runtimeid="3.5.15.30" version="3.5.15.30"/>
<ProjectInfo appname="Application" devicename="Device"
name="Polo_Filmes_Final_2"/>
</Header>

<TypeList>
<TypeSimple name="T_BOOL" iecname="BOOL" typeclass="Bool" swapsize="0"
size="1"/>
<TypeSimple name="T_DINT" iecname="DINT" typeclass="DInt" swapsize="4"
size="4"/>
<TypeSimple name="T_INT" iecname="INT" typeclass="Int" swapsize="2" size="2"/>
<TypeSimple name="T_REAL" iecname="REAL" typeclass="Real" swapsize="4"
size="4"/>
<TypeSimple name="T_STRING_10_" iecname="STRING(10)" typeclass="String"
swapsize="0" size="11"/>
<TypeSimple name="T_STRING_20_" iecname="STRING(20)" typeclass="String"
swapsize="0" size="21"/>
<TypeSimple name="T_STRING_30_" iecname="STRING(30)" typeclass="String"
swapsize="0" size="31"/>
</TypeList>

<NodeList>

<Node name="Application">

```

```
<Node name="GV">
<Node name="AR_OK" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="Auto" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="CLS" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="CMD_Automa" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="CMD_MAN" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="Confirma" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="Dig0" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="Dig1" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="Dig2" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="Dig3" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="Dig4" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="Dig5" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="Dig6" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="Dig7" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="Dig8" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="Dig9" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="Enter" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="F_A_Direto" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="F_B_Direto" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="F_Bomba" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="F_Liga_Ar" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="F_Liga_SM_A" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="F_Liga_SU_B" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="F_Start" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="KS_Abrir_SM_A" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="KS_Abrir_SU_B" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="KS_Avancado" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="ks_Carrega" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="KS_Confirma" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="KS_Direto_A" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="KS_Direto_B" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="KS_Liga_Ar" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
```

```
<Node name="KS_Liga_Bomba" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="KS_MAIS_SM_A" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="KS_Mais_SU_B" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="KS_Manual" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="KS_Menos_SM_A" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="KS_Menos_SU_B" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="KS_Setup" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="KS_Start" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="KS_Troca" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="Man" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="MSG_A_Direto" access="ReadWrite" type="T_STRING_10"/>
<Node name="MSG_AR" access="ReadWrite" type="T_STRING_10"/>
<Node name="MSG_B_Direto" access="ReadWrite" type="T_STRING_10"/>
<Node name="MSG_Bomba" access="ReadWrite" type="T_STRING_20"/>
<Node name="MSG_OK" access="ReadWrite" type="T_STRING_30"/>
<Node name="MSG_SM_A" access="ReadWrite" type="T_STRING_10"/>
<Node name="MSG_Start" access="ReadWrite" type="T_STRING_10"/>
<Node name="MSG_SU_B" access="ReadWrite" type="T_STRING_10"/>
<Node name="Nova_Senha" access="ReadWrite" type="T_DINT"/>
<Node name="Perc_SM_A" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
<Node name="Perc_SU_B" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
<Node name="Senha_Avancado_OK" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="Senha_Manual_Ok" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="Senha_Setup_OK" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="Setup" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="Temp_Real" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
<Node name="Troca" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="VM_A_Real" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
<Node name="VU_B_Real" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
</Node>

<Node name="PR">
<Node name="Incremento" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
```

```
<Node name="Lim_T_Max" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
<Node name="LIM_T_Min" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
<Node name="Manual_SM_A" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
<Node name="MAnual_SU_B" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
<Node name="PT100_Max" access="ReadWrite" type="T_INT"/>
<Node name="PT100_min" access="ReadWrite" type="T_INT"/>
<Node name="Senha0" access="ReadWrite" type="T_DINT"/>
<Node name="Senha1" access="ReadWrite" type="T_DINT"/>
<Node name="Temp_SP" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
<Node name="VM_A_Direto" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="VM_A_KD" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
<Node name="VM_A_KD_0" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
<Node name="VM_A_KI" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
<Node name="VM_A_KI_0" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
<Node name="VM_A_KP" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
<Node name="VM_A_KP_0" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
<Node name="VM_A_SP_MAX" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
<Node name="VM_A_SP_MAX_0" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
<Node name="VM_A_SP_MIN" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
<Node name="VM_A_SP_MIN_0" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
<Node name="VU_B_Direto" access="ReadWrite" type="T_BOOL"/>
<Node name="VU_B_KD" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
<Node name="VU_B_KD_0" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
<Node name="VU_B_KI" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
<Node name="VU_B_KI_0" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
<Node name="VU_B_KP" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
<Node name="VU_B_KP_0" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
<Node name="VU_B_SP_MAX" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
<Node name="VU_B_SP_MAX_0" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
<Node name="VU_B_SP_MIN" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
<Node name="VU_B_SP_MIN_0" access="ReadWrite" type="T_REAL"/>
</Node>
</Node>
```

</NodeList>

</Symbolconfiguration>