

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS ITAJAÍ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

HENRIQUE LUIS PINHEIRO

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DIDÁTICO PARA AUTOMAÇÃO
NO CONTROLE DE TEMPERATURA EM MÁQUINAS EXTRUSORAS**

ITAJAÍ, 2024.

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA - CÂMPUS ITAJAÍ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

HENRIQUE LUIS PINHEIRO

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DIDÁTICO PARA AUTOMAÇÃO
NO CONTROLE DE TEMPERATURA EM MÁQUINAS EXTRUSORAS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador:
Prof. Dr. Daniel dos Santos Matos

ITAJAÍ, 2024.

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca do IFSC.

Pinheiro, Henrique Luis
ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DIDÁTICO PARA
AUTOMAÇÃO NO CONTROLE DE TEMPERATURA EM MÁQUINAS
EXTRUSORAS / Henrique Luis Pinheiro ; orientador, Daniel
dos Santos Matos, 2024.
121 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Instituto
Federal de Santa Catarina, Campus Itajaí, Graduação em
Engenharia elétrica, Itajaí, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia elétrica. 2. Controle de temperatura. 3.
Extrusora. 4. Protótipo. 5. Automação. I. Matos, Daniel dos
Santos. II. Instituto Federal de Santa Catarina. Graduação
em Engenharia elétrica. III. Título.


ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM PROTÓTIPO DIDÁTICO PARA AUTOMAÇÃO NO CONTROLE DE TEMPERATURA EM MÁQUINAS EXTRUSORAS

HENRIQUE LUIS PINHEIRO

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Itajaí, 19 de Dezembro, 2024.


Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 DANIEL DOS SANTOS MATOS
Data: 26/05/2025 11:42:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Daniel dos Santos Matos, Dr.


Orientador

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Documento assinado digitalmente
 LUIS FERNANDO POZAS
Data: 25/05/2025 19:13:35-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Luis Fernando Pozas, Dr.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Documento assinado digitalmente
 PAULO CESAR DA SILVA
Data: 24/05/2025 10:55:53-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Paulo Cesar da Silva, Dr.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

*"Bem-aventurado o homem que acha sabedoria, e o
homem que adquire conhecimento; pois é mais proveitosa
do que a prata, e rende mais do que o ouro fino."
(Provérbios 3:13-14; Salomão)*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer a Deus, por ter me concedido forças, sabedoria e perseverança ao longo desta jornada tão árdua. Sou grato também pela oportunidade de estudar em uma instituição de ensino gratuita e de qualidade, que me proporcionou a formação necessária para este momento. Aos meus pais e irmã, Haroldo, Marileuza e Luana, meu mais profundo agradecimento, por serem meu alicerce durante toda a caminhada. Sua dedicação, suporte e conselhos foram fundamentais para que eu pudesse me concentrar nos estudos e seguir em frente, mesmo diante dos desafios. À minha noiva Rafaela, por seu amor, paciência e compreensão, por estar ao meu lado em todos os momentos, especialmente nos mais difíceis, sempre me motivando e acreditando em meu potencial. Aos familiares e amigos, que com suas palavras de incentivo, apoio emocional e companheirismo, tornaram essa caminhada mais leve e significativa. Por fim, agradeço ao professor orientador Daniel dos Santos Matos, por sua orientação, paciência e valiosas contribuições ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Seu conhecimento e dedicação foram fundamentais para a concretização deste projeto. A todos, minha eterna gratidão.

RESUMO

O controle preciso de temperatura em máquinas extrusoras industriais é crucial para garantir a qualidade e a consistência dos produtos fabricados, além de otimizar a eficiência energética e a durabilidade dos equipamentos. O presente trabalho teve como objetivo principal desenvolver um protótipo didático para automação do controle de temperatura, utilizando o sistema de controle PI (Proporcional e Integral). O projeto inclui uma comparação detalhada entre o controle PI e o método de controle ON/OFF, com o propósito de avaliar e destacar as vantagens e limitações de cada abordagem no contexto da operação de máquinas extrusoras industriais. A implementação do protótipo envolve a integração de um CLP (Controlador Lógico Programável) para o gerenciamento lógico e de processos, bem como uma IHM (Interface Homem-Máquina) para interação intuitiva e visual com o sistema. Este trabalho busca proporcionar uma solução ampla e eficaz para o controle térmico automatizado em máquinas extrusoras, oferecendo uma plataforma didática para o estudo e a aplicação prática de técnicas de controle de temperatura. Além dos testes realizados no protótipo físico, foram conduzidas simulações em *softwares* matemáticos para avaliar o desempenho do sistema de controle projetado. Os resultados esperados incluem a validação do protótipo e a demonstração de sua maior eficiência em comparação com o controle ON/OFF tradicional, destacando as melhorias em termos de exatidão, estabilidade e eficiência energética proporcionadas pelo sistema de controle PI.

Palavras-chave: Controle de temperatura. Extrusora. Protótipo. Automação.

ABSTRACT

Precise temperature control in industrial extrusion machines is crucial to ensure the quality and consistency of manufactured products, in addition to optimizing energy efficiency and equipment durability. The main objective of this work was to develop a didactic prototype for temperature control automation, using the PI (Proportional and Integral) control system. The project includes a detailed comparison between the PI control and the ON/OFF control method, with the purpose of evaluating and highlighting the advantages and limitations of each approach in the context of the operation of industrial extrusion machines. The implementation of the prototype involves the integration of a PLC (Programmable Logic Controller) for logical and process management, as well as an HMI (Human-Machine Interface) for intuitive and visual interaction with the system. This work seeks to provide a comprehensive and effective solution for automated thermal control in extrusion machines, offering a didactic platform for the study and practical application of temperature control techniques. In addition to the tests performed on the physical prototype, simulations were conducted in mathematical software to evaluate the performance of the control system. Expected results include validation of the prototype and demonstration of its greater efficiency compared to traditional ON/OFF control, highlighting the improvements in terms of accuracy, stability and energy efficiency provided by the PI control system.

Keywords: Temperature control. Extruder. Prototype. Automation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Máquina extrusora	21
Figura 2 – Ilustração do funcionamento de uma extrusora	22
Figura 3 – Painel com módulos básicos de controladores de temperatura	25
Figura 4 – Exemplo de interface operacional comercializada para controle de extrusoras	26
Figura 5 – Sistema em malha aberta genérico	29
Figura 6 – Sistema em malha fechada genérico	30
Figura 7 – Sistema de malha fechada de primeira ordem	32
Figura 8 – Resposta ao degrau de um sistema de primeira ordem	35
Figura 9 – Resposta temporal de um processo de segunda ordem a uma entrada em degrau	35
Figura 10 – Curva característica de um controlador ON/OFF	38
Figura 11 – Diagrama de blocos com ação de controle P	40
Figura 12 – Variável de controle sobre ação do <i>Offset</i>	40
Figura 13 – Diagrama de blocos com ação de controle PI	42
Figura 14 – Curva característica de um controlador PI	43
Figura 15 – Diagrama de blocos com ação de controle PID	44
Figura 16 – Respostas típicas de um controlador com termos PID	45
Figura 17 – PWM na aplicação de energia para um elemento de aquecimento	48
Figura 18 – Diagrama em blocos dos processos para controle de temperatura	51
Figura 19 – Sensor de temperatura instalado em máquina extrusoras	52
Figura 20 – Interface operacional de uma máquina extrusora	56
Figura 21 – Resistência elétrica de aquecimento instalada em máquinas extrusoras	58
Figura 22 – Diagrama de blocos com todos os componentes elétricos	60
Figura 23 – Capa do diagrama elétrico projetado	61
Figura 24 – Esquema elétrico de comando do protótipo didático	62
Figura 25 – Esquema elétrico de potência do protótipo didático	64
Figura 26 – Suportes para instalações dos dispositivos elétricos	65
Figura 27 – Protótipo didático montado	66
Figura 28 – Tela inicial	67
Figura 29 – Menu para navegação entre telas	68
Figura 30 – Tela para controle dos parâmetros da extrusora	68
Figura 31 – Protocolo de senha para bloqueio de acesso	69
Figura 32 – Desvio de temperatura	69
Figura 33 – Tela para controle de extrusão	70
Figura 34 – Tela para inserção dos parâmetros de controle	71
Figura 35 – Tela para central de alarmes	72

Figura 36 – Tela de desempenho da máquina extrusora	73
Figura 37 – Testes experimentais para calibração do sensor de temperatura . .	77
Figura 38 – Informações obtidas através dos ensaios de leitura	77
Figura 39 – Programação para leitura do sensor de temperatura	79
Figura 40 – Programação para controle de potência PWM	81
Figura 41 – Programação para controle do sistema de resfriamento	82
Figura 42 – Resultados obtidos experimentalmente aplicando um degrau unitário	84
Figura 43 – Simulação para identificação da planta de controle	86
Figura 44 – Comparação entre os resultados experimentais e simulados	87
Figura 45 – Resultados obtidos por simulação aplicando um degrau unitário . .	88
Figura 46 – Resultados obtidos pelo mal dimensionamento de T_a	91
Figura 47 – Simulação para estudos do controlador PI	92
Figura 48 – Gráfico de resposta da variável manipulada $Y(t)$	94
Figura 49 – Gráfico de resposta do erro atuante $e(t)$	95
Figura 50 – Gráfico de resposta da ação de controle $u(t)$	96
Figura 51 – Teste aplicado a tela de controle de extrusão	97
Figura 52 – Teste aplicado a tela de parâmetros de controle	98
Figura 53 – Teste aplicado a tela central de alarmes	98
Figura 54 – Comparação entre um degrau unitário de 220 VAC e o controlador PI	101
Figura 55 – Análise do controle de temperatura projetado quando $SP=50^{\circ}C$. . .	103
Figura 56 – Análise do controle de temperatura projetado quando $SP=85^{\circ}C$. . .	104
Figura 57 – Análise do sistema de resfriamento projetado	105
Figura 58 – Análise do controle ON/OFF de temperatura quando $SP=85^{\circ}C$. . .	106

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Central de alarmes 72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ciclos de trabalhos (DT) obtidos experimentalmente	100
---	-----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Analógico/Digital
BP	Banda Proporcional
CLP	Controlador Lógico Programável
DT	<i>Duty Cycle</i> (Ciclo de Trabalho)
DV	Desvio de Temperatura
E/S	Entrada/Saída
FT	Função de Transferência
IHM	Interface Homem Máquina
Mp	Valor de Sobressinal
NEMA	<i>National Electrical Manufacturers Association</i> (Associação Nacional de Fabricantes de Equipamentos Elétricos)
PI	Proporcional e Integral
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
PV	<i>Process Variable</i> (Variável do Processo)
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
RTD	<i>Resistance Temperature Detector</i> (Detector de Temperatura de Resistência)
SP	<i>SetPoint</i> (Ponto de Ajuste)
SSR	<i>Solid State Relay</i> (Relé de Estado Sólido)
T	Constante de Tempo
Ta	Tempo de Acomodação
Wn	Frequência Natural

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Motivação e Posicionamento do Problema	17
1.2	Objetivo Geral	18
1.3	Objetivos Específicos	18
1.4	Estrutura do Trabalho	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	Processo de Extrusão	21
2.2	Automação Industrial	23
2.3	Controle de Temperatura	26
2.3.1	Sistema de Controle de Malha Aberta	28
2.3.2	Sistema de Controle de Malha Fechada	30
2.3.3	Função de Transferência	31
2.3.4	Sistema de Primeira Ordem	32
2.3.4.1	<i>Resposta ao Degrau Unitário em Sistemas de Primeira Ordem</i>	33
2.3.5	Sistema de Segunda Ordem	35
2.3.6	Tipos de Controladores Industriais	37
2.3.6.1	<i>Ação de Controle de Duas Posições ON/OFF</i>	37
2.3.6.2	<i>Ação de Controle P</i>	39
2.3.6.3	<i>Ação de Controle PI</i>	41
2.3.6.4	<i>Ação de Controle PID</i>	43
2.3.7	Parâmetros de Controle PID	45
2.4	Controle de Potência	47
2.4.1	Tecnologia PWM	48
3	METODOLOGIA	50
3.1	Protótipo Didático	50
3.1.1	Sensor de Temperatura	52
3.1.2	Transmissor de Temperatura	53
3.1.3	Controlador Lógico Programável	53
3.1.4	Interface Homem Máquina	55
3.1.5	Relé de Estado Sólido	57
3.1.6	Resistência Elétrica de Aquecimento	58
3.1.7	Sistema de Resfriamento	59
3.2	Princípio de Funcionamento do Protótipo Didático	59
3.3	Diagrama Elétrico	61
3.4	Montagem do Protótipo Didático	64
3.5	Implementação da Programação da IHM	66
3.6	Implementação da Programação do CLP	73
3.6.1	Implementação das Entradas do Sistema	75
3.6.2	Implementação das Saídas do Sistema	80
3.7	Identificação da Planta de Controle	83
3.8	Cálculos dos Parâmetros PI	88
4	RESULTADOS OBTIDOS	93
4.1	Resultados Obtidos por Simulação Utilizando o Controlador PI	93

4.2	Teste de Funcionalidade do Protótipo Didático	96
4.3	Teste de Controle de Potência	99
4.4	Teste de Controle de Temperatura	102
4.5	Comparação Entre Controladores ON/OFF e PI	105
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	108
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	111
	REFERÊNCIAS	112
	APÊNDICES	115
	APÊNDICE A – PROGRAMAÇÃO DO CLP EM LADDER PARA AU- TOMAÇÃO DO PROTÓTIPO DIDÁTICO	116

1 INTRODUÇÃO

Na vasta diversidade da indústria moderna, os polímeros emergem como protagonistas indispensáveis, moldando a essência de produtos que permeiam nosso cotidiano. Segundo Chung (2019) os polímeros possuem algumas propriedades únicas para garantir suas aplicações, como baixa densidade, resistência à corrosão e baixíssimas condutividades térmicas e elétricas. A vantagem em termos de custo dos polímeros, muitas vezes, decorre da sua notável facilidade de processamento em comparação com outros tipos de materiais. Os polímeros podem ser processados a temperaturas relativamente baixas, geralmente abaixo de 350°C, permitindo a criação e replicação de formas (produtos) complexos de maneira eficaz. Além disso, a maioria dos polímeros pode ser facilmente reciclados. No epicentro dessa transformação encontram-se máquinas extrusoras, um artefato tecnológico que revela o potencial oculto dos polímeros.

A extrusora é indiscutivelmente a peça de maquinário mais importante na indústria de processamento de polímeros termoplásticos, devido à sua ampla aplicação e ao impacto direto que exerce na produtividade e na qualidade dos produtos finais (RAUWENDAAL, 2014). A extrusão, uma das inovações do século XX, apresentou-se como um modelo de transferência científica e tecnológica entre diferentes indústrias de processamento. A primeira máquina para extrusão de materiais termoplásticos foi construída por volta de 1935 por Paul Troester na Alemanha. Antes desta época, as extrusoras eram usadas principalmente para extrusão de borracha. Depois de 1935, as extrusoras evoluíram para extrusoras de parafuso aquecidas eletricamente (BOUVIER; CAMPANELLA, 2014).

De acordo com Bouvier e Campanella (2014), as extrusoras tiveram um papel determinante no crescimento espetacular da indústria de processamento de polímeros entre 1940 e 1960, quando a produção mundial de plásticos explodiu de 300 mil para 12 milhões de toneladas métricas por ano. A tecnologia de extrusão realmente estabeleceu seu potencial de produção com o desenvolvimento da indústria de processamento de polímeros, onde, juntamente com a disponibilidade de máquinas confiáveis, a fabricação flexível e produtiva pode ser realizada com uma relação custo-benefício competitiva. Suas funções de manufatura são aplicadas em um grande número de aplicações industriais, para processar e transformar materiais poliméricos em produtos comercializáveis.

A tecnologia de processamento de extrusão baseia-se em uma operação de processo contínuo, onde o material é transportado, aquecido e fundido. Dada a natureza contínua desse processo, o controle de variáveis é crucial para ajustar e manter variáveis críticas, como temperatura, pressão e velocidade, isso assegura que o material

seja processado dentro dos padrões estabelecidos, resultando em produtos finais de alta qualidade. Existem várias etapas e componentes envolvidos na implementação de um sistema de controle em uma máquina extrusora. Para Rauwendaal (2014), o controle preciso da temperatura é crítico na extrusão de polímeros, já que os materiais termoplásticos amolecem quando são aquecidos e solidificam quando são resfriados. Para atingir essa regulação, são empregados sensores e controladores de temperatura, responsáveis por ajustar as diferentes zonas de aquecimento ao longo da extrusora. Segundo Michaeli e Hopmann (2016), o objetivo do controle de temperatura em um processo de extrusão é fornecer uma distribuição de temperatura o mais uniforme possível em todo o extrudado ao longo da saída, garantindo assim, o objetivo final do projeto.

O progresso notável no desenvolvimento de controladores de temperatura em sistemas de automação tem impulsionado significativamente a eficiência e a precisão nas operações de máquinas extrusoras, desempenhando um papel crucial na indústria de transformação de plásticos. A introdução de controladores de temperatura mais sofisticados oferece uma gestão precisa do processo de extrusão, resultando em produtos finais mais consistentes, menor desperdício de matéria-prima e, conseqüentemente, uma produção mais sustentável (STEVENSON; COVAS, 1995). A automação, quando integrada de maneira eficaz, não apenas otimiza a eficiência operacional, mas também permite uma flexibilidade maior nos processos, atendendo às demandas do mercado de maneira mais ágil. Sistemas de controle de temperatura em máquinas extrusoras contam com malhas de realimentação, reduzindo variações indesejadas e aproximando o processo de um comportamento linear, empregando o tradicional controlador Proporcional, Integral e Derivativo (PID), atualmente implementado de forma digital em Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) e Interfaces Homem-Máquina (IHM).

Para Nascimento (2018) a forma mais simples de controle de temperatura é o sistema ON/OFF. A grande desvantagem desse sistema é que a grandeza controlada (temperatura) não estabiliza em nenhum ponto e sim oscila entre o ponto desejado, indo do limite inferior ao superior. Entretanto, existem diferentes razões pelas quais algumas empresas ainda optam pelo controle ON/OFF, apesar da existência de tecnologias mais avançadas. Questões financeiras frequentemente se apresentam como uma barreira significativa, com os custos iniciais de implementação sendo percebidos como um obstáculo substancial. Além disso, a resistência à mudança dentro das organizações, muitas vezes enraizada em práticas tradicionais, pode atrasar a adoção dessas inovações. A falta de conscientização sobre os benefícios reais e a ausência de conhecimento técnico para integrar essas tecnologias de maneira eficaz também contribuem para o atraso. Em alguns casos, a falta de recursos dedicados à pesquisa e desenvolvimento limita a capacidade das empresas de acompanhar as últimas tendências tecnológicas

(COMENALE; WILTGEN, 2011).

O presente trabalho consiste na automação de um protótipo didático para simulação de um sistema de controle de temperatura do tipo PI aplicado à zona de aquecimento de máquinas extrusoras, com o objetivo de tornar nula ou próximo de nula a inércia térmica (oscilação de temperatura) tradicional do sistema ON/OFF. No desenvolvimento das implementações foram realizadas comparações entre os dois sistemas (ON-OFF e PI), para verificar a diferença em seus comportamentos. Ao abordar esses temas de maneira integrada, pretende-se não apenas compreender a dinâmica intrínseca da máquina extrusora, mas também explorar os benefícios da automação industrial e do controle exato de temperatura nesse contexto. A utilização de CLP e IHM se apresenta como uma abordagem estratégica para alcançar níveis mais elevados de eficiência, flexibilidade e inteligência nos processos produtivos.

Por meio da construção e análise do protótipo, buscou-se teorizar sobre esses conceitos e validar na prática a viabilidade e potencialidade dessas soluções. Este trabalho se propõe, portanto, a contribuir para o avanço contínuo da automação na indústria, particularmente no contexto das máquinas extrusoras, proporcionando percepções valiosas para profissionais e pesquisadores interessados na convergência dessas tecnologias.

1.1 Motivação e Posicionamento do Problema

A operação de máquinas extrusoras industriais exige um controle preciso de temperatura para garantir a qualidade e consistência dos produtos finais. A temperatura inadequada pode resultar em produtos defeituosos, desperdício de materiais e aumento dos custos operacionais. Portanto, a necessidade de um controlador de temperatura confiável é essencial para a eficiência e a viabilidade econômica das operações de extrusão. Controladores tradicionais, como os baseados no método ON/OFF, são frequentemente utilizados devido à sua simplicidade e custo relativamente baixo. No entanto, este método apresenta várias limitações, como a tendência a causar oscilações significativas na temperatura, levando a inconsistências na qualidade do produto. Em contraste, os controladores PI (Proporcional e Integral) podem oferecer um controle mais refinado e exato, ajustando continuamente a saída para manter a temperatura dentro de uma faixa estreita.

A implementação de controladores, como o CLP (Controlador Lógico Programável) e IHM (Interface Homem-Máquina), proporciona um sistema robusto e intuitivo para o controle de temperatura em máquinas extrusoras. O CLP permite o gerenciamento lógico e de processos com alta precisão e confiabilidade, enquanto a IHM facilita a interação do operador com o sistema, oferecendo uma interface visual clara e comandos intuitivos.

Para comprovar a superioridade do controle PI em relação ao controle ON/OFF, é fundamental realizar testes comparativos utilizando esses tipos de controladores. Por meio de simulações em *softwares* matemáticos e testes práticos no protótipo, é possível demonstrar as vantagens do controle PI, tais como a melhoria na exatidão, a redução de oscilações de temperatura, a estabilidade do processo e a eficiência energética. Essa abordagem não apenas valida a eficácia do controle PI, mas também destaca a importância da adoção de tecnologias de controle em processos industriais. Ao demonstrar os benefícios tangíveis do uso de controladores PI em conjunto com CLP e IHM, este trabalho pretende convencer as partes interessadas das vantagens de atualizar os sistemas de controle de temperatura para alcançar melhor desempenho e competitividade no mercado.

Em resumo, a motivação para este trabalho reside na necessidade de um controle de temperatura mais eficiente e confiável para máquinas extrusoras, e o posicionamento do problema está em provar, através de testes e simulações, que o controle PI, apoiado por tecnologias de controle, é superior ao método ON/OFF tradicional.

1.2 Objetivo Geral

Desenvolver um protótipo didático destinado à automação do controle de temperatura, empregando o sistema de controle PI (Proporcional e Integral), realizando uma comparação com o método de controle ON/OFF, com o intuito de avaliar e destacar as vantagens e limitações de cada abordagem no contexto específico da operação de máquinas extrusoras industriais. A implementação do protótipo incluirá a integração de um CLP para gerenciamento lógico e de processos, juntamente com uma IHM para a interação intuitiva e visual com o sistema, proporcionando uma solução abrangente e eficaz para o controle térmico automatizado em máquinas extrusoras.

1.3 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo geral deste projeto, foram estabelecidos vários objetivos específicos que orientaram o desenvolvimento do protótipo didático de controle de temperatura. Esses objetivos são essenciais para assegurar uma abordagem metódica e abrangente, permitindo uma análise detalhada das tecnologias e métodos aplicados. A seguir, são listados os objetivos específicos, cada um focado em aspectos cruciais do projeto, desde a concepção inicial até a implementação de testes e ensaios final do sistema de controle:

- a) Desenvolver um controlador para um protótipo destinado à simulação do controle de temperatura em uma máquina extrusora, permitindo o monitoramento

- do processo e a correção automática de deficiências de processamento em resposta às variações de temperatura;
- b) Analisar os parâmetros de operação do controle PI, avaliando sua viabilidade e eficácia no sistema;
 - c) Validar a funcionalidade do controlador PI utilizando simulações em plantas de controle no MATLAB, garantindo que os modelos matemáticos correspondam aos requisitos do sistema;
 - d) Analisar o comportamento térmico do sistema, incluindo o tempo de aquecimento e resfriamento, para assegurar que o controle PI responda adequadamente às variações de temperatura;
 - e) Determinar e projetar os circuitos elétricos necessários para o sistema, assegurando que sejam eficientes e confiáveis em sua atuação e funcionamento quando aplicados ao protótipo didático;
 - f) Desenvolver um protótipo funcional que simule o funcionamento de uma das zonas da extrusora, incluindo circuitos de comando e potência elétricos, para demonstrar o controle de temperatura em um ambiente prático;
 - g) Criar uma interface operacional baseada em painéis de controle utilizados no mercado, permitindo operações em modo automático e manual, e avaliar o tempo de resposta do sistema aos comandos do operador;
 - h) Comparar a eficiência do sistema de controle PI com controladores de temperatura convencionais que utilizam o método ON/OFF, destacando melhorias em especificações de desempenhos;
 - i) Analisar a viabilidade técnica do protótipo projetado, avaliando a adequação dos recursos de controle utilizados e identificando possíveis problemas para propor melhorias.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos e estruturado da seguinte forma:

Capítulo 2 – Fundamentação Teórica: São apresentados os referenciais teóricos mais relevantes, fornecendo a base conceitual necessária para o desenvolvimento e compreensão do projeto.

Capítulo 3 – Metodologia: Detalha a estrutura completa do sistema de controle proposto, incluindo a descrição das tecnologias utilizadas no desenvolvimento do projeto. São relatados os procedimentos adotados durante a execução, abrangendo cada etapa do processo de implementação, desde a concepção até a finalização.

Capítulo 4 – Resultados Obtidos: Apresenta os resultados obtidos a partir dos testes de controle de temperatura realizados tanto em *softwares* de simulação matemática quanto no protótipo físico. São detalhados os desempenhos do sistema com a implementação do controle de temperatura PI, destacando a eficiência, precisão e estabilidade do controle. Comparações com o método de controle ON/OFF também são discutidas, evidenciando as vantagens e limitações de cada abordagem no contexto da operação de máquinas extrusoras industriais.

No capítulo 5 – Considerações finais: Discute as implicações do estudo, sintetizando os principais pontos analisados ao longo do desenvolvimento do trabalho. Este capítulo apresenta uma reflexão sobre as contribuições do projeto, destacando os avanços alcançados e as áreas que ainda podem ser exploradas. Sugestões para pesquisas futuras são incluídas, indicando possíveis melhorias e expansões do sistema de controle de temperatura. Além disso, são abordadas as limitações encontradas durante o estudo e propostas soluções para contorná-las.

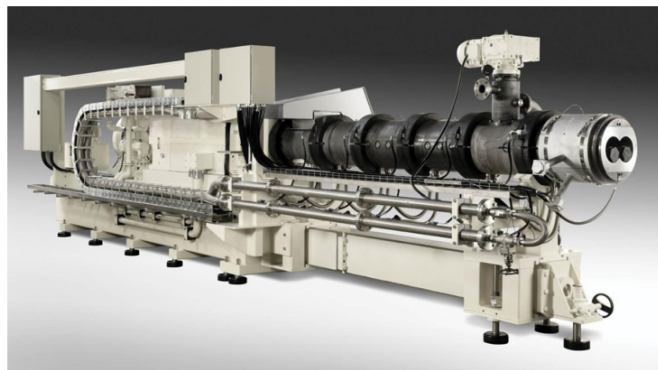
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados fundamentos teóricos, abrangendo os seus principais componentes, além de conceitos fundamentais para o bom entendimento e melhor compreensão deste trabalho. Os tópicos estão divididos entre processo de extrusão, automação industrial, sistemas de controle e técnicas de controle de potência em carga elétrica resistivas.

2.1 Processo de Extrusão

Segundo Rosato (2013), em todo o mundo, as linhas de extrusoras são as maiores conversoras de plásticos, podendo ser consideradas as mais importantes máquinas de produção nas indústrias de plásticos. Comercialmente, as linhas de extrusão são direcionadas para dar vantagens em relação ao custo operacional (produção por hora). Os processos de extrusão oferecem as vantagens de técnicas versáteis e completas de processamento de plástico, insuperáveis em importância econômica por qualquer outro processo. Os principais motivos que os tornam atraentes para os novos desafios do mercado, são sua gama quase ilimitada de aplicações, sua capacidade de produção contínua e uso de matéria prima facilmente reciclada. Como exemplo, a Figura 1 apresenta uma máquina extrusora utilizada na indústria de processamento.

Figura 1 – Máquina extrusora



Fonte: Bouvier e Campanella (2014).

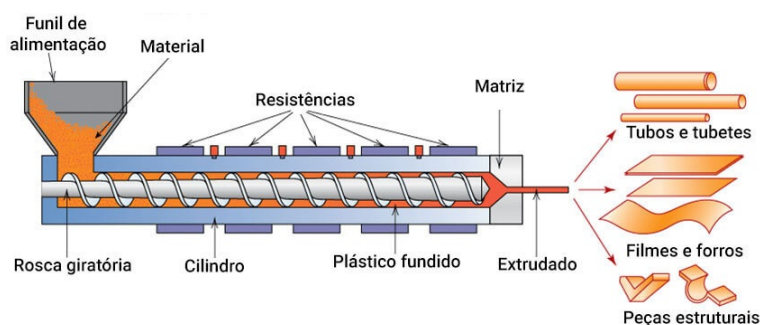
“As extrusoras executam uma série de outras funções, e estas são usadas também, principalmente ou incidentalmente, em uma ampla gama de aplicações especializadas” (STEVENS; COVAS, 1995). Dentre os diferentes produtos formados por meio de um processo de extrusão, estão os perfis de tubo, componentes de moldes injetados, molduras, esquadrias, fitas adesivas, isolamento de fios, plástico filme, monofilamentos, entre outros produtos semiacabados de diferentes opções de polímeros.

Segundo Quelho (2018), entende-se por processo de extrusão, o procedimento cujo objetivo é a conversão de um material sólido em um fluido através da adição e

aplicação de calor e trabalho à sua estrutura física, submetendo este material a altas pressões, afim de expressá-lo por uma matriz, gerando assim a termoplastificação deste material. O esforço mecânico sobre o material é realizado por um parafuso, que ao realizar o movimento rotativo, empurra o material, na direção de uma matriz, tal qual transforma-o em uma seção contínua e uniforme.

O processo da extrusora de plástico começa com o material termoplástico no estado sólido, em forma de granulado ou moído, com sua temperatura abaixo do ponto de fusão. Este material cai em gravidade sobre uma rosca que o transposta em um cilindro, aquecido por resistências elétricas. Nessa fase, o material passa por três etapas, conhecidas como: zona de alimentação, zona de compressão e zona de dosagem.

Figura 2 – Ilustração do funcionamento de uma extrusora



Fonte: Modificado de Poliforma (2018).

Conforme pode ser visto na Figura 2, uma extrusora é constituída de um corpo cilíndrico oco, comumente chamado de barril. O barril, por sua vez, acomoda no seu interior uma rosca acionada por um motor elétrico, com a finalidade de promover o movimento de rotação da rosca (COMENALE; WILTGEN, 2011). O material entra pela tremonha de alimentação, onde ocorre o transporte da matéria-prima para a fase seguinte (zona de compressão). O cilindro está estacionário e o parafuso está girando, como resultado, as forças de atrito atuam no material, tanto no cilindro quanto na superfície do parafuso. Essas forças de atrito são responsáveis pelo transporte do material para a frente. À medida que o material avança, a quantidade de material sólido em cada local diminui como resultado da fusão (RAUWENDAAL, 2014).

Direcionado para a zona de compressão, conforme o material avança, ele se aquece como resultado da geração de calor por atrito (fricção) e por causa do calor conduzido pelos aquecedores elétricos presente no cilindro. Segundo Lamb (2015), o barril é aquecido para derreter o plástico, comumente entre 200°C e 275°C, dependendo do polímero. O aquecimento costuma ser feito em etapas, individualmente separados por zonas, com diferentes controladores para cada uma, permitindo que os granulados derretam gradativamente. Quando a temperatura do material excede o ponto

de fusão, termina a zona de transporte de sólidos e começa a zona de plastificação (RAUWENDAAL, 2014).

Quando todo o polímero sólido é completamente fundido, significa que a zona de plastificação foi concluída. Nesse ponto, inicia-se a zona de transporte do material fundido, onde o polímero já plastificado é transferido para a próxima etapa do processo. Já na zona de dosagem é feita uma mistura do material e a manutenção da vazão através da pressão gerada. Na zona de transporte do material, o polímero fundido é simplesmente bombeado para a matriz. A parte da máquina que contém a abertura através da qual o material é forçado é chamada de matriz.

Conforme o polímero flui através da matriz, ele adota a forma do canal de fluxo. Por sua vez, o extrudado derretido que sai da matriz é moldado e prossegue através de fluxo de equipamento auxiliar à medida que esfria. Para Comenale e Wiltgen (2011), constantes mudanças nas características funcionais de uma máquina extrusora podem induzir efeitos indesejáveis na qualidade do produto fabricado. Para que a extrusão e deposição dos materiais sejam realizadas da melhor forma, é necessário que alguns parâmetros sejam adequadamente controlados, dentre eles o de temperatura, considerado um dos parâmetros de processo mais importantes, sendo um dos melhores indicadores de bom funcionamento de uma extrusora.

2.2 Automação Industrial

Com o aumento da complexidade de processos em plantas industriais, envolvendo exigências de produtividade, segurança e proteção, surgiu a necessidade de monitorar controles automáticos. A partir deste novo nível envolvendo instrumentações, com funções de monitoramentos e alarmes, fez-se necessário o termo automação (RIBEIRO, 1999). A automação é a operação de máquina ou de sistema feita automaticamente, com a mínima interferência do operador humano. Isso significa ter um mecanismo de atuação próprio, que faça uma ação requerida em tempo determinado ou em resposta a certas condições. As aplicações não se resumem a substituir o trabalho humano em tarefas exaustivas, monótonas e perigosas, elas trazem melhoria na qualidade de processos, otimização dos espaços, redução no tempo de produção e custos (PAREDE; GOMES, 2011).

Para Pessoa e Spínola (2014), há três operações básicas em qualquer sistema de automação e controle: medição, decisão e ação. Elas são realizadas pelos elementos sensores, transmissores, controladores e atuadores. Todos esses elementos são extremamente essenciais para sistemas de automação industrial. A medição das variáveis de processo é realizada através de sensores, que fornecem informações sobre as grandezas de um processo industrial. Os sensores são dispositivos que transformam variáveis físicas em variáveis convenientes, podendo converter informações físicas em

sinais elétricos. Os transmissores, por sua vez, detectam as alterações na variável medida e convertem para um sinal padrão, utilizado por controladores, para serem transmitidos a distâncias consideráveis. Os valores medidos são entregues aos controladores. A decisão é realizada pelo controlador, que visa atuar no sistema controlado, tomando as decisões do sistema baseado nos sinais de entrada. Os controladores definem a ação a ser realizada pelos elementos de controle finais, denominados atuadores, que agem como resultado da decisão do controlador, atuando na geração de sinais de saída que operam os acionadores para executar as decisões, convertendo o sinais do sistema de saída em ações físicas.

Segundo White e Potente (2002), com os avanços tecnológicos na automação industrial, os algoritmos de controle são implementados principalmente como circuitos digitais em um microcontrolador. Isso possibilitou que esses controladores digitais incorporassem consideravelmente mais tarefas do que apenas a tarefa de controle puro. Desta forma, as plantas de extrusão se tornaram cada vez mais automatizadas, um desenvolvimento que começou com sistemas de controle de temperatura de circuito fechado para as diferentes seções ao longo do cilindro (barril). De acordo com Jr, III e Jr (2005), os controladores de temperatura evoluíram ao longo dos anos, com algumas melhorias referentes à eletrônica, para fornecer um controle muito preciso (dentro de alguns graus) em todas as zonas de aquecimento. O problema encontrado neste processo de fabricação é como a temperatura real da extrusora mudará conforme resultado da ação do controlador de temperatura.

Muitos setores industriais estão atrasados com relação à adoção de novas tecnologias, com a utilização de sistemas simples e básicos de controle de temperatura. Estes módulos básicos para controle de temperatura não possuem precisão suficiente para a maioria das aplicações dos processos de controle de máquinas. Porém, seus principais benefícios incluem preços acessíveis e uma instalação simplificada. Além disso, é possível realizar a parametrização por meio de um teclado com botões, convenientemente localizado na região frontal do controlador. Em contrapartida, não é possível realizar nenhum tipo de protocolo de comunicação, impossibilitando interface operacionais e programações complexas, onde poder-se-ia controlar duas ou mais saídas e variáveis, tornando o projeto e controle limitados. A Figura 3 apresenta um painel elétrico de uma máquina extrusora utilizando módulos de controladores de temperatura básicos.

Figura 3 – Painel com módulos básicos de controladores de temperatura

Fonte: Autor, 2023.

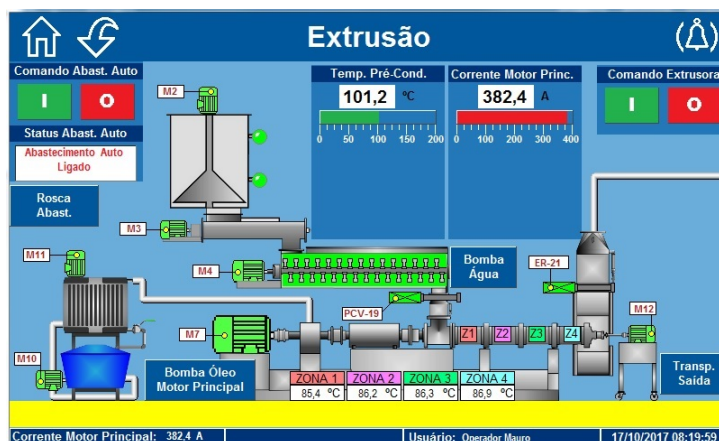
A ausência de tecnologia e a falta de investimento é uma realidade que impossibilita a inovação nos processos produtivos (COMENALE; WILTGEN, 2011). Os processos produtivos atuais requerem controladores que promovem agilidade em produtividade, para redução de custos e de tempo. De acordo com Parede e Gomes (2011), existem diversos equipamentos utilizados na automação industrial moderna, porém, o Controlador Lógico Programável (CLP) é um dos mais importantes. Com maior capacidade e durabilidade dos CLPs, os controles de extrusão tornaram-se mais sofisticados, resultando em um melhor controle do processo.

Existem distintos pacotes de controle com diferentes níveis de sofisticação. À medida que os controles se tornam mais sofisticados, as opções adicionais incluem portas de comunicação, capacidade de partida automática, controles de montagem remota, proteção por senha, implementação de sistemas de alarmes e instruções para controle PID (JR; III; JR, 2005). Em um CLP, todo o processo de extrusão pode ser controlado a partir de um local central, conectando cada sensor, transmissor e atuador diretamente a um CLP.

Com todo o processo instrumentado, pode-se monitorar cada etapa da planta de controle por meio de uma Interface Homem Máquina (IHM), verificando se todas as linhas estão funcionando corretamente e se os processos estão sob controle com base nos dados, apontando resultados de produtividade e disponibilizando informações instantâneas do processo (WHITE; POTENTE, 2002). A interface operacional permite que o operador insira dados por meio dos vários tipos de chaves programadas, para estabelecer as condições de partida ou alterar o controle de um processo. Suas reações

a uma ampla gama de estados de erro podem ser programados com antecedência, evitando assim paradas de produção. A Figura 4 apresenta um painel de controle projetado para fornecer automação para máquinas extrusoras, com uma interface de operação desenvolvida a partir de uma IHM do tipo *Touch Screen*.

Figura 4 – Exemplo de interface operacional comercializada para controle de extrusoras



Fonte: Ferraz (2018).

O equipamento IHM fornece um controle e uma interface de visualização entre um operador e uma máquina industrial. As IHMs permitem ao operador controlar, monitorar, diagnosticar e gerenciar as aplicações. Dependendo das necessidades e da complexidade do processo, o operador pode ser requisitado para operar os controles da máquina e fazer os ajustes necessários para o processo, monitorando seu progresso e em casos de detecção de situações anormais, executar as ações de correção (PETRUZELLA, 2014). Desta forma, segundo Lamb (2015), uma automação moderna em máquinas industriais funciona basicamente como um sistema utilizado para incorporar facilmente inspeções e verificações, a fim de reduzir o número de produtos fora de um determinado padrão de produção, permitindo o controle estatístico de processo que gerará produtos mais consistentes e uniformes.

2.3 Controle de Temperatura

A teoria clássica de controle é um ramo da engenharia que estuda como regular e estabilizar sistemas dinâmicos, garantindo que eles funcionem de maneira desejada. Segundo Ogata (2011), a teoria de controle clássico foi desenvolvida para lidar com demandas em termos de precisão, confiabilidade e custo em aplicações industriais. A teoria de controle clássico simplifica o projeto de sistemas de controle, pois se baseia em um modelo que representam o comportamento do sistema de forma idealizada, facilitando o desenvolvimento de controladores eficazes para atender aos requisitos de precisão e estabilidade.

Controles clássicos e automáticos são considerados essenciais em qualquer campo da engenharia e da ciência, sendo de grande importância em operações industriais que envolvam controle de temperatura. Segundo Stevens e Covas (1995), o operador de uma máquina extrusora geralmente enfrenta alguns problemas de configurações existentes, para fazer um produto vendável, de qualidade e uniformidade suficientes no máximo rendimento e eficiência.

O controle de processo é aplicado normalmente na fabricação ou no processamento de produtos na indústria. Em comparação com outros processos plásticos, uma extrusora tem poucas variáveis de controle independentes que podem ser alteradas por um operador para alterar o processo. Vários parâmetros são monitorados para garantir que o processo esteja sob controle e funcionando corretamente. Uma das principais variáveis da máquina sob controle do operador é a temperatura de aquecimento do cilindro (JR; III; JR, 2005).

Para Rauwendaal (2014), o comportamento dinâmico de uma extrusora é significativamente determinado pelo sistema de controle de temperatura. Controladores de temperatura para máquinas de processamento de plástico funcionam tendo como principais funções, oferecer alta precisão e confiabilidade, permitindo uma resposta rápida durante a inicialização do processo e garantindo a estabilidade térmica mesmo diante de variações nas condições operacionais. Seu funcionamento eficiente assegura que as temperaturas se mantenham dentro dos limites definidos, apesar das grandes mudanças na demanda de calor pelo processo.

“A temperatura no processo de extrusão deve ser alta o suficiente para eliminar a cristalinidade presente no material de alimentação, mas baixo o suficiente para permitir o resfriamento rápido” (STEVENS; COVAS, 1995). Por exemplo, se a temperatura da primeira zona de aquecimento for muito alta, pode causar deslizamento na seção de alimentação de sólidos, e se for muito baixa, retardará o derretimento e poderá causar problemas. Portanto, o controle preciso das temperaturas através do cilindro é essencial, pois a viscosidade dos plásticos pode mudar facilmente com as flutuações de temperatura.

Segundo Nise (2011) um sistema de controle consiste em subsistemas e processos (ou plantas) construídos com o objetivo de obter uma saída com um desempenho desejado, dada uma entrada especificada. Controle é fazer uma medição, determinar se algo precisa ser mudado, tomar uma decisão e agir. Se o produto estiver no limite aceitável ou inaceitável, ou uma etapa do processo estiver fora dos limites, a decisão é que algo está errado e uma mudança é necessária para que o sistema volte ao controle. O controle de processos é utilizado com *Loops* de entrada e *Feedback* de saídas, para verificar se o processo está funcionando corretamente e em equilíbrio (JR; III; JR, 2005). A terminologia utilizada em conjunção para sistemas de controle, segundo Petruzella

(2014), pode ser resumida da seguinte forma:

- A operação da informação que o controlador recebe da máquina é chamada de Variável do Processo (PV) ou realimentação;
- O local de onde o operador diz ao controlador o ponto de operação pré-ajustado é chamado de ponto de ajuste, ou também conhecido como *Setpoint* (SP);
- Quando em funcionamento, o controlador determina se a máquina necessita de ajuste pela comparação (por subtração) do SP e da PV;
- Na saída, o sinal é chamado de variável de controle, ou ação de controle, que é conectada com o atuador do processo.

Os controladores de temperatura em geral são de ação direta ou reversa. Todos os controladores de temperatura de máquinas extrusoras são de ação reversa, o que significa que a saída é reduzida à medida que o calor aumenta. Com aplicações de aquecimento ou resfriamento, a saída de calor se opõe à saída de temperatura. De acordo com Ribeiro (1999), a ação indireta do controlador significa um aumento da medição e diminuição da saída.

Segundo Ogata (2011) na maioria dos casos em um controle de máquina industrial, torna-se necessário projetar um sistema (modificando a estrutura ou incorporando dispositivos ou componentes adicionais), para alterar seu comportamento geral de modo que ele se comporte como desejado. Tal projeto ou acréscimo de um dispositivo adequado chama-se compensação. Um dispositivo inserido no sistema com o propósito de satisfazer as especificações é denominado compensador. Para Jr, III e Jr (2005), sem um bom controle de processo e uma compreensão do processo de extrusão, a extrusora se torna nada mais do que uma caixa preta onde a matéria prima em forma sólida são colocados em uma extremidade e uma forma extrudada sai na outra.

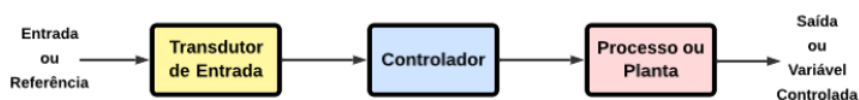
2.3.1 Sistema de Controle de Malha Aberta

“Os chamados sistemas de controle de malha aberta são aqueles em que o sinal de saída não exerce nenhuma ação de controle no sistema” (OGATA, 2011). Portanto, em um sistema com malha aberta, o sinal de saída não é medido nem realimentado para comparação com a entrada de referência. Assim, a cada entrada de referência corresponde uma condição fixa de operação.

Um sistema em malha aberta genérico é mostrado na Figura 5. Ele começa com um subsistema chamado de transdutor de entrada, podendo ser um sensor, no qual converte a forma da entrada para ser utilizada pelo controlador. O controlador aciona

um processo ou uma planta. A entrada, na maioria das vezes é chamada de referência, enquanto a saída pode ser chamada de variável controlada.

Figura 5 – Sistema em malha aberta genérico



Fonte: Autor, 2023.

Através do sistema genérico é possível observar que sistemas em malha aberta são comandados simplesmente pela entrada. Basicamente um sistema de controle de malha aberta só poderá ser utilizado se a relação entre o sinal de entrada e saída forem conhecidos, e se não houver nenhum distúrbio interno ou externo presente no sistema. Desta forma, a exatidão do sistema depende totalmente de uma calibração, pois na presença de distúrbios, um sistema de controle de malha aberta não poderá executar a tarefa desejada. Assim, para que o sistema mantenha a saída de qualidade requerida, é necessária uma regulação periódica. É claro que estes não são sistemas de controle com realimentação.

Um das vantagens do sistema de malha aberta, quando comparado ao sistema de malha fechada é a estabilidade, tornando-o mais fácil de ser construído, pelo fato de a estabilidade ser um problema menos significativo. Por outro lado, segundo Ogata (2011), a estabilidade constitui um problema importante nos sistemas de controle de malha fechada, que podem apresentar uma tendência de correção de erros além do necessário, causando oscilações de amplitude constante ou variável. Então, como afirma Ogata (2011), deve ser enfatizado que, para sistemas nos quais as entradas são conhecidas com antecipação e que são isentos de distúrbios, é conveniente o uso do controle de malha aberta, desta forma o sistema se torna mais fácil em relação a manutenção, e simples de ser construído.

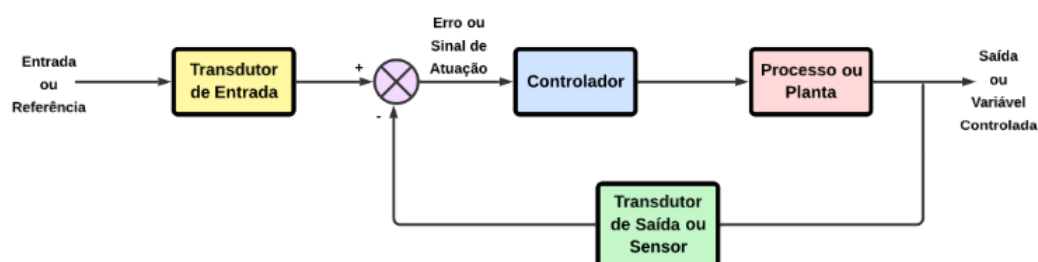
As variáveis de operação de uma máquina extrusora podem ser ajustadas sem controle, fazendo com que o processo esteja operando como um sistema de controle de malha aberta. O problema com os sistemas de controle de malha aberta é que eles tendem a oscilar com o tempo e são muito dependentes do operador. Assim, sistemas de malha fechada são cada vez mais utilizados para controlar o processamento de extrusão, a fim de garantir alto desempenho do processo e consistência do produto. No entanto, isso requer o uso de sensores avançados e confiáveis que permitam que as variáveis dependentes do processo e do produto sejam medidas (BOUVIER; CAMPANELLA, 2014).

2.3.2 Sistema de Controle de Malha Fechada

De acordo com Ogata (2011) em um sistema de controle de malha fechada, o sinal de erro atuante, conhecido como $e(t)$, é considerado como a diferença entre o sinal de entrada e o sinal de realimentação. Esse sinal é utilizado pelo controlador, de modo a minimizar o erro e acertar a saída do sistema ao valor desejado. Portanto, o controle de malha fechada sempre implica a utilização do controle com realimentação para reduzir o erro do sistema.

Um sistema que estabelece uma relação de comparação entre a saída e a entrada de referência, utilizando a diferença como meio de controle, é denominado sistema de controle com realimentação. Para Ogata (2011) o controle com realimentação refere-se a uma operação que, na presença de distúrbios, tende a diminuir a diferença entre a saída de um sistema e alguma entrada de referência e atua com base nessa diferença. A arquitetura genérica de um sistema em malha fechada é mostrado na Figura 6.

Figura 6 – Sistema em malha fechada genérico



Fonte: Autor, 2023.

Analisando um sistema genérico de malha fechada, observa-se que o transdutor de saída, ou sensor, mede a resposta da saída e a converte para ser utilizado pelo controlador. Pela junção algébrica, o sinal de entrada é subtraído do sinal de saída, que chega através da malha de realimentação. O resultado, geralmente, é chamado de sinal de atuação. O sistema em malha fechada compensa o efeito das perturbações medindo a resposta da saída, realimentando essa medida através da malha de realimentação e comparando essa resposta com a entrada na junção de soma. Se existir qualquer diferença entre as duas respostas, o sistema aciona a planta, através do sinal de atuação, para fazer uma correção (NISE, 2011).

Quando um sistema de controle é projetado de modo que receba informação de uma máquina e faça ajustes para ela com base nessa informação da operação, dizemos que o sistema está em malha fechada (PETRUZELLA, 2014). Um sistema de controle de temperatura com realimentação, funciona basicamente medindo a temperatura do ambiente real e comparando-a com a temperatura de referência (temperatura

desejada). O sensor de temperatura, em conjunto com o controlador, determina o acionamento ou desligamento do equipamento de aquecimento ou resfriamento, de modo que assegure que a temperatura permaneça em um nível relativamente confortável, independentemente das condições exteriores.

Para (STEVENS; COVAS, 1995), o processo de extrusão é essencialmente contínuo e deve possuir um grau considerável de alta estabilidade. Para alcançar estabilidade no processo, o primeiro requisito, então, é o controle direto em malha fechada dos parâmetros do processo de extrusão. A principal vantagem da utilização de um sistema com controle de malha fechada, descrita por Nise (2011), é o fato de que o uso da realimentação faz que a resposta do sistema seja relativamente insensível a distúrbios externos, ruídos e a variações internas nos parâmetros do sistema, tornando o sistema vantajoso em casos em que se encontram distúrbios e/ou alterações não previsíveis nos componentes do sistema.

Em um sistema de controle de malha fechada, o custo e a potência são geralmente maiores, pois o número de componentes utilizados são superiores comparados a de um sistema correspondente de malha aberta.

2.3.3 Função de Transferência

Para obter um esquema, o engenheiro de sistemas de controle deve frequentemente adotar diversas hipóteses simplificadas, de modo a manter o modelo resultante tratável e ainda aproximar a realidade física. O próximo passo é desenvolver modelos matemáticos a partir de esquemas de sistemas físicos. O método utilizado para tal tarefa é a Função de Transferência (FT), que é amplamente utilizado na análise e no projeto desses sistemas (NISE, 2011).

Segundo Ogata (2011), na teoria de controle, as funções de transferência são comumente utilizadas para caracterizar as relações de entrada e de saída de componentes ou de sistemas que podem ser descritos por equações diferenciais lineares invariantes no tempo. Esta função é um modelo matemático que constitui um método operacional para expressar a equação diferencial que relaciona a variável de saída sobre a variável de entrada. A FT é um conjunto de equações diferenciais que descrevem o comportamento dinâmico do processo. Portanto, a FT também nos permite combinar algebricamente representações matemáticas de subsistemas para produzir uma representação do sistema como um todo. Entretanto, ela não fornece nenhuma informação relativa à estrutura física do sistema.

De acordo com Castrucci, Bittar e Sales (2018), a Função de Transferência $G(s)$ é definida como o quociente da transformada de Laplace do sinal de saída $Y(s)$ pelo sinal de entrada $R(s)$, quando todas as condições iniciais são nulas. Considerando o sistema linear invariante no tempo a FT é definida pela seguinte Equação (1):

$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} \Big|_{\text{Condições Iniciais Nulas}} \quad (1)$$

2.3.4 Sistema de Primeira Ordem

Segundo Ogata (2011) um sistema de primeira ordem fisicamente, pode representar um sistema térmico, ou algo semelhante, podendo ser processos industriais reais que podem ser descritos por esta expressão. A ordem se refere à ordem da equação diferencial equivalente que representa o sistema. Para a análise de um modelo de primeira ordem, são comumente levados em consideração o ganho estático K , a constante de tempo T , sendo correlacionados pela seguinte Função de Transferência $G(s)$:

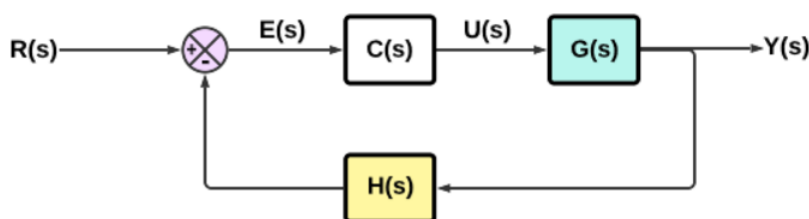
$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K}{T \cdot s + 1}, \text{ sendo } T > 0 \quad (2)$$

Se a resposta a um degrau de amplitude A for medida, é possível determinar os valores das constantes envolvidas na Equação (2). O ganho K é definido pela seguinte regra:

$$K = \frac{y(\infty) - y(0)}{A} \quad (3)$$

Vale ressaltar que $y(\infty)$ é o valor da função no tempo em regime permanente e $y(0)$ o valor da função no instante inicial. A Figura 7 apresenta um exemplo de diagrama de blocos de um sistema de malha fechada de primeira ordem.

Figura 7 – Sistema de malha fechada de primeira ordem



Fonte: Autor, 2023.

Um diagrama de blocos de um sistema é uma representação gráfica das funções desempenhadas por cada componente e do fluxo de sinais entre eles. O projetista traduz uma descrição qualitativa do sistema em um diagrama de blocos, que descreve as partes constituintes do sistema e mostra suas interconexões (NISE, 2011). Para Ogata (2011) em um diagrama de blocos, todas as variáveis do sistema são ligadas umas às outras por meio de blocos funcionais. As vantagens da representação de um

sistema por diagramas de blocos consistem no fato de sua fácil construção para todo o sistema pela simples interligação dos blocos componentes, de acordo com o fluxo de sinais, e pela possibilidade de avaliar a contribuição de cada componente para o desempenho global do sistema.

O sentido dos sinais entre os blocos é indicado por setas, juntamente com símbolos para efetuar a soma ou a subtração algébrica de sinais. A partir das informações detalhadas sobre o sistema fornecidas pelo diagrama de blocos, o projetista pode através de análises e de projeto, desenvolver um modelo esquemático. A representação do diagrama de bloco da Figura 7, de um sistema de primeira ordem, mostra que a relação entre o sinais de entrada e saída estão relacionados pela seguinte Equação (4):

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s) \cdot C(s)}{1 + G(s) \cdot C(s) \cdot H(s)} \quad (4)$$

Sendo as principais variáveis definidas como:

- $R(s)$: Sinal de entrada do sistema, chamado de sinal de referência, ou sinal desejado;
- $E(s)$: Sinal de entrada do controlador, chamado de erro atuante;
- $C(s)$: Ação de Controle;
- $U(s)$: Sinal de saída do controlador, chamado de variável manipulada;
- $G(s)$: Função de Transferência que representa o processo ou planta;
- $Y(s)$: Sinal de saída do sistema;
- $H(s)$: Representa a realimentação do controle, sendo na maioria das vezes um sensor.

Uma das especificações usuais, empregadas na análise de sistemas de controle dinâmico, é a sua resposta temporal quando sinais particulares são aplicados a suas entradas. Normalmente estes são sinais simples, tais como: impulso, degrau, rampa e senoidal, sendo o sinal ao degrau escolhido para a modelagem do presente estudo (NISE, 2011).

2.3.4.1 Resposta ao Degrau Unitário em Sistemas de Primeira Ordem

Uma entrada em degrau representa um comando constante. Tipicamente, o comando de entrada em degrau possui formas diferentes que a saída. Por exemplo,

se a saída do sistema é a temperatura, a entrada em degrau representa uma tensão elétrica aplicada a uma resistência elétrica, que tem como objetivo alcançar uma saída em temperatura, representando a Temperatura Real (PV). Os projetistas utilizam entradas em degrau, porque ambas as respostas, transitória e em regime permanente, são claramente visíveis e podem ser avaliadas. Conforme Nise (2011), depois que o engenheiro obtém uma representação matemática ou analítica de um subsistema, o subsistema é analisado quanto às suas respostas transitória e em regime permanente para verificar se essas características fornecem o comportamento desejado. A resposta ao degrau unitário do sistema de primeira ordem é dedicada à análise da resposta transitória do sistema.

“A resposta transitória é importante por razões estruturais, pois é uma resposta rápida que pode causar danos físicos permanentes” (NISE, 2011). Então, é preciso analisar o sistema e sua resposta transitória existente, estabelecendo definições quantitativas para a resposta transitória, ajustando os parâmetros ou componentes de projeto para produzir uma resposta transitória desejada. Como a transformada de Laplace da função degrau unitário é $R(s) = 1/s$, substituindo na Equação (2), é obtido:

$$Y(s) = G(s) \cdot R(s) = \frac{1}{T \cdot s + 1} \cdot \frac{1}{s} \quad (5)$$

Considerando a transformada inversa de Laplace da Equação (5), a resposta ao degrau é dada por:

$$y(t) = (1 - e^{-\frac{t}{T}}), \text{ para } t \geq 0 \quad (6)$$

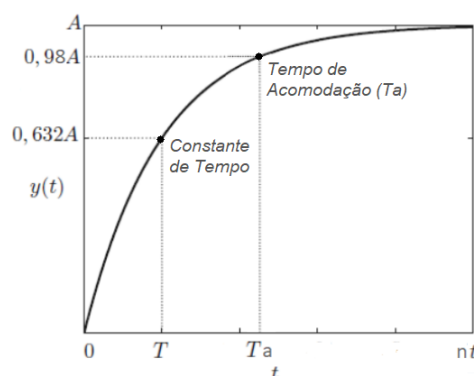
Castrucci, Bittar e Sales (2018) afirmam que uma das características importantes dessa resposta, é que aplicando $t = T$ na Equação (6), o valor da resposta de $y(T)$ é igual a 0,632, ou seja, a resposta $y(T)$ alcança 63,2% de sua variação total. Fisicamente, no instante T a principal parte da energia ou do significado da resposta já ocorreu. Por isso T é chamada de constante de tempo. Assim, para Nise (2011) a constante de tempo pode ser considerada uma especificação da resposta transitória para um sistema de primeira ordem, uma vez que ela está relacionada à velocidade com a qual o sistema responde a uma entrada em degrau. Portanto, em uma constante de tempo, a curva da resposta exponencial vai de 0% a 63,2% do valor final.

O Tempo de acomodação (T_a), ou tempo de assentamento, é definido como o tempo para que a resposta alcance e fique em uma faixa 2% em torno de seu valor final. Fazendo $y(T) = 0,98$ na Equação (6), é determinado o Tempo de acomodação como:

$$T_a = \frac{4}{W_n} \quad (7)$$

A constante W_n é considerada como o inverso da constante de tempo e tem a unidade de frequência. Assim, pode-se chamar o parâmetro W_n de frequência natural. Portanto, o Tempo de acomodação refere-se ao tempo necessário para que a resposta do sistema se estabilize dentro de 98% do seu valor em regime permanente. Um exemplo de gráfico de resposta ao degrau para $T > 0$, é mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Resposta ao degrau de um sistema de primeira ordem

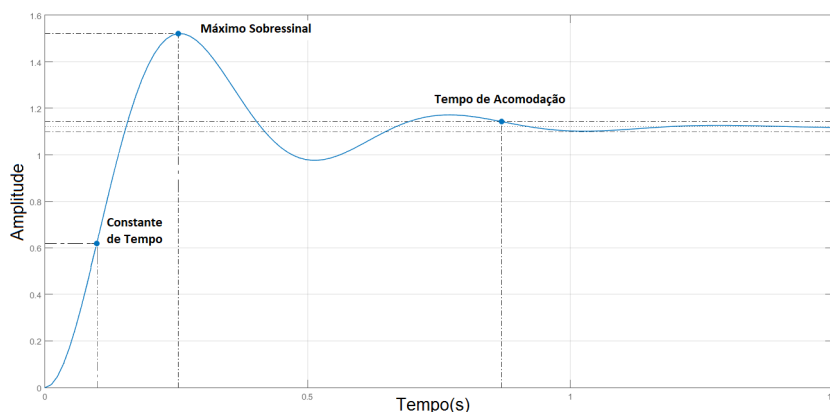


Fonte: Modificado de Castrucci, Bittar e Sales (2018).

2.3.5 Sistema de Segunda Ordem

Principalmente em sistemas de ordem superior (sistemas acima de primeira ordem), antes de alcançar o estado estacionário ou permanente, a resposta transitória apresenta, frequentemente, oscilações amortecidas caracterizadas pelos valor máximo de ultrapassagem ou sobressinal (M_p), mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Resposta temporal de um processo de segunda ordem a uma entrada em degrau



Fonte: Modificado de Madeira (2016).

Segundo Ogata (2011), a maioria dos sistemas de controle é no domínio do tempo, então estes devem apresentar respostas temporais aceitáveis, ou seja, é desejável que a resposta transitória seja suficientemente rápida e amortecida. Através das ações de controle é possível modificar a resposta transitória de modo a alcançar o regime permanente ou estacionário mais rapidamente com um amortecimento significativo que implica em um mínimo de sobressinal. Conforme Zambaldi (2026) um sistema compensador com realimentação é valioso porque dá ao engenheiro a capacidade de ajustar a resposta transitória, assim, o efeito de perturbações pode ser reduzido significativamente, o que na prática, representa um sistema mais confiável e eficiente.

Segundo Nise (2011), um sistema de segunda ordem pode apresentar características muito parecidas com as de um sistema de primeira ordem, ou dependendo dos valores dos componentes, apresentam oscilações amortecidas ou puras na resposta transitória. Essas grandezas podem ser utilizadas para descrever as características da resposta transitória de segunda ordem da mesma forma que as constantes de tempo descrevem a resposta dos sistemas de primeira ordem. Essas duas grandezas são denominadas frequência natural (W_n) e coeficiente de amortecimento (ξ). A frequência natural de um sistema de segunda ordem é definida pela frequência de oscilação do sistema sem amortecimento. Já o coeficiente de amortecimento é considerado um parâmetro fundamental em sistemas dinâmicos de segunda ordem, pois descreve a forma como que o sistema responde às variações de entrada e como essas respostas se decaem ao longo do tempo (NISE, 2011). Desta forma, o comportamento dinâmico dos sistemas de segunda ordem é determinado inteiramente pelos parâmetros ξ e W_n :

$$G(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{W_n^2}{s^2 + 2 \cdot s \cdot \xi \cdot W_n + W_n^2} \quad (8)$$

Analisando a Equação (8), é visto que a natureza da resposta obtida está relacionada com valor de ξ . Variações apenas do fator de amortecimento produzem uma variedade completa de respostas superamortecida, criticamente amortecida, subamortecida e não amortecida. O sistema de segunda ordem subamortecido pode representar um modelo comum para problemas físicos que envolvem controladores de temperatura, apresentando um comportamento único que deve ser pormenorizado. Uma descrição detalhada da resposta subamortecida é necessária tanto para a análise quanto para o projeto (NISE, 2011). Portanto, neste trabalho, foi definido um sistema subamortecido ($0 < \xi < 1$) para valores de resposta. No tipo de resposta subamortecida, os componentes da resposta de segunda ordem ao degrau se aproximam do valor em regime permanente através de uma resposta transitória que é uma oscilação amortecida.

2.3.6 Tipos de Controladores Industriais

De acordo com Ogata (2011), um controlador automático compara o valor real de saída da planta com a entrada de referência (valor desejado), determina o desvio e produz um sinal de controle que reduzirá o desvio a um valor pequeno, aproximadamente a zero. A maneira pela qual o controlador automático produz o sinal de controle é chamada ação de controle. Há diferentes tipos básicos de controladores que podem ser executados no ramo industrial, os principais são definidos como controle *ON/OFF*, o controle Proporcional (P), o controle Proporcional Integral (PI) e o controle Proporcional Integral Derivativo (PID). Cada um envolve o uso de alguma forma de controle em malha fechada para manter um processo característico em um valor pré-ajustado.

2.3.6.1 Ação de Controle de Duas Posições *ON/OFF*

Existem vários tipos de ações de controles, com diferentes maneiras de manter o nível de uma variável dentro de certos limites. O controle *ON/OFF* (liga/desliga) é provavelmente o tipo mais simples de controle automático. No controle liga/desliga de temperatura, a energia para a extrusora é totalmente ligada quando a medição de temperatura está abaixo do ponto de ajuste (*Setpoint*), e completamente desligada quando a temperatura medida está acima do ponto de ajuste. Portanto, neste controlador existem apenas dois níveis de entrada de energia possíveis: totalmente ligado ou totalmente desligado. Essencialmente em todos os casos práticos, o nível de potência elétrica necessário para manter uma certa temperatura estará sempre em 0 ou 100%.

Para Ogata (2011), no controle de duas posições, o sinal $u(t)$ permanece em um valor máximo ou em um valor mínimo, dependendo se o sinal do erro atuante $e(t)$ for negativo ou positivo. Considerando $U1$ e $U2$ são constantes, tem-se as seguintes condições:

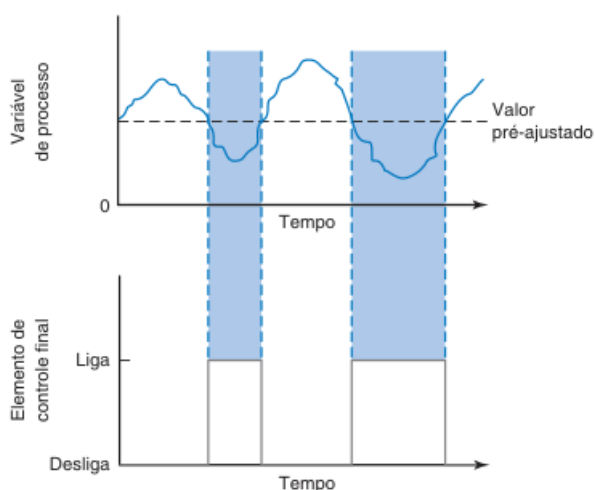
$$u(t) = U1, \text{ para } e(t) > 0$$

$$u(t) = U2, \text{ para } e(t) < 0$$

O intervalo no qual o sinal de erro atuante deve variar antes de ocorrer a comutação é denominado intervalo diferencial. Esse intervalo diferencial faz com que a saída $u(t)$ do controlador mantenha seu valor atual até que o sinal de erro atuante tenha variado ligeiramente além do valor zero. A amplitude da oscilação da saída pode ser reduzida pela diminuição do intervalo diferencial. A diminuição do intervalo diferencial, entretanto, aumenta o número de comutações *ON/OFF* por minuto e reduz a vida útil do componente (OGATA, 2011).

Para Rauwendaal (2014), um dos problemas ao se aplicar o controle liga/desliga ao aquecimento de extrusoras é o atraso térmico significativo, entre o momento em que o controlador solicita o calor da faixa do aquecedor e o momento em que o calor realmente atinge o sensor, resultando em superaquecimento e subresfriamento. A temperatura resultante deste tipo de controle liga/desliga estará flutuando em torno do ponto de ajuste, resultando em variações significativas de temperatura superior e inferior atribuídas ao atraso térmico causado pela enorme parede do cilindro, polímero e parafuso. Por essa razão, geralmente existe uma banda morta ou uma histerese da malha de controle em torno do ponto de ajuste, que é a diferença entre os pontos de operação liga e desliga, como mostra a Figura 10. A frequência e amplitude das flutuações de temperatura serão determinadas pelo atraso térmico da máquina em particular. Além disto, a ação de controle liga/desliga não garante precisão no controle e pode apresentar grandes desvios (*Offsets*) em relação ao *Setpoint* (SP), o que na prática, determina um consumo maior de energia.

Figura 10 – Curva característica de um controlador ON/OFF



Fonte: Petruzella (2014).

Outro problema deste tipo de controle liga/desliga é o possível efeito de distúrbios do processo e interferência de ruído elétrico, fazendo com que a saída alterne rapidamente conforme a temperatura ultrapassa o ponto de ajuste. Esta condição pode ser prejudicial para a maioria dos acionadores dos elementos de controle finais, como por exemplo, contadoras e relés elétricos (RAUWENDAAL, 2014). Assim, define-se o controle como simples, mas ultrapassagem e deslocamentos cíclicos podem ser desvantajosos na maioria dos processos, desta forma, o controle liga/desliga é usado quando não há necessidade de um controle com exatidão.

Uma vez estabelecida a importância do controle de temperatura em uma máquina extrusora, faz-se necessário então a utilização de uma ação de controle adequada

para esta aplicação, devendo possuir estabilidade e faixa restrita de variação. De forma a atender aos requisitos citados, pode utilizar-se de um controlador de malha fechada do tipo Proporcional, Integral e Derivativo (PID). O controlador PID é uma técnica de controle que faz uso de ação de controle Proporcional, Integral e do Derivativo simultaneamente. Os controladores PID também são muito empregados com efeitos parciais.

2.3.6.2 Ação de Controle P

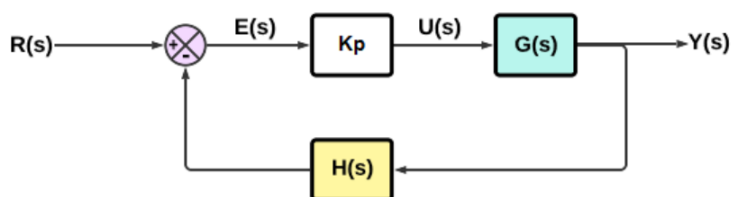
Para Jr, III e Jr (2005) a melhoria nos controladores veio com controladores Proporcionais (P), onde a entrada de energia é reduzida de 100% à medida que a temperatura se aproxima do ponto de ajuste. Petruzella (2014) define os controladores Proporcionais da seguinte forma:

(...) são projetados para eliminar as oscilações cíclicas associado ao controle liga/desliga, além de permitirem que o elemento final de controle tome posições intermediárias entre liga/desliga. Uma ação proporcional permite um controle analógico do elemento final de controle para variar a quantidade de energia para o processo, dependendo de quanto o valor da variável medida foi deslocado do seu valor pré-ajustado. Um controlador Proporcional permite um controle mais próximo da variável de processo, porque sua saída pode ter qualquer valor entre totalmente ligado ou totalmente desligado.

A relação entre a saída do controlador $u(t)$ e o sinal de erro atuante $e(t)$, para um controlador com ação de controle Proporcional, segundo Ogata (2011), é definida da seguinte forma, onde K_p é denominado ganho proporcional, normalmente adimensional:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (9)$$

Analisando a Equação (9), observa-se que a saída do controlador é proporcional ao sinal de erro, onde o ganho define o quanto a variável de controle deve variar em correspondência a uma variação do sinal de erro atuante (TANNURI, 2018). O sinal de K_p pode ser escolhido de forma a fazer com que a saída do controlador aumente (ou diminua) à medida que o desvio é elevado. Para Tannuri (2018), o ganho do controlador pode ser ajustado de forma a tornar a saída do controlador tão sensível quanto desejado aos desvios entre o SP e a PV. Portanto, o controlador Proporcional pode ser utilizado essencialmente como um amplificador com ganho ajustável. A Figura 11 apresenta um diagrama de bloco com malha fechada de um sistema utilizando um controlador P.

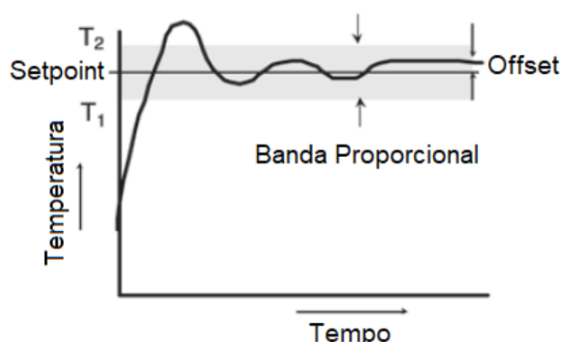
Figura 11 – Diagrama de blocos com ação de controle P

Fonte: Autor, 2023.

A Banda Proporcional (BP), dada em porcentagem sobre o ponto de ajuste, é a faixa de temperatura onde a potência está em algum valor proporcional entre 0 e 100%. No caso em que K_p é adimensional, a BP é definida como:

$$BP = \frac{100\%}{K_p} \quad (10)$$

BP menores corresponde a um valor elevado do ganho K_p , enquanto que um grande valor de BP corresponde a um valor diminuto de K_p . Em operações em máquinas extrusoras, as temperaturas passam por aumentos e diminuições até que um nível de equilíbrio seja alcançado (JR; III; JR, 2005). Por exemplo, considera-se um sistema realimentado de controle de temperatura, no qual a variável controlada varia de 100°C a 300°C, e o SP é 200°C, chegando a uma BP de 50%. Isso significa que a variação de controle foi de 50% do seu range. A diferença entre o ponto de ajuste e o nível de equilíbrio é chamada de *Offset*. A Figura 12 plota o tempo versus a temperatura para um controlador Proporcional.

Figura 12 – Variável de controle sobre ação do *Offset*

Fonte: Modificado de Tannuri (2018).

Na prática, os requisitos de potência da extrusora são baseados no calor necessário para processar o polímero. Se a interseção da curva da Banda Proporcional estiver abaixo do ponto de ajuste, há um deslocamento negativo, enquanto a interseção acima do ponto de ajuste é um deslocamento positivo, ocasionando em uma variação

em torno do ponto de ajuste, gerando assim, desvantagens ao utilizar somente controladores com ganho P (JR; III; JR, 2005). O controlador P apresenta incapacidade de eliminar erros estacionários que surgem após uma mudança de SP ou uma perturbação constante na saída (TANNURI, 2018). Infelizmente, a operação de um controlador P leva a um erro de estado estável conhecido como sinal de desvio (*offset*). Esse erro de estado estável ou em regime permanente é a diferença entre o valor obtido do controlador e o valor pré-ajustado que resulta em um sinal de desvio (*offset*), como ilustra a Figura 12 (PETRUZELLA, 2014).

A redefinição automática da BP para que a curva de perda de energia intercepte a Banda Proporcional no ponto de ajuste é feita por Integração (I). Portanto, uma forma de eliminar os problemas encontrados no controlador Proporcional é a utilização de um controlador contendo um termo Integral (*Ti*). Assim, é fornecida precisão para o controlador de longo prazo com mudanças nas condições externas e internas.

2.3.6.3 Ação de Controle PI

Admitindo que a variável de controle seja a potência térmica fornecida à extrusora. Se, num certo momento, a temperatura de extrusão atingiu o valor desejado, então a potência térmica fornecida ao sistema de aquecimento deve ser mantida inalterada. Para Tannuri (2018), esta situação em um controlador Proporcional não funcionaria, pois a potência térmica, sendo proporcional ao erro, resultaria nula. A ideia básica é definir um controlador tal que sua saída permaneça constante quando o sinal de erro é nulo. Uma maneira de conseguir esta característica é definindo a saída do controlador como sendo Proporcional à Integral do sinal de erro ao longo do tempo, isto é:

$$u(t) = Ki \int_0^t e(t) dt \quad (11)$$

Nesta expressão, *Ki* é uma constante ajustável, conhecida como ganho integral e *Ti* é chamado de tempo Integrativo ou tempo de *Reset*. Por meio da Equação (11), é possível analisar as características práticas de um controlador com ação Integral (I). Se o sistema está em regime permanente (ou regime estacionário), então tanto o sinal de erro $e(t)$ como o sinal de controle $u(t)$ são constantes. Mas, o termo Integral mostra que o sinal de controle variará com o tempo a menos que o erro atuante seja nulo. Portanto, quando a ação Integral é usada, o sinal de controle atingirá um valor constante que fará com que o erro estacionário seja nulo (TANNURI, 2018). Assim, conclui-se que um controlador com ação de controle Integral, tem como principal finalidade a eliminação do erro estacionário.

Na prática, o controle Integral raramente é utilizado sozinho, pois para que a variável de controle atinja um valor significativo, é preciso que o erro persista por um

certo tempo. Já o controle Proporcional atua simultaneamente com a ocorrência de um erro, ou seja, o controlador Proporcional toma uma ação corretiva quando um erro é detectado. Por esta razão, o controle Integral é normalmente utilizado em conjunto com o controle Proporcional, constituindo esta combinação do controlador Proporcional mais o Integral PI (TANNURI, 2018). A ação de controle de um controlador PI é definida por:

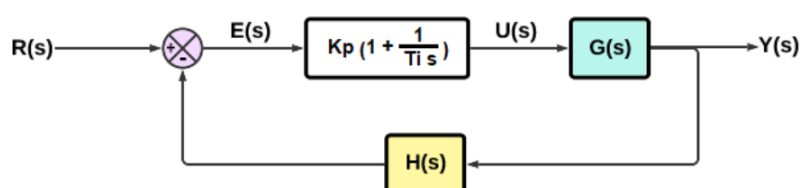
$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (12)$$

Ou, então, a Função de Transferência do controlador é definida como:

$$G(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s}\right) \quad (13)$$

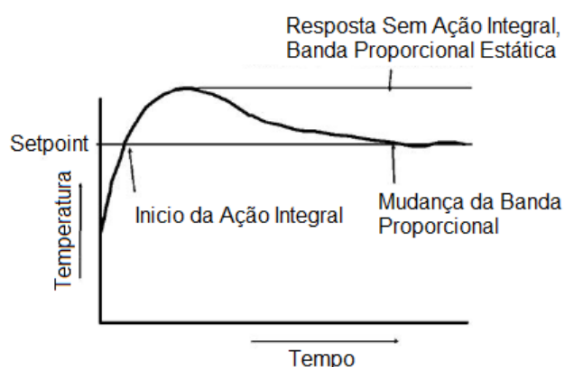
A Figura 13 apresenta um diagrama de bloco com malha fechada de um sistema utilizando um controlador com ação PI.

Figura 13 – Diagrama de blocos com ação de controle PI



Fonte: Autor, 2023.

Em um controlador PI, a constante de tempo Integral é o tempo necessário para a Banda Proporcional se mover. O movimento deve ocorrer de forma relativamente lenta para garantir que oscilações acima e abaixo do ponto de ajuste não sejam introduzidas. O integrador continuará ajustando a Banda Proporcional até que o desvio do ponto de ajuste para a curva de perda de potência seja zero. A Figura 14 mostra a curva de tempo versus temperatura para um controlador PI.

Figura 14 – Curva característica de um controlador PI

Fonte: Jr, III e Jr (2005).

Analisando a Figura 14, é possível observar que a temperatura excede o ponto de ajuste na inicialização, porque a reinicialização automática começa no limite inferior da Banda Proporcional. A ação Integral redefine a BP até que a temperatura esteja no ponto de ajuste (JR; III; JR, 2005). Uma desvantagem do uso da ação Integral é que ela tende a produzir respostas oscilatórias, implicando em uma redução da estabilidade do sistema (TANNURI, 2018). Logo, os controladores PI podem responder incorretamente se o integrador agir em um sinal de erro quando a temperatura estiver fora do limite Proporcional. Estes efeitos indesejáveis da ação de controle PI podem ser reduzidos incluindo a ação Derivativa, que tende a compensar os efeitos desestabilizantes.

2.3.6.4 Ação de Controle PID

Viu-se que um controlador Proporcional reage apenas a um desvio na temperatura, não sendo capaz de distinguir o intervalo de tempo em que o desvio se produz. Também foi visto que o termo Integral gera uma ação corretiva com base no intervalo de tempo passado em que o erro ocorreu. Segundo (TANNURI, 2018), a ação de controle Derivativa (D) tem um caráter antecipatório, sendo sua função reagir antecipadamente ao comportamento futuro do sinal de erro com base na sua taxa de variação.

Este caráter antecipatório introduzido nos controladores automáticos pela ação de controle Derivativa, faz com que a saída do controlador seja proporcional à taxa de variação da variável controlada. Ou seja, a ação de controle Derivativa pode ser expressa por:

$$u(t) = (Td) \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (14)$$

Em que Td é chamado de tempo Derivativo. Dessa maneira, o avanço produzido pelo termo Derivativo pode compensar o atraso introduzido por praticamente todas as malhas de controle (TANNURI, 2018). Observando a Equação (14), conclui-se que se

o erro atuante for constante, o valor do controle seria nulo. Portanto, a ação Derivativa dificilmente é utilizada sozinha. Este tipo de ação de controle, na maioria das vezes é usado em conjunto com um controlador PI. A combinação das ações de controle Proporcional, Integral e Derivativo é denominada PID. Essa ação combinada tem as vantagens individuais de cada uma das três ações de controle.

Para (CASTRUCCI; BITTAR; SALES, 2018) algumas arquiteturas especiais utilizando algoritmos clássicos, chamados de PID, têm demonstrado notável eficácia e praticidade no controle dos processos industriais. Os controladores PID, quando inseridos nos controladores lógicos programáveis, mantêm-se como um dos principais equipamentos de controle. Seus parâmetros são de fácil ajuste e sua construção é adequadamente robusta para o ambiente industrial.

Segundo Ferigollo (2017), o controlador PID calcula o “erro”, que é a diferença entre a variável controlada e o valor desejado (*Setpoint*), e em função dele gera um sinal de controle de forma a eliminar este desvio. Este tipo de controlador, adiciona mais estabilidade ao sistema, compensando as condições que mudam rapidamente, além de um tempo de resposta mais rápido. Este tipo de controlador é amplamente aplicado nas indústrias e busca obter sistemas cada vez mais eficientes, imunes a ruídos e o mais próximo do ideal possível. A equação de um controlador com essas ações PID combinadas, de acordo com Ogata (2011), é dada por:

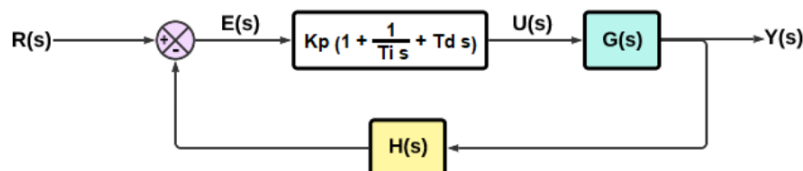
$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p \cdot (T_d) \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (15)$$

Assim, a Equação do controlador PID é definida como:

$$C(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + T_d \cdot s \right) \quad (16)$$

A Figura 15 apresenta um diagrama de bloco com malha fechada quando utilizado um controlador com ação PID.

Figura 15 – Diagrama de blocos com ação de controle PID

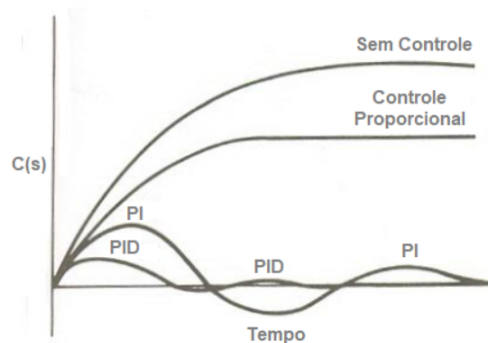


Fonte: Autor, 2023.

Segundo Jr, III e Jr (2005), quando a temperatura da máquina extrusora excede o ponto de ajuste, o sinal derivativo muda de sinal e o integrador traz a Banda Proporcional

de volta à posição. O termo Derivado permite que a Banda Proporcional seja estreitada enquanto evita oscilações. A Figura 16 apresenta a resposta típica de um controlador com termos PID, comparado com os controladores aplicados de forma parcial (P e PI).

Figura 16 – Respostas típicas de um controlador com termos PID



Fonte: Tannuri (2018).

Através da curva de resposta de um controlador PID, demonstrado pela Figura 16, observa-se que um controlador com ação Proporcional torna a resposta mais rápida e reduz o erro estacionário. A adição de um termo Integral elimina o erro estacionário, mas tende a fazer com que a resposta fique mais oscilatória. A inclusão de um termo Derivativo reduz tanto a intensidade das oscilações como o tempo de resposta (TANNURI, 2018). Desta forma, conclui-se que o controlador PID se torna muito vantajoso, quando comparado aos outros tipos de ações de controle apresentados, pois tem a capacidade de reduzir os erros e fornecer precisão, estabilidade e eficiência ao processo. Porém, o ponto mais importante em um controlador PID, está na determinação dos parâmetros do controlador, pois são estes que ditarão as especificações do regime transitório e permanente do sistema.

2.3.7 Parâmetros de Controle PID

Os parâmetros de controladores PID (constantes K_p , K_i e K_d) necessitam ser ajustados para que o controle atinja o seu objetivo. Há vários métodos para realizar essa tarefa. O método proposto para obtenção dos parâmetros de controle PID, foi baseado no desenvolvimento das equações apresentadas abaixo. Como já visto, as Equações (2), (4) e (16), que representam um sistema de controle de primeira ordem, a Função de Transfêrencia $G(s)$ e o controlador $C(s)$ PID, são definidas, respectivamente, como:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{G(s) \cdot C(s)}{1 + G(s) \cdot C(s) \cdot H(s)}$$

$$G(s) = \frac{K}{T \cdot s + 1}$$

$$C(s) = Kp \cdot \left(1 + \frac{1}{Ti \cdot s} + Td \cdot s\right)$$

Uma simplificação feita, para que não comprometesse o equacionamento matemático, foi considerar o sensor com resposta imediata, mesmo porque sua constante de tempo não tem influência tão significativa para o sistema em questão (MELO, 2007). Analisando-se o sistema que se deseja projetar, destaca-se o fato de que o valor de sobressinal é irrelevante, visto que será aguardado certo tempo após a temperatura alvo ser atingida, por se tratar de uma planta de controle com resposta lenta. Por motivos de simplificação e praticidade, a necessidade da variável Derivativa (Td) tornou-se menos relevante para o controlador a ser projetado, pois os resultados, ao longo do projeto indicaram que, para esse controlador de aquecimento uma ação Derivativa não se faz necessária. Com apenas as duas constantes, combinando as características dos dois tipos de controles Proporcional mais Integral (PI), já é possível projetar um bom controlador para o sistema.

Substituindo as Equações (2) e (16) e considerando o ganho do sensor unitário $H(s) = 1$, e o termo Derivativo como $Td = 0$, chegou-se através da Equação (4) no seguinte resultado:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{Kp \cdot K \cdot s + Ki \cdot K}{s^2 \cdot T + s + Kp \cdot s + Ki \cdot K} \quad (17)$$

Dividindo o denominador e numerador pela constante de tempo, foi obtido a seguinte Equação (18) de segunda ordem:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{\left(\frac{Kp \cdot K}{T}\right) \cdot s + \left(\frac{Ki \cdot K}{T}\right)}{s^2 + s \cdot \left(\frac{Kp \cdot K + 1}{T}\right) + \left(\frac{Ki \cdot K}{T}\right)} \quad (18)$$

Através da Equação (8), viu-se que a equação característica de um sistema de segunda ordem é dada por:

$$s^2 + 2 \cdot s \cdot \xi \cdot W_n + W_n^2 = 0$$

Comparando a equação característica de segunda ordem com o denominador da Equação (18) calculada, chega-se aos seguintes resultados:

$$2 \cdot \xi \cdot W_n = \frac{Kp \cdot K + 1}{T} \quad (19)$$

$$W_n^2 = \frac{Ki \cdot K}{T} \quad (20)$$

Isolando as variáveis desejáveis para compensação do sistema, encontra-se os parâmetros do controlador PI, sendo:

$$K_p = \frac{(2 \cdot \xi \cdot W_n \cdot T) - 1}{K} \quad (21)$$

$$K_i = \frac{W_n^2 \cdot T}{K} \quad (22)$$

Para dimensionar a frequência natural em sistemas de segunda ordem é preciso calcular o Tempo de acomodação do sistema em questão. As definições para o Tempo de acomodação são basicamente as mesmas encontradas para respostas em sistemas de primeira ordem, diferenciando apenas pela implementação do coeficiente de amortecimento. O tempo necessário para que a resposta ao degrau passe a permanecer dentro de uma faixa de tolerância de 2% em torno do valor final, para sistemas de segunda ordem, é definida como:

$$T_a = \frac{4}{\xi \cdot W_n} \quad (23)$$

Observa-se que através da Equação (23) para cálculo do Tempo de acomodação (T_a), pode-se chegar ao valor da frequência natural (W_n) do sistema. Com base nas resoluções das equações apresentadas, conclui-se que, com a FT, T_a e ξ definidos, é possível obter os parâmetros de controle PI (K_p e K_i).

2.4 Controle de Potência

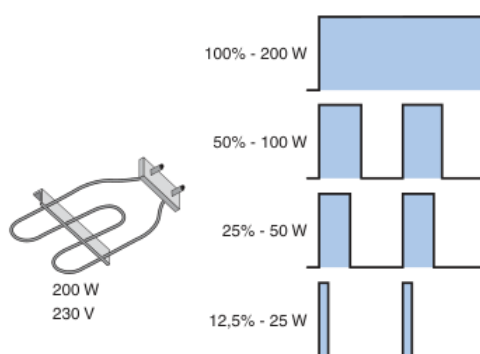
O sistema de controle em malha fechada com ações PID é capaz de verificar o erro comparando o valor desejado com o valor da variável de controle, transmitida a partir do sensor de temperatura e fazer a imediata correção, variando a tensão elétrica sobre o sistema de aquecimento, através de um controle de potência. O controlador de potência é um equipamento voltado para um controle preciso no uso de cargas elétricas, onde seu principal objetivo visa a economia de energia elétrica nos processos industriais. Em máquinas extrusoras encontra-se uma grande quantidade de cargas resistivas, uma passagem da energia elétrica em níveis controlados às resistências elétricas, na medida da necessidade específica da demanda, gera economia de energia e inteligência ao processo industrial controlado (ZAMBALDI, 2026). Desta forma, são requisitados controladores de potência com configurações de maior rendimento e economia, como as que fazem uso da tecnologia de Modulação por Largura de Pulso (PWM).

2.4.1 Tecnologia PWM

A Modulação por Largura de Pulso (PWM) é um sinal totalmente digital pois em qualquer dado instante de tempo, a alimentação está totalmente ligada ou completamente desligada. Esta técnica de modulação pode ser utilizada para fornecer uma fonte elétrica à carga de forma analógica, por meio de uma série repetitiva de impulsos de ligar e desligar (SILVEIRA, 2018). Segundo Petruzella (2014), uma ação Proporcional (P) pode ser obtida através do chaveamento (liga/desliga) de um elemento final de controle com intervalos curtos de tempo. Essa proporcionalidade no tempo, conhecida como Modulação por Largura de Pulso, varia a taxa de tempo do chaveamento.

Este método de controle de potência é comumente utilizado para controlar a tensão, pois a tensão de saída é uma onda modulada por largura de pulso, controlada pela variação da duração dos pulsos. O PWM nada mais é do que uma técnica que controla a largura dos pulsos de um sinal digital para simular diferentes níveis de potência ou tensão, permitindo a reprodução de sinais analógicos de forma eficiente. Nesta técnica, através do uso de circuitos de acionamento elétrico com alta velocidade de comutação, o ciclo de trabalho (*Duty Cycle*) de uma onda quadrada é modulado para codificar um nível de sinal analógico específico, para atender os requisitos de uma aplicação desejada. A Figura 17 mostra um exemplo de um sinal PWM usado para produzir uma potência variável no elemento aquecedor.

Figura 17 – PWM na aplicação de energia para um elemento de aquecimento



Fonte: Petruzella (2014).

Duty Cycle (DT) é a proporção de tempo que uma carga ou circuito encontra-se no estado ligado em comparação com o tempo em que a carga ou circuito está desligado. Portanto, a relação entre o tempo de duração do pulso e o tempo de um ciclo completo de operação do acionamento elétrico define o DT. Segundo Nascimento (2018), para obter uma tensão intermediária, ou seja, 50% aplicada a carga, uma ideia é fazer com que o chaveamento elétrico seja aberto e fechado rapidamente de modo a ficar 50% do tempo aberto e 50% fechado, totalizando um *Duty Cycle* de 50%. Isso significa que, em média, tem-se metade do tempo com potência elétrica e a outra

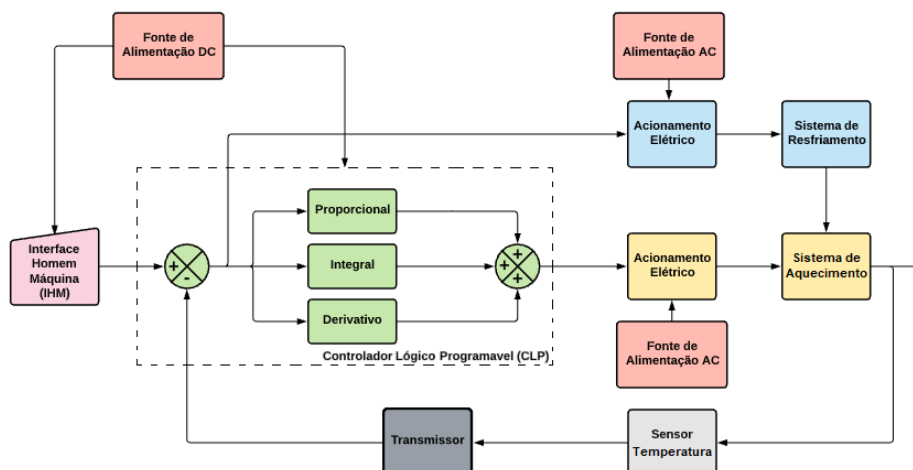
metade do tempo sem potência a carga. Na prática, o circuito de acionamento elétrico é substituído por algum dispositivo de estado sólido, que pode abrir e fechar o circuito rapidamente.

3 METODOLOGIA

3.1 Protótipo Didático

A partir da pesquisa bibliográfica do processo de extrusão e das diferentes técnicas de automação e controle, deu-se início a implementação desses conhecimentos em um aparato que realizasse a simulação do processo de controle de temperatura encontrado em máquinas extrusoras. No estudo de sistemas de controle, o projetista deve ser capaz de modelar sistemas dinâmicos em termos matemáticos e analisar suas características físicas através de experimentos em protótipos. Segundo Castrucci, Bittar e Sales (2018), deficiências inevitáveis dos modelos e do conhecimento dos sinais, além de limitações das teorias, levam ao fato de que o desenvolvimento completo de um controlador real consiste em cálculos, simulações, experimentos em escala reduzida em protótipos e, finalmente, se possível, ensaios na realização final.

Para Ogata (2011) uma planta pode ser considerada uma parte de um determinado equipamento ou apenas um conjunto de componentes, que funcione de maneira integrada, com o objetivo de realizar determinada operação. O presente trabalho teve como finalidade, o desenvolvimento de um protótipo, para simulação de um sistema de controle de temperatura com boa estabilidade e confiabilidade para uma máquina extrusora. Neste projeto, teve como objetivo tornar próximo de nulo as oscilações de temperatura em um protótipo de zona de aquecimento, propondo o desenvolvimento de um controle PI, corrigindo a inércia térmica tradicionais encontradas em alguns sistemas de controle (os do tipo *ON/OFF* por exemplo). Essa abordagem não apenas melhora a estabilidade do sistema, mas também proporciona uma visualização gráfica da temperatura real da planta por meio de uma interface operacional. Isso permite ao operador uma atuação proativa, possibilitando intervenções preventivas, como a interrupção do processo diante de irregularidades, ocasionando no acionamento do sistema de alarme (NASCIMENTO, 2018). A Figura 18 apresenta um diagrama em blocos do sistema proposto.

Figura 18 – Diagrama em blocos dos processos para controle de temperatura

Fonte: Autor, 2023.

Analisando o diagrama de blocos do protótipo destinado a simulação de uma das zonas de temperatura de uma máquina extrusora, concluiu-se que a saída ou variável manipulada do sistema de controle proposto é a temperatura. A temperatura do processo é medida por um sensor, que é um dispositivo analógico. O sinal analógico de temperatura é convertido em um sinal também analógico, mas de outra grandeza através do transmissor. O sinal obtido é fornecido ao controlador, que internamente utiliza um conversor A/D (Analógico/Digital), para converter o sinal. Esse sinal digital é comparado com a temperatura programada de referência, disponibilizada pela IHM, e se houver alguma divergência (erro), o controlador envia um sinal ao aquecedor, por meio de um acionamento elétrico, fazendo que a temperatura atinja o valor desejado. Caso a temperatura exceda indesejadamente o valor programado pelo operador, o controlador tenderá a corrigir o erro através do sistema de resfriamento.

Portanto, a planta de controle (ou processo) é definida como o sistema de aquecimento e resfriamento. Os atuadores são os dispositivos elétricos responsáveis pelo aquecimento e resfriamento da planta de controle. A ação de controle é a variável controlada, pois representa a resposta do controlador, que neste projeto representa níveis de tensão elétrica aplicada ao processo.

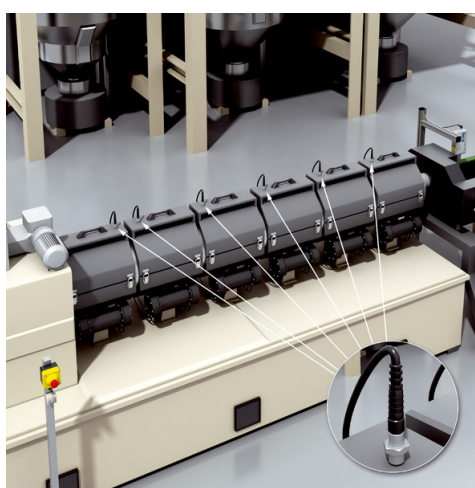
A partir de um diagrama, mostrado na Figura 18, foram definidos os requisitos do sistema e as variáveis de entrada e saída para o controle do protótipo didático. Com base nesse diagrama, foi possível especificar detalhadamente cada componente e equipamento elétrico envolvido no sistema. Toda a montagem da estrutura e ensaios foram desenvolvidos na residência do pesquisador e no Laboratório de Instrumentação do Departamento de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC). Os tópicos seguintes desta seção mostram com mais detalhes cada componente e equipamento elétrico utilizados ao longo do projeto.

3.1.1 Sensor de Temperatura

Segundo Chung (2019), uma extrusora moderna vem bem equipada com diversos instrumentos de medição para controlar as variáveis operacionais e monitorar o desempenho. Instrumentos para monitorar as seguintes variáveis operacionais e desempenho de uma extrusora são extremamente essenciais. Os sensores são instrumentos que fornecem os dados de entrada para o sistema de controle, estes dados são as variáveis a serem controladas ou modificadas. Para Ogata (2011), o sinal de controle ou a variável manipulada é a grandeza ou a condição modificada pelo controlador, de modo que afete o valor da variável controlada. Normalmente, a variável controlada é a saída do sistema. Esse elemento está no ramo de realimentação do sistema de malha fechada.

Para medir a grandeza ou condição a ser controlada, foi utilizado um sensor analógico. Os sensores analógicos produzem uma saída que é proporcional a uma propriedade de medida, como a temperatura (LAMB, 2015). Os sensores analógicos são chamados de transdutores, pois possuem a finalidade de converter uma energia de determinada natureza em outra. Um sinal do sensor analógico se comunica com o controlador, indicando se o aquecedor deve ser ligado ou desligado no processo de extrusão. Para que o controlador e os aquecedores funcionem corretamente, o sensor deve operar adequadamente. Por motivos de resposta rápida e inequívoca, o sensor de controle deve estar próximo à fonte de aquecimento e resfriamento (STEVENS; COVAS, 1995). A Figura 19 apresenta um sensor de temperatura instalado em uma máquina extrusora.

Figura 19 – Sensor de temperatura instalado em máquina extrusoras



Fonte: Sick (2024).

Para medição da temperatura foi utilizado o sensor analógico de temperatura resistivo, conhecido como Detector de Temperatura de Resistência (RTD). Para Engineering (2015), este sensor de temperatura do tipo condutor, usa um elemento de metal

para medir a temperatura, através da variação de sua resistência elétrica. Seu princípio de funcionamento se baseia na relação diretamente proporcional entre a variação da resistência elétrica (ôhmica) do elemento resistor e a temperatura a qual ele é exposto. A resistência da maioria dos metais aumenta com a temperatura, assim, medindo a resistência, pode-se determinar a temperatura (BERTOLETI, 2020).

Foi escolhido o sensor RTD de modelo PT100, que é um instrumento de medição de temperatura que proporciona excelente estabilidade, precisão e repetibilidade. Este sensor de temperatura é frequentemente usado na produção de polímeros devido à sua resistência mecânica, pois utiliza uma ponta de detecção protegida por um metal (CHUNG, 2019).

3.1.2 Transmissor de Temperatura

“Geralmente, dependendo do modelo do controlador escolhido, as saídas da instrumentação não podem ser lidas por outros aparelhos eletrônicos, por isso são conectadas aos transmissores, que convertem os sinais em faixas padrões” (LAMB, 2015). Os transmissores de temperatura convertem o sinal do sensor em um sinal de saída conhecido pelas entradas analógicas do CLP, dito isso, envolve a conversão de sinais de entrada e de saída para serem utilizados de forma útil. É um equipamento que recebe o sinal de um sensor e modula um sinal de referência, por exemplo, sinais de 4 a 20 mA, ou de 0 a 10 V, de forma proporcional ao sinal do sensor. A transferência dos valores é feita de forma segura e rápida e pode ser realizada à distância.

Como regra geral, a saída do transmissor é diretamente proporcional à variável medida, ou seja, o aumento da variável produz aumento na saída do transmissor. Para o projeto, foi utilizado um transmissor de temperatura PT100 para RTD. Esses transmissores são projetados para converter possíveis variações ou mudanças na resistência elétrica, que estão sob efeito da temperatura, em outros sinais de saída padronizados. Este modelo de transmissor transmite em sua saída uma corrente elétrica que varia de 4 a 20 mA, que se torna proporcional com o sinal de entrada do sensor e a temperatura medida. O devido transmissor de temperatura pode converter a temperatura de 0 a 200°C para um sinal de saída de 4 a 20mA.

3.1.3 Controlador Lógico Programável

Castrucci, Bittar e Sales (2018) afirma que controlar a saída de uma planta ou de um processo por realimentação significa aplicar na sua entrada, o sinal resultante da diferença entre o valor desejado e o valor medido da saída. Este tratamento do sinal é realizado pelo controlador, que consiste numa das maiores responsabilidades da engenharia de controle.

A variável a ser controlada (temperatura) é medida, através do sensor, e estas informações são enviadas para uma unidade de controle central. A unidade de controle central também pode ser classificada de acordo com a espécie de energia empregada na operação, como controladores pneumáticos, hidráulicos ou eletrônicos. Segundo Ogata (2011) a escolha do tipo de controlador a ser utilizado deve ser decidida com base na natureza da planta e nas condições de operação, incluindo certas considerações como segurança, custo, disponibilidade, confiabilidade, precisão, peso e tamanho. Dentre todos os critérios para determinação do tipo de controlador, responsável pela lógica, escolheu-se o CLP.

De acordo com a National Electrical Manufacturers Association (NEMA), o CLP trata-se de um “aparelho eletrônico digital que utiliza uma memória programável para o armazenamento interno de instruções para implementações específicas, tais como lógica, sequenciamento, temporização, contagem e aritmética, para controlar através de módulos de entrada e saída vários tipos de máquinas e processos” (PAREDE; GOMES, 2011).

Os controladores lógicos programáveis são hoje a tecnologia de controle de processos industriais mais amplamente utilizada. Um CLP é um tipo de computador industrial que pode ser programado para executar funções de controle (PETRUZELLA, 2014). Segundo Rosato (2013), os controles microeletrônicos CLP eliminaram muitos erros humanos, em potencial na configuração da linha, como erros de entrada de dados e erros devido ao conhecimento insuficiente de extrusão. Eles representam uma grande oportunidade para melhorar a confiabilidade da configuração do processo, eliminando os ajustes manuais da máquina que podem penalizar a taxa de produção e a qualidade dos produtos.

Em razão de suas características físicas, os CLPs são considerados equipamentos robustos, pois são preparados para condições severas, como por exemplo ambientes industriais agressivos, com poeira, umidade, variações de temperatura, vibrações, impactos e ruídos elétricos. Nos CLPs é possível realizar diferentes configurações através da lógica de programação, permitindo a realização de operações que envolvem mecanismos de alarme, com sinalizações sonoras e visuais, sistemas de análise de desempenho e diagnóstico do processo de extrusão. Assim, o sistema não se torna preso a um determinado tipo de tarefa, como apenas controlar a temperatura. Outra vantagem importante é o aumento do número de variáveis controladas, quando comparado a um controlador convencional de temperatura.

No controle de temperatura o CLP tem a função de medir o valor da variável controlada do sistema e aplicar o sinal de controle ao sistema para corrigir ou limitar os desvios do valor medido a partir de um valor desejado. Para que um sistema dinâmico seja controlado de maneira automatizada, as ações de controle são executadas pelo

CLP, onde é implementado a ação de controle PID.

O CLP foi utilizado no projeto para funcionar como um painel de controle central, desejável para simplificar a operação. Assim, as configurações necessárias para toda a operação da linha de processo, são programadas em uma única unidade de controle. O controlador industrial escolhido para o protótipo foi o CLP LOLLETTE, modelo FX3U-14MT. De acordo com o *datasheet* do fabricante, tal CLP contém uma entrada de 24VDC em sua fonte de alimentação, um processador dedicado a lógica a transistor, e uma porta de comunicação isolada. O CLP dispõe de uma porta serial RS232, utilizada para comunicação entre o computador, sendo possível transferir (gravar) o código fonte dentro do microcontrolador, além de interfacear com IHM. Este modelo de CLP suporta 14 pontos digitais (8 entradas digitais e 6 saídas digitais) e 6 pontos analógicos (4 entradas analógicas e 2 saídas analógicas). Das entradas analógicas, três operam na faixa de 0 a 10VDC e três na faixa de 4 a 20mA. Já as duas saídas analógicas operam em 0 a 10VDC. A conversão A/D é feita em 12 Bits codificados em binário.

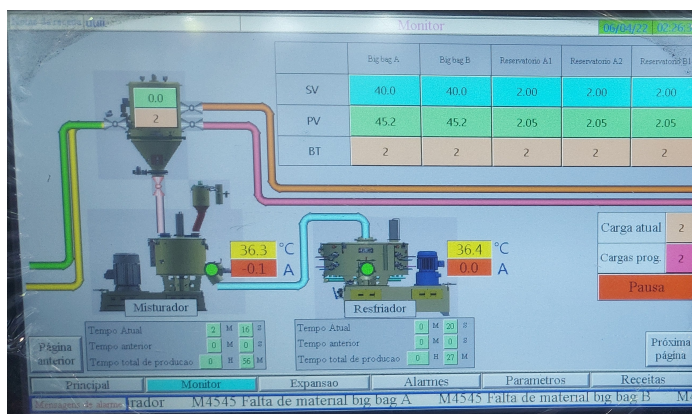
Este modelo de CLP escolhido utiliza transistores como dispositivos eletrônicos para suas saídas digitais, que para Freitas (2014), são utilizados para promover comutações em alta velocidade com baixas amplitudes de correntes e tensão elétricas, possibilitando a implementação de controle de potência com a tecnologia PWM. Por serem elementos estáticos, o chaveamento com transistores são perfeitos para aplicações em processos de extrusão que utilizam controle de temperatura, pois possuem maior vida útil, quando comparados a controladores com saídas digitais a relés, com fechamento mecânicos, que apresentarem grande desgastes ao longo do tempo.

3.1.4 Interface Homem Máquina

Para Lamb (2015), os operadores precisam interagir com as máquinas que controlam a fim de ativar dispositivos ou processos para obter os estados de retorno. Para tal tarefa, são utilizados dispositivos de entrada dedicados, conhecidos como IHM, onde se encontram teclados especiais e monitores de vídeo, que proporcionam uma melhoria significativa para a interface do usuário.

Com a grande difusão do CLP, surgiram novas necessidades do usuário, como por exemplo, a possibilidade de modificar certos parâmetros dentro de um programa sem a necessidade de conectar-se a um computador para realização desta tarefa (BASTOS *et al.*, 2005). Segundo Quelho (2018), as IHMs geralmente são utilizadas quando a instalação dos CLPs necessitam de um equipamento capaz de interpretar os dados coletados no processo e fornecer de forma visível e prático, através de uma tela, mostrando as informações que os supervisores necessitam. A Figura 20 apresenta uma IHM sendo utilizada na prática para automação de uma máquina extrusora.

Figura 20 – Interface operacional de uma máquina extrusora



Fonte: Autor, 2023.

Este dispositivo que se comunica diretamente com o CLP é utilizado principalmente para visualizar dados do processo que executem funções de monitoramento, controle de máquinas e processos industriais. É por meio da IHM que o operador pode interagir com o sistema controlado, exercendo uma função extremamente importante, pois, com as informações recebidas da IHM, pode-se realizar intervenções que mantenham a segurança, o bom funcionamento e a disponibilidade de serviços. Todas estas ações resultam em uma linha operacional mais confiável (PAREDE; GOMES, 2011).

Em sistemas automatizados, as interfaces operacionais oferecem um meio de entrada, permitindo que o usuário envie sinais ou dados para o controlador, possibilitando que o sistema controle ou monitore os efeitos da manipulação dos usuários. A interface operacional designada para o protótipo didático foi da marca SAMKOON, modelo EA-043A. A principal característica considerada para a determinação do modelo de IHM, foi o tipo de comunicação, pois o protocolo de comunicação tem que ser compatível com o modelo de CLP escolhido, já que é preciso estabelecer um elo ou vínculo (*Link*) de comunicação entre eles. O protocolo de comunicação é um método padronizado para a transmissão de dados e/ou estabelecimento de comunicações entre dispositivos diferentes. Este modelo de IHM tem como parâmetros técnicos principais um *Display* de Cristal Líquido (LCD) com tela sensível ao toque (*Touch Screens*) de 4,3 polegadas, tensão de alimentação de 24 VDC, consumindo uma corrente elétrica máxima de 1 A em seu funcionamento.

Para Lamb (2015), uma IHM com tela sensível ao toque é um *display* eletrônico visual que detecta a presença e a localização de um toque executado nele, permitindo assim, uma interação direta com o que é exibido na tela. Terminais com IHM gráfica oferecem uma interface eletrônica com uma ampla variedade de tamanho e configurações, substituindo os painéis com fiações, pois com um monitor sensível ao toque é possível realizar representações gráficas de chaves e indicadores. A IHM está equipada com comunicação serial, que possibilita a comunicação com o equipamento CLP, realizada

serialmente através do protocolo RS-232.

3.1.5 Relé de Estado Sólido

Da unidade de controle, um sinal é enviado para o sistema de aquecimento, que ajusta o processo de modo que a variável de controle seja o mais próximo possível do valor desejado (ponto de ajuste). O controlador de temperatura (CLP) não é capaz de lidar com as altas correntes elétricas necessárias para alimentar o sistema de aquecimento. Por este motivo, um relé elétrico está ligado entre o controlador de temperatura e a faixa de aquecimento.

Uma vez que foi estabelecida a importância do controle de temperatura em uma máquina extrusora, faz-se necessário então a utilização de um sistema de controle com acionamento elétrico adequado para esta aplicação, devendo possuir estabilidade e faixa restrita de variação. Através destas informações, viu-se a necessidade de utilizar controladores que possuem saída a relé de estado sólido, também conhecido como Relé de Estado Sólido (SSR).

Os SSRs são semicondutores que podem ser utilizados no chaveamento de cargas resistivas em circuitos de potências elevadas a partir de sinais com baixa potência aplicada a sua entrada, ou seja, exige uma potência relativamente baixa do circuito de controle para alterar o seu estado. Os SSRs possuem como principal qualidade a velocidade de comutação, sendo bastante útil em controles que utilizam PWM. Através destas vantagens, os SSRs se tornam muito mais viáveis em relação aos relés comuns e contatoras em sistemas de controle de temperatura, pois não possuem partes móveis e componentes mecânicos. Neste caso, é possível aplicar frequências mais altas de comutação, sem a preocupação da diminuição da vida útil causada pelo desgaste mecânico do equipamento (ZAMBALDI, 2026).

Acionamentos elétricos que utilizam transistores podem variar linearmente a potência aplicada pelo controle, diretamente da tensão e corrente elétrica. O controle acaba dissipando menores potências em seus componentes quando é aplicada carga. Na eletrônica moderna, o rendimento com pequenas perdas e a ausência de grandes dissipadores que ocupem espaço é fundamental, principalmente quando circuitos de alta potência estão sendo controlados (GHIRARDELLO, 2000).

O SSR escolhido foi da marca FOTEK, que possui como dados de entrada uma tensão de operação, ou tensão de disparo de 3 a 32 VDC. Já os dados de saída do SSR, estão parametrizados em uma tensão elétrica de operação em 24 até 380 VAC. O tempo de comutação levado pelo SSR para atingir os estados de nível lógico alto e baixo é de 10ms.

3.1.6 Resistência Elétrica de Aquecimento

Segundo Jr, III e Jr (2005) os aquecedores ajudam a aquecer e derreter o polímero, controlando a temperatura nas diferentes zonas, evitando o superaquecimento e a degradação do material. Os aquecedores estão localizados ao longo do cilindro na máquina extrusora, com sensores instalados em cada zona, para controlar os aquecedores e a temperatura do cilindro. Cada zona é controlada independentemente para que um perfil de temperatura possa ser mantido ao longo da extrusora. Os aquecedores cobrem o máximo possível de área de superfície do cilindro, minimizando os pontos quentes e frios ao longo do comprimento do barril, como mostra a Figura 21.

Figura 21 – Resistência elétrica de aquecimento instalada em máquinas extrusoras



Fonte: Autor, 2023.

“Essencialmente, a energia fornecida ao material que está sendo extrudado é composta de uma energia térmica que é aplicada por uma variedade de tecnologias de aquecimento” (BOUVIER; CAMPANELLA, 2014). Os aquecedores dos cilindros mais comuns são aquecedores de resistência elétrica. Isso é baseado no princípio de que se uma corrente passa por um condutor, uma certa quantidade de calor é gerado, dependendo da resistência do condutor e da corrente que passou por ele (RAUWENDAAL, 2014).

A Resistência de Aquecimento ocorre devido a conversão de energia elétrica em calor por meio do processo de aquecimento Joule. Este processo de aquecimento de uma resistência pode acontecer por diferentes razões, como o comprimento, extensão do condutor ou a intensidade da corrente elétrica. As resistências elétricas apresentam ampla variedade de modelos e especificações, para melhor atender às necessidades do mercado industrial, principalmente em aplicação específica em sistemas que envolvem aquecimentos. No que diz respeito à sua construção e forma, eles são diferenciados em bandas de aquecimento com isolamento de mica ou cerâmico. O dispositivo elétrico para promover o aquecimento no protótipo foi a resistência à placa de mica.

A resistência de placa de mica é utilizada em máquinas extrusoras pois propor-

cionam um aquecimento uniforme e muito eficiente, além de possuir fácil instalação e manutenção, oferecendo diversos benefícios aos equipamentos. Este dispositivo de aquecimento industrial, pode ser facilmente controlado utilizando um sensor de temperatura, que pode ser instalado na superfície onde é aquecida. A resistência escolhida para o projeto possui como características uma potência elétrica de 500W, e seu revestimento externo é de aço inox, possibilitando alta durabilidade.

3.1.7 Sistema de Resfriamento

“Extrusoras modernas que operam em altas velocidades de rosca geralmente geram quantidades excessivas de calor, e as zonas do cilindro ficam superaquecidas a menos que sejam resfriadas” (CHUNG, 2019). O resfriamento da extrusora na maioria das operações é um mal necessário. Para Rauwendaal (2014), se a maior parte da energia for fornecida pelo movimento rotativo do parafuso, há uma chance razoável de que a geração de calor interno local no polímero seja maior do que o necessário para manter a temperatura de processo desejada. Assim, geralmente é necessária alguma forma de resfriamento.

A solução para esse tipo de problema é a instalação de um sistema de resfriamento, para que evite o superaquecimento da máquina extrusora, permitindo assim um funcionamento constante e livre de problemas com altas temperaturas. Caso a temperatura exceda a estipulada pelo operador, é acionado o sistema de resfriamento, promovido por ventilação. A maioria das extrusoras usam resfriamento de ar forçado, provocados por motores elétricos acoplados com sopradores. Nesse caso em específico de equipamentos que trabalham com variações de temperatura, como máquinas extrusoras, é utilizado micro ventilador do tipo *blower*, que pode ser utilizado como ventilador, soprador ou até mesmo exaustor. Para o protótipo, foi utilizado um motor elétrico retirado de sucatas de eletrodomésticos, acoplado com hélices de aço, para promover o sopramento de ar. Este motor de corrente alternada possui como características elétricas tensão de alimentação de 220VAC.

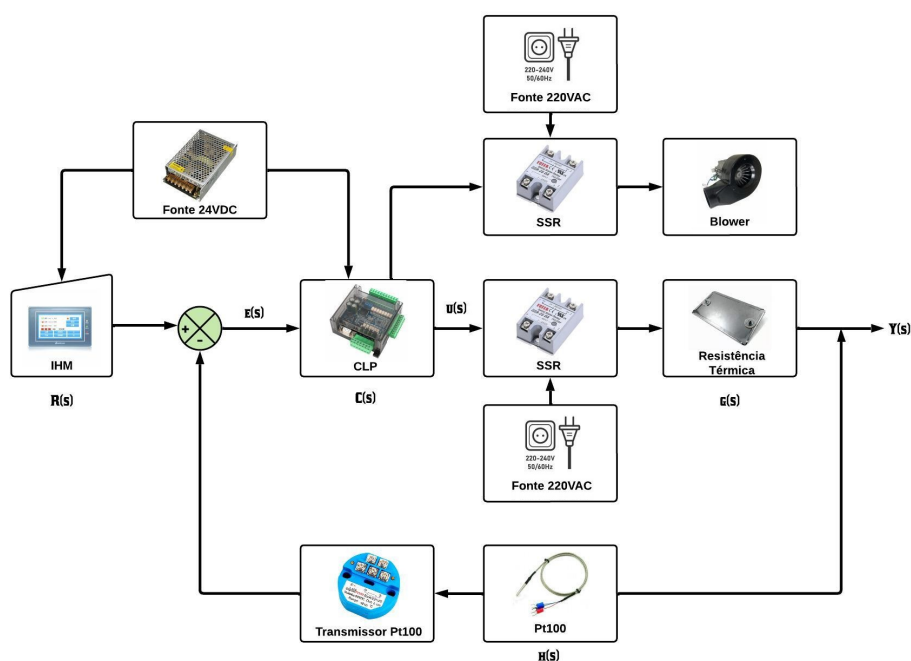
3.2 Princípio de Funcionamento do Protótipo Didático

Com as definições de cada elemento utilizado no protótipo didático, foi possível compreender melhor seu funcionamento de controle como todos os dispositivos e equipamentos elétricos que compõem o sistema. Para a leitura da temperatura, por meio do sensor RTD PT100, foi utilizado um transmissor de temperatura, para converter o sinal analógico em uma unidade padrão conhecida por controladores. O sinal do sensor de temperatura foi conectado à entrada analógica do CLP, o qual foi programado para controlar a temperatura do processo, corrigindo os erros encontrados na diferença entre a leitura obtida pelo sensor, quando comparado com o valor de referência (SP) de

um ciclo de aquecimento previamente programado pela IHM. Este valor é convertido para um valor de temperatura padrão, para visualização no painel frontal e obter uma melhor interpretação do sinal. A correção do erro foi feita por meio de um algoritmo de controle PI, inserido no mesmo programa do controlador CLP, através de uma biblioteca disponibilizada pela plataforma.

As correções são enviadas para saída do controlador, onde é feito o acionamento do sistema de aquecimento. Esse acionamento é realizado por meio da modulação PWM, implementada pela saída digital do CLP. Essa saída está conectada a um relé de estado sólido que controla a variação da potência fornecida à resistência elétrica, conseqüentemente, sua temperatura interna. A potência média é disponibilizada à resistência de aquecimento mediante uma tensão elétrica de 220 VAC. Essa energia é originada da rede elétrica, que percorre o terminal de carga do SSR até alcançar uma tomada elétrica, onde o protótipo foi alimentado. Uma vez estabelecidos todos os componentes e o comportamento desejado do sistema, pôde-se então definir o diagrama de blocos final de malha fechada para controlar a temperatura do protótipo didático, mostrado na Figura 22.

Figura 22 – Diagrama de blocos com todos os componentes elétricos



Fonte: Autor, 2023.

Para o atendimento aos objetivos propostos, o desenvolvimento deste projeto foi dividido em etapas, sendo divididas entre: diagrama elétrico; montagem e construção do protótipo; implementação dos *softwares* para modelagem da programação; identificação da planta de controle; sintonia do controlador e ensaios físicos, as quais estão

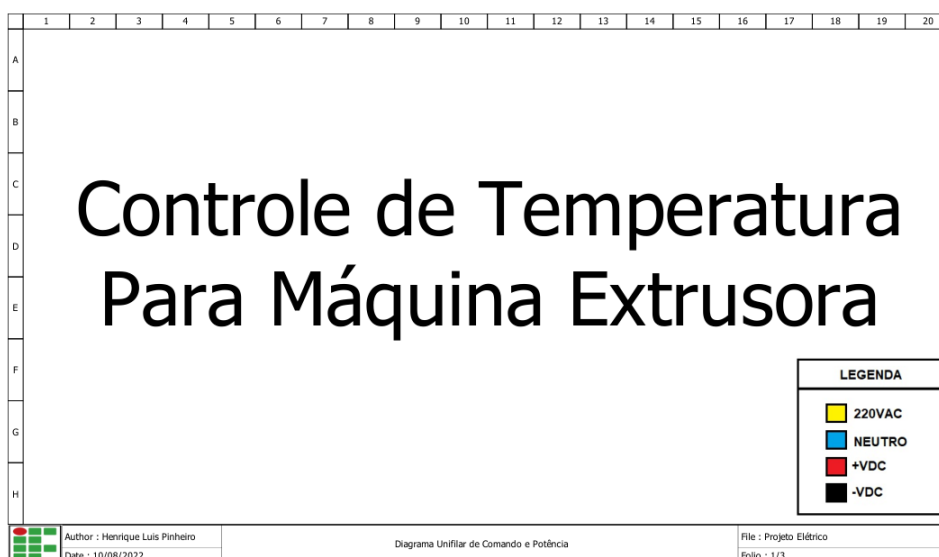
detalhados a seguir.

3.3 Diagrama Elétrico

A partir de um diagrama elétrico, é que se elabora e executa um projeto elétrico. Após o entendimento e determinação de todos os componentes e equipamentos elétricos utilizados no protótipo, partiu-se para a elaboração do diagrama elétrico, onde estão presentes todos os esquemas de ligações do projeto, detalhando como estes dispositivos serão interligados entre si. Este documento permite a rastreabilidade das ligações e dispositivos utilizados em sistemas de controles elétricos, facilitando assim a identificação de uma possível falha ou defeito indesejado, implicando em soluções para determinados problemas muito mais rápida e eficiente.

Foi utilizado o *software* de projetos elétricos QElectroTech, onde foi possível realizar a representação do circuito proposto, por meio de desenhos técnicos, através de um conjunto de símbolos. Inicialmente, foi criada a capa do diagrama elétrico, exibida na Figura 23, onde foram apresentadas informações indispensáveis sobre o projeto e identificação do projetista, como nome, título e data de conclusão.

Figura 23 – Capa do diagrama elétrico projetado



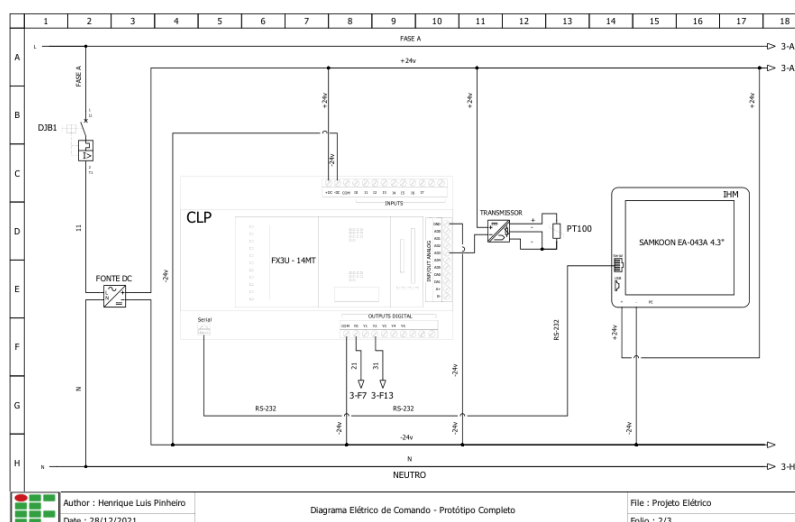
Fonte: Autor, 2023.

Na capa, incluiu-se uma legenda para facilitar a identificação das cores dos cabos usados nas conexões elétricas. A identificação dos cabos elétricos é de extrema importância, pois não apenas torna o circuito mais prático e visível, mas também desempenha um papel fundamental em operações de manutenção elétrica. Essa identificação simplifica o trabalho, fazendo com que o serviço seja executado com mais facilidade, tornando-o mais eficiente, especialmente em um ambiente industrial. Foram utilizados condutores da cor amarela, para identificar tensão alternada de 220 VAC e os

cabos azuis para neutro. Para o circuito de comando, foram utilizados os cabos da cor vermelha para sinalizar +24 VDC e o da cor preta para -24 VDC.

Um diagrama elétrico é dividido basicamente em dois circuitos, que são definidos em circuito de comando e de potência. Iniciou-se o esquema elétrico pelo circuito de comando, onde são encontrados os dispositivos de acionamento, sinalização, controle e monitoramento, sendo componentes que trabalham com baixas correntes elétricas. A Figura 24 apresenta o diagrama elétrico de comando projetado.

Figura 24 – Esquema elétrico de comando do protótipo didático



Fonte: Autor, 2023.

Começou-se o circuito de comando pelo dispositivo de proteção, que tem como finalidade a proteção de equipamentos e máquinas contra alterações indesejadas de tensão e corrente elétrica. O dispositivo de proteção utilizado foi o disjuntor, que são dispositivos de proteção e manobra, com capacidade de ligação e interrupção de corrente elétrica, em casos de condições anormais de trabalho, como curto-circuito ou sobrecarga. Durante a execução do projeto, foi necessário utilizar os disjuntores disponibilizados pelo laboratório. Embora o ideal fosse realizar o dimensionamento específico dos disjuntores, foi possível verificar, por meio da funcionalidade do protótipo, que os disjuntores utilizados atenderiam de maneira adequada às necessidades do sistema, já que os disjuntores presentes no laboratório eram suficientes para garantir a segurança e o funcionamento do sistema dentro dos parâmetros esperados.

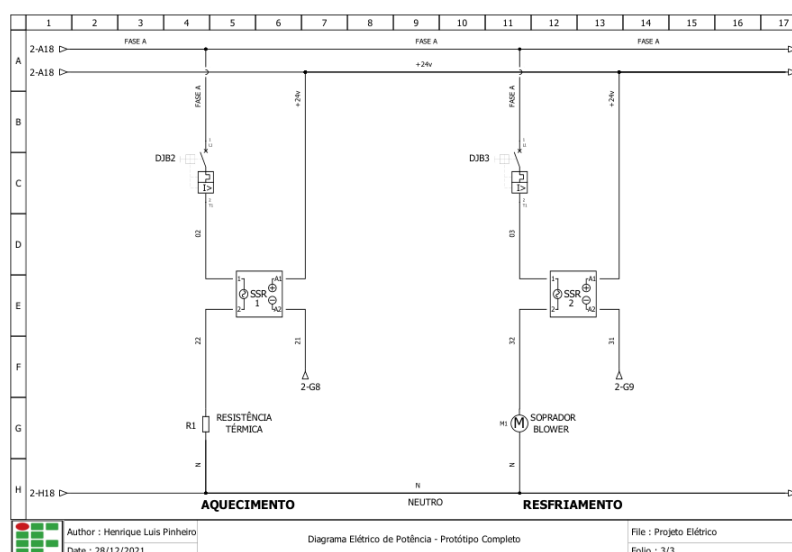
Para a alimentação do circuito de comando foi utilizada uma fonte chaveada de tensão. A fonte de alimentação DC fornece toda tensão necessária para as devidas operações do circuito de comando. Dessa forma, ao acionar o disjuntor monofásico, a fonte chaveada entra em funcionamento, energizando assim toda a linha de comando com uma tensão contínua de 24 VDC. Quando a fonte de tensão DC é energizada, ocorre o acionamento do CLP, IHM, sensor e transmissor de temperatura. A partir

de uma fonte de entrada de alimentação, conectada ao positivo do transmissor de temperatura, o cabo elétrico comum (negativo) se torna como uma linha de transmissão de corrente elétrica, que varia entre 4 a 20mA. O cabo comum, que é a saída do transmissor, transforma o sinal do PT100 em um sinal proporcional a temperatura medida. O sensor de temperatura RTD PT100, a três fios, foi conectado ao transmissor conforme as especificações descritas no *datasheet* do dispositivo.

Foi realizado um estudo do controlador escolhido, para realizar as ligações de acordo com as conexões descritas pelo manual do fabricante. As Entradas e Saídas (E/S) de um CLP conectam a interface com o sistema externo. Existem diversos tipos de módulos (analógicos e digitais), com diferentes números de variáveis de entradas e saídas. Na maioria das vezes as entradas analógicas do CLP recebem os sinais dos sensores. Dito isso, a saída do transmissor foi conectada à porta destinada a entradas analógicas do CLP. Esta porta permite controlar e monitorar correntes elétricas.

As E/S digitais operam com sinais de dois estados: ligado ou desligado. Os módulos de saída digital são capazes de converter os sinais lógicos de saída usados no CLP em sinais próprios, capazes de energizar os atuadores. Elas são acionadas de acordo com a programação feita pelo usuário. Nas portas responsáveis pelas saídas digitais, foi conectado o sinal negativo da fonte de tensão. Isso ocorreu devido ao tipo de CLP utilizado, que possui saídas digitais transistorizadas. Essas saídas utilizam um sinal de tensão negativa para realizar o chaveamento, o que resulta no fornecimento do potencial GND para a carga. As saídas digitais foram então conectadas ao disparo dos SSRs para controlar o sistema de aquecimento e resfriamento.

Segundo Parede e Gomes (2011) parte das comunicações feitas em ambientes industriais é baseada em comunicação serial. Foi utilizado o cabo serial RS-232 db9 (nove pinos) para realizar a comunicação entre a IHM e o CLP. Depois partiu-se para o circuito de potência, mostrado na Figura 25, onde estão presentes os equipamentos elétricos que possuem maiores potências elétricas, ou seja, as cargas a serem acionadas, tais como motor e resistência elétrica. Portanto, nos esquemáticos elétricos de potência é encontrado os maiores níveis de corrente elétrica e grande quantidade de dissipação de potência.

Figura 25 – Esquema elétrico de potência do protótipo didático

Fonte: Autor, 2023.

Iniciou-se o projeto referente ao circuito de potência pela etapa responsável pelo aquecimento da máquina extrusora. Da mesma forma do circuito de comando, foi utilizado um disjuntor monofásico como equipamento de proteção. Quando acionado o disjuntor, o controlador emite um sinal de tensão contínua para o circuito de comando do SSR, que ao ser alimentado faz a comutação de outro par de contatos ligados a um circuito secundário, responsável por energizar a resistência de aquecimento. Por último, foi instalado o ventilador, controlado pelo módulo de saída digital. Seguiu-se as mesmas etapas para o circuito de potência do sistema de resfriamento, modificando apenas a carga, sendo um motor monofásico.

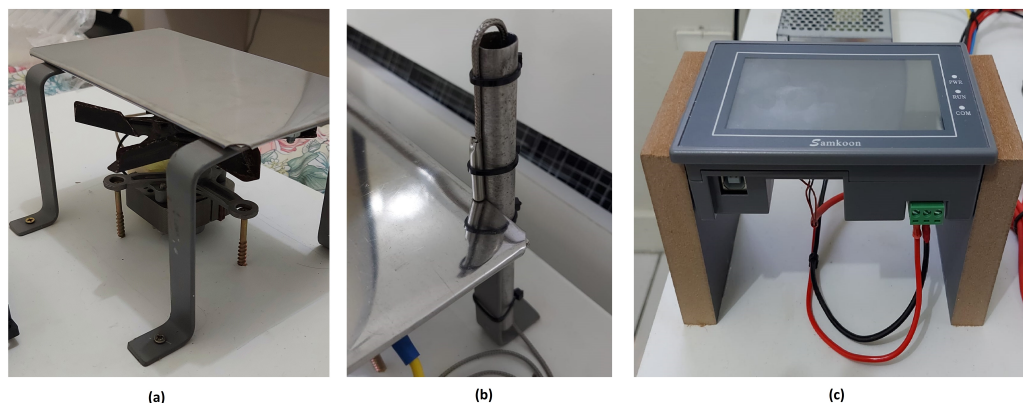
3.4 Montagem do Protótipo Didático

Após o diagrama elétrico completo, com todos os circuitos de comando e potência projetados, partiu-se para a montagem do protótipo, seguindo todas as especificações e esquemas do diagrama elétrico. Iniciou-se através da placa de montagem, que foi utilizada para fixar todos os componentes elétricos presentes no projeto. Também foi fixada na placa de montagem os trilhos DIN, que foram utilizados para fixar determinados dispositivos elétricos, como os disjuntores e o CLP.

Para fixação da resistência e o motor elétrico, foram construídos suportes de aço, para suportar altas temperaturas, como mostra a Figura 26(a). O motor elétrico monofásico acoplado à hélice foi montado abaixo da resistência térmica, para que ocorra o resfriamento imediato do sistema de aquecimento por meio da ventilação. Já para montagem e fixação do sensor de temperatura PT100, foi utilizado um suporte para que o sensor RTD ficasse o mais próximo possível da resistência térmica, como

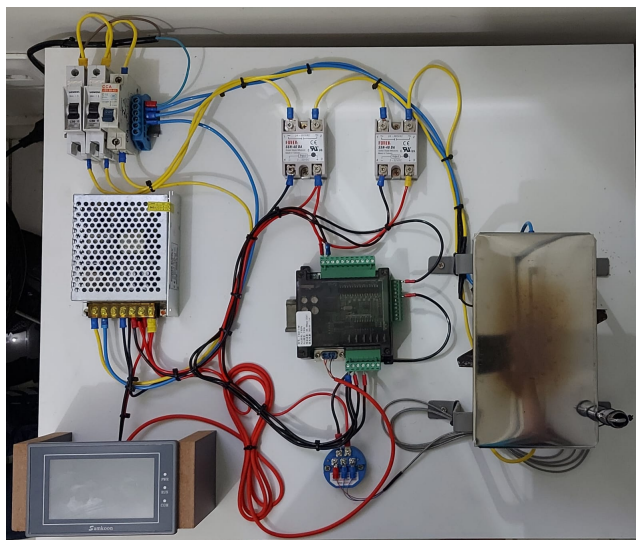
apresenta a Figura 26(b). Os sensores de temperatura devem ser conectados ao controlador e ao processo de forma correta, caso contrário, controlará os aquecedores de forma errônea. A IHM geralmente é instalada na parte frontal de painéis elétricos, por este motivo, foi preciso a construção de um suporte para elevação da interface de operação, mostrado na Figura 26(c), já que seus bornes de conexão são encontrados na região traseira do equipamento.

Figura 26 – Suportes para instalações dos dispositivos elétricos



Fonte: Autor, 2023.

Após a fixação de todos os dispositivos elétricos na placa de montagem, iniciou-se o processo de conexão por meio dos cabos elétricos. Foram dimensionados cabos com seção de $2,5\text{mm}^2$, para o circuito de potência, e cabos com seção de $1,5\text{mm}^2$ para o circuito de comando. Primeiramente foram realizadas as conexões da etapa de força do sistema de controle de temperatura, conectando os disjuntores, SSRs, resistência elétrica e o motor monofásico. Em seguida, procedeu-se com a montagem referente a parte de comando do sistema de controle, realizando todas as ligações elétricas, incluindo as conexões da fonte de tensão chaveada. Para finalizar a construção do protótipo, foi conectado o cabo serial entre a IHM e o CLP, para realizar a comunicação dos mesmos. A Figura 27 apresenta o protótipo final montado.

Figura 27 – Protótipo didático montado

Fonte: Autor, 2023.

3.5 Implementação da Programação da IHM

A IHM deve ser desenvolvida para produzir uma interface de usuário que torne a operação da máquina simples e eficiente. As interfaces com o operador podem ser bem elaboradas e são limitadas somente pelas informações que podem ser trocadas com o controlador. O objetivo de uma IHM instalada em uma máquina é permitir que o operador tenha o estado dos componentes da máquina em tempo real, principalmente, alertando um problema ou uma operação incorreta no processo. A IHM possui as funções que o operador necessita para comandar e alterar o funcionamento de máquinas ou processos (JUNIOR, 2021).

De acordo com Junior (2021), quando é programada uma IHM, o usuário tem que ser considerado em primeiro lugar e depois a máquina. Para cumprir estas tarefas de forma eficiente, a programação da IHM deve ser desenvolvida para alertar o operador para o que realmente importa, sem sobrecarregá-lo com informação visual desnecessária. Tais informações são de suma importância para que a máquina extrusora atinja o desempenho necessário. Portanto, foi desenvolvido uma interface de operação que seja o mais próximo possível de um modelo real, encontrando em máquinas extrusoras industriais, para que o operador tenha uma boa usabilidade em condições normais, como também em situações críticas.

Assim, uma IHM é um componente utilizado para apresentar os dados de uma máquina industrial para um operador na forma de usuário e, por meio do qual o operador seja capaz de controlar e monitorar a máquina. Segundo Junior (2021), algumas instruções e funções são determinadas pela linguagem de programação. Os programas devem ser capazes de manipular dados de entrada, e devem ser capazes de entregar

uma saída, seja ela física ou escrevendo os dados em um arquivo. Uma interface com operador é programada por meio de um *software* em um terminal de computação padrão (LAMB, 2015). Os terminais gráficos vêm com um pacote completo que inclui equipamento, programa e comunicações. Foi utilizado o *software* de programação Satool, que é uma plataforma gratuita para IHMs da marca SAMKOON.

De acordo com Junior (2021), botões, mensagens, valores definidos e indicadores são apresentados na tela da IHM. Esses itens recebem endereços de Bits ou palavras em um controlador para funcionar como entrada ou como valor de retorno. O princípio de funcionamento das IHM consiste em pré-programar as instruções, onde cada uma possui um endereço de memória. Esses endereços serão utilizados nas lógicas para designar os momentos que devem ser apresentados na IHM. Os endereços definidos devem coincidir com os mesmos utilizados na lógica de programação do CLP, para que haja uma comunicação entre estas unidades de controle e interface.

Partindo para a programação, primeiramente foi desenvolvida a tela inicial, apresentada na Figura 28, que ao ligar o sistema de controle, é mostrada por aproximadamente três segundos. Essa tela é de extrema importância, pois apresenta informações e dados sobre quem a desenvolveu, como nome da empresa (ou instituição) e projetista, já que os projetos e programação geralmente são de uso proprietário e específico para uma determinada máquina (LAMB, 2015).

Figura 28 – Tela inicial

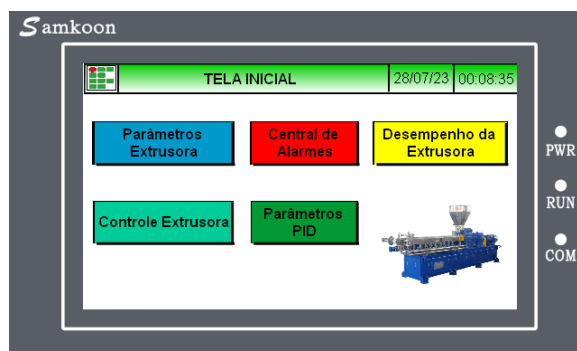


Fonte: Autor, 2023.

As seguintes telas foram programadas com um *layout* padrão, que continha o título da tela, data, horário, botão de retorno ao menu e logotipo da instituição. Depois do período de tempo da tela inicial, entra-se no modo de menu. Esta tela foi desenvolvida para possibilitar a navegação e mobilidade entre os conteúdos da IHM, através de botões que servem para acessar outras telas, funcionando também como uma tela de referência para os operadores. A área de navegação tem como principal objetivo direcionar a diferentes telas para visualização de todos os parâmetros e variáveis de controle presentes no processo.

Para Parede e Gomes (2011) normalmente é utilizado um conjunto de páginas para compor determinada aplicação. Ele pode ser usado para mudanças entre processos, seleção de área de visualização de dados, modos de operação e também para intervenção direta do operador no sistema. Os botões foram divididos em controle de extrusão, parâmetros da extrusora, parâmetros do PID, tela de alarmes e desempenho da máquina, como mostra a Figura 29.

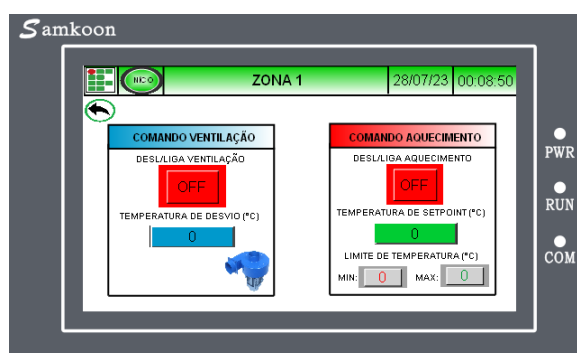
Figura 29 – Menu para navegação entre telas



Fonte: Autor, 2023.

O operador tem de oferecer uma entrada mínima para produzir o resultado desejado, e a interface deve fornecer somente a informação desejada com retorno ao operador (LAMB, 2015). Através destas informações, foi programada a tela de parâmetros da extrusora. A tela de parâmetros para a extrusora foi dividida em duas partes, sendo uma destinada ao aquecimento e outra ao resfriamento, como apresenta a Figura 30.

Figura 30 – Tela para controle dos parâmetros da extrusora

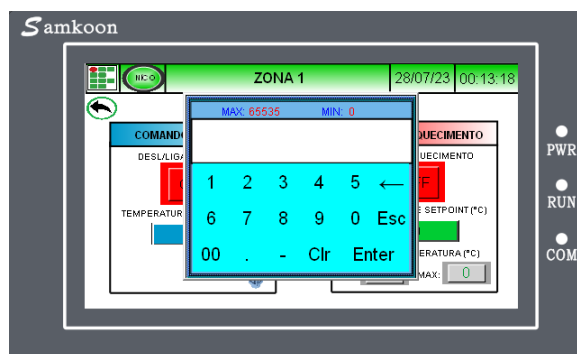


Fonte: Autor, 2023.

Na parte destinada ao aquecimento, foram utilizados *displays* com entradas numéricas, onde foi definido a temperatura de SP, o limite máximo e mínimo da temperatura do processo. O limite máximo e mínimo de temperatura é programado por um supervisor da máquina extrusora, para que o operador escolha um SP dentro da faixa de temperatura adequada para o funcionamento do processo. Para definir parâmetros

que possam ser programados e definidos apenas por supervisores ou responsáveis da máquina, é colocado protocolo de senhas, como visto na Figura 31, onde apenas com a chave de acesso é possível definir os dados numéricos. A entrada de senha é utilizada para evitar acidentes e não autorizar alterações nas configurações da máquina.

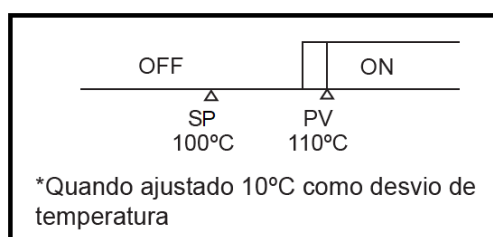
Figura 31 – Protocolo de senha para bloqueio de acesso



Fonte: Autor, 2023.

Na seção dedicada ao resfriamento da máquina extrusora, empregou-se um campo de entrada numérica para estabelecer o Desvio de Temperatura (DV). O parâmetro de DV é utilizado para determinar quantos graus acima da temperatura de SP o sistema de resfriamento deve ser ligado. Portanto, se a temperatura do processo (PV) estiver acima da temperatura de *SetPoint* (SP) mais o desvio, a saída será ativada, acionando o sistema de ventilação, como exemplifica a Figura 32.

Figura 32 – Desvio de temperatura



Fonte: Autor, 2023.

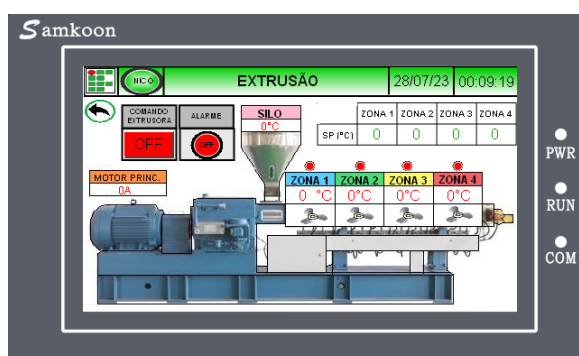
Adicionalmente, na tela de controle de parâmetros para a máquina extrusora foram inseridos botões para o ligamento e desligamento do sistema de aquecimento e resfriamento. É de suma importância a presença de botões que permitem forçar uma saída, independentemente da ação de controle, especialmente durante intervenções para manutenções elétricas, sejam elas preventivas ou corretivas. Esses botões possibilitam ligar ou desligar os atuadores para testes operacionais na máquina. Quando o controle automático é insuficiente para fornecer o resultado desejado, (por falha da estação automática, má sintonia ou carga diferente do processo), o operador transfere a operação de automática para manual. Isto não causa nenhum problema particular ao

processo, serve para estudar o comportamento da máquina em particular (RIBEIRO, 1999).

A forma gráfica dos botões também serviu para indicação de estado do sistema (ligado ou desligado). A cor do botão foi utilizada juntamente com palavras, para indicação do estado da máquina, pois essa informação redundante é um dos métodos mais eficientes, principalmente para portadores do daltonismo (JUNIOR, 2021).

Em seguida, procedeu-se com a programação da tela principal da máquina, o monitor de controle de extrusão, conforme ilustrado na Figura 33. Esta tela possui a função de supervisor, onde se tem um conjunto de ferramentas e métodos que monitora e armazena informações dos processos produtivos, para gerenciamento da planta industrial, colhendo dados em tempo real sobre as variáveis. Para o desenvolvimento, obteve-se um planejamento cuidadoso da estrutura da tela, dos gráficos e ícones representativos da máquina, além dos visores organizados com consistência para que obtivessem uma interface eficaz.

Figura 33 – Tela para controle de extrusão



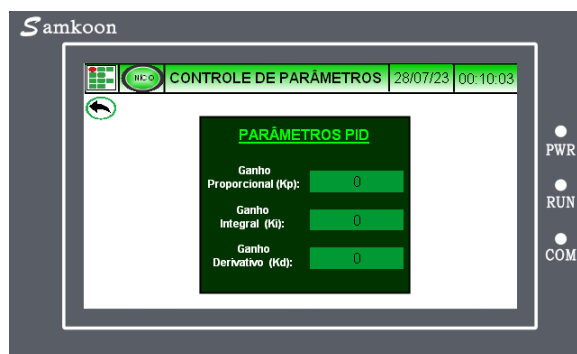
Fonte: Autor, 2023.

Na tela de controle de extrusão é utilizada tendência de valores, para mostrar informações sobre as variáveis do processo. Utilizou-se saídas numéricas, para visualização da temperatura real da planta (PV) e temperatura de SP. Adicionalmente, um botão é incorporado para acionamento do sistema de controle de temperatura e lâmpadas de sinalização, para indicar o estado em que se encontra o sistema de aquecimento e alarme (ligado ou desligado). Para a sinalização do estado de funcionamento do sistema de resfriamento, foi utilizado um Formato de Intercâmbio de Gráficos (GIF) em forma de hélice, para animar o objeto, que quando acionado entra em movimento, simulando a rotação da ventilação.

Depois foi programado o painel que disponibiliza campos para alteração dinâmica dos parâmetros de controle. A tela projetada foi desenvolvida para facilitar a inserção dos parâmetros do controlador PID, permitindo definições das variáveis de controle, como constante Proporcional, Integral e Derivativo. Nessa interface, o usuário

pode facilmente inserir e ajustar os valores necessários para otimizar o desempenho do sistema de controle, proporcionando uma configuração intuitiva e eficiente. Esta tela também foi programada para ser configurada apenas por supervisores ou responsáveis autorizados.

Figura 34 – Tela para inserção dos parâmetros de controle



Fonte: Autor, 2023.

“Geralmente, o sistema de controle possui um sistema suplementar de alarme, que chama a atenção do operador para a perda do controle automático ou para a tendência do produto sair fora das especificações” (RIBEIRO, 1999). A tela central de alarmes foi programada de forma clara e proeminente, para a indicações de situações anormais. Segundo Parede e Gomes (2011) a tela de alarme mostra que algo imprevisto ou anormal está ocorrendo na máquina, e tal situação pode requerer ações corretivas do operador, evitando um agravamento.

O ideal é que a planta de controle trabalhe em automático o tempo todo. Os distúrbios normais do processo são eliminados pelo controle automático. Quando houver uma anormalidade além da faixa de controle automático, o processo em uma máquina extrusora deve ser passado para a condição de manual, para possíveis correções. Por isso, a importância de haver sistema de alarme para chamar a atenção do operador, pois ele não está durante todo o tempo olhando os controladores e atualmente há tantas informações concentradas que se torna impossível do operador perceber prontamente quando o controle automático é perdido (RIBEIRO, 1999).

Quando o sistema de alarme é ativado, a lâmpada de sinalização da cor amarela é acionada na tela de controle de extrusão, indicando que o alarme está ligado. Desta forma, o operador deve acessar a tela de central de alarmes, que contém um quadro de mensagens, responsável por apresentar as falhas possíveis. O Quadro 1 de mensagens foi desenvolvido para apresentar as seguintes condições da máquina:

Quadro 1 – Central de alarmes

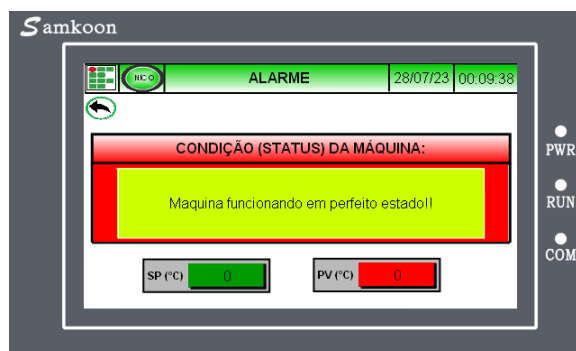
Alarme	Mensagem
0	Máquina funcionando em perfeito estado!!
1	Temperatura elevada!!
2	Temperatura abaixo do ideal!!
3	Sistema de ventilação com período de trabalho excessivo!!

Fonte: Autor, 2023.

Quando um alarme dispara, a mensagem correspondente aquele alarme é acionada, na forma de natureza de texto, usada para detalhar o erro no processo. Para evitar qualquer risco à segurança, a informação exibida na tela deve ser suficientemente legível, explícita e de interpretação imediata. De acordo com o teor da mensagem recebida, o operador pode ter de intervir rapidamente, acionando um ou vários botões ou teclas. Essas ações serão facilitadas se os botões ou as teclas estiverem devidamente identificados ou marcadas, com símbolos normalizados (PAREDE; GOMES, 2011).

As mensagens de texto na tela de alarme são determinadas pelo controlador para mostrar o estado atual da máquina em funcionamento. A Figura 35 apresenta a tela de central de alarmes. Além disso, foi incorporado juntamente a tela de alarmes, visores numéricos para visualização das temperaturas de PV e SP, para comprovação por meio de testes do funcionamento do sistema de alarme proposto.

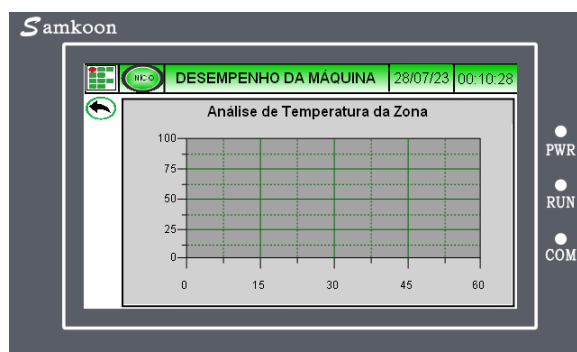
Figura 35 – Tela para central de alarmes



Fonte: Autor, 2023.

A última tela da IHM foi desenvolvida para obter informações de diagnóstico e desempenho do protótipo didático, através de um gráfico, mostrado na Figura 36. A tendência é monitorar o processo e registrar as condições de operação da temperatura real da planta graficamente.

Figura 36 – Tela de desempenho da máquina extrusora



Fonte: Autor, 2023.

A tela de diagnósticos tem como principal finalidade analisar o desempenho do controle de temperatura. Sem uma tela de diagnóstico, é difícil determinar mudanças em uma máquina industrial, pois não se tem dados necessários para detecção do momento em que ocorreu o problema, dificultando uma solução de problemas adequada para identificar a causa raiz. Com uma tela gráfica, a interface passa a atuar especialmente na prevenção de falhas e na redução de erros operacionais, por meio de análise no desempenho da máquina extrusora. Além de ser uma importante ferramenta utilizada pelos técnicos de manutenção para diagnosticar falhas no equipamento.

3.6 Implementação da Programação do CLP

Dispositivos complexos de automação utilizam *softwares* de programação a fim de configurar um dispositivo alvo para que se comporte de uma determinada maneira. Segundo Lamb (2015) a plataforma de programação para controladores é utilizada para ativar os movimentos de uma máquina automatizada, ou de uma linha de produção, e reunir dados sobre suas operações, bem como para projetar e documentar os sistemas de automação.

O primeiro passo na maioria dos processos mais formais para desenvolvimento de um sistema de automação é analisar os requisitos do programa. Para Lamb (2015), a fase de análise envolve a revisão dos resultados e a determinação das entradas, do processamento, das saídas e dos componentes de dados. Essa fase inicial permite que o programador tenha a certeza de que entendeu por completo o escopo e o propósito do sistema operacional. Para o mapeamento dos dispositivos de entrada e saída foi utilizado o diagrama elétrico, onde já foram especificadas cada porta e conexões utilizadas de acordo com o desenvolvimento do projeto.

Depois de assegurar que todos os requisitos do programa são conhecidos, o próximo passo é criar uma solução. O método escolhido para desenvolver a solução dependerá do tipo de plataforma de *software*. Assim, como no caso de *hardware*,

existe uma variedade de fornecedores de plataformas de automação para desenvolver e editar programas. Os fabricantes de equipamentos de controle em geral também disponibilizam o sistema operacional necessário para a programação de seus sistemas (LAMB, 2015). O aplicativo gratuito disponibilizado pelo fabricante para programação da plataforma é o Gx Developer. Esse pacote é específico para o modelo de CLP escolhido, e não pode ser utilizado em *hardwares* de outros fabricantes.

O termo linguagem de programação do CLP refere-se ao método pelo qual o usuário comunica a informação ao CLP. A programação envolve todo o processo de projeto, codificação, depuração e manutenção do programa (LAMB, 2015). Há diferentes linguagens de programação, cada uma com suas características específicas e com níveis de complexidade e objetivos diferentes. A representação de um programa pode ser baseada em texto, com caracteres alfanuméricos, ou gráfica por natureza, como a lógica *ladder*. Devido a sua maior simplicidade de entendimento e clareza de programação, a linguagem escolhida para programação foi a *ladder*.

A lógica *ladder*, empregada na programação de CLP, utiliza representações de componentes elétricos, como contatos e bobinas. Para Lamb (2015), neste tipo de lógica os elementos de programa são arranjados em linhas horizontais conhecidas como degraus que simulam um circuito elétrico. Essas linhas são desenhadas entre duas linhas verticais, chamadas trilhos. Contatos, bobinas, temporizadores e várias outras operações de dados são organizadas ao longo dos degraus do diagrama. O gráfico resultante é parecido com uma escada, por isso é denominado o *ladder*. Na programação utilizando a lógica *ladder* as entradas e as saídas podem ser representadas por valores digitais de *ON/OFF* (1 ou 0). Os contatos na lógica de programação podem ser Normalmente Abertos (NA) ou Normalmente Fechados (NF), e as bobinas são ativadas somente se a lógica for verdadeira. Os contatos de entradas e saídas representam dispositivos conectados ao CLP, assim qualquer alteração em seus estados, altera também os dispositivos que eles representam (BASTOS *et al.*, 2005).

Os argumentos condicionais (como *if*, *then*, *else* e *or*) e funções matemáticas são usados em combinação com variáveis para dar origem a argumentos que criam o resultado desejado. Elementos como temporizadores e contadores são predefinidas como elementos na linguagem *ladder*. No campo da automação, todos estes processos de instruções podem ser implementados em um controlador CLP. As instruções são armazenadas na memória do processador do CLP, na parte de programas do usuário, e durante a varredura do programa, o controlador monitora as entradas, executa o programa de controle e muda as saídas adequadamente. O sistema de memória do CLP armazena as informações relativas ao estado de todas as entradas e saídas, e as acompanha utilizando um sistema de endereçamento (PETRUZELLA, 2014).

Cada dispositivo de entrada e saída conectado a um sinal discreto é endereçado

a um Bit específico na memória do CLP. Um Bit é um dígito binário que pode ser 1 ou 0. Sinais analógicos utilizam palavras como formato de endereçamento, as quais permitem que palavras inteiras sejam endereçadas. Segundo Petruzella (2014), um endereço é uma indicação ou número que mostra onde está localizada uma determinada parte da informação na memória do CLP. Desse modo, se um CLP necessita levantar uma informação sobre um dispositivo de campo, ele tem a capacidade de buscá-la nos locais correspondentes do endereço. Em um controlador dedicado, como CLP, existem registros dedicados para diferentes tipos de dados, e para este projeto foi utilizado o registrador de dados para armazenamento de números decimais e inteiros.

Como os *softwares* de programação dos CLPs são desenvolvidos por diferentes empresas para diferentes tipos de *hardware*, os símbolos ou os nomes das variáveis, os dispositivos e as técnicas podem mudar bastante (LAMB, 2015). As entradas definidas pelo fabricante do CLP escolhido são rotuladas como X, e as saídas, como Y. Os temporizadores são marcados como T, os registradores são simbolizados pela letra D, e as memórias internas como M.

As memórias (M) são instruções que podem ser utilizadas como entradas ou saídas. Segundo Petruzella (2014), a memória é utilizada estritamente para finalidades internas. A vantagem do uso das saídas internas é que existem várias situações em que uma instrução de saída é requisitada pelo programa, mas não é necessária uma conexão física com o dispositivo de campo. Em sistemas automatizados, é comum incluir a variável tempo no processo. Nesses casos, o temporizador (T) é utilizado para definir o intervalo de tempo entre duas operações, verificar se uma operação ocorreu dentro do tempo esperado ou definir o tempo de duração de uma operação (PAREDE; GOMES, 2011).

Um programa é constituído por um conjunto de instruções em sequência, onde cada uma identificará precisamente a função básica que o CLP irá executar. Ao longo da seção, serão descritos as principais etapas de programação desenvolvidas para o funcionamento do sistema automático como um todo. Ao longo do desenvolvimento do código foram utilizados alguns comentários, notas e títulos, identificando cada variável, com o intuito de garantir que a programação seja bem organizada e de fácil leitura.

3.6.1 Implementação das Entradas do Sistema

Primeiramente foi desenvolvido uma preparação para dar início (*start-up*) ao controle de processo, chamado também de inicialização. A criação e uso de procedimentos para dar início automático da extrusora, são utilizados para otimizar a inicialização e desligamento do processo. Para a programação da inicialização foi utilizado uma memória, que quando acionada pelo botão geral, presente na tela de comando da extrusora, indica que todo o sistema de controle de temperatura da máquina extrusora

está ligado.

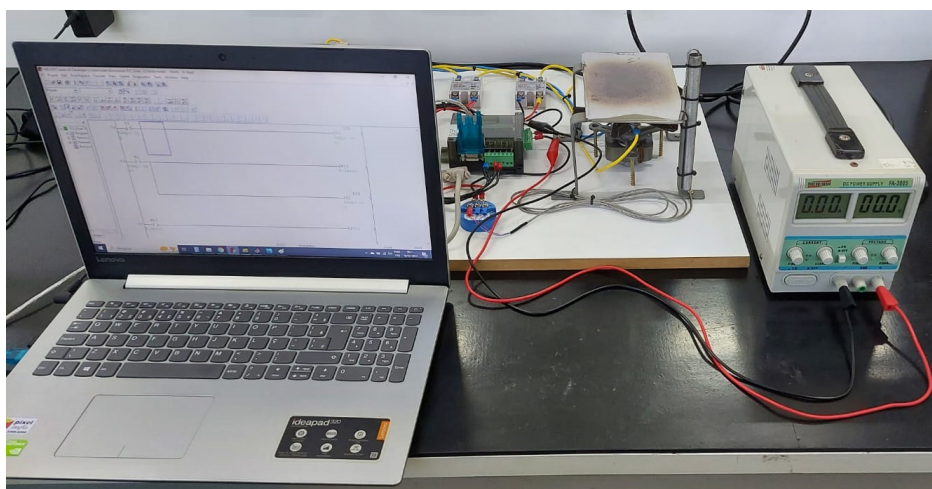
Depois do sistema de inicialização, iniciou-se a programação do CLP pela parte responsável pela leitura da temperatura. O sinal de realimentação que vem do sensor (elemento de medição), deve ser convertido em um sinal de referência com as mesmas unidades do ponto de ajuste (SP). Nesta etapa foram realizados testes e cálculos para a transformação do sinal elétrico em informações físicas, convertendo o sinal lido de corrente elétrica para a unidade de temperatura térmica, em graus Celsius, resultando na temperatura real (PV) da planta de controle.

A entrada analógica é a parte do circuito do CLP que lê um sinal analógico e o converte internamente em um valor binário. Sabe-se através do *datasheet* do fabricante do CLP, que a entrada analógica destinada a corrente elétrica varia entre 4 a 20mA, ocasionando uma saída analógica binária de 0 a 4095 (12 Bytes). Portanto, teoricamente quando é aplicado 4mA na entrada analógica do CLP, o controlador deve indicar 0 em seu registrador interno, e 4095 quando aplicado 20mA. Através destas informações partiu-se para o teste de leitura do sensor de temperatura.

Os testes realizados para leitura de temperatura foram feitos para calibração do instrumento de medição, com o intuito de ajustar o sensor, para que a saída correspondesse com precisão à entrada, sem erros de medições. Segundo (BALBINOT; BRUSAMARELLO, 2010), o erro de medição é a diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência. A calibração é de suma importância quando se trata de transmissores, pois é preciso estabelecer a quantidade de corrente elétrica (mA) representada em valor físico, para que a leitura do sensor quando aplicado à planta de controle seja feita de forma confiável. Os instrumentos e sistemas de medição são geralmente ajustados ou calibrados utilizando padrões de referência para corrigir erros sistemáticos. O teste foi realizado utilizando uma fonte variável de corrente contínua como instrumento de referência para a medição.

Os CLPs possuem um diagnóstico residente e substituem funções que permitem ao usuário traçar e corrigir os problemas do programa e do equipamento facilmente. Os usuários podem visualizar o programa de controle em um monitor e observá-lo em tempo real à medida que ele está sendo executado. Quando o controlador é colocado no modo de funcionamento (RUN), ou no modo de ciclo de operação, é possível executar o programa do usuário, possibilitando monitorar e examinar os estados dos dispositivos de entrada, e mudar as saídas adequadamente (PETRUZELLA, 2014). Utilizando uma fonte variável, foi aplicada uma corrente elétrica de 4mA a 20mA na entrada analógica do CLP. Isso permitiu monitorar através da ferramenta de programação os valores dos registradores internos, como apresenta a Figura 37.

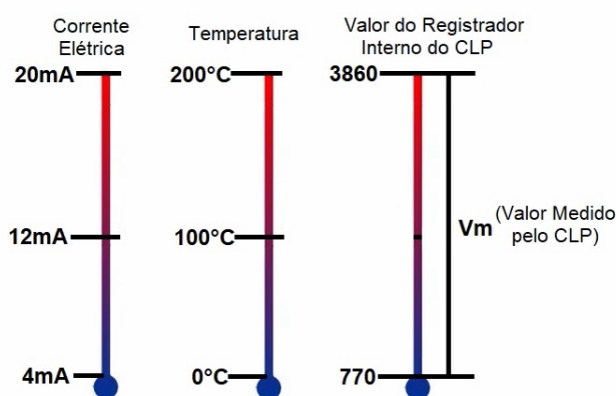
Figura 37 – Testes experimentais para calibração do sensor de temperatura



Fonte: Autor, 2023.

Um bloco de instrução de leitura foi empregado para obter o valor da entrada analógica. Nesse bloco, são especificados a porta do canal de entrada analógica e o registrador de dados, no qual o valor instantâneo lido deve ser armazenado. Durante os testes, os valores registrados internamente pelo CLP para uma corrente de 4mA foi de 770, enquanto para 20mA atingiu 3860. Como já mencionado anteriormente, o transmissor de temperatura trabalha transmitindo uma corrente elétrica de 4 a 20mA em sua saída, que corresponde a uma faixa de temperatura entre 0 a 200°C . Com todos os dados para a leitura do sensor de temperatura, foi compilada as informações, ilustradas na Figura 38.

Figura 38 – Informações obtidas através dos ensaios de leitura



Fonte: Autor, 2023.

Com todas as informações necessárias, foi possível obter a Equação (24) utilizando o método de interpolação, uma técnica amplamente empregada para estimar valores intermediários com base em dados conhecidos. No contexto da conversão de sinais analógicos em temperatura, a interpolação é aplicada para estimar temperaturas

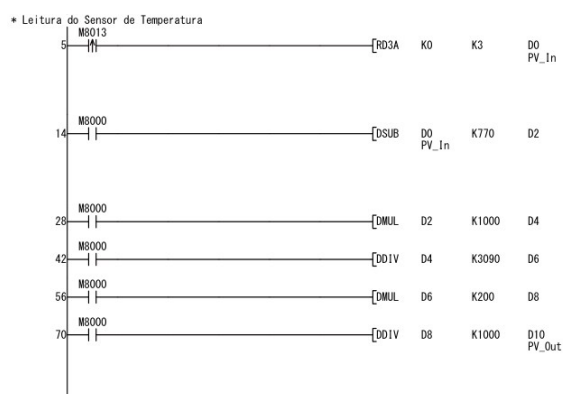
correspondentes a valores de sinal analógico que não estão diretamente mapeados nos pontos de calibração. Assim, a temperatura real foi calculada como a diferença entre o valor medido (V_m) pelo CLP e o valor encontrado no teste prático a uma corrente elétrica de $4mA$, dividida pela diferença entre os valores medidos quando a entrada analógica foi submetida a $20mA$ e $4mA$, tendo-se:

$$PV[\%] = \frac{V_m - 770}{3860 - 770} \quad (24)$$

Essa Equação (24) é comumente usada em situações onde é necessário determinar uma relação entre três valores diferentes. O resultado da Equação (24) está em porcentagem, para obter o valor desejado, foi multiplicado pela temperatura máxima em graus Celsius, da seguinte forma:

$$PV[^\circ C] = \left(\frac{V_m - 770}{3090} \right) \cdot 200 \quad (25)$$

Após a Equação (25) definida, foram transferidos todos os cálculos de leitura da temperatura para a programação, mostrada na Figura 39. Com as instruções presentes na programação, foram capazes de realizar operações aritméticas, desde adição, subtração, multiplicação e divisão. Essas instruções têm como função executar operações matemáticas entre dois operandos, colocando o resultado em um operando de resposta denominado. No bloco destinado à medição da entrada analógica, foi incorporada uma memória especial (M8013) com a função de gerar um pulso de um segundo, portanto, a leitura da temperatura do sistema foi feita a cada um segundo. Vale ressaltar que, com base nas características do sistema e nos dados de projeto, havia a expectativa de que a planta de controle apresentasse uma resposta térmica relativamente lenta. Essa consideração preliminar influenciou na definição inicial do tempo de leitura da temperatura, com o objetivo de garantir uma amostragem compatível com o comportamento dinâmico estimado do sistema. A confirmação dessa característica será discutida posteriormente, durante a apresentação dos testes práticos.

Figura 39 – Programação para leitura do sensor de temperatura

Fonte: Autor, 2023.

Após isso, desenvolveu-se a programação responsável por limitar a temperatura de SP a um valor determinado pelo supervisor da máquina extrusora. Para tal tarefa foi utilizada instruções do CLP para a manipulação de dados (transferência e comparação de dados), que juntamente com símbolos matemáticos executarem as condições e funções, e todas essas instruções são de saída. Se a temperatura de SP definida for maior que a temperatura mínima, e menor que a temperatura máxima, a condição se torna verdadeira, transferindo o valor para um novo registrador. Este novo registrador será a temperatura de SP da máquina extrusora.

“Muitas linguagens de programação também fornecem um mecanismo para invocar funções por meio de bibliotecas e blocos de funções” (LAMB, 2015). Na programação foram utilizados diferentes blocos de funções com propósitos específicos predefinidos, dentre eles o de ação de controle PID. Os controladores programáveis geralmente são equipados com módulos de E/S que desempenham o controle PID ou apresentam recursos matemáticos suficientes para realizar o controle internamente. Essa instrução é essencial para a execução do cálculo PID, onde são definidos o valor alvo (ou valor de referência), o valor atual (ou valor medido), os parâmetros de controle e, por fim, o registrador que armazena o resultado dos cálculos. Esse resultado é convertido em um sinal analógico binário variando de 0 a 4095. O valor alvo para este projeto é definido como a temperatura de SP, que foi endereçada após o código de limites máximo e mínimo de temperatura. Já o valor atual é representado pela temperatura PV, que foi endereçado após os cálculos presentes na leitura de temperatura.

O *software* de programação escolhido para este modelo de CLP, utiliza uma quantidade de registradores consecutivos, a partir do registrador no bloco PID, para definir os parâmetros do controlador PID (K_p , K_i e K_d). A partir destes registradores é que a programação coleta as informações de variáveis para executar os cálculos, onde o resultado será um sinal referente a ação de controle PID. Desta forma, foi vinculado os registradores de parâmetros PID com os registradores definidos pela programação

da IHM, para que o supervisor da máquina defina através da interface operacional as especificações de parâmetros de controle.

3.6.2 Implementação das Saídas do Sistema

A unidade interna do CLP armazena o programa e controla as saídas com base nos valores recebidos pelas entradas. A saída de dados envia as informações para o equipamento a ser controlado (PESSÔA; SPÍNOLA, 2014). Segundo Silveira (2018), um dispositivo digital como um microcontrolador CLP, trabalha com saídas que possuem apenas dois estados: ligado ou desligado. No entanto, às vezes é preciso mais do que apenas “ligar” e “desligar” no controle de dispositivos. Para contornar esta situação, habilmente foi desenvolvida a técnica chamada PWM. Como visto na seção que trata sobre revisões bibliográficas, o PWM refere-se ao conceito de pulsar rapidamente um sinal digital em um condutor elétrico. A modulação PWM pode ser considerada como uma técnica para controle de circuitos analógicos utilizando uma saída digital de um microcontrolador CLP, ou seja, é um artifício para reproduzir níveis de sinais analógicos digitalmente.

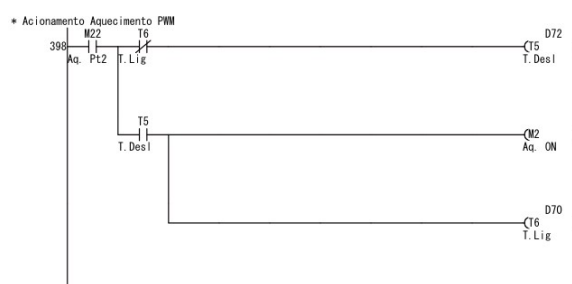
De acordo com Petruzella (2014) essa proporcionalidade no tempo, conhecida como Modulação por Largura de Pulso, varia a taxa de tempo do chaveamento (liga/desliga). O tempo de ativação é o tempo durante o qual a alimentação é aplicada à carga, já o tempo de desativação é o período durante o qual a alimentação é desligada (SILVEIRA, 2018). Dada uma largura de banda suficiente, qualquer valor analógico pode ser codificado com PWM. Com isso, se tem um sinal digital que oscila entre 0 e 24 VDC com determinada frequência.

O módulo de saída digital do CLP controla o nível de tensão elétrica aplicado ao circuito de aquecimento, pelo ajuste da porcentagem do DT. À medida que a temperatura PV aproxima-se do ponto pré-ajustado, o processador modifica a saída para rebaixar a tensão elétrica por diferentes porcentagens, ajustando-a para manter o ponto de ajuste. Essa dosagem pode ser alcançada ao ligar e desligar a saída em intervalos curtos, ou seja, variando a sua frequência em uma determinada “Banda Proporcional”. Se a temperatura estiver ainda distante do ponto de ajuste, os tempos de duração ligado e desligado variam na proporção da diferença de temperatura dentro da Banda Proporcional, que é geralmente expressa como uma porcentagem.

Com o entendimento do acionamento PWM, partiu-se para a implementação desta técnica de comutação na programação do CLP. Devido ao fato da limitação do tipo de CLP genérico escolhido, por não incluir bibliotecas de instruções PWM no seu sistema interno, foi preciso solucionar o problema através de lógicas de programação específica, conforme demonstrado na Figura 40. Para tal tarefa, foram utilizados dois temporizadores, com a funcionalidade de determinar o tempo em estado de nível lógico

alto e baixo do pulso de saída PWM.

Figura 40 – Programação para controle de potência PWM

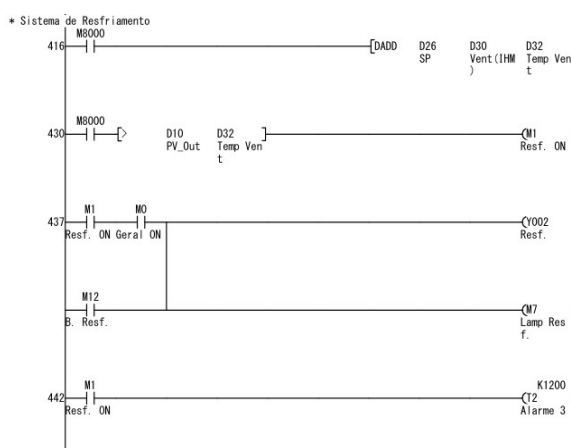


Fonte: Autor, 2023.

Desenvolveu-se uma lógica na qual os dois temporizadores estão interligados, de modo que a contagem do tempo em estado ligado só é iniciada após a conclusão da contagem do tempo em nível baixo. Esse arranjo permite determinar tanto a largura de pulso quanto ao período do sinal, possibilitando assim o controle do *Duty Cycle* para gerenciar a potência do processo. Portanto, o que se controlou por meio da programação foi precisamente o *Duty Cycle*, ou seja, a proporção de tempo durante o qual o sinal digital permanece em 24VDC. Essa técnica foi empregada para limitar a potência no circuito de aquecimento, quando a saída digital PWM se conecta a uma entrada de controle de um relé de estado sólido. À medida que a tensão de controle oscila, com base no *Duty Cycle*, ocorre a abertura ou o fechamento imediato do circuito de disparo, que passa pelos terminais de carga do SSR. Como resultado, é alcançado o controle da potência média fornecida à resistência de aquecimento (ZAMBALDI, 2026).

O controle do sistema de resfriamento foi baseado na ação de controle *ON/OFF*, onde a ventilação do processo foi ligado (*ON*) quando a temperatura atingisse o limite máximo de operação, estabelecido pelo operador, e desligado (*OFF*) quando a temperatura alcançasse a temperatura de referência. Se o valor da variável medida for acima do valor pré-ajustado, o sistema será acionado e a ventilação ligada.

Na programação do sistema de resfriamento, inicialmente, empregou-se uma função de adição para calcular a soma da temperatura de referência (SP) com o Desvio de Temperatura (DV). Adicionalmente, utilizou-se a lógica de argumentos condicionais, de modo que, quando a temperatura do processo (PV) ultrapassa o valor resultante dessa soma, uma memória é acionada, indicando que o sistema de resfriamento está ativo. Essa memória serve como saída responsável pela ativação do sistema e pela animação do GIF que simboliza a operação da ventilação, conforme apresentado na Figura 41.

Figura 41 – Programação para controle do sistema de resfriamento

Fonte: Autor, 2023.

Uma das aplicações mais comuns no controle de processo é a implementação da programação para circuitos simples de alarme. O sistema de alarme é binário, pois o interesse é apenas se a variável está abaixo ou acima de determinado valor preestabelecido. Em processo de manufatura industrial, há muitas aplicações com variáveis acima e abaixo da variável controlada, que devem ser monitoradas (RIBEIRO, 1999). Toda planta deve ser projetada usando-se princípios de segurança baseados em práticas de engenharia estabelecidas, com procedimentos alertando contra perigos de operabilidade.

Alertas para avisos de situações indesejadas são fundamentais em processos de extrusão, já que os termoplásticos são extremamente sensíveis a mudanças de temperatura. Uma das considerações mais importantes, ao estudar o desempenho de materiais plásticos, é a mudança dimensional das principais propriedades com alterações da temperatura, como módulo de elasticidade, resistência a tração, propriedades elétricas, resistência química e outros vários fatores que influenciam na vida útil esperada do produto moldado. Mediante estes conceitos, foi dado início a programação para o sistema de alarme do protótipo didático. O primeiro código desenvolvido foi referente ao Alarme 1, que tem a finalidade de alertar sobre níveis elevados de temperatura. Foi escolhido um valor de 10°C para acionamento do Alarme 1, ou seja, quando a temperatura PV estiver 10°C acima da temperatura de SP o sistema de Alarme 1 é ativado. Quando o alarme é acionado é transferido um valor que corresponde a mensagem de temperatura elevada na central de alarmes.

O Alarme 2 foi implementado para alertar o operador quando a máquina apresenta níveis de temperatura abaixo do ideal. Semelhante ao código do Alarme 1, o sistema do Alarme 2 foi concebido, distinguindo-se pela incorporação de um contato de temporizador, combinado com a função de subtração. A bobina do temporizador é ativada quando é acionado o botão de inicialização, que dá início ao controle de

extrusão. Este temporizador teve como objetivo impedir o acionamento do Alarme 2 no instante inicial de ligamento do sistema de controle, pois no início a temperatura PV está muito abaixo da temperatura de SP. Portanto, caso a temperatura do processo esteja abaixo de 10°C em relação à temperatura de referência (SP), o sistema foi configurado para alertar o operador, exibindo a mensagem correspondente.

O sistema de Alarme 3, indicando ventilação excessiva da máquina extrusora, foi programado utilizando um temporizador presente na lógica de acionamento do sistema de resfriamento. Quando ativado o sistema de ventilação, o temporizador começa a contagem, se o tempo de funcionamento do ventilador ultrapassar um valor excessivo de trabalho, o sistema de Alarme 3 é ativado, movendo a mensagem necessária para alertar o operador da máquina sobre tal problema. Foi determinado 2 minutos, como tempo de contagem para acionamento do Alarme 3 em casos de anomalia.

3.7 Identificação da Planta de Controle

Depois de finalizada as etapas de construção do protótipo didático, implementação dos *softwares* e de todas as partes necessárias para seu funcionamento, o próximo passo foi realizar a coleta de dados, por meio de testes, para auxiliar na determinação do modelo determinístico da planta. O primeiro passo para descrever o processo a ser controlado é desenvolver um modelo matemático (também conhecido como modelo dinâmico), considerando o sistema linear e invariante no tempo. “O modelo matemático de um sistema é definido como um conjunto de equações que representa a dinâmica do sistema com precisão ou, pelo menos, razoavelmente bem” (OGATA, 2011). Segundo Franklin, Powell e Emami-Naeini (2013), um modelo pode ser obtido usando os princípios físicos, ou por meio de testes em um protótipo do dispositivo, medindo sua resposta a determinadas entradas e usando os dados para construir um modelo analítico.

Quando a Função de Transferência de um sistema não for conhecida, o projetista pode construir um protótipo e testar o sistema de malha aberta. É possível compreender o comportamento do sistema através da análise da resposta em malha aberta. Se houver garantia de estabilidade absoluta da malha fechada, o projetista fecha a malha e testa o desempenho do sistema de malha fechada resultante (OGATA, 2011). Um modelo matemático satisfatório pode ser obtido de forma experimental com o auxílio de entradas conhecidas e do estudo das respectivas respostas do sistema. Desta forma, foi aplicado um degrau unitário ao sistema, para determinar as variáveis em regime transitório.

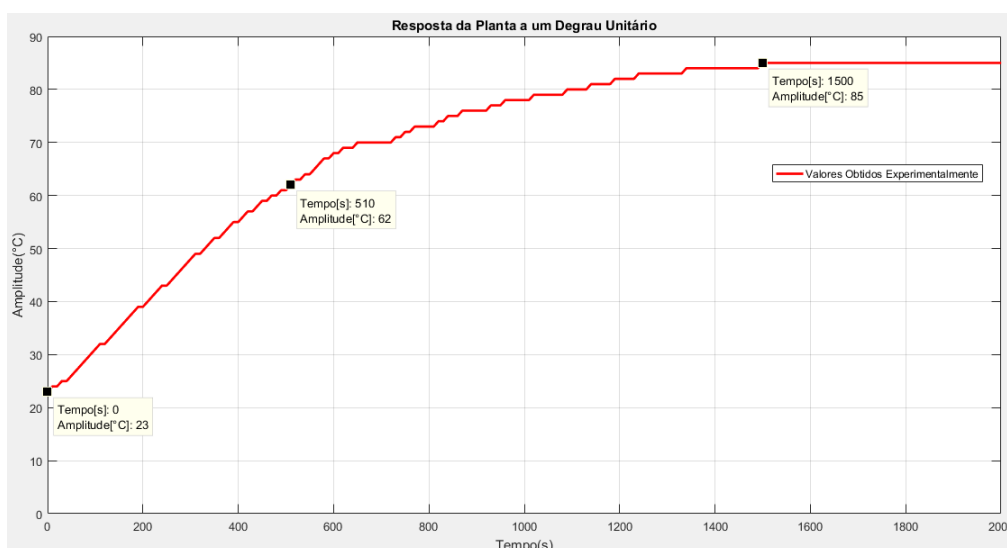
Quando o SP é ajustado a saída leva um tempo para atingir seu valor final. Este tempo é chamado de transitório e é muito importante seu conhecimento para fins de determinação de comportamento do sistema e avaliação do desempenho do

controlador (NASCIMENTO, 2018). As respostas ao degrau têm grande importância, pois na prática podem ser facilmente medidas, bastando para isso modificar o patamar das entradas e registrar as saídas.

Em testes envolvendo degraus unitários, costuma-se repetir as medidas buscando partir de uma condição padrão. Para isto, foi utilizado um transformador abaixador de tensão para aplicar um degrau unitário de 110 VAC. Para o devido ensaio foi determinado um valor de tensão elétrica abaixo do fornecido pela rede (220 VAC), com o intuito de posteriormente obter uma maior liberdade no dimensionamentos dos parâmetros de controle, aumentando a capacidade de ajustar o desempenho da resposta transitória e permanente, diminuindo assim, o tempo para a estabilização do sistema.

Com a tensão elétrica alternada aplicada à planta, foi medida a temperatura a cada dez segundos com o auxílio de um cronômetro, registrando os dados na memória de um computador, para obter as amostras de temperatura. O aquecimento da planta de controle ocorreu em regime máximo de operação (sistema em malha aberta com degrau de acionamento em nível máximo, que significa 100%) até atingir o regime permanente de operação, e logo após foi desligado. A resposta ao degrau permite de maneira preliminar que se analise a dinâmica do processo com uma simples interpretação gráfica. Os valores registrados no computador foram inseridos em um *software* matemático, onde foi possível apresentar graficamente a curva de resposta em decorrer do tempo do sistema a um degrau unitário de 110 VAC, mostrado na Figura 42.

Figura 42 – Resultados obtidos experimentalmente aplicando um degrau unitário



Fonte: Autor, 2023.

Como resultado do primeiro experimento, foi obtida uma temperatura inicial $y(0)$ de 23°C, e uma temperatura final $y(\infty)$ de 85°C. O valor da temperatura inicial é remetido à temperatura do ambiente onde se encontrava a planta. Já o valor da

temperatura final correspondeu a estabilização da temperatura, que ocorreu no regime permanente, após 25 minutos (1500 segundos) do sistema de aquecimento estar ligado a um degrau unitário. Foi possível observar analisando o gráfico da Figura 42, que a resposta obtida através do degrau unitário aplicado à planta resultou em uma curva característica de um sistema de primeira ordem, com ausência de ultrapassagem e uma inclinação inicial não nula. Através dos dados obtidos experimentalmente, foi possível determinar a Função de Transferência que expressa a informação entre entrada e saída. Para isso foi utilizado o valor em que a resposta alcançou 63,2% de sua variação total, para encontrar o valor da constante de tempo (T).

Para dimensionar a constante de tempo, foi preciso ter em mente que o sistema partiu a uma temperatura inicial de 23°C. Na prática, em processos industriais, a temperatura inicial de uma extrusora pode assumir diferentes valores, dependendo do local e ambiente onde a máquina encontra-se instalada. Assim, foi preciso obter a FT considerando como valor inicial 0°C. Caso contrário, o dimensionamento do modelo matemático apresentaria resultados insuficientes quando comparado ao modelo real. Chegou-se a constante de tempo da seguinte forma:

$$y(T) = 0,632 \cdot (y(\infty) - y(0)) + y(0) \quad (26)$$

$$y(T) = 0,632 \cdot (85 - 23) + 23 \simeq 62^\circ C$$

Através da curva de resposta, mostrada no gráfico da Figura 42, foi visto onde a curva atingiu (abscissa) 62°C, sendo cerca de 510 segundos. Para o cálculo do Tempo de acomodação do processo a Equação (7) foi usada, obtendo:

$$T_a = \frac{4}{W_n} = \frac{4}{\left(\frac{1}{510}\right)} = 2040 \text{ segundos}$$

Portanto, a constante de tempo do sistema foi de $T = 510$ segundos e o Tempo de acomodação de $T_a = 2040$ segundos. Segundo Nise (2011), quando é identificado a constante de ganho K , a partir de ensaios laboratoriais, pode-se obter a Função de Transferência do sistema. A constante K é obtida através da Equação (3), que combina a relação entre a diferença da amplitude de saída final e inicial, pelo degrau de entrada do sistema, sendo:

$$K = \frac{y(\infty) - y(0)}{A} = \frac{85 - 23}{110} = \frac{62}{110}$$

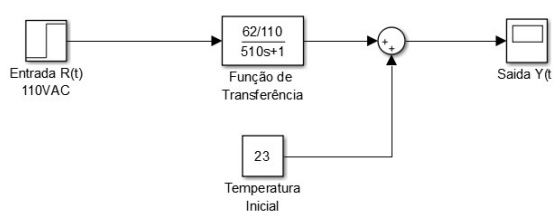
Aplicando as constantes na Equação (2), que representa a FT de um sistema de primeira ordem quando aplicado um degrau unitário, encontrou-se a FT que definiu a planta de controle:

$$G(s) = \frac{\left(\frac{62}{110}\right)}{510 \cdot s + 1} \quad (27)$$

Para verificar a qualidade do modelo expressado na Equação (27), uma validação deve ser feita usando outros conjuntos de dados, obtidos através de simulações, para validação da FT. Segundo Ogata (2011), no processo de projetar um sistema de controle, é montado um modelo matemático do sistema de controle e ajustado os parâmetros do compensador. A parte do processo que mais consome tempo é a verificação do desempenho do sistema, por meio da análise de cada ajuste dos parâmetros. O projetista deve usar ferramentas de simulações disponíveis para evitar boa parte do trabalho matemático enfadonho, necessário a essa verificação.

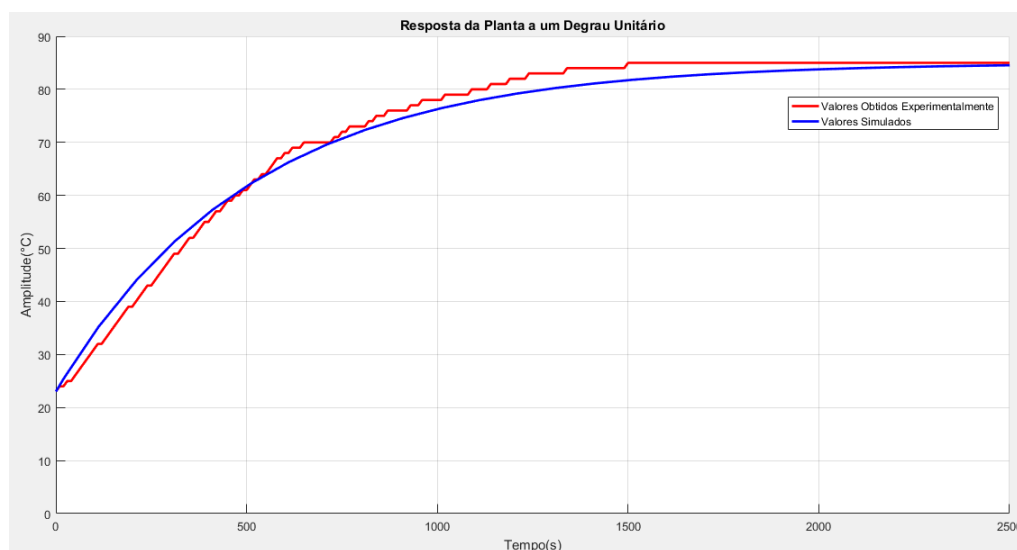
Com o desenvolvimento de programas especializados, a engenharia de controle tem alcançado um alto grau de amadurecimento nas últimas décadas, facilitando a utilização das técnicas de projeto. O programa mais conhecido para simulação de controle é o MATLAB da MathWorks (CASTRUCCI; BITTAR; SALES, 2018). Para reproduzir por meio de simulações o comportamento dinâmico do modelo proposto, foram utilizados pacotes de controle e de simulação de sistemas encontrados no MATLAB, conhecido como *Simulink*. Através do *Simulink*, foi utilizado o diagrama gráficos por blocos, onde encontra-se bibliotecas customizadas para simulações. Assim, foi transcrito o modelo dinâmico encontrado para a simulação, aplicando uma entrada (degrau unitário) á FT obtida experimentalmente, como mostra a Figura 43.

Figura 43 – Simulação para identificação da planta de controle



Fonte: Autor, 2023.

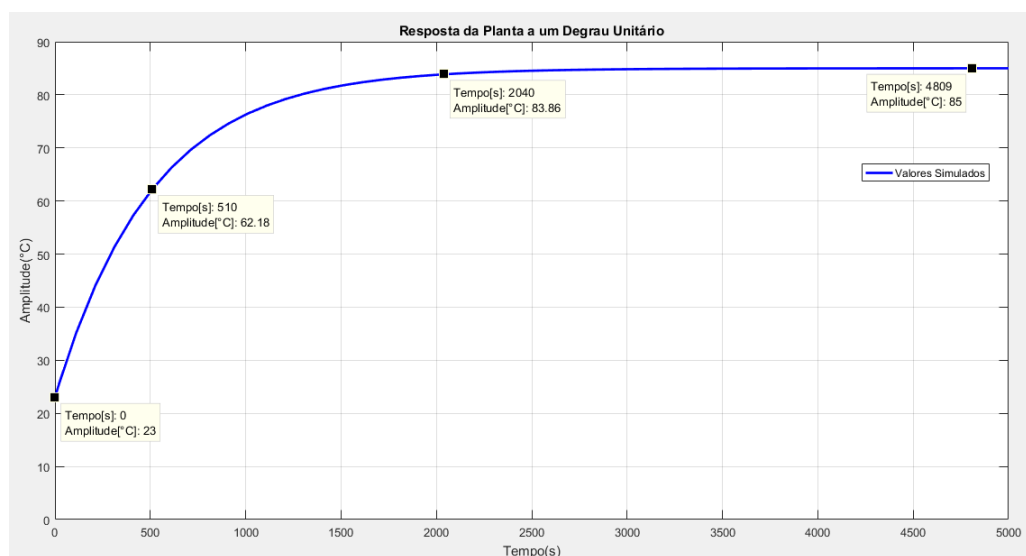
Utilizando a função de plotagem, foi possível gerar o gráfico de resposta obtidos experimentalmente e simulado, apresentado na Figura 44, para realizar uma comparação usando os próprios dados de modelagem juntamente com a resposta do modelo. Segundo Melo (2007), comparar a simulação do modelo com dados medidos é provavelmente a maneira mais simples de se validar um projeto de controle.

Figura 44 – Comparação entre os resultados experimentais e simulados

Fonte: Autor, 2023.

Por meio de comparação dos resultados, conclui-se a validação do modelo matemático usado na simulação, pois foi possível reproduzir o comportamento dinâmico da planta de controle, já que as curvas de respostas demonstraram similaridade. O sistema térmico encontrado se caracterizou por possuir comportamento de primeira ordem, isto é, a Função de Transferência de primeira ordem descreveu muito bem a dinâmica do sistema. Como era esperado, o modelo matemático não apresentou resultados perfeitos, embora ele represente corretamente o comportamento do conjunto de dados. Segundo Ogata (2011), devido aos efeitos negligenciados da carga entre os componentes, e das não linearidades dos parâmetros distribuídos, que não foram levados em consideração no projeto original, o desempenho real do protótipo do sistema provavelmente será diferente das previsões teóricas.

Por meio da visualização de gráficos disponibilizados pela simulação, foi possível obter os valores precisos da resposta $Y(t)$ no período de tempo desejado. A Figura 45 apresenta a simulação da curva de saída da planta de controle equacionada.

Figura 45 – Resultados obtidos por simulação aplicando um degrau unitário

Fonte: Autor, 2023.

Como visto na Figura 45, o tempo necessário para a temperatura atingir o regime permanente de 85°C foi de aproximadamente 4809 segundos. Desta forma, foi possível comparar os cálculos desenvolvidos com os dados retirados por simulação, para uma melhor confiabilidade do modelo matemático encontrado. Para isso, foi comparado os valores de temperatura no instante da constante de tempo e do Tempo de acomodação. Assim, foi possível comprovar os cálculos juntamente com a simulação, já que:

$$T[^\circ C] \simeq 62^\circ C$$

$$T_a[^\circ C] = 85 \cdot 0,98 \simeq 83,3^\circ C$$

Viu-se que os valores encontrados através do eixo são praticamente os mesmos que os calculados, comprovando assim, a validação da FT. Outra consideração importante a ser observada é o intervalo considerado para este modelo, ou seja, foi utilizado um intervalo para estudo de 0 a 100°C, devido a limitação física da resistência de aquecimento, pois em temperaturas fora deste valor, o comportamento da planta de controle é desconhecido. O devido teste experimental só foi possível devido à resposta lenta da planta.

3.8 Cálculos dos Parâmetros PI

"Uma vez determinada, a Função de Transferência fornece uma descrição completa das características dinâmicas da planta de controle, independentemente de sua descrição física"(OGATA, 2011). No processo de projetar um sistema de controle, é encontrado o modelo matemático do sistema e ajustado os parâmetros de um compensador. Com a Função de Transferência conhecida, o próximo estágio foi simular

o sistema em malha fechada, realizando a aproximação dos ajustes de sintonização PI com o auxílio do aplicativo de simulação MATLAB. Para Silveira (2018) um sistema de controle em malha fechada exige um bloco controlador que comande o parâmetro de saída (variável manipulada), de modo a influenciar diretamente no comportamento geral do sistema. Através do controlador são ajustadas às características do sistema, podendo-se modificar, por exemplo, sua velocidade de resposta e o erro no regime permanente.

O processo de determinação dos ganhos ideais para o controlador é frequentemente chamado de sintonia de PI. Muitas vezes esses parâmetros são obtidos de modo empírico usando respostas ao degrau obtidas via simulação. Segundo Melo (2007), o grande desafio é sintonizar os parâmetros do controlador PI. Se estes valores estiverem mal regulados, podem ocasionar em uma possível instabilidade do controle de temperatura, comprometendo os regimes transitório e permanente. Portanto, um cuidado grande deve ser tomado no dimensionamento desses valores de forma a atenuar os efeitos da perturbação na saída.

Como visto anteriormente, os parâmetros de um compensador PI para controle de temperatura podem ser obtidos através da FT, coeficiente de amortecimento e Tempo de acomodação. Com o modelo matemático adquirido experimentalmente, as únicas informações que restavam eram o coeficiente de amortecimento e Tempo de Acomodação, para começar a trabalhar no dimensionamento dos parâmetros do controlador PI.

Na prática da engenharia, normalmente deseja-se atender a duas exigências conflitantes: resposta transitória rápida e resposta bem amortecida, isto é, sem sobressinal. Em geral, dada a ordem da dinâmica do sistema não se pode minimizar o coeficiente de amortecimento e o Tempo de acomodação simultaneamente (CASTRUCCI; BITTAR; SALES, 2018). Sendo assim, foi mantido constante o coeficiente de amortecimento, utilizando o critério que descreve um subamortecimento ótimo em:

$$\xi = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0,70 \quad (28)$$

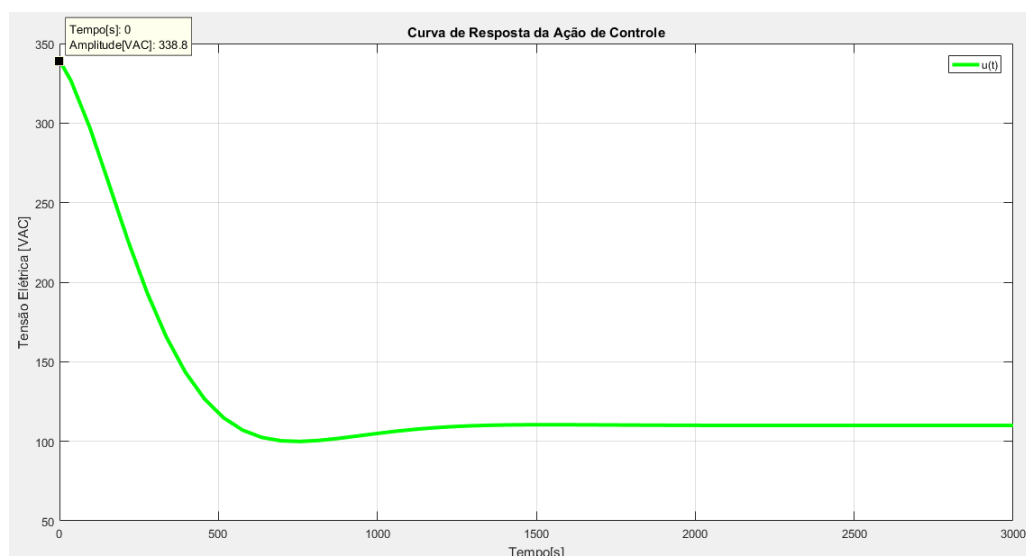
Este valor de coeficiente de amortecimento é considerado ideal em muitos casos porque oferece um compromisso equilibrado entre a rapidez da resposta e a minimização do sobressinal. Esse valor é escolhido com base nas características desejadas para a resposta do sistema, buscando um equilíbrio entre velocidade de resposta e estabilidade, minimizando oscilações indesejadas e melhorando a precisão do controle. É frequentemente utilizado em projetos de controladores PID e outros sistemas de controle automático, onde a estabilidade e a resposta dinâmica são críticas. Desta forma, o sistema tende a ter um sobressinal mínimo em resposta a uma mudança

de entrada. Isso é crucial em aplicações onde é necessário alcançar rapidamente uma nova condição de operação sem oscilações excessivas.

Pelo fato de ocorrerem mudanças, o parâmetro crucial no controle de processo é o tempo, ou seja, quanto tempo ele leva para uma mudança em qualquer entrada aparecer na saída. A determinação do Tempo de acomodação implica na rapidez que a ação de controle irá atuar sobre a planta de controle, pois é o tempo necessário para o sistema passar do regime transitório para 98% do regime permanente. Assim, entende-se o Tempo de acomodação como o intervalo de tempo em que ajustada uma entrada, o sistema demora a convergir, ou seja, é o intervalo de tempo em que dura a fase do transitório (NASCIMENTO, 2018). O Tempo de acomodação deve ser rápido o suficiente para que a ação de controle sobre a planta não se torne muito lenta.

Em contrapartida, ajustes de temperatura devem ser graduais, ou em pequenos passos bem espaçados no tempo, caso contrário, transientes excessivos podem resultar em produtos fora de especificação e até mesmo a interrupção do processo. Na prática, se a redução da temperatura for detectada, os controladores tenderão a restaurar a temperatura por aporte adicional de calor, através dos aquecedores, mas devido à capacidade térmica da máquina, isso ocorrerá em uma escala de tempo maior. Desta forma, para escolha do Tempo de acomodação foram tomadas algumas precauções. Uma forma de abordar o dimensionamento do T_a , foi considerar as restrições físicas dos atuadores do processo, para que o controle projetado limita os valores máximos e mínimos permitidos pelo sistema, evitando uma possível saturação no sinal de resposta do controlador.

Negligências dos impactos da saturação podem resultar em significativa degradação do desempenho do sistema de controle. A Figura 46 apresenta um ensaio realizado por simulação, onde o Tempo de Acomodação mal dimensionado ocasionou em uma saturação do sinal de ação de controle, pois o controlador demandou uma ação de controle rápida, ocasionando em uma potência elétrica maior que a suportada pelo acionamento elétrico, chegando a uma tensão elétrica de aproximadamente 340 VAC.

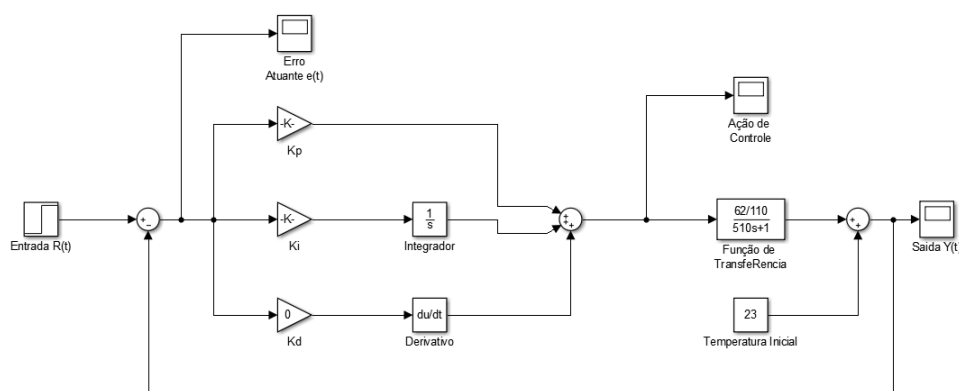
Figura 46 – Resultados obtidos pelo mal dimensionamento de T_a 

Fonte: Autor, 2023.

Em virtude destes problemas mostrados, causados pelo mau dimensionamento do controlador, justifica-se a realização de uma sintonia do PI atenuando estes problemas. No caso da aplicação deste controlador de temperatura, os problemas mencionados acima não são aceitáveis. Em muitas outras aplicações, inclusive a nível industrial, esse problema não pode ocorrer (MELO, 2007). Sendo assim, para projetar o controlador levando em consideração a saturação da ação de controle, foi definida uma tensão elétrica de 0 VAC até 220 VAC como limitação mínima e máxima dos atuadores, pois é a tensão elétrica permitida pelos sistemas de aquecimento e resfriamento.

Para uma melhor definição dos parâmetros de controle, foi utilizado a ferramenta analítica e de computação *Simulink* do MATLAB, para efeito de análise e síntese. Segundo Ogata (2011), o projetista deve ajustar os parâmetros do sistema e modificá-los, até que o sistema atenda às especificações. Ao fazer isso, foi analisado cada teste e os resultados da análise foram incorporados ao teste seguinte. O projetista deve garantir que o sistema final atenda às especificações de desempenho e seja, ao mesmo tempo, confiável e econômico. Assim, foram feitos vários cálculos e ensaios, variando o Tempo de Acomodação, até encontrar a melhor resposta do sistema de controle proposto. A Figura 47 apresenta o diagrama de blocos com o sistema em malha fechada. Foi determinado para os testes uma temperatura de SP de 85°C e temperatura inicial de 23°C, sendo a mesma temperatura inicial obtida nos testes de identificação da planta de controle.

Figura 47 – Simulação para estudos do controlador PI



Fonte: Autor, 2023.

Com o bloco de simulação já montado, bastou variar o Tempo de acomodação e recalculer os parâmetros PI. Após um criterioso estudo qualitativo dos efeitos provocados pelas mudanças ocasionadas pelos parâmetros do controlador e com ajuda da simulação, foi possível escolher bons valores para as constantes. Vale lembrar que a escolha desses valores foi definida de forma baseada nos resultados das simulações, através da análise de respostas dos gráficos Melo (2007). O melhor resultado apresentado, foi quando o Tempo de acomodação foi setado em $T_a = 1360$ segundos, chegando aos seguintes valores de K_p e K_i :

$$T_a = \frac{4}{\xi \cdot W_n} \Rightarrow 1360 = \frac{4}{0,70 \cdot w_n} \Rightarrow W_n = 4,15 \text{ m[Hz]}$$

$$K_p = \frac{(2 \cdot \xi \cdot W_n \cdot T) - 1}{K} = K_p = \frac{(2 \cdot 0,70 \cdot 4,15 \cdot 10^{-3} \cdot 510) - 1}{\left(\frac{62}{110}\right)} \Rightarrow K_p \simeq 3548 \text{ m}$$

$$K_i = \frac{W_n^2 \cdot T}{K} = \frac{(4,15 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 510}{\left(\frac{62}{110}\right)} \Rightarrow K_i \simeq 16,65 \text{ m}$$

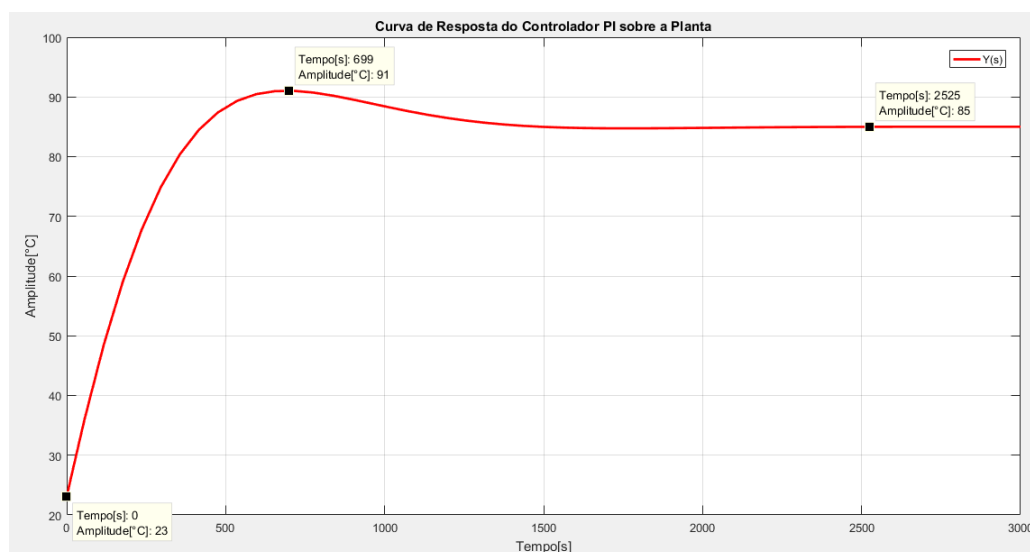
Após a conclusão dos cálculos teóricos, o próximo passo crucial consistiu na realização de simulações tanto em ambientes virtuais, por meio de *softwares* especializados, quanto na prática, através do protótipo físico. Essa abordagem integrada buscou validar e aprimorar o modelo teórico por meio da análise comparativa entre os resultados obtidos nas simulações computacionais e aqueles observados durante os testes reais. Essa estratégia não apenas fortalece a confiabilidade do projeto, mas também proporciona uma base sólida para ajustes e refinamentos, garantindo que a implementação prática reflita com precisão as previsões teóricas.

4 RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos ao longo deste estudo, os quais abrangem diversas avaliações e testes realizados no contexto do desenvolvimento e aplicação do protótipo didático para automação no controle de temperatura em máquinas extrusoras. Este capítulo será dividido em seções distintas, cada uma detalhando os resultados específicos obtidos em diferentes cenários e abordagens. Ressalta-se que os ensaios práticos foram realizados a vazio, ou seja, sem conexão com uma extrusora real, sendo aplicados exclusivamente no protótipo didático para fins de validação do funcionamento do sistema de controle proposto.

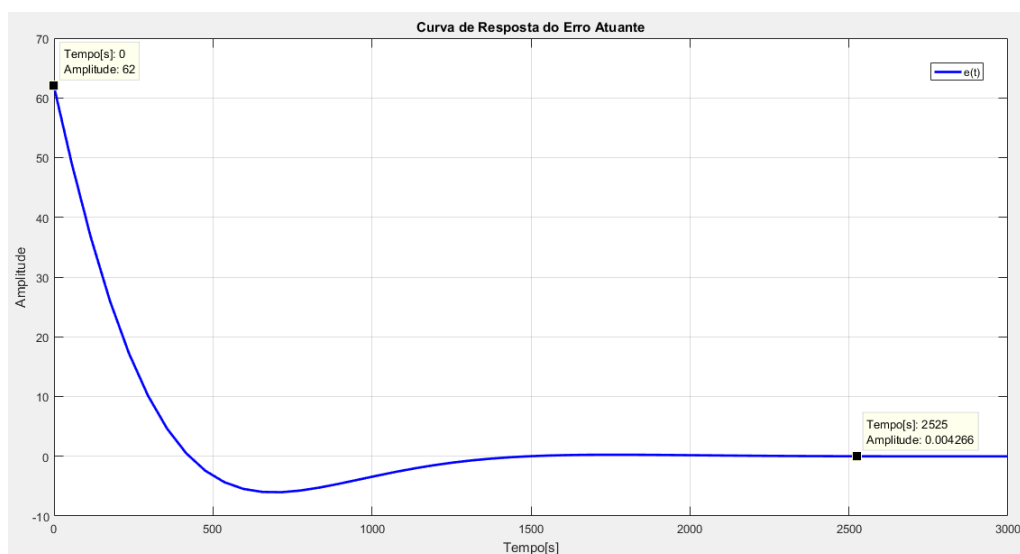
4.1 Resultados Obtidos por Simulação Utilizando o Controlador PI

A primeira seção apresentará os resultados derivados das simulações realizadas utilizando o controlador PI, destacando as respostas do sistema sob diferentes condições e parâmetros de controle. Uma mudança no valor pré-ajustado faz que o controlador responda proporcionalmente, seguido por uma resposta Integral, combinando as características dos dois tipos de controle. Obteve-se através de cálculos os valores aproximados dos coeficientes PI que posteriormente foram simulados no aplicativo *Simulink*. A Figura 48 apresenta a curva de resposta $Y(t)$ do sistema de controle proposto, mostrando a temperatura da planta ao passar do tempo. Analisando o comportamento da temperatura sobre a planta de controle, é visto que no momento inicial, a temperatura encontra-se exatamente igual ao valor definido no bloco de temperatura ambiente. Após 1360 segundos, a temperatura chegou a 98% do valor em regime permanente, comprovando o Tempo de acomodação escolhido. Em 2525 segundos a temperatura estabilizou em 85°C, chegando ao regime permanente.

Figura 48 – Gráfico de resposta da variável manipulada $Y(t)$ 

Fonte: Autor, 2023.

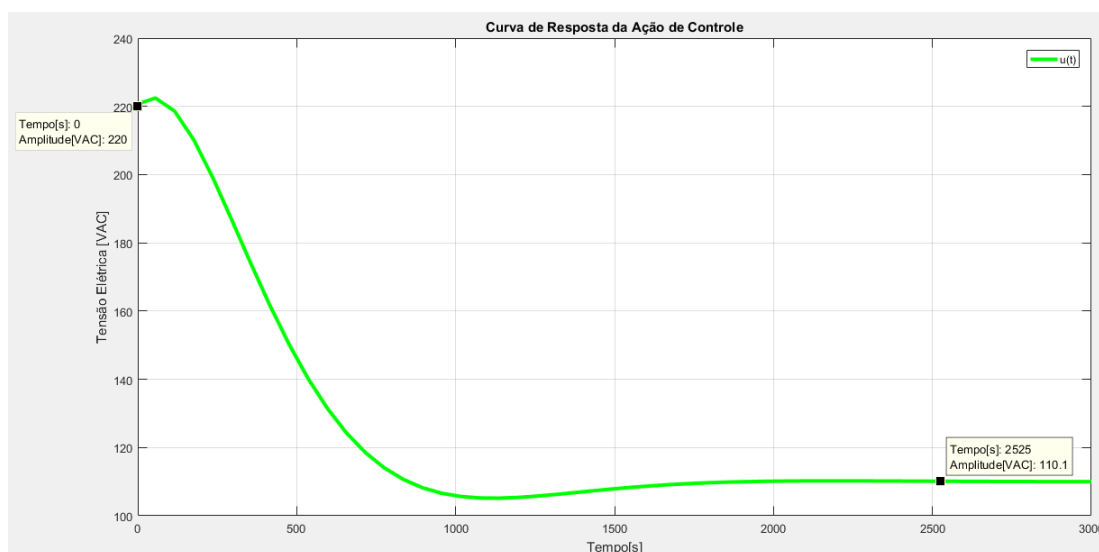
Durante o teste realizado, a curva de resposta do sistema apresentou um sobressinal (M_p) de 6°C, o que equivale a um desvio de aproximadamente 7% da temperatura de SP. Esse sobressinal indica uma oscilação temporária da temperatura, na qual o valor ultrapassa o ponto de referência antes de se estabilizar. Nota-se que existe um sinal de erro atuante quando há uma diferença entre a temperatura real da planta e o valor pré ajustado, de modo que a ação Integral faz que a saída mude, e continue a mudar, até que não exista mais erro. A ação do controle Integral faz a saída mudar por uma quantidade necessária para acionar a variável de processo de volta ao valor de SP. Para mostrar com mais detalhes os efeitos de um compensador PI, um outro ensaio foi realizado em simulação de forma a descobrir com mais exatidão o comportamento do erro atuante $e(t)$, apresentado na Figura 49:

Figura 49 – Gráfico de resposta do erro atuante $e(t)$ 

Fonte: Autor, 2023.

No momento inicial, como de costume, encontrou-se uma diferença entre a temperatura real da planta e o SP. O controlador PI toma medidas apropriadas para modificar o ponto de operação do processo até que a variável de controle e o ponto de ajuste fiquem aproximadamente iguais. Com o decorrer do tempo a diferença decai, até o momento que o erro atuante zera, pois a temperatura sobre o sistema de aquecimento se torna a mesma que a temperatura de SP. Desta forma, para eliminar o erro de desvio (*offset*), o controlador precisa mudar sua saída até que o erro atuante da variável de processo seja próximo de zero.

A partir da curva gerada pela simulação, ilustrada na Figura 50, foi possível analisar a resposta do controlador projetado. Ao observar o gráfico, notou-se que inicialmente o controlador demanda potência máxima do acionamento elétrico, resultando em uma tensão de saída de 220 VAC. Com o decorrer do tempo, essa tensão elétrica é reduzida até atingir o valor de regime permanente de 110 VAC. Percebeu-se que o compensador projetado para controle de temperatura, atingiu a tensão elétrica em regime permanente exatamente igual ao degrau unitário aplicado ao processo para identificação da planta de controle.

Figura 50 – Gráfico de resposta da ação de controle $u(t)$ 

Fonte: Autor, 2023.

Destaca-se pela análise do gráfico a aplicação da ação de controle Proporcional, diminuindo a potência média fornecida ao aquecedor, conforme a temperatura se aproxima do ponto de ajuste. Isso produz um efeito de desaceleração do aquecedor, de modo que ele não ultrapasse o ponto de ajuste, mas que se aproxime e mantenha uma temperatura estável, ou seja, a sua ação é proporcional ao erro (diferença entre o valor medido e o ponto de ajuste).

4.2 Teste de Funcionalidade do Protótipo Didático

Depois que a solução para o projeto de controle para uma máquina extrusora foi desenvolvida, o próximo passo foi a validação do protótipo como um todo por meios de testes práticos, apresentando uma análise dos resultados obtidos a partir de ensaios prático de funcionalidade do protótipo didático, evidenciando sua eficácia e desempenho operacional em um ambiente real de aplicação. Esse passo consistiu na revisão dos códigos, implementação das programações nos *hardwares* CLP e IHM, e testes com dados reais na planta, para uma melhor exatidão e confiabilidade do sistema de controle proposto. A implementação dos códigos de programação consistiu na compilação e instalação dos programas. As instalações das programações foram feitas por meio de uma conexão simples e direta, ponto a ponto pela porta serial do computador pessoal. Depois da implementação dos programas, o sistema foi testado e depurado, isso garante que o programa funcionará corretamente e possivelmente estará livre de erros (LAMB, 2015).

Buscando observar o comportamento do sistema e avaliar o desempenho do controlador em uma situação típica de utilização pelo usuário, decidiu-se realizar uma sequência de ensaios que se aproximasse do processo de extrusão utilizado na

indústria. Existem vários sistemas automáticos associados à planta de controle, que precisam ser testados para garantir sua operação correta e eficiente, além de ensaios de segurança dos equipamentos envolvidos e dos possíveis operadores presentes. Os testes foram realizados com o objetivo de verificar se a programação desenvolvida estava simplesmente acessando, manipulando e apresentando os dados corretamente. De acordo com Lamb (2015), com os testes reais realizados no protótipo, vários conjuntos de dados são desenvolvidos e os resultados esperados são apresentados.

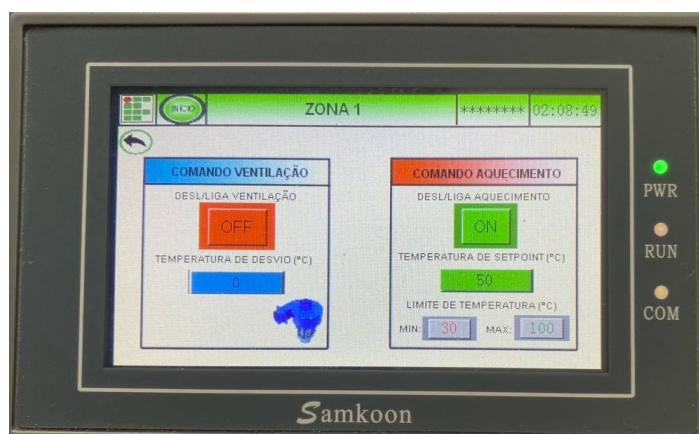
O primeiro teste realizado através da lógica de programação, foi a visualização da temperatura da planta através da IHM, presente na tela de controle da máquina extrusora, mostrada na Figura 51. Através deste teste conclui-se que o elo (link) de comunicação entre o CLP e IHM estava sendo feito corretamente.

Figura 51 – Teste aplicado a tela de controle de extrusão



Fonte: Autor, 2023.

Os próximos ensaios envolveram a manipulação das saídas, ligando o sistema de aquecimento e resfriamento pelo comando manual de botões presente na IHM, como apresenta a Figura 52, que demonstra a interface desenvolvida para controle das variáveis do sistemas de aquecimento e resfriamento.

Figura 52 – Teste aplicado a tela de parâmetros de controle

Fonte: Autor, 2023.

Com o devido teste, foi possível observar e comprovar as diferentes vantagens da utilização do comando de acionamento, funcionando com uma função de controle de substituição manual. Essa abordagem possibilitou ao usuário do CLP ativar ou desativar as saídas externas diretamente pelo teclado do dispositivo IHM, independentemente do estado atual do dispositivo de campo. Viu-se que a capacidade de forçar permite que a máquina ou o processador continue a funcionar até que a falha no dispositivo externo seja reparada. Este comando também esteve disponível para estimular a ação de partes do programa que ainda não foram implementadas.

Aplicou-se testes onde a planta de controle trabalhou em circunstâncias não usuais, introduzindo dados incorretos ou de condições de falha propositais. A Figura 53 apresenta o resultado de um teste realizado, onde foi elevado a temperatura acima da temperatura de SP, para verificar o acionamento do sistema de Alarme 1 projetado.

Figura 53 – Teste aplicado a tela central de alarmes

Fonte: Autor, 2023.

Destacou-se a facilidade da central de alarme projetada para avisar o operador

em casos indesejados, sinalizando através de lâmpadas e quadro de mensagens, apresentando textos simples e de fácil leitura, para que o operador entenda de forma objetiva os problemas indesejados encontrados em uma máquina extrusora, como por exemplo, a temperatura do processo após ter atingido um valor acima do pré-estabelecido.

Ao longo dos testes e simulações, foi preciso realizar correções nos códigos de programação, pois a apuração de um código também envolve os erros presentes na lógica. Os principais testes realizados no protótipo didático abrangeram os processos de simulações de código executados, manipulação das saídas, análise das entradas, operações de visualização e comando da IHM, concluindo-se assim, a validação do protótipo didático para simulação de uma máquina extrusora.

4.3 Teste de Controle de Potência

Para Franklin, Powell e Emami-Naeini (2013), um cuidadoso projetista de sistemas de controle deverá contar com alguns experimentos para verificar a exatidão do modelo quando este for obtido por meio de princípios físicos. Se a Função de Transferência de um sistema for conhecida, a saída ou a resposta poderá ser estudada para várias maneiras de entrada, visando ao entendimento da natureza do sistema. Posteriormente, foi preciso detalhar os resultados dos testes práticos realizados para avaliar o controle de potência e temperatura proporcionado pelo sistema desenvolvido. O ensaio subsequente consistiu na análise e monitoramento do controle de potência projetado, utilizando a tecnologia PWM, a fim de obter uma melhor compreensão do parâmetro conhecido como *Duty Cycle*. Sabe-se através de estudos teóricos que variando-se a largura do pulso e também o intervalo de modo a obter ciclos ativos diferentes, é possível controlar a potência média aplicada à carga. Assim, quando a largura do pulso varia de zero até o máximo, a potência também varia na mesma proporção. Este princípio é usado justamente no controle PWM, pois ao modular a largura do pulso é controlado o ciclo de trabalho do sinal aplicado a uma carga e, com isso, a potência aplicada a ela (NASCIMENTO, 2018).

Na prática, para análise de sistemas que envolvem controle PWM, são utilizados equipamentos de medições para visualização gráfica da resposta e comportamento do sistema projetado, com o objetivo de conhecer o comportamento padrão, identificando as possíveis anormalidades. Infelizmente, a realização do teste prático enfrentou uma limitação inesperada devido à incapacidade dos instrumentos de medição disponíveis no laboratório, os quais não foram capazes de interpretar níveis de tensão elétrica necessários para a realização adequada do devido teste. Este cenário impediu a execução adequada do ensaio, uma vez que a instrumentação disponível não ofereceu suporte às especificações elétricas necessárias para a leitura de tensões mais elevadas (220 VAC).

A complexidade e os requisitos específicos do sistema em questão, demandou uma instrumentação capaz de lidar com as características de tensão envolvidas. Explorando alternativas viáveis para superar essa limitação e garantir a realização do teste prático em condições ideais, utilizou-se como método alternativo a variação da temperatura real da planta quando aplicado um ciclo constante de PWM. Um dos mais simples e comuns métodos para determinar as características do sistema é medir a resposta da temperatura, a uma mudança gradual na potência elétrica aplicada à carga (resistência elétrica).

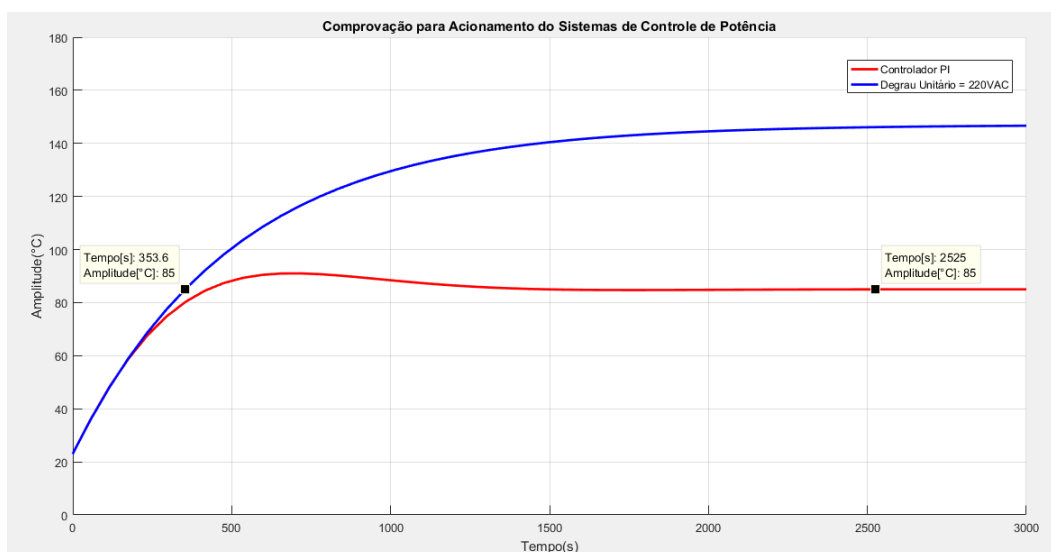
De forma experimental, aplicando-se um degrau unitário de 110 VAC, chegou-se a uma temperatura em regime permanente de 85°C. Através dessa informação, sabe-se que com a temperatura estabilizada em 85°C, a ação de controle sobre a planta é de 110 VAC. A partir desses conceitos, deu-se início aos ensaios de controle de potência. Para tal ensaios, primeiramente foi mantido constante o tempo em nível lógico baixo (0 VAC) em 1 segundo, e variando o tempo de nível lógico alto em 0,1 segundo. A cada ensaio foi acrescentado 0,1 segundos de tempo em estado ligado, até que a temperatura PV estabilizasse. A Tabela 1 apresenta os valores retirados pelo monitoramento das variáveis:

Tabela 1 – Ciclos de trabalhos (DT) obtidos experimentalmente

Tempo de Ativação [segundos]	Tempo de Desativação [segundos]	Temperatura PV [°C]	Duty Cycle [%]
0,1	1	0	9,09
0,2	1	50	16,66
0,3	1	60	23,07
0,4	1	70	28,57
0,5	1	75	33,33
0,6	1	80	37,5
0,7	1	85	41,17

Fonte: Autor, 2023.

Após análises e monitoramentos da modulação, observou-se que a temperatura do processo (PV) alcançou a estabilização em 85°C em 0,7 segundos, resultando em um período total do pulso de 1,7 segundos e um *Duty Cycle* de 41%. Através de simulações realizadas, observou-se que o controlador PI demandou aproximadamente 2525 segundos para que a temperatura do sistema atingisse 85°C. Essa análise proporcionou uma compreensão detalhada do tempo necessário para alcançar o SP desejado e revelou a dinâmica do processo sob controle. Para validar esses resultados e compreender melhor a resposta do sistema diante outra entrada de controle, foi conduzido um teste aplicando um degrau unitário de 220 VAC, apresentado na Figura 54.

Figura 54 – Comparação entre um degrau unitário de 220 VAC e o controlador PI

Fonte: Autor, 2023.

Por meio desta simulação, foi perceptível que a temperatura alcançou o regime permanente de forma significativamente mais rápida quando aplicado um degrau unitário de 220 VAC. Comparativamente, o tempo necessário para atingir o regime permanente foi reduzido em cerca de 2170 segundos em relação ao teste anterior, onde o controlador PI foi utilizado. Essa observação indicou uma melhoria notável na dinâmica do sistema, sugerindo uma resposta mais ágil e eficiente. Ao manter as temperaturas definidas, os controladores restaurarão automaticamente o equilíbrio de energia, mas após mudanças no polímero devido às interações dentro da extrusora, levará tempo, podendo ser várias horas. Na prática, é preciso que máquinas extrusoras entrem em regime permanente o mais rápido possível.

Diante dessa necessidade, identificou-se a importância de um complemento adicional no projeto, especificamente voltado para o sistema de controle de potência. Desenvolveu-se uma lógica de programação com o intuito de dar início ao controle PWM, apenas quando a temperatura da planta de controle estiver próximo ao valor de SP, pois não há necessidade no momento de partida a ação de controle decair conforme o aumento de temperatura, tal abordagem resultaria em um período mais prolongado para que a máquina atingisse a temperatura desejada.

A variável de controle representa um endereço no CLP onde é armazenado o resultado do cálculo da instrução PID. Assim, procedeu-se com a associação da variável de controle com o DT, dado que o DT é uma variável que depende da ação do controlador PI. O próximo passo consistiu na realização de ensaios para o controle de temperatura utilizando a tecnologia PWM.

4.4 Teste de Controle de Temperatura

Sistemas de controle são projetados para realizar tarefas específicas. É evidente que para um sistema de controle de temperatura ser considerado bom, deve-se manter a saída estabilizada conforme determinado pelo SP e continuar assim mesmo submetido a interferências (MELO, 2007). Então, para ajudar na escolha dos parâmetros do PI, foi de extrema importância realizar testes sobre o sistema e verificar se essa condição ocorre.

"Os requisitos impostos no sistema de controle são geralmente explicitados como especificações de desempenho"(OGATA, 2011). Para fins de avaliação da performance de um sistema de controle, existem alguns indicadores de desempenho básicos (que se relacionam à precisão, estabilidade e regulação), muito utilizados para a especificação de um sistema de controle (NASCIMENTO, 2018). Um dos principais indicadores de desempenho é a regulação. A regulação é uma avaliação do sistema com relação a sua capacidade de reduzir o erro entre o valor real da grandeza física controlada e o valor esperado ao final do transitório. Se o erro for muito grande, implicará em uma regulação do sistema ruim. Outro importante indicador de desempenho é a estabilidade do sistema.

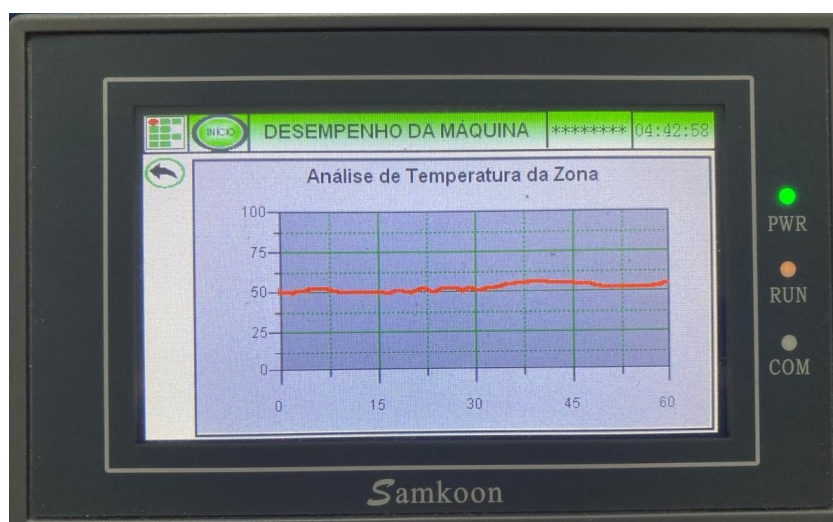
Segundo Ogata (2011) a característica mais importante do comportamento dinâmico do sistema de controle é a estabilidade, isto é, se o sistema é estável ou instável. Um sistema de controle está em equilíbrio se, na ausência de qualquer distúrbio ou sinal de entrada, a saída permanece no mesmo estado. Um sistema de controle linear e invariante no tempo é estável se a saída sempre retorna ao estado de equilíbrio quando o sistema é submetido a uma condição inicial.

Para problemas rotineiros de projeto, as especificações de desempenho podem ser dadas em termos de valores numéricos precisos. Em outros casos, elas podem ser dadas em parte como termos de afirmações qualitativas. Geralmente as especificações de desempenho não devem ser mais restritivas que o necessário para a realização da tarefa em questão. A parte mais importante do projeto de sistemas de controle é estabelecer precisamente as especificações de desempenho, de forma que elas resultem em um sistema de controle ótimo para o fim a que se destina (OGATA, 2011). Para o seguinte projeto, foi determinado como especificação de desempenho ajustar o processo para que a variável de controle (temperatura) fique o mais próximo possível do SP (valor desejado).

Após definido as especificações de desempenho e dada a partida em ensaios no protótipo, partiu-se para testes do sistema projetado, para validação dos parâmetros do PI calculados, onde a planta trabalhou no estado de automático, ou seja, com malha fechada de realimentação, onde foram inseridos os valores dos coeficientes

PI calculados. Os ensaios realizados avaliaram o comportamento da temperatura ao longo do tempo após estipulado um valor de referência. Os valores das variáveis controlada e manipulada foram registrados pela tela de desempenho, para futura análise e comparação. Operando como interface entre o sistema e o usuário enquanto o programa estava em funcionamento, o painel frontal de desempenho apresentou em formato de gráfico os valores de temperatura (em graus Celsius), sendo atualizados a cada 1 segundo. O primeiro ensaio realizado para a coleta de dados consistiu em regular a temperatura de processo em 50°C e esperá-la estabilizar. A Figura 55 apresenta os resultados obtidos das amostras térmicas com o controlador PI, em decorrer do tempo após a estabilização em 50°C.

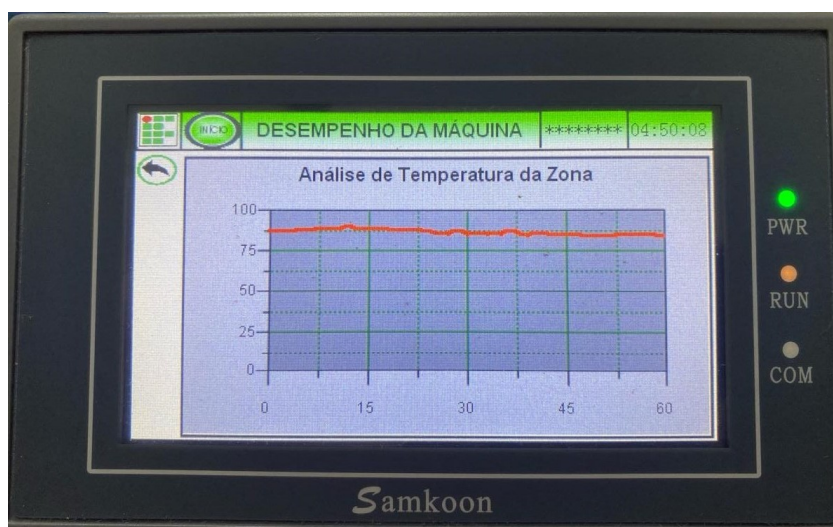
Figura 55 – Análise do controle de temperatura projetado quando SP=50°C



Fonte: Autor, 2023.

Percebe-se, que o controlador conseguiu manter a saída muito bem regulada, embora haja uma pequena oscilação de cerca de 3 graus, obtendo um erro em regime permanente flutuante em torno de $\pm 4,0\%$. Fato relacionado ao conhecimento prévio do comportamento da planta de controle, já que a FT não fornece nenhuma informação relativa à estrutura física do sistema e é baseada em um modelo simplificado, pois, segundo Ogata (2011) quase todos os sistemas físicos são muito complexos e frequentemente não lineares. Observou-se que, embora o modelo a ser usado para fins de projeto seja simplificado, foi necessário que tal modelo inclui-se todas as características intrínsecas do objeto real, presumindo que é possível um modelo se aproximar satisfatoriamente do sistema real.

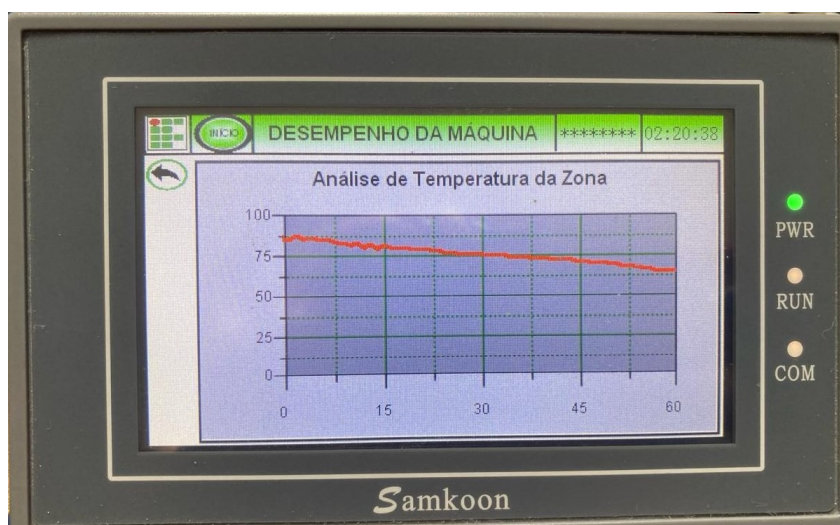
Foi aplicado à planta outras condições de temperatura de SP, para uma melhor análise do comportamento do processo ao ser submetido a outro conjunto de dados diferente do primeiro ensaio. A Figura 56 apresenta o curva de temperatura quando SP foi alterado para 85°C:

Figura 56 – Análise do controle de temperatura projetado quando SP=85°C

Fonte: Autor, 2023.

Pode-se observar a semelhança entre os resultados dos ensaios, reforçando a validação do desempenho do controlador. A importância da tela de desempenho se tornou evidente ao proporcionar uma visualização do comportamento do sistema, através de gráficos que esboçaram em tempo real as informações trabalhadas no sistema. Neste gráfico foi avaliado a temperatura inicial, entre o estado de partida do sistema até chegar no valor predefinido pelo operador do processo. Essa representação gráfica simplificou a compreensão do desempenho do processo, proporcionando uma percepção valiosa sobre a otimização do controle térmico empregado no projeto.

Ao longo do experimento, foi notável que o sistema de resfriamento não foi acionado em nenhuma instância. Esse resultado indicou de forma conclusiva que a temperatura se manteve muito bem regulada, evidenciando a eficácia do sistema de controle térmico implementado. O fato de que não houve a necessidade de ativar o sistema de resfriamento reforçou a estabilidade e a exatidão alcançadas, consolidando assim a robustez do controle e a capacidade de manter a temperatura dentro dos parâmetros desejados de forma autônoma. Este aspecto positivo destacou a eficiência do sistema em responder adequadamente às demandas térmicas, promovendo um ambiente controlado e estável durante todo o experimento. Embora o sistema de resfriamento não tenha sido ativado durante a operação automática do sistema de controle, conduziu-se um teste específico, conforme apresentado na Figura 57. Utilizando-se a função manual, foi acionado o sistema de resfriamento em pleno funcionamento, com o propósito de avaliar o impacto da ventilação sobre a temperatura.

Figura 57 – Análise do sistema de resfriamento projetado

Fonte: Autor, 2023.

Durante a execução do experimento, apresentado na Figura 57, foi observado que ao ativar o sistema de resfriamento, houve uma redução significativa na temperatura do ambiente. Esse resultado prático e mensurável forneceu uma evidência concreta e positiva do funcionamento do sistema de resfriamento implementado. A resposta imediata e substancial na diminuição da temperatura confirmou a eficiência do sistema, validando assim a sua capacidade de atender ao propósito de controlar e regular a temperatura do processo. Este resultado reforçou a importância e a funcionalidade do sistema de resfriamento no contexto do experimento.

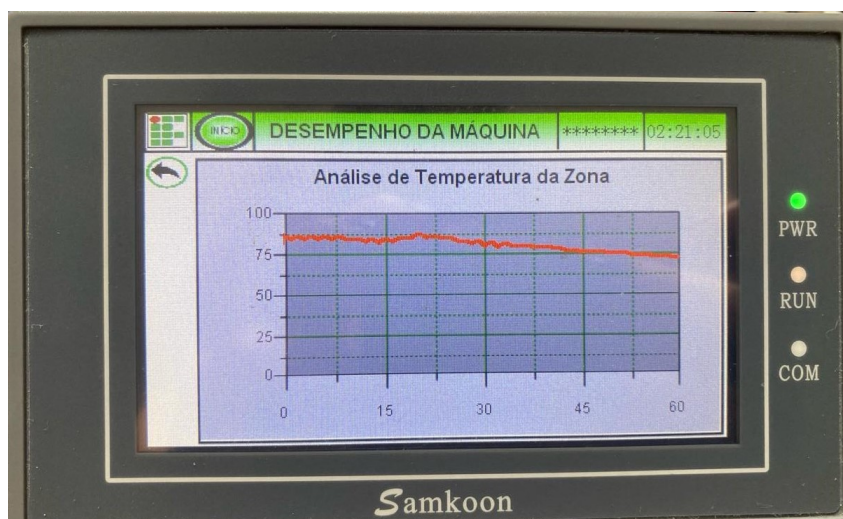
4.5 Comparação Entre Controladores ON/OFF e PI

Dando continuidade à investigação do desempenho do sistema de controle térmico projetado, o próximo passo envolveu a realização de ensaios e testes para a comparação entre dois tipos distintos de controladores apresentados: o ON/OFF e o PI. Essa etapa teve como objetivo analisar de maneira aprofundada como o controlador ON/OFF responde às demandas do sistema em termos de estabilidade, regulação e exatidão. Ao comparar os dois tipos de controladores, buscou-se identificar as vantagens e limitações de cada abordagem, proporcionando uma base sólida para a avaliação do melhor método de controle no contexto específico do sistema em estudo.

Com o intuito de avaliar o desempenho dos métodos de controle, foram conduzidas medições relacionadas ao controle de temperatura durante o processo. Para isso, empregou-se o mesmo ciclo de aquecimento previamente testado com o controlador PI, entretanto, desta vez, utilizando um controlador do tipo Liga/Desliga (ON/OFF). Nesse sistema, o aquecimento é ativado quando a temperatura atinge o limite pre-estabelecido, sendo desativado quando a temperatura alcança o valor de referência

(SP). Se a temperatura da planta de controle diminuir abaixo do valor ajustado, o CLP envia um sinal de resposta ao comando do SSR, ativando o sistema de aquecimento com potência máxima de 220 VAC. A Figura 58 ilustra os resultados obtidos com o controlador ON/OFF, apresentados através da tela de desempenho e diagnóstico, ao definir a temperatura de referência em 85 °C.

Figura 58 – Análise do controle ON/OFF de temperatura quando SP=85°C



Fonte: Autor, 2023.

Inicialmente o sistema partiu com a temperatura real de 25°C e após atingir o SP a inércia térmica foi de 6°C, obtendo um erro em regime permanente variando aproximadamente $\pm 8,0\%$, após isso continuou-se o ciclo de acordo como mostra a Figura 58. Comparando a resposta dos dois tipos de controle percebe-se que as oscilações térmicas no controle PI permaneceu abaixo de 4°C durante o período de tempo de funcionamento. Dentre as características analisadas na implementação das duas técnicas de controle, destaca-se o comportamento menos oscilatório da variável manipulada no controlador PI, impactando positivamente no processo de controle de temperatura e evitando um aquecimento indesejado.

Através do ensaio tornou-se nítido o atraso térmico referente ao tempo que o sistema levou para responder à mudança na variável controlada, resultando em uma situação em que o sistema continuou a aquecer mesmo após o controle de potência ter sido desligado. Isso ocorreu pois, uma vez que o sistema é desligado, leva algum tempo para que sua influência seja perceptível na redução da temperatura. Diante desse cenário, tornou-se mais propício para o acionamento do sistema de resfriamento, que foi acionado em diferentes momentos para manter a temperatura no valor desejado.

Assim, pode-se afirmar que o controle do tipo PI apresentou vantagens em comparação com o controle do tipo ON/OFF ao eliminar gradualmente as variações do sistema e manter a temperatura constantemente próxima ao valor do SP. Isso deve à

sua capacidade de autoajuste, corrigindo alterações na temperatura do processo de maneira mais precisa. Outra grande vantagem, respaldada por embasamento teórico, está na economia de energia elétrica, uma vez que a implementação do controlador PI minimiza o desperdício associado a transições abruptas de potência. Isso permite uma adaptação mais gradual às demandas do processo, resultando em um uso mais eficiente da energia e favorecendo uma operação mais econômica e sustentável do sistema de controle térmico.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O esforço empregado ao longo do trabalho revelou-se de vital significância, uma vez que, na ausência de um bom conjunto adequado de valores de parâmetros, o controlador não atenderia ao seu objetivo inerente, que é a regulação da temperatura. A obtenção desses resultados se tornou viável graças ao uso de ferramentas de simulação, uma tarefa que seria altamente desafiadora de se concretizar na prática, dadas as consideráveis complexidades características da metodologia adotada, encontrada em sistemas de controle indústrias.

Uma etapa fundamental durante o projeto para o sistema de controle foi estabelecer precisamente as especificações de desempenho, de forma que elas resultem em um sistema de controle ótimo para o fim a que se destina. Ao analisar os resultados obtidos, observou-se que o compensador, embora representado por um modelo matemático simplificado, demonstrou eficiência notável no controle da temperatura. Apesar dos resultados terem exibido alguma disparidade, os testes práticos comprovaram que o controlador projetado apresentou um desempenho satisfatório na aplicação à planta real. Um modelo inadequado, por outro lado, teria o potencial de resultar em um controle deficiente, possivelmente introduzindo pequenas flutuações em condições inerentemente estáveis, o que poderia afetar as propriedades do produto fabricado.

Com os resultados obtidos no desenvolvimento deste projeto, chegou-se a conclusão que a implementação de um sistema de controle de temperatura utilizando a ação de controle PI tem a capacidade de reduzir, ou mesmo eliminar, a inércia térmica típica associada aos sistemas de controle do tipo ON/OFF. Embora tenha sido comprovado que o controle ON/OFF tenha suas vantagens em certos cenários, pois manteve a temperatura de certa forma regulada, é importante que as empresas considerem as demandas específicas de suas operações, a evolução das tecnologias disponíveis e os benefícios potenciais de sistemas mais avançados ao tomar decisões sobre o método de controle de temperatura a ser empregado. A diferença de custo para a implementação do controle PI, em contraste com o controle ON/OFF, tem diminuído cada vez mais conforme a diminuição dos custos dos componentes eletrônicos e a evolução dos sistemas informáticos, o que aumenta a vantagem do controlador PI sobre o ON/OFF, justificando sua escolha devido à economia de energia, especialmente em sistemas de aquecimento.

Na prática, constatou-se que automação do controle de temperatura em uma máquina extrusora pode ser aprimorada com sucesso por meio da implementação de um protótipo didático, resultando em uma possível melhoria significativa na eficiência do processo industrial. A experiência com protótipos pode desempenhar um papel crucial na transição para a implementação em modelos reais. Ela oferece uma série

de benefícios, ajudando a aprimorar a eficiência, a confiabilidade e a eficácia de um sistema, equipamento ou processo. Ao desenvolver um protótipo, foi possível detectar problemas e desafios que podem não ser evidentes na fase do projeto teórico. Essa abordagem permite que haja correção e ajuste no sistema antes de aplicá-lo em um ambiente industrial, economizando tempo e recursos.

Um protótipo didático disponibiliza a oportunidade de avaliar se o sistema de controle projetado atendeu aos requisitos e especificações esperados. Isso evita surpresas desagradáveis ao passar para a implementação em planta real. A experiência com protótipos permitiu a validação do desempenho do sistema em condições reais ou próximas à realidade. O protótipo demonstrou-se eficaz na simulação do controle de temperatura em uma máquina extrusora, revelando suas versatilidades para aplicações em máquinas industriais. Além de sua adaptabilidade para o contexto específico de extrusoras, este sistema poderia ser igualmente empregado em outras configurações industriais, que envolvam controladores de temperatura, como silos, fornos, injetoras e entre outras máquinas elétricas de aquecimentos térmicos.

O processo de desenvolvimento de um protótipo para sistemas de controle de temperatura inclui obrigatoriamente muitas escolhas, que podem ser influenciadas de acordo com experiências do projetista e limitações de recursos financeiros. Devido a restrições orçamentárias significativas, o projeto teve que recorrer ao uso de equipamentos e componentes de qualidade inferior, uma vez que os recursos financeiros disponíveis para aquisições foram integralmente providos pelo próprio projetista. Limitações de custo, podem até mesmo, em certos casos, levar a uma atenuação das especificações de desempenho do controlador projetado. Um dos fatores que influenciaram negativamente os resultados obtidos com um protótipo didático foi a qualidade e a exatidão dos equipamentos empregados. A escolha de dispositivos e componentes de menor qualidade ou inadequados para a tarefa específica pode resultar em um desempenho inferior do protótipo. Isso impactou negativamente a capacidade do protótipo de ilustrar os conceitos de forma eficaz.

Foi importante reconhecer que, em algumas situações, o protótipo didático pode não apresentar os resultados esperados devido aos equipamentos utilizados em sua construção. Desta forma, conclui-se que a falta de disponibilidade de equipamentos de ponta ou de alta precisão pode limitar a capacidade do protótipo de reproduzir fielmente os cenários reais encontrados em máquinas extrusoras, afetando a exatidão dos resultados. Em alguns casos, pode ser necessário investir em equipamentos de melhor qualidade ou buscar alternativas para melhorar a precisão e o desempenho do sistema de controle.

Máquinas extrusoras modernas estão disponíveis com controladores digitais que adaptam automaticamente suas constantes ao estado operacional predominante,

função conhecida como autoajuste. O autoajuste de controladores PID em CLPs é uma funcionalidade valiosa para otimizar o controle de processos em sistemas de automação industrial. O autoajuste permite que os controladores PID se adaptem dinamicamente às mudanças nas condições do processo. Isso resulta em um controle mais preciso e eficaz, independentemente de variações na carga ou nas características do sistema. A implementação do autoajuste em um CLP envolve a coleta de dados em tempo real do sistema de controle, utilizando algoritmos para ajustar automaticamente os parâmetros do controlador PID.

Existem várias técnicas e métodos de autoajuste disponíveis no mercado, que podem variar de acordo com o fabricante do CLP e o modelo específico. Um exemplo notável são controladores que suportam a implementação do PWM em seus controladores PID, possibilitando um controle eficaz da saída do controlador, ajustando a largura dos pulsos de acordo com o erro entre a variável controlada e o SP. Marcas renomadas de controladores oferecem ferramentas e recursos de controle PID e PWM, que simplificam a implementação dessas técnicas em seus CLPs, consolidando-os como opções populares em ambientes industriais.

No decorrer do projeto, destacou-se um fator de grande relevância que pode impactar empresas de maneira abrangente: o custo significativo associado à implementação de automação com interface operacional. Esse custo implica em um investimento financeiro considerável. Conseqüentemente, as empresas que não conseguem acompanhar esse avanço contínuo, embora sejam proficientes em seus processos, correm o risco de ficar para trás, como por exemplo, utilizando controladores do tipo ON/OFF. Isso ocorre porque a concorrência pode desenvolver sistemas de automação de ponta, resultando em maior produtividade e qualidade superior em seus produtos.

Para superar esses desafios, é imperativo que as empresas compreendam não apenas os benefícios imediatos dos controladores de temperatura avançados e da automação em máquinas extrusoras, mas também reconheçam a importância estratégica dessas inovações para a competitividade a longo prazo. A conscientização, educação e investimento adequado são elementos chave para garantir que todas as empresas possam colher os benefícios dessa inovação tecnológica e manter uma posição competitiva no cenário industrial em constante evolução.

Por final, espera-se que este trabalho contribua para a compreensão e aplicação prática de sistemas de controle térmico, promovendo uma abordagem educativa e experimental no campo da automação industrial.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, sugere-se explorar mais profundamente a implementação de controle automático com realimentação para atingir um desempenho técnico otimizado em processos de extrusão. O objetivo desse controle é garantir que uma variável física siga um sinal de referência definido e que seja capaz de atenuar perturbações, sejam elas internas ou externas. Distúrbios, nesse contexto, são sinais que podem afetar negativamente o valor da variável de saída de um sistema. Se originados dentro do sistema, são chamados de distúrbios internos, e, se gerados fora do sistema, são conhecidos como distúrbios externos. No caso de processos de extrusão, é importante considerar que esses distúrbios externos podem incluir fatores como condições ambientais e desgaste de componentes mecânicos, principalmente das roscas, que afetam diretamente o desempenho e a qualidade do processo.

Este exemplo mostra que um bom projeto do controlador deve absorver o conhecimento não apenas do objetivo de reduzir o erro, mas também das características dinâmicas do processo controlado e das amplitudes e frequências das perturbações atuantes no processo. Um controle eficaz precisa ser capaz de ajustar-se e responder de forma adequada às variações impostas pelo ambiente e pelos componentes do sistema, de modo a minimizar o impacto dessas perturbações.

Além disso, como uma sugestão para desenvolvimento contínuo, é altamente recomendável a utilização de equipamentos de automação mais modernos, desta forma, pretende-se utilizar os melhores controladores lógicos programáveis disponíveis no mercado para alcançar os melhores resultados possíveis, principalmente que integrem com blocos de controle configurados para operar com saídas PWM. Essa abordagem permitirá uma maior precisão no controle de variáveis, uma resposta mais eficiente às mudanças no processo e uma melhor eficiência energética. Investir em tecnologias de automação de ponta, embora possa representar um custo inicial mais elevado em comparação com sistemas convencionais, trará uma automação mais confiável e com diversas vantagens, garantindo um desempenho superior e mais robusto. A adoção dessas tecnologias modernas proporcionará um avanço significativo na qualidade do controle automático e ajudará a mitigar os efeitos dos distúrbios, garantindo um desempenho mais consistente e robusto para alcançar objetivos de maior escala, frequentemente de natureza econômica.

REFERÊNCIAS

- BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. Instrumentação e fundamentos de medidas—vol. 1. *Rio De*, 2010. 76
- BASTOS, I. S. *et al.* Automação de um sistema esteira com forno. Universidade Federal de Campina Grande, 2005. 55, 74
- BERTOLETI, P. *Como Funciona o Termopar*. 2020. Accessed: 2023-10-07. Disponível em: <https://www.filipeflop.com/blog/como-funciona-o-termopar/>. 53
- BOUVIER, J.-M.; CAMPANELLA, O. H. *Extrusion processing technology: Food and non-food biomaterials*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2014. 15, 21, 29, 58
- CASTRUCCI, P. d.; BITTAR, A.; SALES, R. M. *Controle automático*. [S.l.]: LTC, 2018. 31, 34, 35, 44, 50, 53, 86, 89
- CHUNG, C. I. *Extrusion of polymers: theory & practice*. [S.l.]: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2019. 15, 52, 53, 59
- COMENALE, W.; WILTGEN, F. Automação industrial para a manufatura avançada com apoio da engenharia de sistemas & requisitos. *Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação*, 2011. 17, 22, 23, 25
- ENGINEERING, O. *RTD Sensor Pt100 Information*. 2015. Accessed: 2023-10-04. Disponível em: <https://br.omega.com/prodinfo/pt100.html>. 52
- FERIGOLLO, C. *Desenvolvimento de uma ferramenta para sintoma automática de controlares PID em sistema embarcado aplicado em CLP*. Tese (Doutorado), 2017. 44
- FERRAZ. *Kit Automação para Extrusora*. 2018. Accessed: 2022-08-12. Disponível em: <https://www.ferrazmaquinas.com.br/conteudo/telas-e-relatorios-de-ihm-e-supervisorio-ferraz-maquinas.html>. 26
- FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; EMAMI-NAEINI, A. *Sistemas de controle para engenharia*. [S.l.]: Bookman Editora, 2013. 83, 99
- FREITAS, C. M. *CLP – Controlador Lógico Programável*. 2014. Accessed: 2023-08-22. Disponível em: <https://embarcados.com.br/controlador-logico-programavel-clp-parte-2/#:~:text=Sa%C3%ADdas%20por%20transistor&text=Esta%20t%C3%A9cnica%20possui%20as%20seguintes,mA%20na%20maioria%20dos%20casos>. 55
- GHIRARDELLO, A. Apostila sobre modulação pwm. *Curso Técnico em*, 2000. 57
- JR, H. F. G.; III, E. M. M.; JR, J. R. W. *Extrusion: the definitive processing guide and handbook*. [S.l.]: William Andrew, 2005. 24, 25, 27, 28, 39, 40, 41, 43, 44, 58
- JUNIOR, R. C. *IHM de Alta Performace Visual*. 2021. Accessed: 2024-02-05. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/ihm-de-alta-performace-visual-ricardo-conc%C3%A1rio-j%C3%BAnior/>. 66, 67, 70
- LAMB, F. *Automação industrial na prática-série Tekne*. [S.l.]: AMGH Editora, 2015. 22, 26, 52, 53, 55, 56, 67, 68, 73, 74, 75, 79, 96, 97

- MADEIRA, D. *Controlador proporcional em sistemas de segunda ordem*. 2016. Accessed: 2023-04-02. Disponível em: <https://embarcados.com.br/controlador-proporcional-em-sistemas-de-segunda-ordem/>. 35
- MELO, M. M. Modelagem de uma estufa térmica e sintonia do controlador pid. *Monografia e seminário do curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2007*. 46, 86, 89, 91, 92, 102
- MICHAELI, W.; HOPMANN, C. *Extrusion dies for plastics and rubber*. [S.l.]: Hanser Publishers Munich, Germany, 2016. 16
- NASCIMENTO, L. M. *Controle de Temperatura do Tipo PID Aplicado a Zona de Aquecimento de um Forno Elétrico Resistivo*. Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) — Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2018. 16, 48, 50, 84, 90, 99, 102
- NISE, N. S. *Control systems engineering*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. 27, 30, 31, 32, 33, 34, 36, 85
- OGATA, K. *Engenharia de controle moderno. 5ª*. [S.l.]: São Paulo: Pearson, 2011. 26, 28, 29, 30, 31, 32, 36, 37, 39, 44, 50, 52, 54, 83, 86, 87, 88, 91, 102, 103
- PAREDE, I. M.; GOMES, L. E. L. Eletrônica: automação industrial. *São Paulo: Fundação Padre Anchieta*, v. 103, p. 6, 2011. 23, 25, 54, 56, 63, 68, 71, 72, 75
- PESSÔA, M.; SPÍNOLA, M. Introdução à automação: para cursos de engenharia e gestão. 2014. 23, 80
- PETRUZELLA, F. D. *Controladores lógicos programáveis*. [S.l.]: AMGH Editora, 2014. 26, 28, 30, 38, 39, 41, 48, 54, 74, 75, 76, 80
- POLIFORMA, E. *Rotomoldagem e Extrusão: dois processos de transformação do pláático*. Rio Grande do Sul, 2018. Accessed: 2022-09-29. Disponível em: <https://poliforma.ind.br/artigos-blog/rotomoldagem-e-extrusao>. 22
- QUELHO, P. E. Q. *Desenvolvimento de extrusora experimental e software para controle e superviso das variáveis de extrusão do ABS*. Dissertação (Mestrado) — Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2018. Dissertação de Mestrado. 21, 55
- RAUWENDAAL, C. *Polymer extrusion*. [S.l.]: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2014. 15, 16, 22, 23, 27, 38, 58, 59
- RIBEIRO, M. A. Automação industrial. *Salvador:[sn]*, 1999. 23, 28, 70, 71, 82
- ROSATO, D. V. *Extruding plastics: a practical processing handbook*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013. 21, 54
- SICK. *Medição da temperatura na extrusora*. 2024. Accessed: 2024-02-17. Disponível em: <https://www.sick.com/br/pt/ramos-industriais/setor-automobilistico/pneus/fabricacao-de-componentes-do-pneu/medicao-da-temperatura-na-extrusora/c/p413085>. 52
- SILVEIRA, G. B. Implementação de técnicas de controle em um forno convencional adaptado ao processo de torra de malte. 2018. 48, 80, 89

STEVENS, M.; COVAS, J. A. *Extruder principles and operation*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 1995. 16, 21, 27, 31, 52

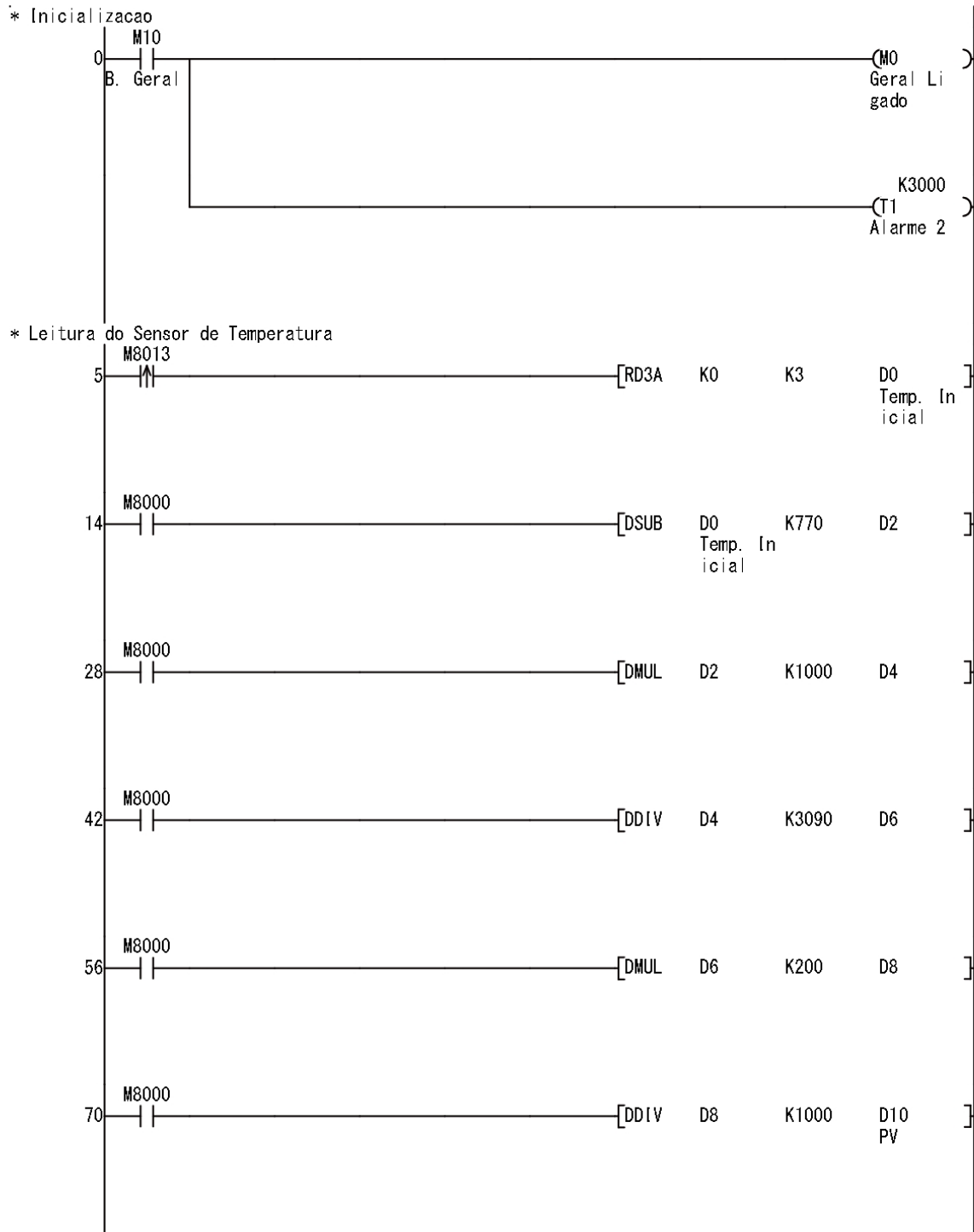
TANNURI, E. A. Apostila sobre pid e métodos de sintonia. *São Paulo: USP*, 2018. 39, 40, 41, 42, 43, 45

WHITE, J. L.; POTENTE, H. *Screw extrusion*. [S.l.]: Hanser Publishers Munich, Germany, 2002. 24, 25

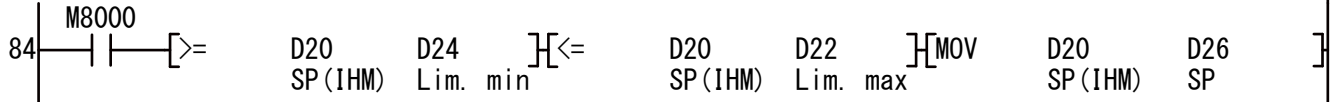
ZAMBALDI, E. d. S. *Controle Automatizado de Fornos para Tratamento Térmico em Aços*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2026. Dissertação de Pós-Graduação. 36, 47, 57, 81

APÊNDICES

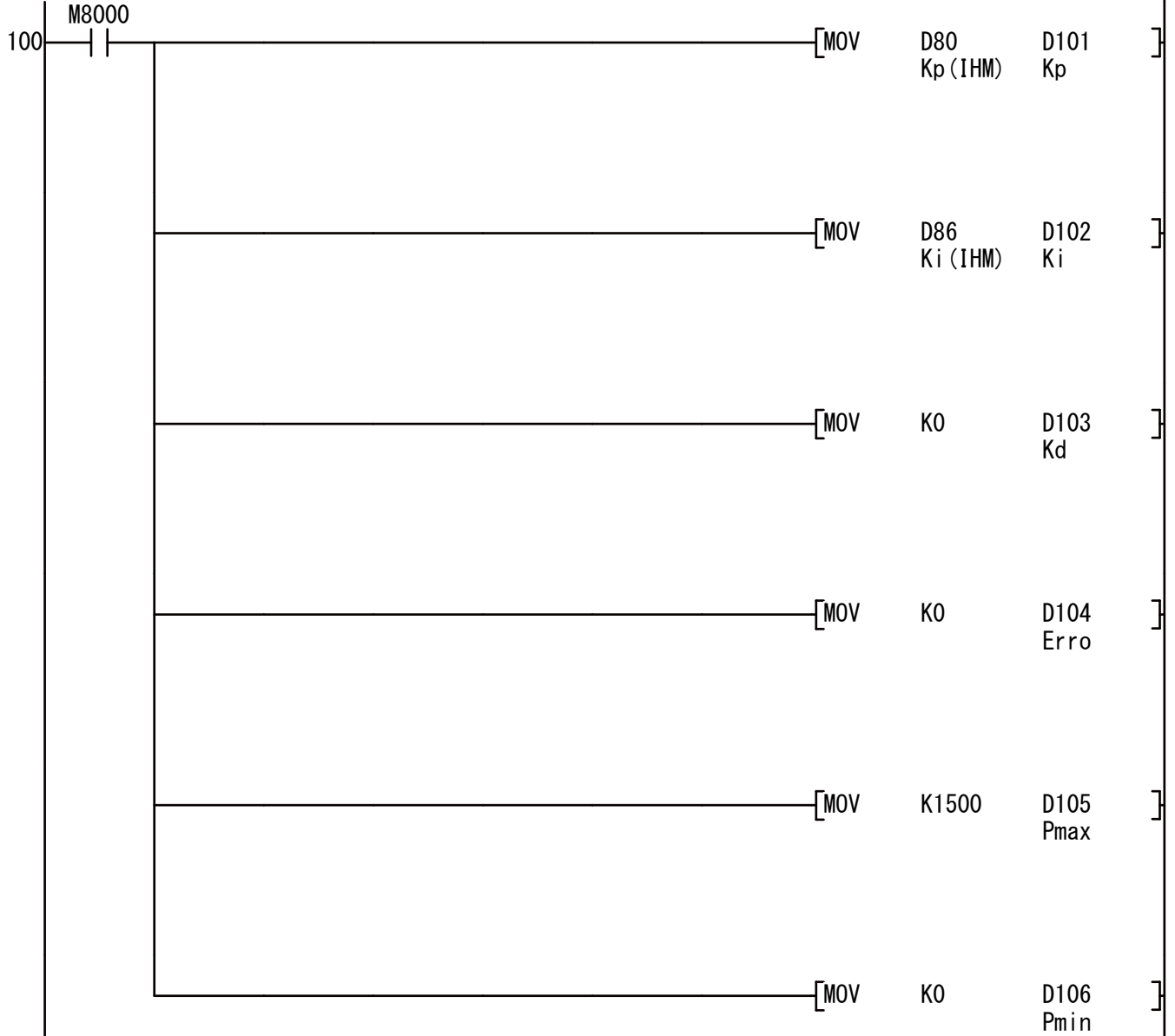
APÊNDICE A – PROGRAMAÇÃO DO CLP EM LADDER PARA AUTOMAÇÃO DO PROTÓTIPO DIDÁTICO



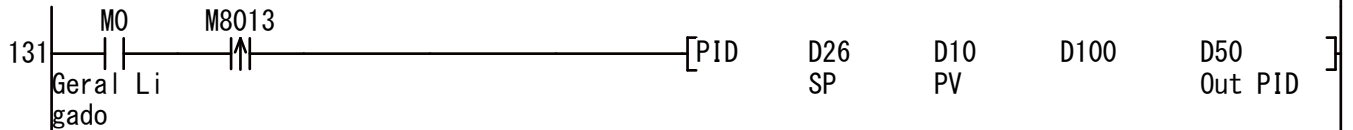
* Limites de Temperatura



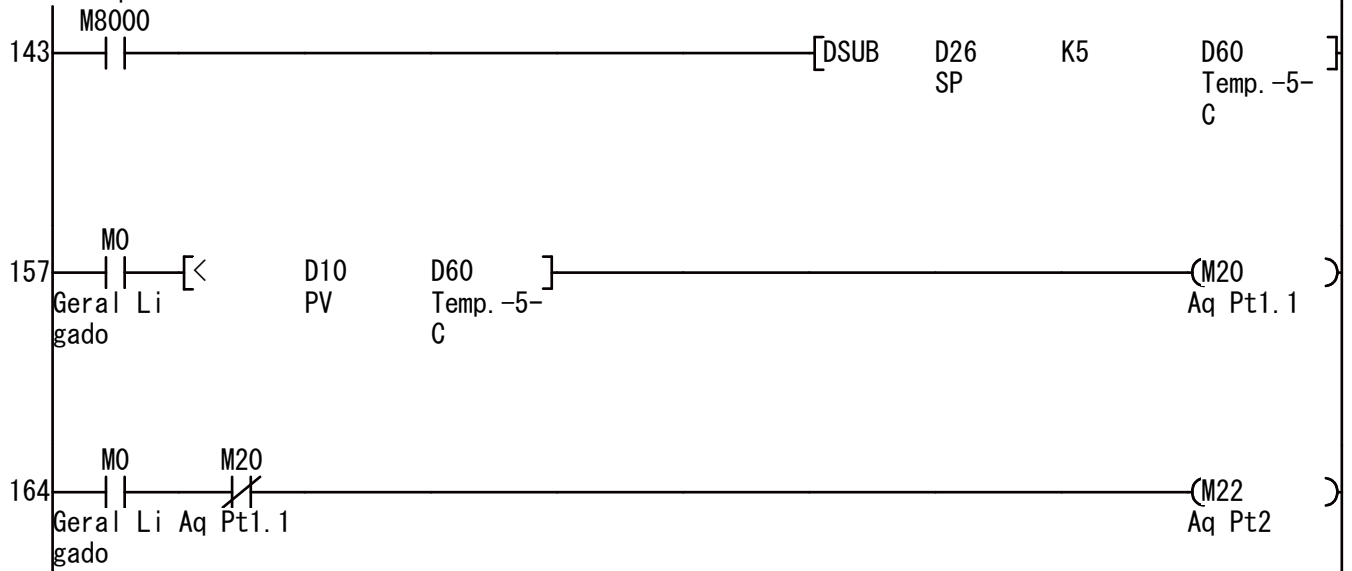
* Parametros PID



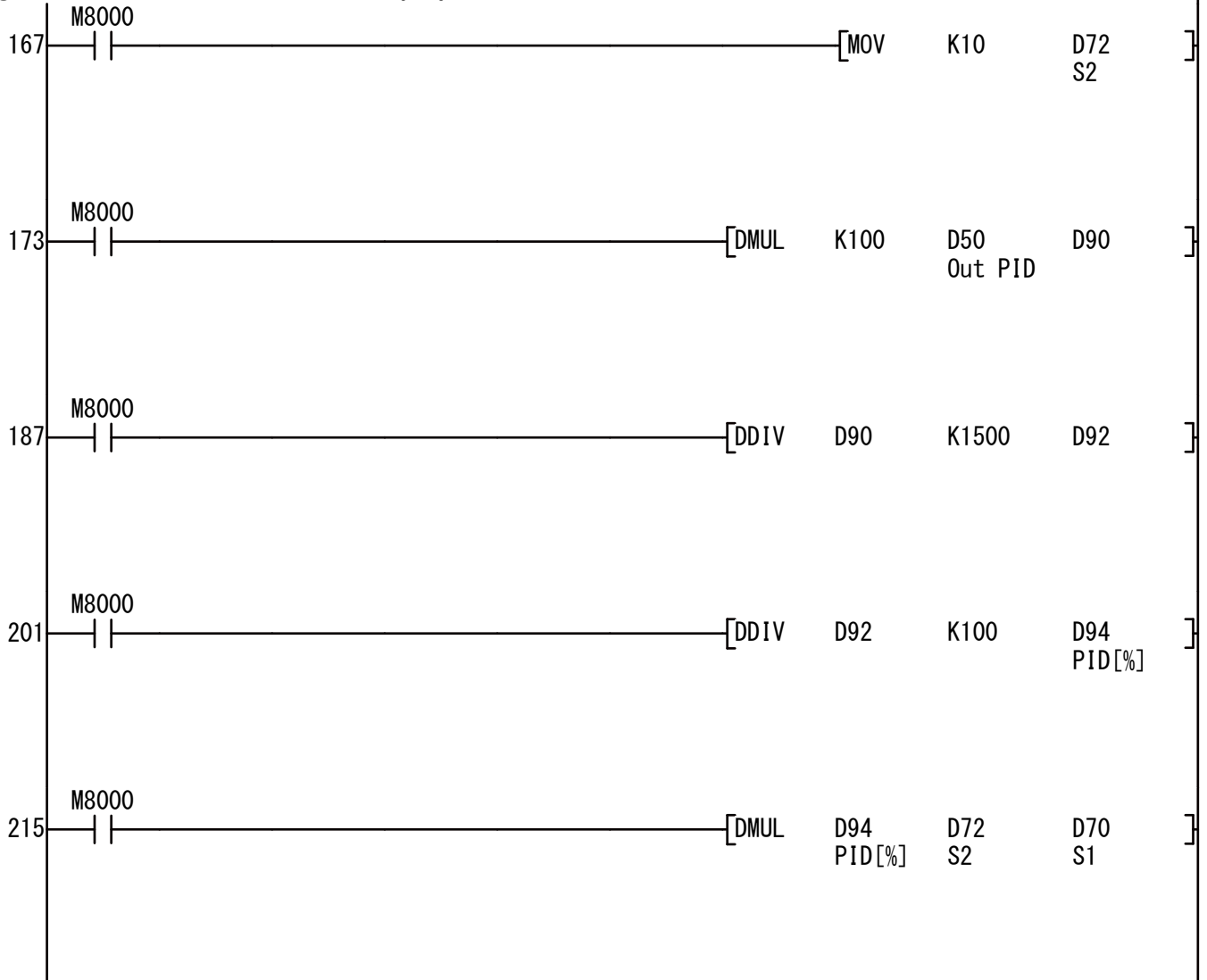
* Controle PID



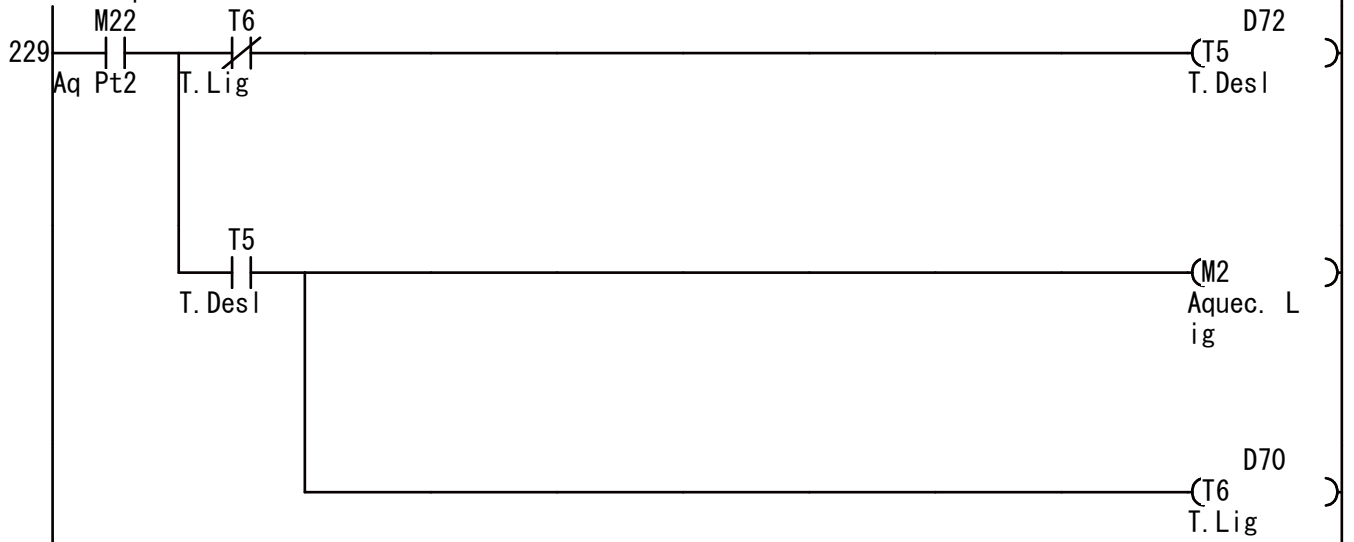
* Sistema de Aquecimento



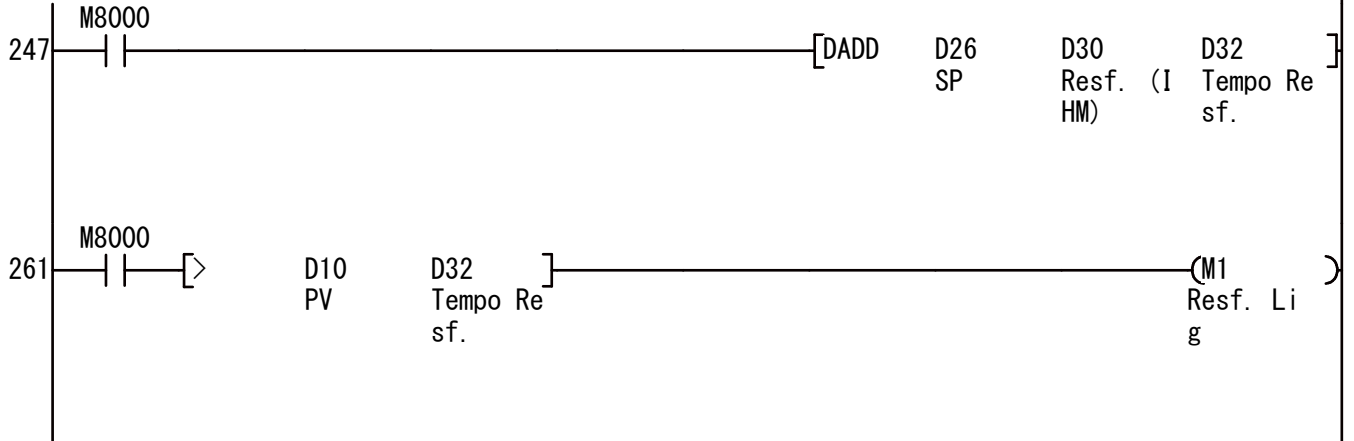
* Integração do controle PID com o Duty Cycle (DT)

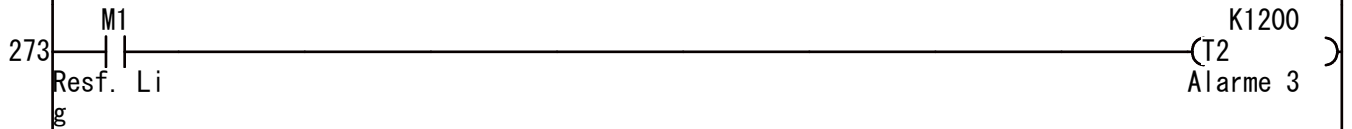
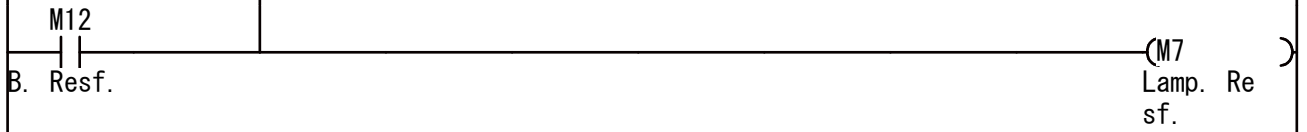
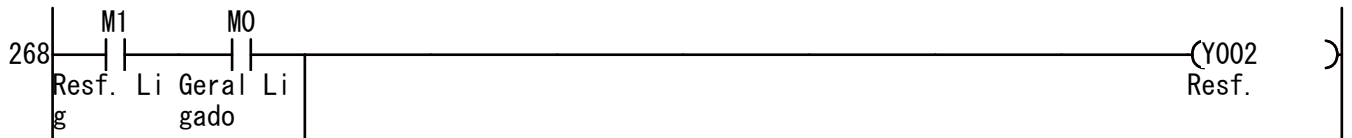


* Acionamento Aquecimento PWM

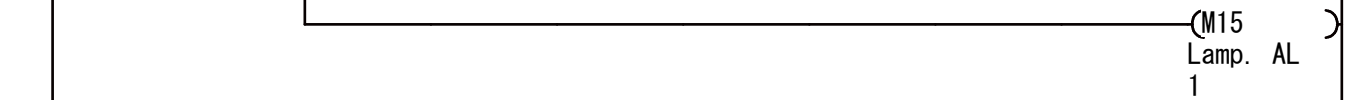
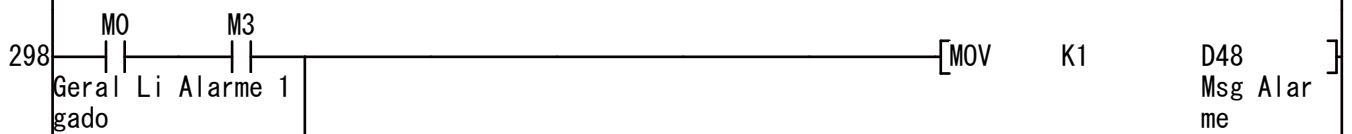
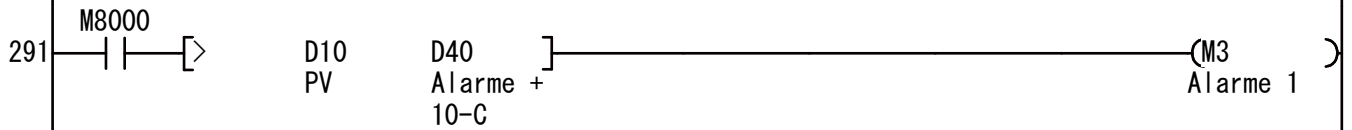
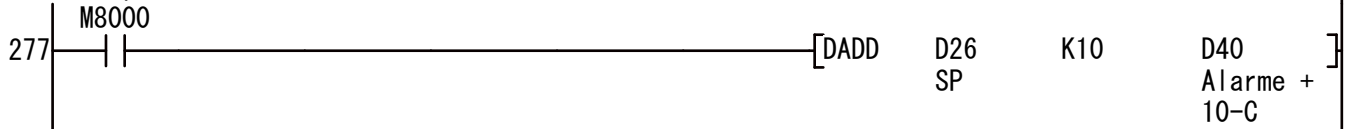


* Sistema de Resfriamento

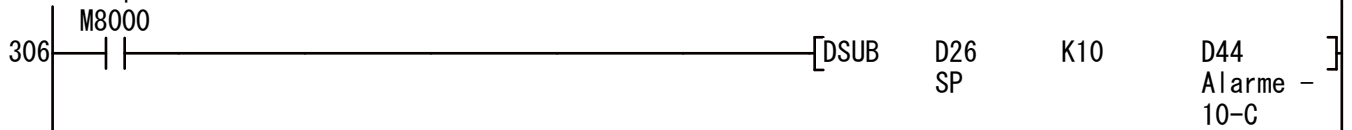


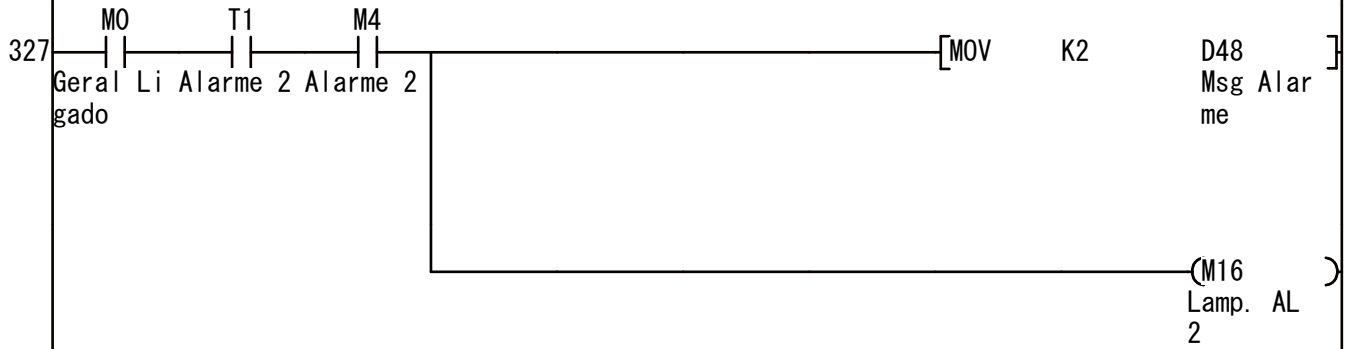
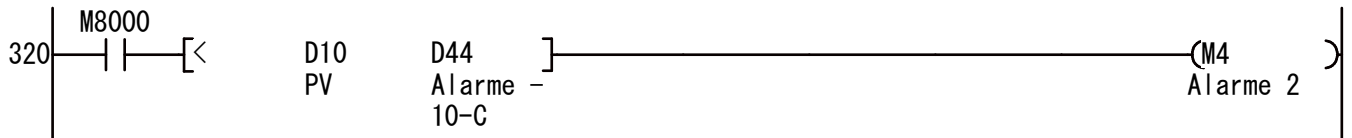


* Alarme 1: Temperatura Elevada

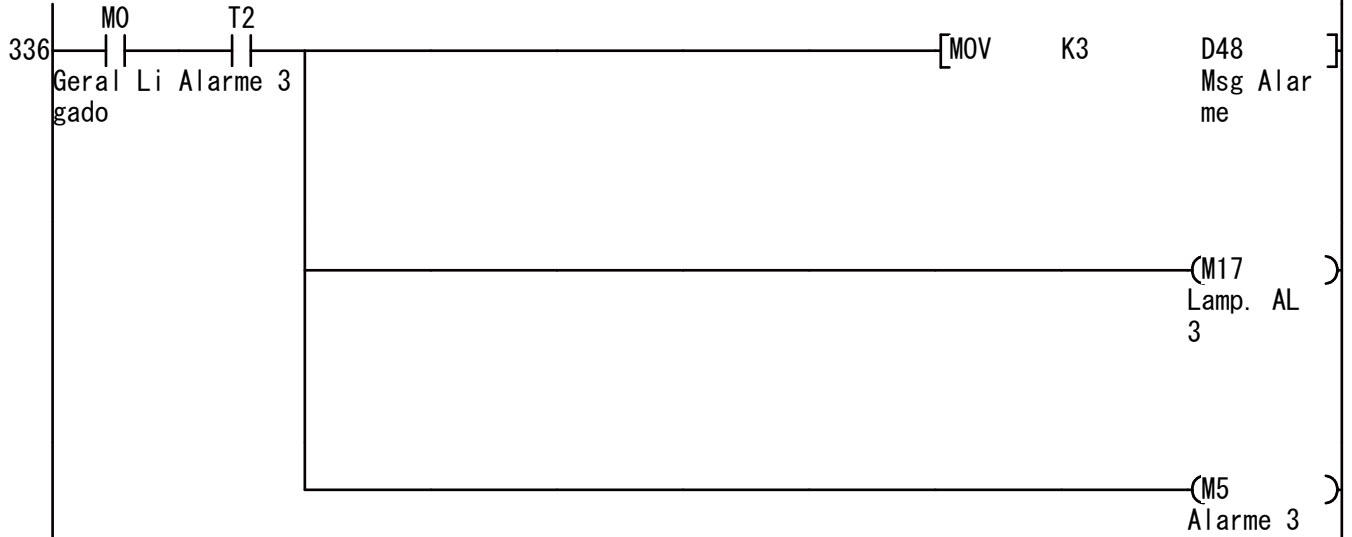


* Alarme 2: Temperatura Abaixo

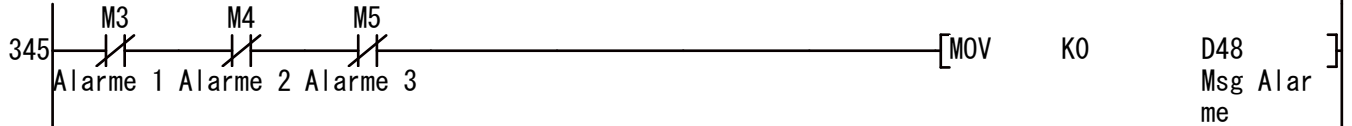




* Alarme 3: Ventilacao Excessiva



* Alarme 0: Condiçoes Normais



* Lampada Alarme

