



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO DE BAIXO CUSTO
PARA A SECAGEM DO RESÍDUO DE MALTE COM INTEGRAÇÃO ENTRE CLP
E ELETRÔNICA DE POTÊNCIA.**

HEBERTY HULTON AMARAL

Foz do Iguaçu
2025



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E
SUSTENTABILIDADE**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO DE BAIXO CUSTO PARA
A SECAGEM DO RESÍDUO DE MALTE COM INTEGRAÇÃO ENTRE CLP E
ELETRÔNICA DE POTÊNCIA.**

HEBERTY HUILTON AMARAL

Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Energia e Sustentabilidade.

Área de concentração: Energia e Sustentabilidade
Orientador(a): Prof. Dr. Leonardo da Silva Arrieche
Coorientadora(a): Prof.(a) Dr.(a) Andréia Cristina Furtado

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - CENTRAL

A485

Amaral, Heberty Huiltton.

Desenvolvimento de um sistema automatizado de baixo custo para a secagem do resíduo de malte com integração entre CLP e Eletrônica de Potência / Heberty Huiltton Amaral. - Foz do Iguaçu, 2025.

127 f.: il.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade. Foz do Iguaçu - PR, 2025.

Orientador: Leonardo da Silva Arrieche.

Coorientador: Andréia Cristina Furtado.


1. Automação Industrial - Controle Lógico Programável. 2. Engenharia - Retirada de água. 3. Secagem. 4. Automação Industrial. 5. Controle automático. 6. Eficiência energética. I. Arrieche, Leonardo da Silva. II. Furtado, Andréia Cristina. III. Título.

620.9:502


DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTOMATIZADO DE BAIXO CUSTO PARA A SECAGEM DO RESÍDUO DE MALTE COM INTEGRAÇÃO ENTRE CLP E ELETRÔNICA DE POTÊNCIA.

Tese de Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade do Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Energia e Sustentabilidade.


BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 LEONARDO DA SILVA ARRIECHE
Data: 10/09/2025 18:42:15-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Orientador: Prof. Dr. Leonardo da Silva Arrieche

UNILA
Documento assinado digitalmente
 ANDREIA CRISTINA FURTADO
Data: 11/09/2025 19:10:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Coorientadora: Prof.^a Dra. Andréia Cristina Furtado

UNILA
Documento assinado digitalmente
 ANA PAULA MENEGUELO
Data: 11/09/2025 16:39:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a Dra. Ana Paula Meneguelo

UFES
Documento assinado digitalmente
 RUI JOVITA GODINHO CORREA DA SILVA
Data: 11/09/2025 21:38:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rui Jovita Godinho Corrêa da Silva

ITAIPU
Documento assinado digitalmente
 ALCIONE BENACCHIO
Data: 10/09/2025 19:20:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alcione Benacchio

IFPR
Documento assinado digitalmente
 JOYLAN NUNES MACIEL
Data: 11/09/2025 19:50:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Joylan Nunes Maciel

UNILA

Foz do Iguaçu, 01 de setembro de 2025.

Dedico este trabalho a Deus e a Nossa Senhora Aparecida, meus protetores em todos os momentos de minha vida, aos meus pais, Amauri Amaral e Neusa Lourdes Amaral, pelo amor, exemplo, apoio, compreensão e dedicação incontestável, a minha avó, Irene Zeca Amaral, pelo amor e exemplo de luta e perseverança, a memória dos meus grandes amigos Marcelo Alves e Sinfioriano Franco, a memória dos meus tios Arcineu Paulo da Silva, Ari Valdir da Silva, a memória da minha tia Arlete Terezinha Dalmolin, a memória da tia Maria Silva Fernandes a memória de Paulo César Cavalcante, a memória da minha tia Gabriela da Silva e a memória da minha tia-avó Iraci Zecca Rinaldi. De forma incondicional à minha esposa Ivanir e ao meu filho Davi, pelo amor, pela presença constante, incentivo e paciência, me fazendo acreditar que posso mais do que imagino.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos:

Ao professor **Dr. Leonardo da Silva Arrieche**, pela orientação, amizade e tempo dedicado para finalização deste trabalho.

A professora **Dr.(a) Andréia Cristina Furtado**, pela coorientação, amizade e tempo dedicado para finalização deste trabalho.

Ao meu padrinho, **Rui** pelo incentivo, pelos conselhos e pela nossa amizade de longa data.

A minha madrinha **Cristina** por sempre apoiar, pelos conselhos e pela nossa amizade

Aos amigos do **DALL**: **Alexandre Rodrigues de Oliveira, Cesar Augusto Ramos, Paula Regina do Santos, Gilsemar Selfstroem, Juliana Honnicke, Caio Maia, Luciano Ari, Cesar Augusto Ramos**, e também aos amigos (as) **Paulo L. Benatto, Bruno Franco, Alexandre Zamadei, Guilherme Sartori, Wagner Ferreira, Gilson Bueno, Clarissa Rodrigues, Ana Carolina Sobral Rainho Morato, Rafael Nogueira, Ana Flávia Eduardo Machado, Dangel Maria Fernandes, Della Maris Fernandes** e a todos os demais que auxiliaram na criação e desenvolvimento desse trabalho, além da amizade e convivência diária que fazem do **PPGIES** um local de trabalho agradável.

Ao **Inácio Liveira** pela doação do resíduo do malte.

Ao **PPGIES** e **ILAEQ** que proporcionou todas as ferramentas e oportunidades fundamentais para meu crescimento profissional.

Meus agradecimentos aos professores que aceitaram ser componentes da banca examinadora e pelas contribuições dadas ao trabalho.

A **UNILA** que forneceu uma estrutura adequada para minha formação durante o curso de Pós-graduação.

A **SACT, DELABEN** e ao **DALL** por terem concedido a licença pós-graduação.

“Não é o que você leva no bolso que te faz valioso. É o que você deixa no coração dos outros”.

Albert Einstein

AMARAL, Heberty Huiltton. Desenvolvimento de um sistema automatizado de baixo custo para a secagem do resíduo de malte com integração entre clp e eletrônica de potência. 2025. 127 f. Tese (Doutorado em Energia e Sustentabilidade) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu.

RESUMO

A secagem é uma das operações unitárias com maior consumo energético, corresponde entre 8 a 20% da energia utilizada na indústria. Em razão disto, ocorre desperdício de energia em diversos processos de secagem industrial. Desta forma, é imprescindível investigar, projetar e implementar metodologias de controle para automatizar e elevar a eficiência energética de um processo de secagem dos produtos da indústria cervejeira. Embora, há estudos sobre técnicas de controle e sua relação com a eficiência energética, não houve relatos da técnica de controle empregada em um controlador lógico programável, o qual faz parte de um secador e sua função é controlar a temperatura em um processo de secagem e, sua correlação com a retirada de umidade do resíduo do malte em um secador de leito fixo. Apesar dos avanços em eficiência energética, a maioria dos estudos foca em eficiência na parte do controlador empregado, havendo pouca pesquisa sobre a união da área de eletrônica de potência com controlador lógico programável (CLP). Este trabalho confeccionou um secador de leito fixo e realizou a comparação de desempenho do controlador P (proporcional) e do controlador *on-off* em razão da retirada de água do resíduo do malte. Além disso, foi analisada entre os dois tipos de controladores o consumo elétrico (W) e energético na secagem dos resíduos, podendo ser utilizados futuramente como fontes de energia. A orientação metodológica adotada para este trabalho foi a pesquisa bibliográfica e a experimental, sendo a primeira orientada pela base de dados: portal capes, periódicos, google acadêmico, livros. Já a segunda foi a construção do secador de leito fixo desde a parte mecânica até construção de circuitos e programação dos *hardwares*. Os resultados demonstraram-se que o secador com a abordagem de controle P consumiu mais energia do que quando controlado pela abordagem *on-off*, em torno de 28%. No entanto, o secador controlado pela abordagem proporcional removeu umidade em aproximadamente 65%. Logo, com esse nível de retirada de água do resíduo do malte, comprovou-se que a eficiência energética (no caso a elétrica) nem sempre faz a remoção de umidade para um nível adequado para se tornar uma possível fonte de energia. Outro fato, foi a conexão entre o CLP com um circuito de eletrônica potência, o qual resultou em uma economia de 24% e a união de duas áreas que são a eletrônica de potência com a área de eletrotécnica que antes trabalhavam de forma isolada, tornando-se um caminho promissor a junção destas áreas.

Palavras-chave: controle lógico programável; retirada de água; secagem; automação; técnicas de controle; eficiência energética.

AMARAL, Heberly Huiton. Desarrollo de un sistema automatizado de bajo coste para el secado de residuos de malta con integración entre PLC y electrónica de potencia. 2025. 127 f. Tesis (Doctorado en Energía y Sustentabilidad) – Universidad Federal para la Integración Latinoamericana, Foz do Iguaçu.

RESUMEN

El secado es una de las operaciones unitarias que consumen más energía, representando entre el 8% y el 20% de la energía utilizada en la industria. Debido a esto, se desperdicia energía en diversos procesos de secado industrial. Por lo tanto, es esencial investigar, diseñar e implementar metodologías de control para automatizar y aumentar la eficiencia energética de los procesos de secado de productos cerveceros. Si bien existen estudios sobre técnicas de control y su relación con la eficiencia energética, no se han reportado informes sobre la técnica de control empleada en un controlador lógico programable (PLC), que forma parte de un secador y funciona para controlar la temperatura durante el proceso de secado, y su correlación con la eliminación de humedad de los residuos de malta en un secador de lecho fijo. A pesar de los avances en eficiencia energética, la mayoría de los estudios se centran en la eficiencia del propio controlador, con poca investigación sobre la integración de la electrónica de potencia con los PLC. Este estudio diseñó un secador de lecho fijo y comparó el rendimiento del controlador P (proporcional) y el controlador de encendido-apagado en términos de eliminación de agua de los residuos de malta. Además, se analizó el consumo eléctrico (W) y energético de los dos controladores durante el secado de los residuos, lo que podría utilizarse como futuras fuentes de energía. El enfoque metodológico adoptado para este trabajo consistió en una investigación bibliográfica y experimental. La primera se basó en el portal CAPES, publicaciones periódicas, Google Académico y libros. La segunda consistió en la construcción del secador de lecho fijo, desde la parte mecánica hasta la construcción del circuito y la programación del hardware. Los resultados demostraron que el secador con el enfoque de control P consumió aproximadamente un 28 % más de energía que el controlado con el enfoque de encendido-apagado. Sin embargo, el secador controlado con el enfoque proporcional eliminó aproximadamente el 65 % de la humedad. Por lo tanto, con este nivel de eliminación de agua del residuo de malta, se demostró que la eficiencia energética (en este caso, la eficiencia eléctrica) no siempre elimina la humedad a un nivel adecuado para convertirse en una fuente potencial de energía. Otro hecho fue la conexión entre el PLC y un circuito de electrónica de potencia, que resultó en un ahorro del 24 % y la unión de dos áreas, la electrónica de potencia y la ingeniería eléctrica, que anteriormente trabajaban de forma aislada, lo que convierte la unión de estas áreas en un camino prometedor.

Palabras clave: control lógico programable; eliminación de agua; secado; automatización; técnicas de control; eficiencia energética.

AMARAL, Heberty Huiltton. Development of a low-cost automated system for drying malt residue with integration between PLC and power electronics. 2025. 127 f. Thesis (Doctorate in Energy and Sustainability) – Federal University for Latin American Integration, Foz do Iguaçu.

ABSTRACT

Drying is one of the most energy-intensive unit operations, accounting for between 8 and 20% of the energy used in industry. Because of this, energy is wasted in various industrial drying processes. Therefore, it is essential to investigate, design, and implement control methodologies to automate and increase the energy efficiency of drying processes for brewing products. Although studies on control techniques and their relationship to energy efficiency exist, there have been no reports on the control technique employed in a programmable logic controller, which is part of a dryer and functions to control the temperature during a drying process and its correlation with moisture removal from malt residue in a fixed-bed dryer. Despite advances in energy efficiency, most studies focus on the efficiency of the controller itself, with little research on the integration of power electronics with programmable logic controllers (plcs). This study designed a fixed-bed dryer and compared the performance of the P (proportional) controller and the on-off controller in terms of water removal from malt residue. Furthermore, the electrical (W) and energy consumption of the two controllers during drying the residues were analyzed, which could be used as future energy sources. The methodological approach adopted for this work was both bibliographical and experimental research, with the first guided by the CAPES portal, periodicals, Google Scholar, and books. The second involved the construction of the fixed-bed dryer, from the mechanical part to circuit construction and hardware programming. The results demonstrated that the dryer with the P control approach consumed approximately 28% more energy than the one controlled by the on-off approach. However, the dryer controlled by the proportional approach removed approximately 65% of moisture. Therefore, with this level of water removal from the malt residue, it was demonstrated that energy efficiency (in this case, electrical efficiency) does not always remove moisture to a level adequate to become a potential energy source. Another fact was the connection between the PLC and a power electronics circuit, which resulted in a saving of 24% and the union of two areas, power electronics and electrical engineering, which previously worked in isolation, making the union of these areas a promising path.

Keywords: programmable logic control; water removal; drying; automation; control techniques; energy efficiency.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Resíduo do malte.	16
Figura 2- Mecanismo de transferência de fluxo de massa e de calor.	17
Figura 3- Classificação relacionada ao tipo de reservatório.	19
Figura 4- Classificação de matéria úmida por abastecimento.	19
Figura 5- Classificação do secador em função da escala de produção.	20
Figura 6- Diagrama em blocos de um sistema automatizado.	22
Figura 7- Níveis de automação.	23
Figura 8- Diagrama em blocos de um sistema em malha aberta.	24
Figura 9- Diagrama em blocos em malha fechada.	24
Figura 10- Circuito Gradador.	25
Figura 11- Formas de energia em um sensor.	25
Figura 12- Diagrama em blocos de um controle regulatório.	27
Figura 13- Diagrama em blocos do controle preditivo.	28
Figura 14- Diagrama em blocos da otimização em estado estacionário.	28
Figura 15- Diagrama em blocos de um controlador adaptativo.	29
Figura 16- Diagrama em blocos de um controlador PID.	31
Figura 17- Diagrama em blocos de um controlador lógico programável.	34
Figura 18- Linguagem Ladder.	35
Figura 19- Circuito gradador de tensão.	51
Figura 20- Vista frontal e posterior da placa eletrônica produzida no programa Kicad [®]	52
Figura 21- Esquemático do sistema de secagem proposto neste trabalho.	53
Figura 22- Diagrama em blocos do sistema de secagem proposto neste trabalho.	54
Figura 23- Esboço da parte experimental.	56
Figura 24- Protótipo do secador de resíduo de malte.	57
Figura 25- Conexão elétrica do sistema de secagem de resíduo do malte.	58
Figura 26- Estimção da planta a partir de dados reais obtidos do secador de leito fixo.	66
Figura 27- Resposta do sistema em malha fechada para um controlador on-off.	68
Figura 28- Gráfico Overshoot entre o controlador on-off e o controlador proporcional.	68
Figura 29- União de três áreas distintas da engenharia.	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Energia e tempo adequado para secagem de alimentos.....	36
Tabela 2- Dados iniciais de projeto.....	49
Tabela 3- Valores dos parâmetros da planta.	66
Tabela 4- Parâmetros de desempenho do controlador on-off.	69
Tabela 5- Parâmetros de desempenho do controlador proporcional.....	69
Tabela 6- Média dos parâmetros otimizados do controlador proporcional.	69
Tabela 7- Potência consumida pelo controlador P.....	70
Tabela 8- Potência consumida pelo controlador on-off.	70
Tabela 9- Energia consumida em kWh em função do controlador P.....	70
Tabela 10- Energia consumida em kWh em função do controlador on-off.....	70
Tabela 11- Teor de umidade em base seca x controlador.	71

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Descritivo de todos os níveis da pirâmide da automação.	23
Quadro 2- Estudos sobre o controle do processo de secagem de biomassa.....	39
Quadro 3- Os valores dos componentes do circuito gradador de tensão.	51
Quadro 4- Valor de cada resistência do potenciômetro de cada placa do circuito gradador.	55

LISTA DE SIGLAS

BAU-STR	– Bangladesh Agricultural University - Screw Type Rotating Dryer
BSG	– Brewer’s Spent Grain
CC	– Corrente Contínua
CI	– Controle Inteligente
CLP	– Controle Lógico Programável
CNC	– Controle Numérico Computadorizado
CVS	– Comma-Separated Values
DIAC	– Diode for Alternating Current
EDOs	– Equações Diferenciais Ordinárias
EUA	– Estados Unidos da América
FD	– Freeze Drying
GA	– Genetic Algorithm
GEE	– Gases do Efeito Estufa
GOFIP	– Genetically Optimized Fuzzy Immune Proportional Integral Derivative Controller
IA	– Inteligência Artificial
IEC	– International Electrotechnical Commission
IP	– Internet Protocol
IR	– Infravermelho
kWh	– kiloWatt-hora
LM	– Linear Monolithic
L-BFGS-B	– Limited-Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno-Bound
LQR	– Linear Quadratic Regulator
MAE	– Mean Absolute Error
MQTT	– Message Queuing Telemetry Transport
MSE	– Mean Squared Error
OD	– Oven Drying
P.I	– Proporcional Integral
PHT	– Pin Through Hole
PID	– Proporcional Integral Derivativo
RNA	– Rede Neural Artificial
R ²	– Coeficiente de Determinação
ROM	– Reduced-Order Modeling

SISO	– Single-Input Single-Output
SOPDT	– Second Order Plus Dead Time
SPHSD	– Solar Powered Hot-Air Supplemented Dryer
TCP	– Transmission Control Protocol
TC	– Transformador de Corrente
TRIAC	– Triode for Alternating Current
UNILA	– Universidade Federal da Integração Latino-Americana
VMD	– Microwave Vacuum Drying
WEG	– Werner Eggon Geraldo
W	– Watt
XLSX	– Arquivo padrão para o Excel

LISTA DE ABREVIações

- Ee* – Economia de energia
- Et* – Economia de tempo
- KiCad* – Programa para projeto eletrônico (mistura de prefixo e sigla CAD)
- P* – Proporcional

SUMÁRIO

1	1 INTRODUÇÃO	12
1.1	APRESENTAÇÃO DO TEMA	12
1.2	JUSTIFICATIVA	12
1.3	PROBLEMA DE PESQUISA	13
1.4	HIPÓTESES	13
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	14
2	OBJETIVOS	15
2.1	OBJETO GERAL	15
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	RESÍDUO DO MALTE	16
3.2	SECAGEM	17
3.3	SECADORES	18
3.4	AUTOMAÇÃO, CONTROLE E EFICIÊNCIA	21
3.4.1	Indústria De Processo X Indústria De Produção Discreta	21
3.4.2	Automação	21
3.5	PROCESSO	26
3.5.1	Controle Contínuo X Controle Discreto	26
3.6	CATEGORIAS DE CONTROLE	26
3.6.1	Controle Regulatório	27
3.6.2	Controle Preditivo	27
3.6.3	Otimização Em Estado Estacionário	28
3.6.4	Controle Adaptativo	29
3.6.5	Estratégias De Busca Em Tempo Real	29
3.6.6	Controlador Pid (Proporcional- Integral- Derivativo)	30
3.7	CONFIGURAÇÃO DE UM CONTROLADOR PID	30
3.8	CONTROLE INTELIGENTE (INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL)	33
3.9	NÍVEL DA MÁQUINA	34
3.10	EFICIÊNCIA	35
3.11	ESTADO DA ARTE	39
3.12	Secadores	41
3.12.1	Resíduos e produtos alimentícios usado como combustíveis	43
3.12.2	Eficiência Energética E Estratégias De Controle	44
4	METODOLOGIA	48
4.1	TIPO DE PESQUISA	48

4.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	48
4.2.1	Metodologia de Projeto do Gradador de tensão (<i>Dimmer</i>)	49
4.3	MATERIAIS E MÉTODOS	59
4.4	LOCAL E PERÍODO DA PESQUISA	61
4.5	INSTRUMENTOS DE COLETA E ANÁLISE DE DADOS	61
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
5.1	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	64
5.1.1	Análise da Resposta do Controlador P	64
5.1.2	Análise da Resposta do Controlador <i>On-Off</i>	67
5.1.3	Análise De <i>Overshoot</i> Dos Controladores	68
5.1.4	Análise De Desempenho Do Controlador <i>On-Off</i>	69
5.1.5	Análise De Desempenho do Controlador P	69
5.1.6	Análise Da Potência Consumida por Controlador	70
5.1.7	Análise Da Energia Consumida por Controlador	70
5.1.8	Análise Do Teor de umidade Em Razão Do Controlador	71
5.2	DISCUSSÃO DOS DADOS À LUZ DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	71
6	CONCLUSÕES	77
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	79
	REFERÊNCIAS	80
	APÊNDICE A – DIAGRAMA LADDER CONTROLE ON-OFF	87
	APÊNDICE B – DIAGRAMA LADDER CONTROLE P	88
	APÊNDICE C – PLACA ROTEADA DO GRADADOR DE TENSÃO	89
	APÊNDICE D – SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA EMPREGANDO ARDUINO JUNTAMENTE COM EXCEL	91
	ANEXO A – DATASHEET SOBRE OS RESISTORES	97
	ANEXO B – DATASHEET SOBRE O POTENCIÔMETRO	98
	ANEXO C – DATASHEET SOBRE O VENTILADOR	99
	ANEXO D – DATASHEET TRIAC (BT136)	102
	ANEXO E – DATASHEET DIAC (BD3)	103
	ANEXO F – DATASHEET CAPACITOR POLIÉSTER	104
	ANEXO G – DATASHEET RESISTÊNCIA CALORÍFICA	105
	ANEXO H – DATASHEET SENSOR TEMPERATURA LM 35	106
	ANEXO I – MANUAL DE USUÁRIO DO CLIC 02	107
	ANEXO J – PROGRAMA EM PYTHON CONTROLADOR ON-OFF	108
	ANEXO K – PROGRAMA EM PYTHON CONTROLADOR P	111

1 1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO DO TEMA

A remoção de água é um dos processos industriais mais antigos para a conservação e comercialização de produtos que podem sofrer deterioração. Na agricultura, por exemplo, a desidratação de grãos previne o desenvolvimento de microrganismos e perdas pós-colheita. No entanto, métodos convencionais de secagem consomem até 20% da energia total em algumas indústrias, por exemplo: alimentos e bebidas, farmacêutica e de biotecnologia, química e de materiais, papel e celulose, têxtil, mineração e cerâmica, madeira e móveis e processamento de resíduos. Diversas indústrias utilizam recursos da natureza, tendo como exemplo a produção de cerveja, e para isso utilizam energia no processo secagem. Desta forma, a comodidade e o desenvolvimento da sociedade atual exigem cada vez mais recursos da natureza como consumo energia. Dessa forma, motivando pesquisas em alternativas sustentáveis (RAGHAVAN; LI; WANG; GARIÉPY, 2010).

Este trabalho foca na otimização da secagem convectiva do resíduo do malte, devido este ser um produto de baixo valor agregado, ao qual a secagem deve ser mais eficiente para viabilizar a sua transformação em briquetes (fonte de energia). Dessa forma, o estudo do controle da secagem desses resíduos é fundamental para o desenvolvimento sustentável da indústria (MOSES; NORTON; ALAGUSUNDARAM; TIWARI, 2014).

1.2 JUSTIFICATIVA

Segundo Masud, Karim, Ananno e Ahmed (2020), com a otimização na eficiência energética em torno de 1% no processo de remoção de água na indústria alimentícia, há potencial para elevar o lucro do produto em até 10%. Logo, é de suma importância para a indústria o uso adequado energético instalado, através do emprego racional de energia elétrica e térmica. É fundamental diminuir o desperdício e melhorar a eficiência dos secadores, assim pode-se reduzir a emissão de gases do efeito estufa e tornar o processo mais sustentável.

O resíduo de malte de cerveja ou *BSG* (*brewer's spent grain*, em inglês) é o subproduto mais gerado na produção de cerveja. Consiste basicamente na casca do grão de cevada obtida após o processo de preparação do mosto da cerveja (GEREMIAS; MILANI; HOLLAS, 2021). Com uma produção de 14,1 bilhões de litros de cerveja em 2018, o Brasil é o terceiro maior produtor de cerveja do mundo, sendo que o bagaço de malte representa 85% de todos os subprodutos da indústria cervejeira. Em linhas gerais, na produção em grande escala a cada 100 litros de cerveja produzida resulta

em 20 kg de bagaço de malte, resultando em torno de aproximadamente 2,8 bilhões de kg anuais (MELLO; MALI, 2020).

Com base no que foi apresentado, a ideia de aproveitar o resíduo de malte usando técnicas de controle no sistema de secagem para transformá-lo em briquetes e utilizá-los como fonte de energia em caldeiras ou em geradores elétricos é uma solução que não só é viável do ponto de vista técnico, mas também uma estratégia importante para uma economia mais circular e sustentável. Por isso, essa pesquisa é totalmente justificada.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

A destinação mais comum do resíduo do malte é a utilização como ração animal de baixo custo ou, em casos menos desejáveis, o descarte em aterros sanitários, gerando contaminação no solo e lençóis freáticos (LYNCH; STEFFEN; ARENDT, 2016).

A secagem é uma das operações unitárias com maior consumo de energia, corresponde de 8 a 20% da energia utilizada na indústria. Sendo assim, ocorre desperdício de energia em diversos processos de secagem industrial alimentícia, como por exemplo, indústria cervejeira (LIMA; SILVA; PEREIRA; SANTOS; LIMA, 2015).

A fabricação de cerveja produz elevada quantidade de resíduo, que pode ser usado como fonte energética, através da remoção da umidade e de um processo de baixo consumo de energia no processo de secagem, tornando-se um desafio técnico, viabilizado pelas técnicas de controle.

Abordou-se neste trabalho o problema da destinação inadequada do resíduo de malte e, também do desperdício energético no processo de secagem ao propor a retirada de umidade do resíduo para se tornar adequado para fins energéticos, como por exemplo, para queima na produção de energia.

Nesta pesquisa empregou-se no sistema de remoção de umidade um controlador lógico programável que utilizou duas técnicas de controle, a primeira é o controle proporcional, já a segunda o controle *on-off*, visando investigar o desempenho desses controladores.

Vale lembrar, que não foi encontrada disponível na literatura aplicação usual do circuito gradador de tensão em conjunto com o controlador lógico programável. Sendo este, objeto de estudo desta pesquisa.

1.4 HIPÓTESES

Criar hipóteses é uma etapa muito importante na elaboração de uma pesquisa científica, pois ajuda a definir as suposições que podem ser testadas durante o estudo. Elas funcionam como uma

previsão baseada na relação entre diferentes variáveis, oferecendo uma resposta inicial e razoável para a questão que está sendo investigada. As hipóteses serão testadas por meio de um equipamento experimental, que é um secador de leito fixo especialmente projetado, implementado e equipado com instrumentos de medição. Em seguida, são formuladas as hipóteses que norteiam este trabalho:

- a) A escolha de um controlador Proporcional em um secador de leito fixo torna a remoção de umidade do resíduo do malte mais eficiente do que a retirada de água adotando um controlador *on-off*.
- b) A utilização de circuitos da área de eletrônica de potência aliado a área de automação e controle (controladores lógicos programáveis e sensores) resulta em benefícios como por exemplo, redução de custos e simplicidade do sistema.
- c) Do ponto de vista de consumo energético o controlador P consome mais energia do que o controlador *on-off*.
- d) Remover a umidade da biomassa de forma controlada ajuda a tornar o processo mais eficiente, pois diminui os custos e melhora a qualidade do combustível produzido. Assim, fica mais fácil usar esse material de maneira econômica e mais sustentável para o meio ambiente.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado em sete capítulos, sendo que o capítulo um apresenta a introdução e, informações preliminares sobre o tema, além de mencionar as principais justificativas e problemas que são inerentes da área e, por fim abordar as questões norteadoras do estudo.

No capítulo dois estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos desta pesquisa.

O capítulo três é referente a revisão bibliográfica, a fim de disponibilizar informações básicas para o entendimento deste tema e, ainda apresentar as informações triviais sobre: o resíduo do malte, secagem e secadores, a automação e controle e, ainda exibir a explicação sobre eficiência dos secadores.

Os resultados e discussões estão no capítulo cinco, sendo exposto os resultados obtidos e discussão sobre o tema.

Já para o capítulo seis são apresentadas as conclusões e limitações do estudo.

No capítulo sete são indicadas as sugestões para trabalhos futuros.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETO GERAL

A finalidade deste trabalho é investigar e implementar um secador de resíduo do malte, na produção de cerveja em escala laboratorial, aplicando técnicas de controle que permitissem obter maior eficiência do ponto de vista energético e, obter a redução de umidade do resíduo em um secador, contribuindo, desta forma para a sustentabilidade. Soma-se a esse fato a aplicação da eletrônica de potência de forma conjunta com o controlador lógico programável, tornando-se promissora e de grande contribuição para a área energética e de sustentabilidade.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Fase 1: Estudo das diferentes configurações de secadores.

Fase 2: Investigação metodologias de controle para automatizar e elevar a eficiência energética de um processo de secagem do resíduo do malte e seu uso como fonte de energia.

Fase 3: -Construção de um secador de leito fixo.

Fase 4: -Desenvolvimento, implementação e comparação da eficiência energética de um controlador *on-off* e um controlador P (proporcional), analisando o consumo de energia [kWh] e potência elétrica [W].

Fase 5: - Modelagem, realização de experimentos de secagem, e simulação do sistema de controle para secagem do resíduo do malte, visando a otimização da eficiência e a lucratividade.

Fase 6:-Verificação dos critérios de desempenho dos controladores (tempo de subida, sobre sinal, tempo de pico e tempo de acomodação).

Este trabalho contribui para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 7, 9 e 12 da Agenda 2030 da ONU, ao propor o aproveitamento energético do resíduo de malte (ODS 7), a implementação de tecnologia acessível e inovadora de automação industrial (ODS 9) e a valorização de subprodutos da indústria cervejeira em um contexto de consumo e produção responsáveis (ODS 12).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica tem como objetivo mapear as evidências científicas sobre sistema de secagem em alimentos e resíduos, além dos tipos de controladores adotados, buscando identificar tendências e lacunas na literatura recente. Em vista disso, foram selecionados artigos publicados entre 1980 até 2024, das bases *Google scholar* e *Science direct* e, ainda livros e capítulos de autores referenciais, fazendo uso dos descritores: eficiência, controladores, resíduos, secadores, secagem e umidade. Incluíram-se estudos teórico e empíricos, excluindo-se trabalhos sem revisão por pares. Em seguida, serão demonstrados conceito básico para entendimento do processo de secagem de resíduo, desde o produto até tipos de secadores.

3.1 RESÍDUO DO MALTE

Em Aldana, Oliveira e Waldman (2021), foi explanado sobre os resíduos gerados na produção de cerveja, representando: os resíduos sólidos que são vidro, papel, etiqueta, plásticos, madeira, óleo, lama biológica, entre outros e; o resíduo do malte, ao passo que este último é de interesse.

O resíduo do malte ou BSG (*brewer's spent grain*, em inglês) é o mais gerado na produção de cerveja. Consiste basicamente na casca do grão de cevada obtida após o processo de preparação do mosto, conforme Figura 1 (GEREMIAS; MILANI; HOLLAS, 2021).

Figura 1- Resíduo do malte.



Fonte: Autoria Própria (2025).

Com uma produção de 14,1 bilhões de litros em 2018, o Brasil é o terceiro maior produtor de cerveja do mundo, sendo que o resíduo do malte representa 85% de todos os resíduos da indústria

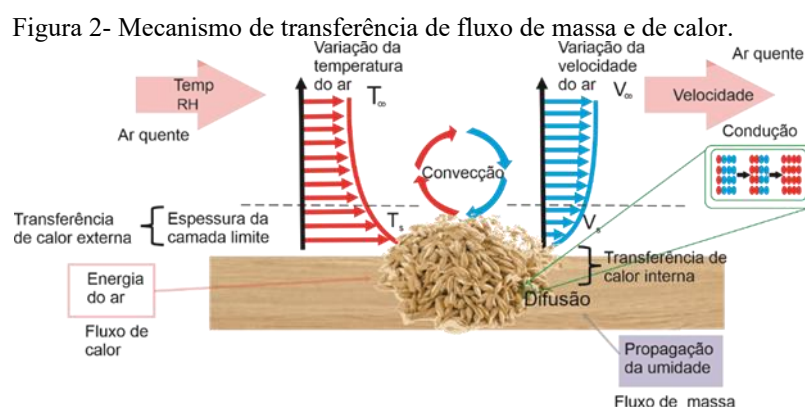
cervejeira, sendo que uma parte é empregada na alimentação de animais ruminantes e, também descartada em aterros sanitários. Em linhas gerais, na produção em grande escala a cada 100 litros de cerveja produzida resulta em 20 kg de resíduo de malte (MELLO; MALI, 2020).

3.2 SECAGEM

O processo de secagem implica na remoção parcial de água do grão, através da transferência de calor do ar para a partícula e, simultaneamente por fluxo de vapor de água do grânulo para atmosfera.

Na retirada de água do grão dois mecanismos ocorrem juntos:

- ✓ Transporte do vapor de água da superfície do grão para o ar;
- ✓ Deslocamento de água do interior para a superfície, conforme ilustra a Figura 2.



Fonte: Adaptado de Masud, Karim, Ananno e Ahmed (2020).

A remoção da umidade é imprescindível para o armazenamento, bem como, para o processo de germinação da cevada, além de diminuir o desenvolvimento dos insetos e pragas em grãos armazenados pois, se não realizadas nas condições adequadas promoverá o crescimento da maioria dos microrganismos (bactérias, leveduras, fungos) e ácaros.

Outras vantagens são: a preservação de alimentos, a disponibilidade destes nos períodos de entressafra, ou de produção inexistente, a redução de custos de armazenamentos e transporte, devido à redução de peso e do volume do produto, a proteção contra a degradação enzimática e a economia de energia por não necessitar de refrigeração para conservar. (MARTINS; BOSCH NETO; SILVA; SIQUEIRA, 2020).

A secagem não ocorre em toda a produção da cerveja, mas é uma etapa essencial e única no processo de malteamento. É durante a secagem ou torra no forno (kiln) que o malte ganha suas cores, sabores e aromas finais, que depois serão extraídos na brassagem para formar a base da cerveja. Sem essa etapa, não haveria a variedade enorme de estilos de cerveja que se conhece atualmente

(PROCEEDINGS OF THE AUSTRALIAN POSTHARVEST TECHNICAL CONFERENCE., 2003).

3.3 SECADORES

Os secadores são estruturas projetadas para modificar as características do ar de secagem, como por exemplo, temperatura e o fluxo de ar. (COUPER; PENNEY; FAIR; WALAS, 2012).

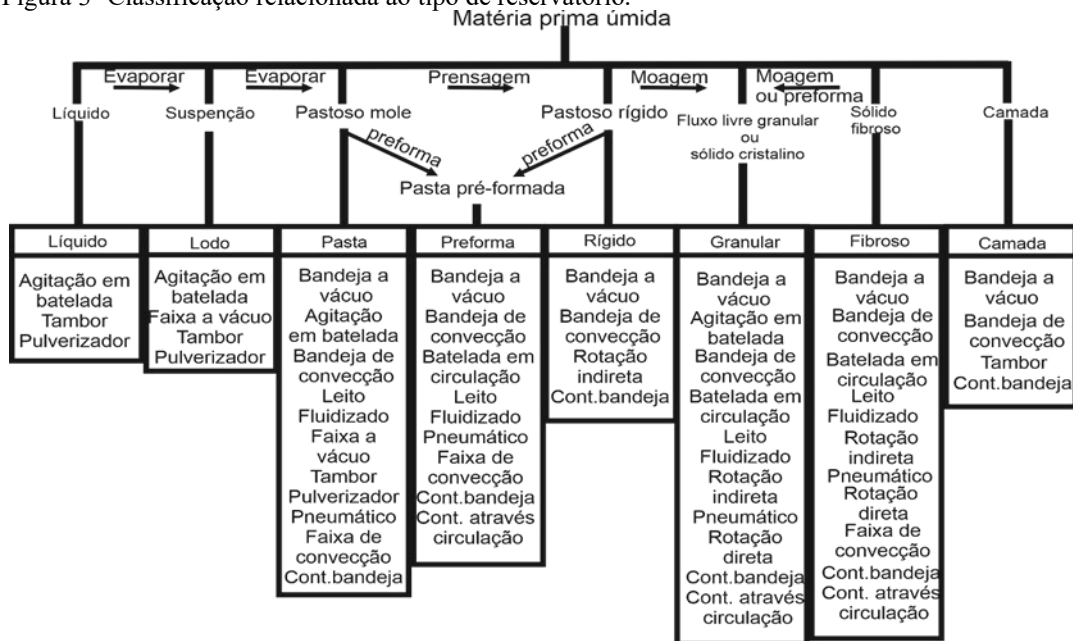
Em Mujumdar (2020), fica explícito que a maioria dos produtos da indústria possui secagem em algum estágio do processo. Uma mercadoria deve ser adequada para processamento e venda. Logo, há necessidade de o material possuir um teor de umidade específico para processamento, moldagem ou pelotização.

Nos processos cerâmicos e metalúrgicos, os itens que precisam ser aquecidos a altas temperaturas são previamente fornecido uma pequena quantidade de calor, visando a economia de energia antes de colocá-los nos fornos com elevadas temperaturas. A despesa no transporte depende do teor de umidade do produto e, logo, o equilíbrio deve ser alcançado entre os custos de locomoção e secagem (MUJUMDAR, 2020).

Segundo Kerr (2019), há diversas operações unitárias para secar produtos alimentícios, classificando os secadores em: ar quente, por congelamento e osmótico. No entanto, há variações de secadores dentro da mesma categoria.

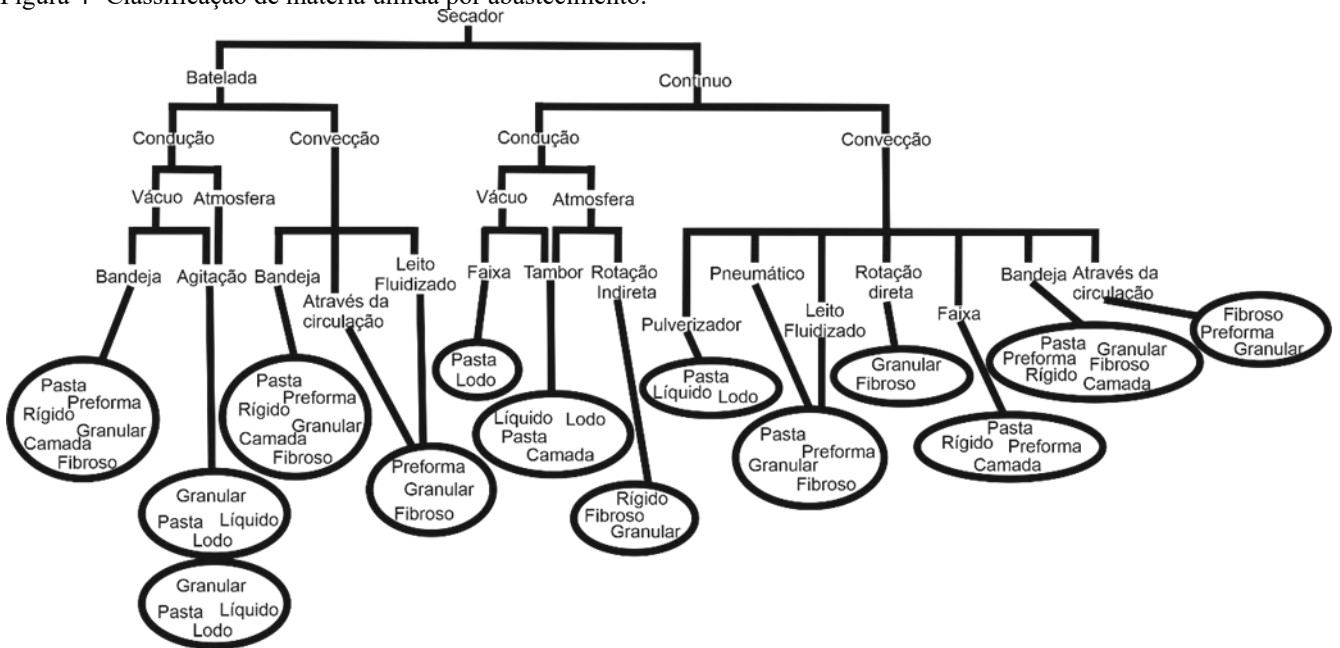
Já em Mujumdar (2020), fica notório que há quatro categorias, há primeira sobre o método de transferência de calor, sendo eles: aquecimento por: condução, convecção, radiação e dielétricos. Na segunda classificação está relacionada ao tipo do reservatório de secagem, classificados como: bandeja, tambor rotativo, leito fluidizado, pneumático ou pulverizador, segundo a Figura 3. Outra classificação é sobre o fornecimento da matéria-prima para remoção de umidade, sendo o abastecimento feito por bateladas, ou de forma contínua, de acordo com a Figura 4. Por fim, apresentou-se a classificação de acordo com o tempo de permanência do produto na secadora, e a escala de produção segundo ilustra a Figura 5.

Figura 3- Classificação relacionada ao tipo de reservatório.



Fonte: Couper (2012).

Figura 4- Classificação de matéria úmida por abastecimento.



Fonte: Adaptada de Coupper (2012).

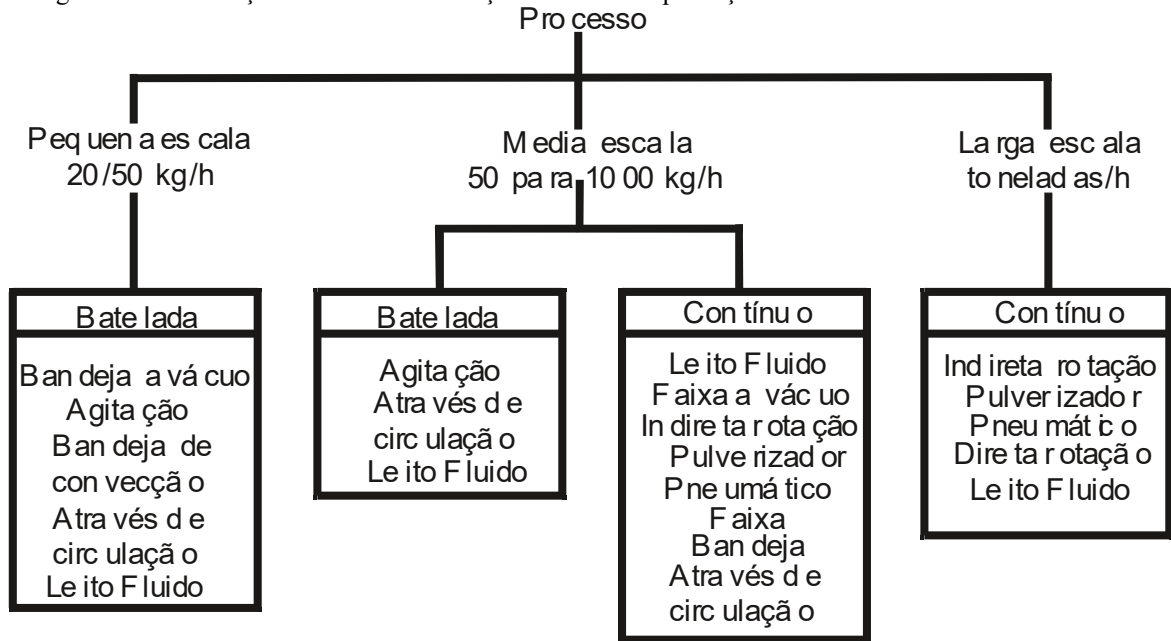
O tempo de residência no interior dos secadores organiza diversos tipos de equipamentos de secagem conforme seu mecanismo de transferência de calor — seja por Convecção ou Condução — e os classifica de acordo com a faixa de tempo que o material permanece no interior do secador.

Observa-se uma grande variação no tempo de residência entre os diferentes modelos. O secador pulverizador (*spray dryer*), que opera por convecção, e o secador de tambor, que funciona por condução, se destacam por serem os mais rápidos, com tempos entre 10 e 30 segundos. Na

extremidade oposta, não há nenhum equipamento listado que opere na faixa mais longa de 1 a 6 horas.

A maioria dos secadores apresentados, como os de leito fluido, rotativo, bandeja (seja em batelada ou contínuo) e os rotativos que utilizam vapor d'água, operam em uma faixa de tempo intermediária, entre 10 e 60 minutos. Um caso particular é o secador com esteira transportadora, que possui uma dupla classificação, atuando tanto em tempos muito curtos (0-10 segundos) quanto na faixa de 10-60 minutos (COUPER; PENNEY; FAIR; WALAS, 2012).

Figura 5- Classificação do secador em função da escala de produção.



Fonte: Copper (2012).

A escolha do secador adequado, é baseada em algumas informações, como, por exemplo:

- Produção do secador; modo de produção de matéria-prima (batelada/ contínuo);
- Propriedades físicas, químicas e bioquímicas da matéria-prima úmida, bem como as especificações desejadas do produto;
- Variabilidade esperada nas características da matéria-prima;
- Operações de processamento montante e jusante;
- Teor de umidade da matéria-prima e do produto;
- Cinética de secagem;
- Isotermas de sorção de sólidos úmidos;
- Qualidade dos parâmetros (físicos, químicos, bioquímicos);
- Aspectos de segurança, por exemplo, risco de incêndio, explosão e toxicidade;
- Valor do produto;
- Necessidade de controle automático;

- Propriedades toxicológicas do produto;
- Taxa de redução, flexibilidade nos requisitos de capacidade;
- Tipo e custo do combustível, custo da eletricidade;
- Regulações ambientais;
- Espaço na planta. (MUJUMDAR, 2020)

Existem algumas variáveis que afetam o desempenho do secador, mas a principal é a potência. Diversas alternativas são apresentadas para mitigar o consumo de energia, sendo elas: aumentar a temperatura do ar na entrada; reduzir a temperatura do mesmo na saída; diminuir a carga de evaporação; pré-aquecer a matéria-prima com outros fluxos de processo; restringir a vazão; pré-aquecer o fluido fornecido e o de exaustão; efetuar a secagem em dois estágios; empregar um trocador de calor interno; reciclo do fluido atmosférico de exaustão; considerar fontes alternativas de calor e isolamento térmica da área de retirada de umidade do equipamento. (COUPER; PENNEY; FAIR; WALAS, 2012).

Na próxima seção será explicado conceitos-chaves sobre automação, controle e eficiência dos secadores que são aplicados na indústria de forma generalizada e, também se aplica na secagem de resíduo do malte.

3.4 AUTOMAÇÃO, CONTROLE E EFICIÊNCIA

Nesta seção abordados temas relacionados às operações industriais e como são classificadas além da definição de automação, quais são seus níveis e, as noções básicas de controle e os principais controladores existentes na indústria, assim como os principais investigados pela comunidade científica. Também serão realizadas explanações sobre o nível do dispositivo e nível da máquina.

3.4.1 Indústria De Processo X Indústria De Produção Discreta

As operações das indústrias são classificadas em: indústria de processo e indústria de produção discreta. Na primeira seus procedimentos ocorrem através de montantes de materiais, pois estes tendem a ser líquidos, gases, pó e similares. Já a produção discreta suas ações são feitas em quantidades de materiais, sendo eles peças, ou produtos.

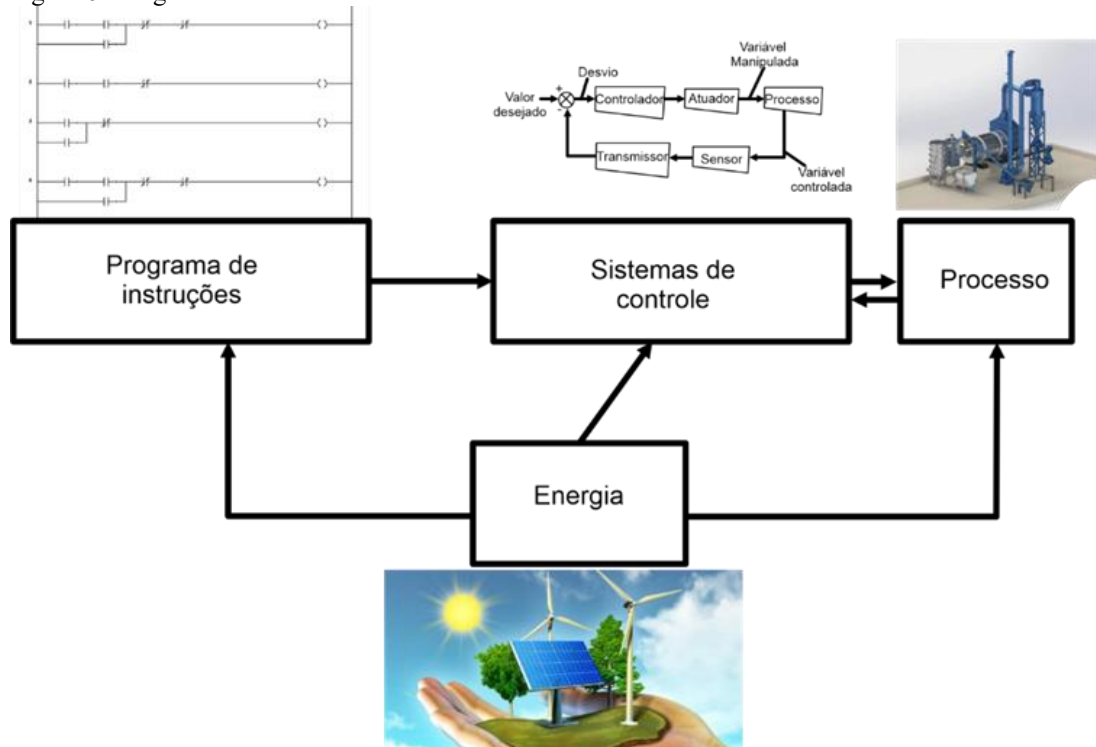
3.4.2 Automação

Segundo Aguirre (2007), automação é uma tecnologia por meio da qual um processo, ou procedimento foi alcançado sem assistência humana. Tal fato, ocorre através de um programa de instruções combinado a um sistema de controle, o qual desempenha as tarefas.

Para tornar um sistema automático é impreterível energia, tanto para condução do processo como para operação do programa e do sistema de controle.

Na Figura 6 foi ilustrado um diagrama em blocos de um sistema autônomo, sendo constituído por: programa de instruções, sistemas de controle, processo e energia. O programa de instruções são ações realizadas por um processo automatizado e, o sistema de controle executa o programa de instruções, efetuando alguma operação da produção. Já a energia é necessária para operação da produção feita, também para enviar sinais de controle, coletar dados e processamento de informações (GROOVER, 2011).

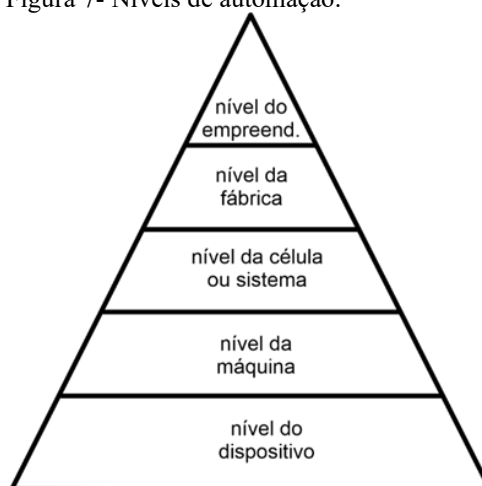
Figura 6- Diagrama em blocos de um sistema automatizado.



Fonte: Groover (2011).

A automação possui cinco níveis conhecidos como nível de empreendimento, nível da fábrica, nível do sistema, nível da máquina e nível do dispositivo. Nos itens a seguir apresenta-se um detalhamento de cada nível. Posteriormente, são apresentados os cinco níveis de automação e suas definições, conforme ilustra a Figura 7. No Quadro 1 foram descritas as definições de cada nível (OMER; M.M., 2014).

Figura 7- Níveis de automação.



Fonte: Groover (2011).

A seguir é realizado uma breve explicação sobre cada nível de automação no Quadro 1.

Quadro 1- Descritivo de todos os níveis da pirâmide da automação.

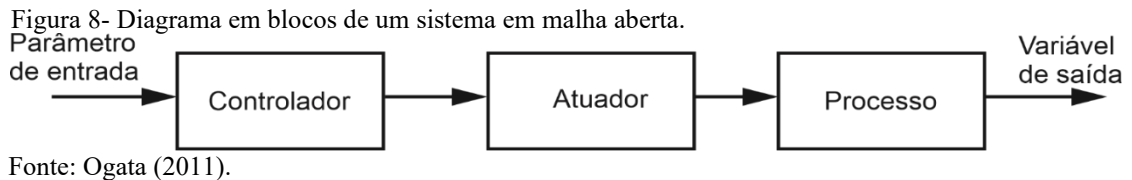
Nível	Significado
Nível de empreendimento	Nível mais alto, formado pelos sistemas de informações corporativas. Focado em todas as funções necessárias ao gerenciamento da empresa: <i>marketing</i> e vendas, contabilidade, projeto, pesquisa, planejamento agregado e o plano mestre de produção.
Nível da fábrica	Recebe dados dos sistemas de informações corporativas e as traduz em plano operacionais para produção. Ex.: processamento do pedido, planejamento de requisitos de materiais, controle do chão de fábrica e controle da qualidade de processos.
Nível do sistema ou célula	Opera sob as instruções do nível de fábrica. Um grupo de máquinas ou sistemas conectadas e suportadas por um sistema, um computador, ou equipamento apropriado a produção. Ex.: Linhas de produção, expedição de peça, carregamento da máquina e coordenação da mesma.
Nível da máquina	O <i>hardware</i> instalado em máquinas individuais. Ex.: CNC, robôs industriais, transportadores elétricos e veículos guiados automatizados.
Nível do dispositivo	Menor nível hierárquico de automação. Os dispositivos estão combinados em <i>loops</i> individuais de controle e malhas de controle por realimentação. Ex.: atuadores, sensores e outros componentes de <i>hardware</i> .

Fonte: Groover (2011).

Em alusão ao Quadro 1 que exemplifica os níveis de automação será detalhado nas seções seguintes sobre o nível do dispositivo, nível de máquina e nível do sistema.

Um sistema de controle automatizado pode ser do tipo malha aberta, ou malha fechada. No

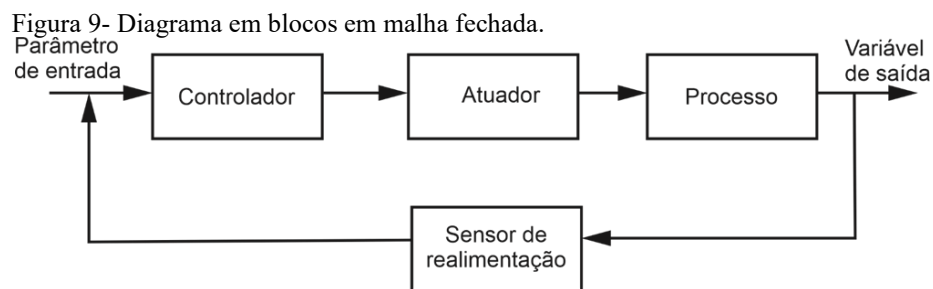
sistema malha aberta a variável de saída não é aferida e, conseqüentemente não há uma comparação do valor medido na saída com o valor desejado na entrada do sistema. O diagrama em blocos da Figura 8 exemplifica um sistema em malha aberta. Observa-se que o diagrama é composto por: parâmetro de entrada, controlador, atuador, processo e a variável de saída.



Segundo Ogata (2010), o sistema em malha fechada é chamado também de sistema de controle por realimentação, pois a variável de saída é comparada a um valor desejado da entrada. Qualquer diferença entre os mesmos precisa ser reduzida.

Na Figura 9 é ilustrado um diagrama em blocos de um sistema em malha fechada. A principal diferença entre o sistema em malha aberta é o uso do sensor de realimentação que aferi a variável de saída e compara a um valor desejado na entrada, fazendo com que essa diferença seja minimizada (MAYA; LEONARDI, 2011).

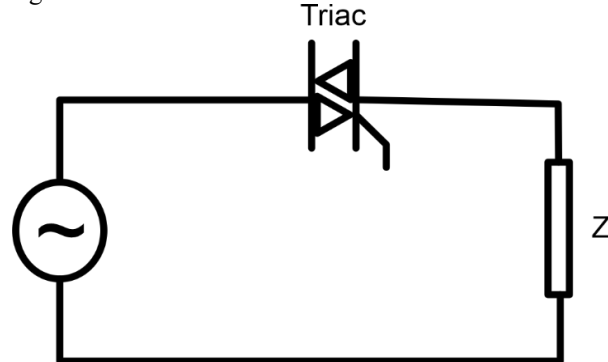
O parâmetro de entrada é a variável com o valor desejado, em um sistema de controle de temperatura pode-se dizer que é o termostato. O processo é a operação controlada, sendo monitorada a temperatura em sua saída, através do sensor e enviada ao controlador para que reduza a diferença do valor de temperatura almejado pelo valor de temperatura medido. Tal ação é realizada pelos atuadores que são dispositivos físicos que executam ações de controle (circuitos com resistências e ventiladores produzindo calor para manter a temperatura do processo) (GROOVER, 2011).



Com a finalidade de efetuar algum tipo de ação que irá alterar a variável do processo emprega-se um circuito comumente chamado de gradadores. Estes são conversores estáticos que variam o valor eficaz de uma tensão alternada. Possuem diversas aplicações, como por exemplo: controle de intensidade luminosa, controle de temperatura, controle de velocidade de motores de indução e limitação da corrente de partida de motores de indução.

Na Figura 10 ilustra-se um gradador a triac (triodo de corrente alternada) composto por uma fonte de tensão alternada, um triac (para potência menor é indicado) e uma carga que poder ser resistiva e/ ou indutiva (Z). Para esta pesquisa será empregado um controle de temperatura e de velocidade do ventilador (BARBI et al., 2002). O circuito representado na Figura 10 será aplicado tanto no controle da velocidade do fluido (ar) como para controlar a temperatura. A seguir será apresentada informações sobre os sensores.

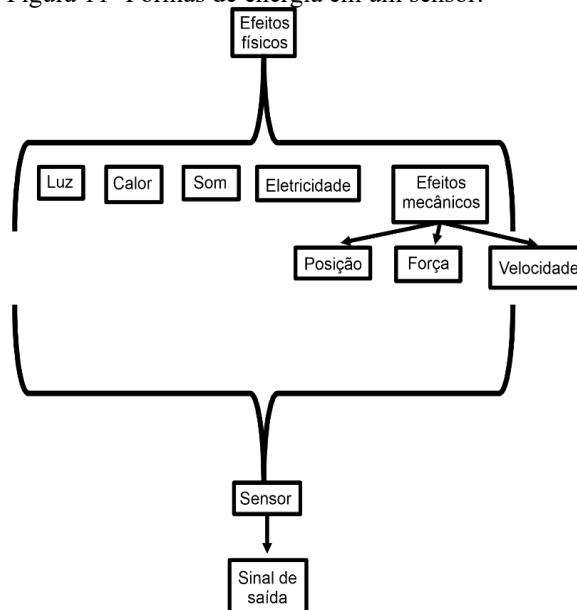
Figura 10- Circuito Gradador.



Fonte: Barbi (2002).

Sensores são dispositivos sensíveis a alguma forma de energia que pode ser: luminosa, térmica, cinética, elétrica e, estabelece uma associação dessa informação sobre uma grandeza que precisa ser aferida, como: temperatura, pressão, velocidade, corrente, aceleração, posição, entre outras. Na Figura 11 é exemplificado as formas de energia em um sensor (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2011).

Figura 11- Formas de energia em um sensor.



Fonte: Thomazini e Albuquerque (2011).

Os sensores podem ser classificados como analógicos e digitais. O primeiro pode assumir qualquer valor em sua variável de saída ao longo do tempo, desde que esteja dentro da sua faixa de operação. As principais grandezas físicas que assumem qualquer valor ao longo do tempo são: pressão, temperatura, velocidade, umidade, vazão, força, ângulo, distância, torque, luminosidade, sendo aferidas por elementos sensíveis com circuitos eletrônicos não digitais.

Já os sensores digitais podem assumir dois valores em seu sinal de saída ao decorrer do tempo, sendo eles zero, ou um. Não há grandezas físicas naturalmente mensuradas apenas com zeros e uns, porém é através do transdutor (não é objeto de estudo) que o valor analógico é transformado para digital e enviado ao sistema de controle o qual será interpretado. Por fim, será descrito em seguida sobre a etapa de processo (GROOVER, 2011).

3.5 PROCESSO

A definição de processo é um progresso contínuo definido por diversas modificações graduais que sucedem umas às outras de modo estável em busca do objetivo ou resultado. Pode-se afirmar que um processo é toda operação que pode ser controlada, sendo ela: processos biológicos, químicos e econômicos, entre outras (OGATA, 2010).

3.5.1 Controle Contínuo X Controle Discreto

Em um sistema de controle contínuo os parâmetros e as variáveis são contínuos e analógicos. No entanto, no controle discreto as variáveis e parâmetros são discretos, geralmente possui valores binários (GROOVER, 2011).

De acordo com Aguirre (2007) e, com advento da eletrônica digital, os computadores digitais vêm substituindo os controladores analógicos e, portanto, as variáveis e parâmetros contínuos agora tem características de dados discreta, através da amostragem do sinal analógico em pulsos digitais com valores zeros e uns.

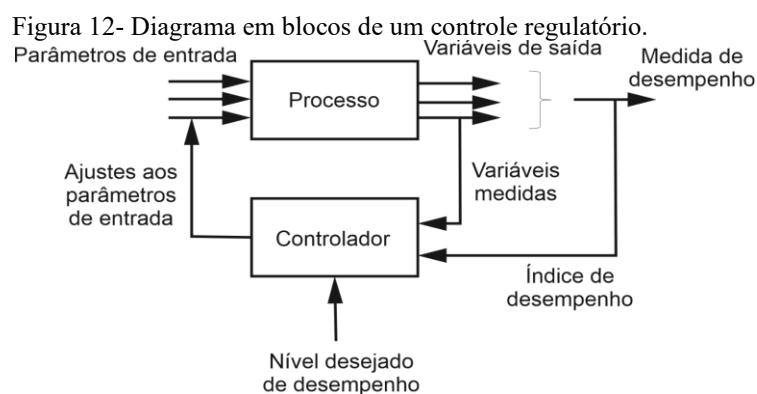
3.6 CATEGORIAS DE CONTROLE

Com intuito, de automatizar processos contínuos serão descritas nas próximas seções as principais categorias de controle, sendo elas: controle regulatório, controle preditivo, controle adaptativo, controle em otimização em estado estacionário, estratégia de busca em tempo real, técnicas para modelagem da planta P e, por fim, inteligência artificial.

3.6.1 Controle Regulatório

Em um controlador regulatório o propósito é manter o rendimento do processo em certo nível, ou dentro de uma faixa específica de tolerância. O desempenho foi empregado de alguma forma na medida da qualidade do produto. Sendo imprescindível manter o nível especificado de qualidade.

A Figura 12 foi ilustrado o diagrama em blocos de um controle regulatório, sua composição é de parâmetros e variáveis que representam a entrada e saída das variáveis do processo, o controlador que monitora as variáveis medidas e compara com o valor estipulado e com base nesse valor uma decisão será executada pelo controlador para manter a variável no valor estipulado (GROOVER, 2011).



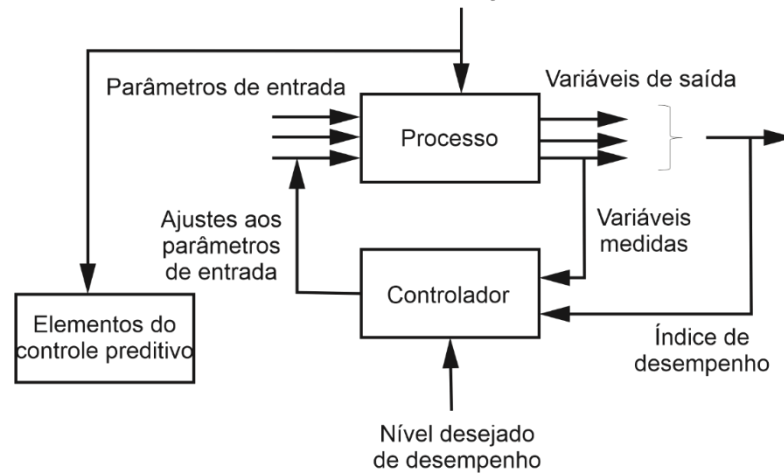
Fonte: Groover (2011).

3.6.2 Controle Preditivo

O controle preditivo tem por objetivo antecipar o efeito de perturbação que prejudicará o processo, sendo seu monitoramento e compensação efetuada antes que o distúrbio possa afetar o sistema (PINHEIRO, 2017).

Na Figura 13 é exemplificado um diagrama em blocos do controle preditivo, observa-se que o controle preditivo percebe a presença de uma perturbação e, logo medidas corretivas são aplicadas ajustando um parâmetro do processo que compense qualquer efeito do sinal inadequado (GROOVER, 2011).

Figura 13- Diagrama em blocos do controle preditivo.
Perturbação



Fonte: Groover (2011).

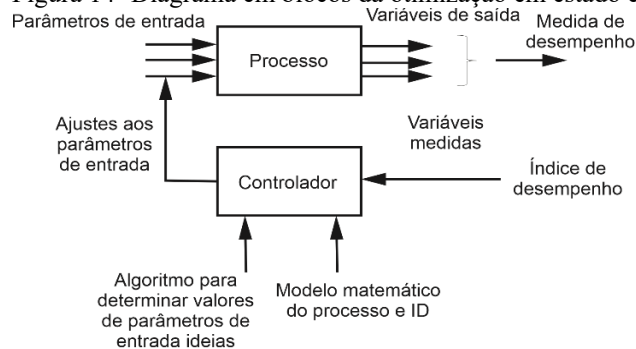
3.6.3 Otimização Em Estado Estacionário

Técnicas de otimização são aplicadas em processos e exibem algumas características bem definidas, como por exemplo: índice de desempenho (custo do produto, taxa de produção, ou rendimento do processo); a relação entre as variáveis de processo e o índice de desempenho são conhecidas; valores dos parâmetros que otimizam o sistema podem ser determinados matematicamente.

Tais características descritas anteriormente aplicam-se ao algoritmo de controle buscando o ajuste para obter o estado ideal. O sistema é malha aberta e diversas técnicas matemáticas são disponibilizadas para solução de problemas com controle de estado estacionário otimizado, por exemplo, cálculos diferenciais, cálculo de variações e muitos métodos matemáticos de programação (GROOVER, 2011).

Na Figura 14 foi apresentado o diagrama em blocos da otimização em estacionário.

Figura 14- Diagrama em blocos da otimização em estado estacionário.



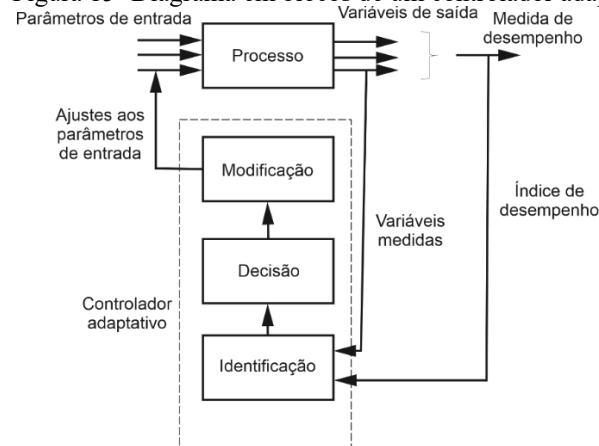
Fonte: Groover (2011).

3.6.4 Controle Adaptativo

Na presença da perturbação que afeta as variáveis do processo uma forma autocorretiva de controle otimizado chamada de controle adaptativo foi aplicada. Sendo este a combinação do controle em malha fechada juntamente com a otimização em estado estacionário. As aferições nas variantes relevantes do processo são efetuadas durante a operação em conjunto com um algoritmo de controle que busca valores para otimizar o desempenho do sistema, conforme representa a Figura 15.

Para avaliar o desempenho três funções são executadas: - função de identificação que é determinada com base em medidas coletadas do processo, já que o ambiente sofre alteração com o tempo, o desempenho também sofrerá alteração; -função decisão que é baseada no rendimento determinado e, define quais alterações devem ser efetuadas no sistema; funções de modificações implementam a decisão definida no passo anterior, efetuando uma mudança física no sistema, ou nas entradas do processo através dos atuadores buscando otimizar o sistema (GROOVER, 2011).

Figura 15- Diagrama em blocos de um controlador adaptativo.



Fonte: Groover (2011).

3.6.5 Estratégias De Busca Em Tempo Real

Pode ser aplicada em uma classe especial de problemas de controle adaptativo em que a função de decisão não pode ser definida de forma eficiente, isto é, os parâmetros de entrada e desempenho não são conhecidos, ou não são suficientes para ser utilizados em controle adaptativo.

Dessa forma não é possível decidir as mudanças nos parâmetros internos dos sistemas para produzir o aumento de rendimento desejado. As estratégias de busca em tempo real incluem uma variedade de esquemas para a exploração dos efeitos das mudanças nos parâmetros do processo, partindo de técnicas de tentativa e até métodos de gradiente (GROOVER, 2011).

3.6.6 Controlador Pid (Proporcional- Integral- Derivativo)

Na indústria mais da metade dos controladores empregados são os controladores proporcional- integral- derivativo, devido seus ajustes realizados em campo, outro seria quando o modelo matemático da planta não é conhecido, logo, projetos analíticos não podem ser empregados, sendo assim, controladores PID se mostram mais úteis. (OGATA, 2010).

Os reguladores PID muito usado na indústria algumas vezes são subutilizados, como por exemplo, malhas operando em modo manual, ou automático com a sintonia do controlador não adequada. As principais consequências são: perda da qualidade final do produto, redução de eficiência do processo produtivo, gastos desnecessários de energia, redução da vida útil de equipamentos, entre outros (AGUIRRE, 2007).

3.7 CONFIGURAÇÃO DE UM CONTROLADOR PID

Basicamente a estrutura de um PID é a união do controlador proporcional, controlador integral e controlador derivativo. Visto que, aplicar individualmente tais controladores produz resultados inadequados. Esta subseção é baseada em Ogata (2010).

A ação integral é capaz de mitigar o erro de regime permanente. Já a ação derivativa antecipar o comportamento do processo e, por fim, a ação proporcional faz com que o sistema reaja ao erro presente, fornecendo uma ação imediata no sistema. Na Equação 1 é apresentado o erro.

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (1)$$

$e(t)$: erro da planta

$r(t)$: valor de referência da planta

$y(t)$: valor da saída da planta

A Equação 2 representa o sinal produzido pelo controlador PID:

$$u(t) = k \left(e(t) \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2)$$

$u(t)$: sinal de controle

k : ganho proporcional

$e(t)$: erro da planta

$e(\tau)$: constante de tempo integral

$d\tau$: diferencial da constante de tempo integral

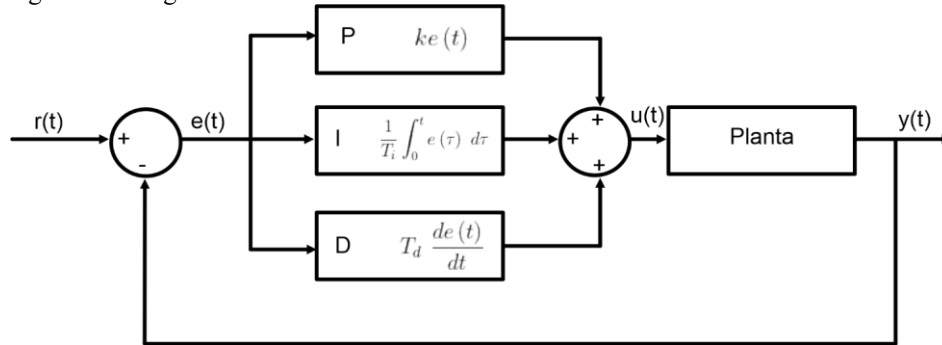
T_i : tempo da ação integral

T_d tempo da ação derivativa

$\frac{de(t)}{dt}$: diferencial do erro da planta

De acordo com a Equação 2 o sinal de controle é oriundo da soma dos controles individuais de p(t)- proporcional, i(t)- integral, d(t)- derivativo. A Figura 16 ilustra um diagrama em blocos de um controlador PID.

Figura 16- Diagrama em blocos de um controlador PID.



Fonte: Ogata(2011).

Técnicas para modelagem da planta P

A seguir será explicada sobre os métodos utilizados para a identificação da planta para a função de transferência otimizada.

O primeiro método é a modelagem de segunda ordem com tempo morto, conhecida pela sigla SOPDT (*Second Order Plus Dead Time*). Tal modelo dinâmico que se refere a sistemas com dois polos, por isso, são chamados de segunda ordem. Sistemas assim apresentam oscilações/amortecimento. O atraso de transporte comumente chamado de *dead time* é comum em processos industriais. Posteriormente a Equação 3, ilustra um sistema de segunda ordem. Para maiores informações e detalhes sobre esse assunto estão disponíveis em Seborg *et al.* (2016) e Aström e Hägglund (1988).

$$G(s) = \frac{k_p e^{-Ls}}{(\tau s + 1)^2} \quad (3)$$

Ao passo que:

k_p :ganho do sistema

τ : constante de tempo (s)

L : atraso ou tempo morto

s : variável complexa da transformada de Laplace

$G(s)$: função de transferência em s.

Em seguida, o segundo método que é aproximação de Padé. Esta técnica de aproximação racional polinomial para funções transcendentais como e^{-Ls} , usada para representar atrasos no domínio da frequência. A Equação 4 apresenta a aproximação de Padé de ordem 3.

$$e^{-Ls} \approx \frac{1 - \frac{Ls}{2} + \frac{(Ls)^2}{10} - \frac{(Ls)^3}{120}}{1 + \frac{Ls}{2} + \frac{(Ls)^2}{10} + \frac{(Ls)^3}{120}} \quad (4)$$

Sendo que:

e^{-Ls} : função de atraso exponencial

L_s : L (Atraso de transporte (s)) -s (variável complexa da transformada de Laplace)

Como a abordagem é apenas superficial, para quem necessita de informações mais detalhadas está em Ogata (2010).

O terceiro método é o de Otimização por Múltiplas Métricas, a qual é a combinação de critérios de erro, como por exemplo, MSE (Erro quadrático médio), *overshoot* (Penalização de *overshoot*: Excesso de oscilação.) e tempo de acomodação (Penalização de tempo de acomodação: Diferença entre modelo e dados.), tudo em uma única função objetivo para ajustar o modelo.

A seção anterior foi baseada em Ljung (1999) e Boyd e Vandenberghe (2004), deste modo, quem necessitar buscar uma compreensão mais detalhada buscar nas fontes citadas.

O quarto método é a estratégia de combinação de dois algoritmos de otimização. Sendo eles: na fase 1 o método *Nelder-Mead* que é direto sem usar derivadas. Na Fase 2 o método L-BFGS-B, o qual é baseado em gradientes, com restrições. As principais vantagens são: o primeiro método possui robustez para chutes iniciais ruins. Já o segundo método possui precisão com limites físicos (ex.: $\tau > 0$).

Para informação mais detalhadas sobre o mencionado acima buscar em Byrd, Lu, Nocedal e Zhu (1995) e Nelder e Mead (1965).

Para finalizar, a Análise de Desempenho Avaliação, que é a parte quantitativa e qualitativa do modelo identificado, incluindo: métricas de erro (MSE, MAE, R^2), características dinâmicas (*overshoot*, tempo de subida) e visualização de resíduos. Em Box, Jenkins, Reinsel e Ljung (2016) encontraras mais informação detalhadas sobre o tema, até este momento foi dada apenas informações triviais sobre o assunto.

3.8 CONTROLE INTELIGENTE (INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL)

Com a crescente necessidade de mitigar o consumo energético e o aumento da complexidade dos sistemas que são controlados e, devido a estes serem não lineares cresceu o foco e desenvolvimento na área de controle inteligente.

Em um controlador tradicional, elabora-se um modelo matemático que representa o sistema, suas interações e dinâmicas. Outra, é a impossibilidade de antecipar as possíveis incertezas nas aferições e suas variantes no próprio ambiente de operação durante a modelagem matemática do sistema.

Conforme descrito anteriormente, estes aspectos possuem impacto na robustez final do modelo, determinando se representa de maneira adequada, ou não, as condições mais adversas na qual o sistema deverá operar posteriormente. Sendo assim, o modelo obtido ao final do processo pode, porém, não ser adequado para obtenção de algoritmos de controle, dada sua elevada complexidade (SIDDIQUE, 2014).

Na década de 70 surge a área de Controle Inteligente (CI), inserindo métodos ou técnicas oriundos do campo de inteligência artificial (IA) em sistemas nos quais o controle era realizado computacionalmente e, desde então, tem recebido crescente atenção da comunidade científica e da indústria (ZILOUCHIAN; JAMSHIDI, 2001).

No passado havia discussão sobre a definição do termo controle inteligente, devido à dificuldade em definir precisamente o significado do termo inteligência, a área tem se caracterizado por englobar diferentes formas de controle que não se enquadram no chamado controle tradicional (ANTSAKLIS, 1999).

Pelo fato exposto acima, o CI é um campo interdisciplinar que compreende métodos e teorias de áreas como ciência da computação, inteligência artificial, aprendizado de máquina, e da própria teoria de controle, dentre outras (ANTSAKLIS, 1999; SIDDIQUE, 2014).

No CI não há um modelo matemático explícito, obtido através de princípios físicos, que descreve o comportamento do sistema a ser controlado. Sendo realizado o controle através de técnicas de uso geral, oriundas de diversas áreas, que são aplicadas para um problema específico.

Tais técnicas buscam a resolução para o problema com inspiração na cognição humana, isto é, procuram imitar, ainda que de forma rudimentar, aspectos fundamentais do comportamento humano como raciocínio, aprendizado e adaptação em condições incertas, ou mal definidas (SIDDIQUE, 2014).

De maneira geral as técnicas, modelos de CI são observadas em função do seu comportamento em relação à pares de entrada e saída (SIDDIQUE, 2014) possuindo, geralmente, uma elevada robustez à presença de altos graus de incerteza ou variações no sistema (BAVARIAN, 1988).

Até o momento foi dada ênfase no nível 1 da pirâmide de automação nas próximas seções será focado no nível da máquina que corresponde ao nível 2 da pirâmide de automação, conhecido como nível de máquina.

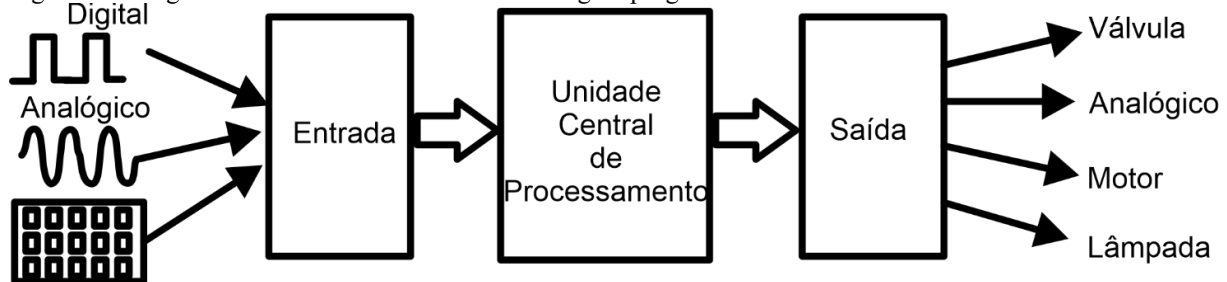
3.9 NÍVEL DA MÁQUINA

Nesta seção será descrita de forma breve sobre o nível da máquina. Este nível compreende o hardware montado em máquinas individuais. A partir deste instante, as funções de controle adicionam a execução das sequências de etapas no programa de instruções na ordem correta e garantem que cada etapa foi executada (GROOVER, 2011).

Segundo Aguirre (2007), o controlador lógico programado (CLP) é considerado uma máquina individual, o qual foi projetado para controlar e automatizar equipamentos e processos tendo que reagir, ou apresentar respostas em tempos menores que o atraso máximo permitido pelo sistema operando desta forma em tempo real.

Este sistema é composto por: entradas (sensores analógicos, sensores digitais, teclados, pulsos de sinais), unidade central de processamento (recebe os dados de entradas, processa-os e acionam uma saída, isto ocorre através de uma linguagem de programação), saídas (válvulas, motor, lâmpada, resistências), conforme ilustra a Figura 17.

Figura 17- Diagrama em blocos de um controlador lógico programável.



Fonte: Aguirre (2007).

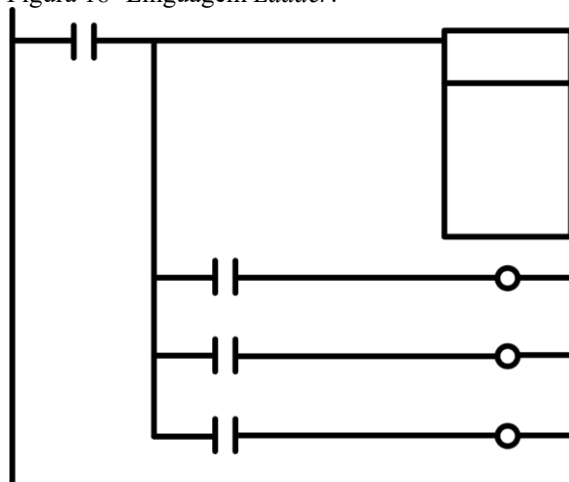
Na sequência é efetuada uma explanação sobre a linguagem de programação empregada nos controladores lógicos programáveis.

LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO

A norma IEC61131-3 define uma série de linguagens de programação para CLPs. As principais linguagens variam de: gráficas que representam uma linguagem de alto nível até linguagem estruturada demonstrando uma linguagem de baixo nível próximas ao projeto de circuito ou linguagem de máquina.

A maneira mais comum de programar um CLP é projetar o circuito de controle desejado na forma de um diagrama de lógica *ladder* e, em seguida, insira este diagrama em um terminal de programação. O terminal de programação é capaz de converter o diagrama *ladder* em códigos digitais e então enviar este programa via conector Rs-485-usb para o CLP onde será armazenado na memória. Existem também outras maneiras de programar um CLP, abaixo um exemplo do diagrama na Figura 18 (ALPHONSUS; ABDULLAH, 2016).

Figura 18- Linguagem *Ladder*.



Fonte: Alphonsus e Abdullah (2016).

Foi elucidado o funcionamento de um CLP e qual linguagem de programação ele utiliza encerrando os esclarecimentos relacionados ao nível de máquina, ao qual faz parte da pirâmide de automação, em seguida, será dada ênfase aos aspectos teóricos do nível de eficiência energética.

3.10 EFICIÊNCIA

Os secadores são um dos maiores consumidores de energia em escala global e, contribuem significativamente para a produção de gases de efeito estufa (GEE) (PROCEEDINGS OF THE 14TH INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM, 2004).

Durante sua vida útil o secador convectivo (85% de todos os secadores industriais) consome cerca de cinco vezes seu custo em energia, no nível industrial, aproximadamente 85 por cento dos secadores são do tipo convectivo. Os outros meios de secagem como por exemplo, por campo eletromagnético passam diretamente pelo tecido alimentar e força a molécula de água a vibrar mais rápido. Os modos de secagem fornecem calor nos limites do tecido alimentar para difundir o calor na matriz sólida do material, onde o calor é transferido principalmente por processo de condução. Logo, torna-se crucial desenvolver uma compreensão do quantitativo de energia consumida (útil ou desperdiçada) (LIMA; DELGADO, 2016).

A remoção de água do produto é uma operação com alto consumo de energia, o qual é responsável pelo uso de até 15% da parcela referente ao setor alimentício industrial, muitas vezes possui baixa eficiência térmica na faixa de 25–50% (LIMA; DELGADO, 2016).

Definiu-se duas razões principais para comparar as operações de secagem convectiva, segundo a economia de tempo e energia, conformidade com as Equação 5 e Equação 6 (LIMA; DELGADO, 2016).

Economia de tempo (E_t)

$$E_t = \frac{\text{duração secagem convectiva} - \text{duração secagem combinada}}{\text{duração da secagem convectiva}} \quad (5)$$

Economia de energia (E_e)

$$E_e = \frac{\text{consumo de energia na secagem convectiva} - \text{consumo de energia na secagem combinada}}{\text{consumo de energia na secagem convectiva}} \quad (6)$$

Com a otimização na eficiência energética em torno de 1% no processo de secagem, há potencial para elevar o lucro do produto final até 10% (MASUD; KARIM; ANANNO; AHMED, 2020).

O calor é a forma de energia empregada em diferentes etapas do processamento, por exemplo, quando a retirada de água é realizada a 50 °C, a energia necessária para a remoção de umidade é quase $1,5 \times 10^6$ kJ/t. Logo, com a variação dos parâmetros do processo e do tipo de alimento, a energia necessária também irá variar.

Da Tabela 1, nota-se que diversos alimentos utilizam uma quantidade de energia e tempo diferentes na remoção de umidade, devido à variação na distribuição de água, bem como as propriedades do material (MASUD; KARIM; ANANNO; AHMED, 2020).

Tabela 1- Energia e tempo adequado para secagem de alimentos.

Colheita fatiada	Teor de umidade inicial (%)	Teor de umidade final (%)	Energia necessária (MJ/ kg)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura exigida na secagem (°C)	Tempo necessário para secagem (h)
Maça	80- 85	20- 24	23- 50	70	45	8- 10
Banana	70- 80	7- 15	16,79	70	45	8- 10
chips de mandioca	62- 75	7- 17	23- 62	150	30- 60	7- 10
Pimenta	75- 80	5- 14	16,1	90	40	5- 6
Manga	80- 85	12- 18	15,64	70	55	10- 15
Batata	70- 75	8- 13	14,53	75- 85	50- 70	10- 13
Azarole	65- 70	8- 9	27- 42	75	60- 70	50

Fonte: Masud, Karim, Ananno e Ahmed (2020).

A eficiência de energia térmica pode ser determinada usando equações de conservação de calor e de massa aplicada ao ar e ao material úmido, ou obtida como um produto de eficiências parciais que representam fatores internos que afetam o consumo de energia em um secador. Estas duas maneiras para o cálculo da eficiência energética podem ser usadas para obter eficiência de energia instantânea, ou total.

Existe uma diversidade de materiais para secagem e várias categorias de equipamentos, não sendo possível propor um método generalizado para determinação padronizada da eficiência do secador. O desempenho energético de um secador e de um processo de secagem é caracterizado por vários índices, como taxa de evaporação volumétrica, perdas de calor na superfície, consumo de vapor, consumo de calor por unidade e eficiência energética (térmica).

Há diversas maneiras de calcular a eficiência do secador, sendo algumas apresentadas na sequência. O consumo de energia específica pode ser calculado conforme Equação 7:

$$\epsilon = \frac{\textit{Quantidade de água evaporada}}{\textit{Energia útil ou empregada}} \quad (7)$$

A quantidade de água evaporada é calculada a partir da curva de secagem e a energia de entrada é a soma das demandas de energias. Na secagem convectiva o cálculo das demandas de energia de todo o sistema deve ser realizado com tolerância buscando a energia necessária para aquecer o ar até a temperatura de remoção de água e aplicar medidas de reaproveitamento de calor.

A secagem é aplicada a todos os produtos agrícolas, incluindo cereais, frutas, vegetais e especiarias, consumindo cerca de 0,38–0,63 GJ / tonelada grão.

Segundo Lima e Delgado (2016), os valores médios de consumo específico de energia para secadores nos setores de: cerâmica, química e alimentos, estão na faixa de 3,98 GJ/t, 5,41 GJ/t e 4,88 GJ/t. de água evaporada.

A eficiência energética pode ser definida segundo a Equação 8:

$$\eta = \frac{\textit{Energia útil}}{\textit{Energia fornecida}} \quad (8)$$

A eficiência energética pode ser total, instantânea, ou para a câmara de secagem, excluindo outras demandas de energias.

Eficiência total em processos de radiação, envolvem ondas eletromagnéticas, como micro-ondas e infravermelho e, são definidos conforme Equação 9 ou 10:

$$\eta_{rad} = \frac{\textit{Potência total irradiada do emissor}}{\textit{Potência elétrica do módulo emissor}} \quad (9)$$

$$\eta_{Total} = \frac{\text{Potência absorvida pelo material úmido}}{\text{Potência elétrica do módulo emissor}} \quad (10)$$

A energia total fornecida ao produto úmido está relacionada ao calor latente de evaporação da água, calor sensível e de sorção e perdas convectivas no material. Nos processos de secagem por infravermelho, solar e micro-ondas, a demanda de energia está associado à potência absorvida pelo material, de acordo com a Equação 10.

Foi definida a eficiência energética para secadores convectivos como apresenta a Equação 11:

$$\eta = \frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in} - T_{env}} \quad (11)$$

T_{in} : temperatura média de secagem na entrada

T_{out} : temperatura média de secagem na saída

T_{env} : temperatura ambiente do ar

η : Eficiência energética.

O valor máximo de T_{out} é a temperatura de bulbo úmido. A equação anterior está associada apenas à câmara de secagem. Portanto, quaisquer outras entradas e perdas de energia não são consideradas.

Uma definição completa para eficiência energética deve incluir: o calor fornecido para o secador na remoção da umidade (evaporação de água livre, remoção de água capilar); aquecimento do material úmido, estrutura do secador e perdas de calor para o ambiente por convecção e radiação; a potência do ventilador (para fluir o ar) e a energia de transporte do produto. Assim, a seguinte equação para cálculo da eficiência energética é dada na Equação 12:

$$\eta = \frac{\dot{m}_{a\ in}(y_{a\ out} - y_{a\ in})h_{lv}}{\dot{m}_{a\ in}(y_{a\ out} - y_{a\ in})h_{lv} + \dot{m}_{a\ out}h_{a\ out} + \dot{Q}_{loss} + \dot{m}_p c_p T_{p\ out} + \dot{W}_{fan} + \dot{W}_p} \quad (12)$$

Em que:

\dot{m} : taxa do fluxo de massa

y : umidade absoluta

h : entalpia

c : calor específico

W : potência

h_{lv} : calor latente de vaporização

Os subscritos in , out , p , a , $loss$, fan : representam entrada, saída, produto, ar, perdas e ventilador.

3.11 ESTADO DA ARTE

Até o presente momento, procedeu-se a uma descrição concisa sobre os conceitos fundamentais para a compreensão do sistema de secagem, secadores, técnicas de controle e eficiência. Em seguida, será investigada a evolução histórica da temática e as pesquisas em andamento e suas respectivas contribuições. No Quadro 2 a seguir é descrito um resumo do estado da arte e seus autores, sendo que na última linha deste quadro está explicitada a contribuição deste trabalho.

Quadro 2- Estudos sobre o controle do processo de secagem de biomassa.

(continua)

Autores	Ano	Objetivo principal	Conclusão
MANN, W.	1980	Aperfeiçoar o controle e reduzir gasto com combustível.	Melhoria no controle do processo com aplicação de computadores para o mesmo e economia de combustível de 2,5%, além de torná-lo menos complexo.
RODRIGUEZ, G.; VASSEUR, J.; COURTOIS, F..	1996	Aumentar a produtividade do secador fornecendo um produto com qualidade e baixo teor de umidade.	Controlador PI se mostrou conveniente no controle da umidade, pois, o controlador diminui a velocidade em malha fechada. Deste modo, elevando a produtividade e reduzindo a secagem em excesso.
TRELEA, Ioan-Cristian; COURTOIS, Francis; TRYSTRAM, Gilles.	1997	Entender as dinâmicas da planta quando é não linear para compreender a dificuldade da aplicação de um controlador linear.	Com a utilização do PI obteve-se um resultado satisfatório desde que seja aplicada a transformação linear.
U.S. Wade A. Amos.	1998	Demonstrar as principais tecnologias para secagem de biomassa, questões de segurança, controle de poluição e custos envolvidos.	As tecnologias dos secadores variam muito de acordo as características da biomassa.
STÄHL, M.; GRANSTRÖM, K.; BERGHEL, J.; RENSTRÖM, R..	2004	Verificar se a qualidade dos <i>pellets</i> sofre influência dos diferentes secadores existentes nas industriais.	São necessários mais estudos para comprovar se o tempo de permanência e os efeitos da emissão do terpeno.
RAGHAVAN, G. S. V.; LI, Zhenfeng; WANG, Ning; GARIÉPY, Yvan.	2010	Monitorar o aroma do alimento em um sistema de secagem no micro-ondas em tempo real.	Comprovou que com a variação de temperatura obteve retenção do aroma no alimento, evitou a queima do alimento e elevou a eficiência energética. Uso do controlador <i>fuzzy</i> e o controlador linear.
DINCER, Ibrahim.	2011	Demonstrar que a análise exegética fornece avaliações mais realistas sobre o desempenho dos sistemas de secagem.	A exergia é um método adequado para projeto e melhoria do desempenho em sistemas de redução da umidade.
Y., Liu; M., Aziz; Y., Kansha; A., Tsutsumi.	2012	Reaproveitar o calor gerado no sistema de secagem da biomassa.	Com a tecnologia de recuperação de calor através do emparelhamento do calor sensível e latente, reduzindo a diferença de temperatura entre os fluxos quente e frio. Sendo assim, ocorreu a redução do consumo de energia em 1 \ 6.

(continuação)

Autores	Ano	Objetivo principal	Conclusão
A, Setel; C., Antal; G., Badea.	2015	Investigar o uso da energia geotérmica para a atividade de retirada de água da madeira, através de técnicas de controle.	Comparando-se ao controlador convencional a nova estratégia de controle demonstra melhorias a perturbações ao sistema, demonstrando rapidez na tomada da ação e, conseqüentemente reduzir danos no processo de secagem e a madeira.
BÜCK, Andreas; SEIDEL, Carsten; DÜRR, Robert; NEUGEBAUER, Christoph.	2018	Validar se o modelo de incerteza aplicado no controlador robusto é adequado para garantir a umidade necessária ao produto.	Os controladores P.I e LQR apresentam um resultado adequado com as estimações dos parâmetros dentro da faixa de erros admissíveis. Principal vantagem foi a manutenção da qualidade do produto e a redução da secagem excessiva do produto.
PEREA-MORENO, Miguel-Angel; SAMERÓN-MANZANO, Esther; PEREA-MORENO, Alberto-Jesus.	2019	Investigar as pesquisas relacionadas a biomassa como fonte de energia renovável entre 1978 a 2018.	Certificou-se que países como EUA, China, Índia, Alemanha e Itália destacam-se nas pesquisas científicas utilizando a biomassa como fonte renovável de energia, sendo estes países responsáveis pelas principais publicações nas seguintes temáticas: revisões de energia renovável e sustentável, biomassa, bioenergia, tecnologia de biofonte.
SCHÖRGHUBER, Christoph; GÖLLES, Markus; REICHHARTINGER, Markus; HORN, Martin.	2020	Implementar uma nova estratégia de controle em uma caldeira com matéria orgânica.	Verificou-se que a nova estratégia de controle tornou mais simples o sistema e reduziu o número de parâmetros para sintonizar o controlador. Com isso, aumentou a eficiência e restringiu a emissão de poluentes.
TAKOUGNADI, Essouhouna; BOROZE, Tcha-Esso Tchamye; AZOUMA, Ouézou Yaovi.	2020	Estabelecer o melhor cenário de eficiência energética mantendo as propriedades nutritivas da banana em um sistema de retirada da umidade.	Demonstrou-se que a temperatura influencia mais que a taxa de fluxo de ar nas qualidades nutritivas da banana em um processo de secagem.
BERNER, Marc Oliver; SCHERER, Viktor; MÖNNIGMANN, Martin.	2020	Adotar a técnica de modelos de ordem reduzido aplicado no sistema de retirada de água de biomassa, visando o controle otimizado.	O modelo de controle com ordem reduzida mostrou-se eficiente do ponto de vista energético da atividade de remoção da umidade e preciso.
CHEN, Chang; VENKITASAMY, Chandrasekar; ZHANG, Weipeng; DENG, Lizhen; MENG, Xiangyong; PAN, Zhongli.	2020	Verificar a influência da temperatura na qualidade da atividade de secagem de nozes em um secador de coluna e, sua relação com o consumo de energia.	Comprovou-se que o processo de secagem de nozes com variação de temperatura e o fluxo de ar constante atingiu em 40% a redução do tempo de secagem e, também uma economia de 24% no consumo de energia comparado ao processo tradicional.
Friso	2023	Avaliar a modelagem matemática baseada na solução de equações diferenciais ordinárias (EDOs) e compará-la com o modelo simplificado para o controle da secagem para garantir um teor de umidade desejável na saída do produto.	O modelo simplificado forneceu valores de temperaturas de entrada de ar maior, até +8,2%, representando maior consumo de energia e, menor qualidade de alfafa seca.

(conclusão)

Autores	Ano	Objetivo principal	Conclusão
Martins, Rabello, Gomes e Garcia	2024	Quantificar a economia de energia na produção de farinha de banana verde através da secagem por infravermelho (IR) em relação ao processo convencional de secagem em estufa com resistência elétrica.	A energia total consumida pelo processo de secagem usando radiação infravermelha foi menor do que a energia consumida pela estufa. O uso do sistema de controle de temperatura gerou um aumento na eficiência do processo de secagem com IR quando a temperatura da superfície da polpa da fruta foi aumentada.
Pramudita	2024	Implementar o controlador PID para obter a otimização do consumo de energia entre dois tipos de secadores, sendo eles: convecção forçada e convecção forçada híbrida.	O secador híbrido reduz o consumo de energia e potência em 48,32% e 49,18%, em comparação ao secador de convecção forçada.
Ma, Zhou e Wen	2025	Elaborar um sistema de controle de uma secador automático baseado em CLP da Siemens, que oferece controle de temperatura e umidade em circuito fechado, seleção de múltiplos modos e otimização do consumo de energia.	O controle preciso alcançado por meio do CLP reduz o consumo de energia e simplifica a operação. No futuro, com a adição de controle remoto e aprendizado de IA, as secadoras proporcionarão ainda mais conveniência para a vida das pessoas.
AMARAL, H. H..	2025	Confeccionar um secador de leite fixo e implementar técnicas de controle (<i>on-off</i> ; proporcional) aplicados ao controlador lógico programável em um processo de secagem dos resíduos do malte, buscando eficiência energética e sustentabilidade do processo.	Aumento da eficiência energética em função do controlador adotado, de modo que o secador possui viabilidade econômica e simplicidade na implementação para utilizar o resíduo de malte para a composição de briquetes e péletes.

Fonte: Autoria própria (2025).

Conforme descrito no estado da arte no Quadro 2, diversos autores abordam o tema sob diferentes perspectivas. Os processos de secagem de alimentos, ou biomassa, buscam a sua otimização por meio de estratégias de controle, visando obter redução no consumo de energia, elevar a qualidade do produto, segurança e mitigar a emissão de poluentes na atmosfera. Torna-se imprescindível dividir o estudo em três eixos temáticos que são: secadores; resíduos e, produtos alimentícios usado como combustíveis; e eficiência energética e estratégias de controle, como são descritos na sequência.

3.12 Secadores

Como enfatizam os autores Albini, Freire e Freire (2018), Soares, Jorge e Montanuci (2016), (RYNIECKI; GAWRYSIK-WITULSKA; WAWRZYNIAK, 2007), Ebrahimifakhar e Yuill (2020), Markowski, Białoobrzewski e Modrzewska (2010), Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e

Extensão (2018), investigou-se a secagem do grão cevada em diversos secadores, avaliando-se a sensibilidade a variações de alguns parâmetros.

As pesquisas mencionadas anteriormente e seus pontos-chaves descritos a seguir: empregou-se um secador de leito fixo, revertendo o fluxo de ar, ou com uma entrada de fluxo de ar convencional, sem reversão, e averiguou-se a distribuição de umidade e o efeito da temperatura; também avaliou-se a cinética de secagem de grãos de cevada por modelagem matemática e, também a difusividade durante e após a redução de umidade; desenvolveu-se um método para a determinação automática do ponto final da secagem da cevada em leitos fixos profundos, com base em uma correlação para inferir o teor de umidade do grão da camada superior, usando uma medição online contínua da umidade relativa e da temperatura do ar de saída; foi proposta uma metodologia inversa para estimar propriedades dos grãos durante a secagem em leito profundo; estudou-se a cinética de remoção de água da cevada em secador de leito jorro e se há influência na forma do núcleo da semente assumida no modelo e sobre o valor estimado de umidade efetiva de difusividade; foi avaliada a germinação e teor de umidade final sobre a secagem do grão de cevada empregando os secadores de: leito fixo, fluidizado e jorro.

Segundo os autores Aduewa, Oyerinde e Olalusi (2019), um secador com suplemento de ar quente movido a energia solar (SPHSD) com capacidade para 20 kg de inhame fatiado foi projetado e implementado. O SPHSD é constituído em três seções: a câmara do coletor solar, de secagem e suplemento de ar quente, sendo a energia fornecida por dois painéis solares de 150 watts e uma bateria solar de 200 amperes para operação contínua durante uma intempérie. O SPHSD atingiu um tempo maior para remover a umidade do inhame quando comparado a secador indireto solar, mas reduziu drasticamente o teor de umidade. O secador suprido com ar quente movido a energia solar (SPHSD) com capacidade para 20 kg de inhame fatiado é de baixo custo e pode ser operado por qualquer pessoa do campo, pois sua operação e manutenção são simples.

Conforme sustenta Rocha, Stoppe, Silvério, Santos e Vieira Neto (2020), investigou-se a remoção de umidade do resíduo de malte empregando dois equipamentos: estufa solar e secador solar de leito fixo, o estudo da cinética de secagem do material em diferentes temperaturas, comprovou-se que o modelo de Page melhor representa a cinética de retirada de água do resíduo de malte. Nos testes de secagem solar, foi possível determinar a influência de fatores como a radiação solar e velocidade do vento sobre as temperaturas obtidas, bem como sobre a taxa de remoção de água em ambos os equipamentos. Análises de fluidodinâmica computacional do secador de leito fixo apresentou a melhor forma de fornecimento do ar no interior do secador, que favorece a secagem. No entanto, a estufa solar se mostrou mais eficiente, promovendo uma retirada de água mais homogênea do material.

Conforme dispõem Couper, Penney, Fair e Walas (2012), existem algumas variáveis que afetam o desempenho do secador, mas a principal é a potência. Diversas alternativas foram apresentadas para mitigar o consumo de energia, sendo elas: aumentar a temperatura do ar na entrada; reduzir a temperatura do mesmo na saída; diminuir a carga de evaporação; pré-aquecer a matéria-prima com outros fluxos de processo; restringir a vazão; pré-aquecer o fluido fornecido e o de exaustão; efetuar a secagem em dois estágios; empregar um trocador de calor interno; reciclo do fluido atmosférico de exaustão; considerar fontes alternativas de calor e isolamento térmica da área de retirada de umidade do equipamento.

3.12.1 Resíduos e produtos alimentícios usado como combustíveis

Conforme sustentam Mello (2020), Gonçalves (2017), Shih (2020), Karlović (2020), Lütke (2020), Nigam (2017), Tsaousi (2009), SINGH (2020) o resíduo do malte pode gerar produtos que sejam rentáveis e com elevada eficiência energética, sendo os pontos importantes descritos na sequência.

Foi empregado um pré-tratamento no resíduo do malte combinando a hidrólise ácida com técnicas de sonicação visando obter açúcares fermentáveis; Convertem-se os subprodutos de cervejarias em bio-óleo e carvão ativado através do processo de pirólise e ativação com CO₂ usando uma, ou duas etapas; Utilizou-se da secagem de impacto para partículas de materiais com alta umidade através dos fluxos de alta velocidade de ar quente por meio do produto que está sendo seco; Investigou-se como obter matérias-primas de alto valor energético que possuem um potencial de aplicação no ramo da biotecnologia, e na manufatura de alimentos; Foi implementado um processo de conversão do resíduo para biocarvão e, também óleo pirolítico rico em ácido palmítico; Produziu-se bioprodutos, como ácido láctico, enzimas, xilitol, ração animal e a reciclagem, por meio dos processos biotecnológicos; como elemento de baixo custo para diversas aplicações, inclusive biocombustível; A remoção da umidade foi executada por: forno, fluxo de ar e sob vácuo, monitorando a redução da massa em vários intervalos de tempo, até o peso ser constante; Estudou-se a cinética de desidratação do bagaço do malte e o efeito de três métodos de secagem distintos- em forno (OD), liofilização (FD) e por micro-ondas a vácuo (VMD) – analisadas em seu conteúdo nutricional, energético e exergético.

Conforme sustentam Reuss, Cassells e Green (2003), foi proposta uma alternativa ao uso de produtos químicos agrícolas para quebrar a dormência anterior, ou posterior ao armazenamento. Tal alternativa é o processo de secagem na dormência. Em Swanston, Wilhelmson, Ritala e Gibson (2014) comprovou-se que a temperatura final e o teor de umidade variam conforme a categoria de malte produzido, alterando as características da cerveja.

Alguns métodos de retirada de água podem ser mais adequados e, dependem de alguns fatores, como por exemplo, temperatura, fluxo de ar, tamanho dos grãos, sistemas de secagem, condições climáticas, tipo de matéria orgânica e teor de umidade inicial e final requerido. Esses procedimentos são classificados de acordo com o tipo de escoamento, mobilidade do leito, contínuos, ou em batelada, geometria, entre outros aspectos. A redução da umidade por convecção forçada é a mais tradicional e pode ser conduzida em diferentes configurações, tais como, em leito fixo, leito fluidizado e tambor rotativo.

Contudo, a operação de secagem continua a ser um dos processos com menor eficiência energética na indústria alimentícia, com valores de desempenho quase sempre inferior a 30%. Isso demonstra que o estudo de novas técnicas de secagem com a finalidade de: antecipar a colheita, reduzir perdas de produto no campo, estocagem de produtos por um tempo maior, manter o poder germinativo durante um período mais elevado e ainda mitigar o desenvolvimento de microrganismos e isentos. Também pode ser útil evidenciar que a remoção de água, aliada à automação e controle do processo, é crucial para a utilização da biomassa como fonte energética, especialmente quando transformada em briquetes ou péletes. Segundo Demirbas (2001), a redução do teor de umidade da biomassa é fundamental para melhorar seu desempenho energético, viabilizando processos de conversão como combustão e densificação. Além disso, estudos como os de Dias *et al.* (2012) e Protásio *et al.* (2012) reforçam que o controle adequado da secagem e da compactação garante maior eficiência na produção e qualidade dos biocombustíveis sólidos

3.12.2 Eficiência Energética E Estratégias De Controle

A automação e eficiência energética do sistema da retirada de água têm sido alvo de estudos por diversos pesquisadores, tanto no âmbito nacional quanto no internacional, destacando-se as pesquisas realizadas por Mann (1980), Rodriguez, Vasseur & Courtois (1996), Trelea, Courtois & Trystram (1997), Ståhl *et al.* (2004), Raghavan *et al.* (2010), Dincer (2011), Bück *et al.* (2018), Chen *et al.* (2020), Schörghuber *et al.* (2020), Berner, Scherer & Mönnigmann (2020).

Nesses trabalhos foram realizados estudos sobre controle em cascata, dinâmica do processo com controle proporcional e integral, controlador *LQR* (*linear quadratic regular*), técnicas de secagem em função da qualidade requerida do pélete, controladores de lógica *fuzzy*, exergia, economia e sustentabilidade em uma atividade para reduzir a umidade, controle robusto e com redução gradual da temperatura do ar e sua relação com o consumo de energia, controle de modelo interno a parâmetros ajustáveis, entre outras abordagens.

Por exemplo, em Mann (1980), era empregado um secador do tipo rotativo de modo a secar a polpa extraída do açúcar da beterraba, ao passo que a porcentagem da polpa seca era controlada manualmente e despendia muito combustível. No entanto, implementava-se com base no modelo identificado, os algoritmos de controle de um sistema de controle digital multicascata foram projetados com auxílio do computador, comprovando-se uma economia de 2,5% em combustível.

De acordo com Rodriguez, Vasseur e Courtois (1996), realizava-se o projeto e a implementação de um controlador P.I. (Proporcional Integral) nos secadores a tambor com aplicação na indústria alimentícia, com o intuito de reduzir a umidade do produto, elevar sua qualidade e aumentar a produtividade do secador. Portanto, observava-se que essa configuração elevava a produtividade em 30% e diminuía a secagem de alta intensidade, a qual era um inconveniente na indústria, devido às perdas de qualidade, que incluíam perda de aroma, valor nutritivo, descoloração, propriedades físicas e mudanças de textura.

Já em Dincer (2011), foi investigado o conceito de exergia com energia, economia e sustentabilidade em um processo de secagem, confirmando-se que a exergia é uma ferramenta fundamental para resolver problemas ambientais e melhorar a sustentabilidade nos sistemas de redução de umidade.

Segundo Bück, Seidel, Dürr e Neugebauer (2018), foi utilizada uma estratégia de controle robusto no processo de secagem de leveduras em comparação aos controladores P.I e Regulador linear quadrático. Foi comprovada a vantagem desse método, em que limites mais rígidos na qualidade da levedura de panificação podem ser garantidos, mesmo na presença de outras incertezas paramétricas, evitando assim a remoção excessiva de água, ou insuficiente, bem como aumento da inativação de materiais bioativos.

De acordo com Berner, Scherer e Mönnigmann (2020), procedimentos de eliminação da água na biomassa são complexos, o que dificulta a modelagem a partir de equações diferenciais parciais para resolver problemas de controle. Além disso, o modelo *ROM (Reduced- Order Modeling)* provou ser preciso e computacionalmente eficiente para solução de problemas de controle para a operação do processo de secagem com eficiência energética.

Em Hosseinpour e Martynenko (2020), abordou-se uma ampla revisão das aplicações existentes da lógica *fuzzy* em processos de secagem de alimentos, demonstrando benefícios e suas lacunas. A lógica difusa tem elevado potencial, mas não é explorada em sua plenitude. Nas pesquisas atuais têm sido resolvidos problemas de modelagem não linear, simulação, reconhecimento de padrões, *clustering*, classificação, controle e otimização de processos. Há um grande espaço de pesquisa sobre a integração da lógica multivalorada para monitoramento em tempo real, controle, e otimização na secagem.

Segundo Alam, Saha, Ashraf, Bala e Harvey (2018), uma rede neural foi usada para prever o desempenho do secador BAU-STR para a secagem do arroz. A previsão de desempenho do secador foi considerada excelente após o treinamento adequado. Logo, pode ser usado para prever o potencial do secador para diferentes locais e empregado em um algoritmo de controle otimizado preditivo.

Conforme Dai, Zhou e Liu (2017), foram avaliadas estratégias de controle eficazes para uma planta de secagem de grãos e, otimizado o desempenho do controle, como os critérios de desempenho: *overshoot*, precisão e habilidades anti-perturbação. As variáveis de secagem eram: teor de umidade, temperatura do grão e temperatura do ar aquecido. Comparou-se três controladores: o controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) geral, o controlador PID difuso e o controlador PID imune difuso. O controlador PID *Imune Fuzzy* geneticamente otimizado (GOFIP) que é uma combinação de controle de *feedback* imunológico *fuzzy* inteligente e controle tradicional. O controlador GOFIP era superior aos demais controladores simulados, pois o *overshoot* e o tempo de ajuste eram zero, retratando a estabilidade do controle, já que podiam ajustar a saída para o valor alvo de forma rápida e constante.

A pesquisa envolveu a integração de rede neural artificial (RNA) com algoritmo genético (GA) para prever os parâmetros de processo otimizados necessários para remoção de água das folhas do chá-verde em um secador de leito fluidizado. Os resultados indicaram que o modelo de secagem RNA / GA desenvolvido pode estimar com eficiência os valores dos parâmetros de qualidade das folhas secas de chá-verde, e identificar condições otimizadas de secagem para quaisquer novos dados (KALATHINGAL; BASAK; MITRA, 2019).

Na seção 3.7 foram apresentados os principais trabalhos relevantes na área de secagem, secadores e controladores visando reduzir a umidade de produtos alimentícios e biomassas.

De acordo com alguns trabalhos mencionados anteriormente, há algumas perspectivas que ainda não foram suficientemente investigadas. Essas lacunas na literatura destacam a necessidade de pesquisas que abordem retirada de umidade em função do controlador adotado, maior explanação sobre controladores aplicados em um secador de leito fixo, expor métodos de controle que elevam a eficiência no consumo de energia e secagem do resíduo do malte, unificar e alavancar pesquisas nas áreas de eletrônica de potência e automação e controle de maneira mais abrangente e inovadora. Nesse sentido, esta tese busca preencher essas lacunas ao investigar e implementar um secador de leito fixo de resíduo do malte em escala laboratorial aplicando o controlador *on-off* e o controlador proporcional (P), com intuito de obter uma maior eficiência do ponto de vista energético e, obter a redução de umidade do resíduo em um secador de leito fixo, contribuindo, desta forma para a sustentabilidade. Além de conectar as áreas de controle e automação e eletrônica de potência, tornando-se também uma contribuição inovadora, através do CLP e a união ao circuito gradador de tensão.

Esta tese traz contribuições originais para o campo de secagem e secadores, as quais podem ser resumidas nos seguintes pontos:

Uma das principais contribuições deste trabalho é a avaliação da retirada de umidade do resíduo do malte em virtude do controlador utilizado e sua eficiência energética (através da potência consumida no secador) na secagem. Diferentemente das abordagens tradicionais, que se basearam em projetar / simular/ implementar tipos de controladores em um secador e avaliou-se apenas a retirada de água do resíduo, ou somente a eficiência energética dele.

A análise desenvolvida nesta tese incorpora como nova ferramenta a abordagem que permitiu avaliar que determinado tipo de controlador influencia na redução de umidade e, também no consumo de potência, ao passo que este tipo de avaliação conjunta não é realizado na literatura.

Outra contribuição original desta tese é a integração de teorias/ áreas de automação e controle e teorias/ área da eletrônica de potência, que tradicionalmente são tratadas de forma isolada. Ao combinar estas áreas, esta pesquisa oferece uma visão mais abrangente de aumentar a eficiência energética e reduzir a umidade do resíduo do malte através do controlador, permitindo novas aplicações práticas, pois emprega equipamentos como CLP da indústria, e circuitos gradadores, os quais também são aplicados em alguns produtos no mercado, porém não há registro de união destes dois elementos e com aplicação em um secador. Além das contribuições de união das duas áreas citadas anteriormente, esta tese também demonstra a aplicabilidade prática da pesquisa na área de tecnologia na secagem de resíduos.

Este capítulo evidenciou a revisão bibliográfica sobre secagem, organizadas em: resíduo do malte que foi o produto empregado na secagem, noções básicas sobre secagem e secadores, além de descrever de forma trivial sobre automação, controle, níveis de máquina e eficiência e, finalmente foi apresentado o estado da arte sobre: secadores, resíduos e produtos alimentícios empregado como combustíveis e, também eficiência energética e estratégias de controle.

No próximo capítulo será elucidado questões relacionadas ao procedimento metodológico e resultados.

4 METODOLOGIA

O estudo teórico realizado sobre o secador com duas técnicas de controle é de fundamental importância para o entendimento do princípio de funcionamento do sistema de secagem, visto que, este controlador será implementado com as duas técnicas de controle mencionadas no Capítulo 3. É importante destacar que cada controlador é empregado isoladamente.

Neste capítulo será descrito que tipo de pesquisa foi executada, o procedimento metodológico, materiais e métodos, local e período da pesquisa e os instrumentos de coleta e análise de dados.

4.1 TIPO DE PESQUISA

Em relação a natureza da pesquisa é do tipo aplicada, pois gera conhecimento de aplicação prática. No que se refere aos objetivos da pesquisa é explicativa e exploratória. Com base na abordagem do problema foi utilizada a pesquisa qualitativa e quantitativa. Em se tratando de procedimentos sobre as fontes de informações empregou-se a pesquisa bibliográfica e a pesquisa documental orientada pela base de dados: portal capes, periódicos, google acadêmico, livros. As palavras-chave utilizadas na pesquisa bibliográfica foram *dryer, drying, control and automation in drying, biomass, brewer's spent grain, moisture*. Sendo estas definidas a partir dos principais conceitos relacionados ao tema, permitindo a localização e seleção dos artigos incorporados nesta tese. Ainda, foi construído um secador para remoção de umidade do resíduo do malte que caracteriza também como uma pesquisa experimental (do tipo qualitativa e quantitativa).

A elaboração desse trabalho é dividida em: teórica e experimental. Na parte teórica foram disponibilizados conceitos para o entendimento de como é o processo de secagem, como é definida a estrutura de um secador e foi demonstrada o controle do processo por meio de um controlador lógico programável. No tocante a parte experimental será detalhada na seção seguinte.

4.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste momento será explicado como foi realizado o projeto dos circuitos gradador de tensão que estará na saída do CLP e controlará a tensão aplicada na resistência e a tensão aplicada ao ventilador e, ainda os passos para construção de todo o sistema de secagem do resíduo do malte.

4.2.1 Metodologia de Projeto do Gradador de tensão (*Dimmer*)

Neste instante é apresentada a metodologia de projeto do conversor gradador de tensão. Os dados iniciais de projeto são necessários para realização dos cálculos feitos posteriormente. Estes dados estão dispostos na Tabela 2. Vale ressaltar que mesmo com o detalhamento do cálculo de projeto do conversor os valores dos respectivos componentes tiveram que ser ajustados para o valor final de forma experimental.

Tabela 2- Dados iniciais de projeto.

Dados iniciais de projeto	
Tensão de entrada- V_{em}	127 V
Tensão de saída- V_{sai}	127 V
Corrente de saída- I_{calor}	3,94 A
Frequência – f	60 Hz

Fonte: Aatoria própria (2025).

Na Tabela 2 é apresentado o valor da tensão de entrada, que foi definido em função da tensão da rede elétrica que utilizamos (127 V).

O sistema de secagem emprega um resistor que é a fonte de calor do secador e possui uma potência de 500 W a 127 V. Logo, a corrente necessária na saída do gradador foi de aproximadamente 3,94 A, assim como foi usada a frequência da rede elétrica de 60 Hz.

Com os dados iniciais de projeto mencionados, será dada ênfase ao cálculo de valores dos componentes empregados no gradador de tensão. Em primeiro momento será demonstrado o cálculo de projeto para o sinal de acionamento do TRIAC através do DIAC. Visto que, a rede elétrica é de 127 V_{rms}, logo, a tensão de pico foi de 179,60 V e, a frequência da rede é 60 Hz teremos o período de 16,67 ms. Deste modo, temos que escolher o ângulo de disparo do TRIAC, para o gradador neste trabalho adotou-se um $\alpha=90^\circ$, para cálculo do tempo em relação ao ângulo de fase fez-se uso da Equação 13

$$t = \frac{\alpha}{360} * T \quad (13)$$

Em que:

t: tempo de disparo

α : ângulo de fase

T: período da rede.

Dessa forma, $t = 4,17 \text{ ms}$. O DIAC, conforme o *datasheet* dispara quando atinge a tensão de 30 V, diante disso calcularemos a constante de tempo τ na Equação 14.

$$\tau = \frac{-t}{\ln\left(1 - \frac{V_{DIAC}}{V_{pico}}\right)} * T \quad (14)$$

Em que:

V_{pico} : tensão de pico da rede

V_{DIAC} : tensão de acionamento do DIAC

Sendo assim obteve-se um valor inicial de $\tau = 0,0246$ segundos, porém experimentalmente foi necessário modificar para um valor de funcionamento adequado.

Em seguida, adotou-se um valor de C_1 na faixa de nano *Farady's*, iniciou-se com o valor de $0,1\mu F$ ou $100 nF$ em valor comercial, a escolha desse intervalo de capacitância é baseada em fatores práticos e de desempenho, como por exemplo, compromisso com a frequência da rede elétrica (50/60 Hz), caso a capacitância fosse muito baixa carregaria e descarregaria rapidamente demais, limitando a faixa de controle, desta forma o circuito se tornaria instável e difícil de ajustar.

No caso da capacitância muito alta: obteria uma constante de tempo muito longa, mesmo com o potenciômetro na posição mínima. O circuito poderia não disparar a tempo ou limitar a potência máxima. O valor de capacitância de $100nF$ oferece um equilíbrio ideal para a frequência da rede elétrica, permitindo uma ampla e suave faixa de controle, do mínimo ao máximo. Assim como assumiu-se o $P_1 = 100 k\Omega$ e um resistor de proteção da porta do tiristor em torno de $10k\Omega$ (R_1) para limitar a corrente. Assim, quanto maior a faixa de ângulo de disparo e de proteção, melhor o ajuste, devido a faixa morta do potenciômetro do circuito. A partir da nova escolha de capacitor e resistores o $\tau = 11 ms$, obteve-se esse valor com a Equação 15.

$$\tau = R * C \quad (15)$$

Feito isso, deve-se calcular o circuito *snubber* levando em conta os critérios como redução do pico de tensão, controle do dV/dt para proteção contra pico de tensão no tiristor e reduzir ruídos. Sendo este composto por um resistor (C_2) e um capacitor (R_2) em série conectados em paralelo com o tiristor. Visto que, os respectivos valores foram obtidos experimentalmente sendo eles: $R_2 = 330 \Omega$ e $C_2 = 47 nF$.

No Quadro 3 estão apresentados os valores dos componentes do circuito gradador de tensão e estão no Anexo A, B, C, D, E, F e G.

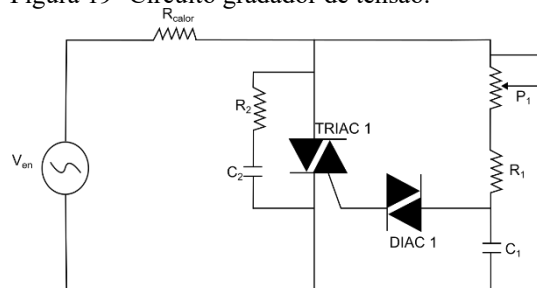
Quadro 3- Os valores dos componentes do circuito gradador de tensão.

Componentes	Valores comerciais
R_1	10 k Ω
P_1	100 k Ω (B- linear)
R_2	330 Ω
R_{calor}	500 W
TRIAC ₁	Bt 136
DIAC ₁	Db3
C_1	100 nF (poliéster- 400 V)
C_2	47nF (poliéster – 400 V)
Ventilador	28 W

Fonte: Braga (1979).

Na Figura 19 foi ilustrado os circuitos que controlar a velocidade do fluido (vento) e o calor gerado pela resistência.

Figura 19- Circuito gradador de tensão.



Fonte: Braga (1979).

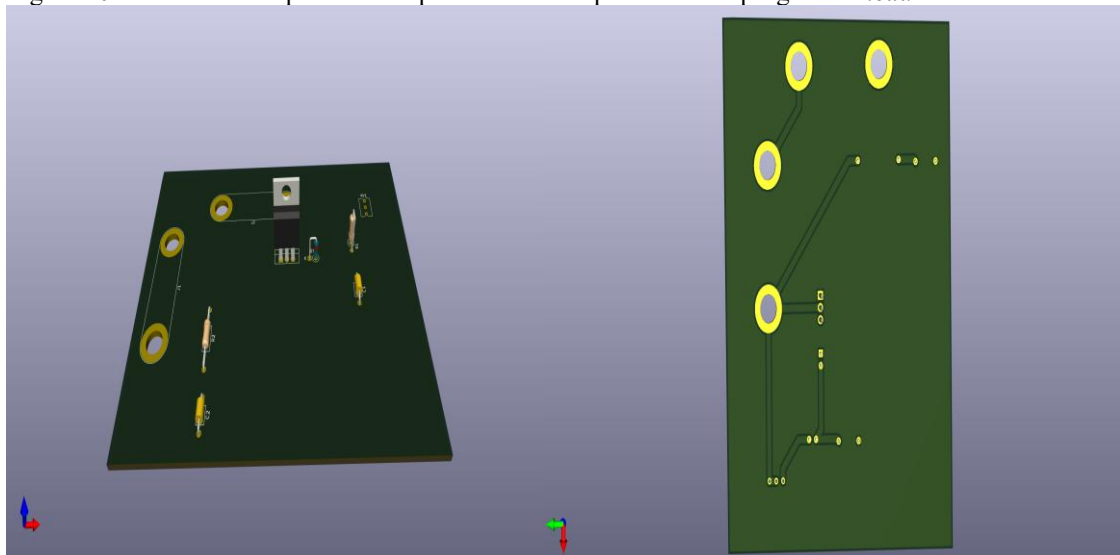
A etapa experimental foi dividida em duas partes. Em um primeiro momento foi realizado o projeto e o *layout* da placa do circuito variável (chamado de gradador) com o programa *kicad*[®]. Nessa etapa foi realizado o desenho do circuito sobre a placa de circuito impressa. Feito isso, partiu-se para a elaboração do protótipo, cuja confecção das placas que variam a energia na resistência e no ventilador foram realizadas através do processo de corrosão utilizando o perclorato de ferro, conforme Figura 20.

Na sequência foram inseridos os componentes *PHT* (componente inserido na placa através de um orifício sobre a placa de circuito impresso) na placa de circuito impresso. Logo foi realizada a solda desses componentes (*diac*, *triac*, diodo, capacitor cerâmico, resistores e potenciômetro). A placa real foi roteada e está em Apêndice C.

Após a confecção das placas, conforme ilustra a Figura 20 foi realizada a programação em um computador na linguagem em *Ladder*[®] e carregado o programa para o CLP via cabo de comunicação serial-*usb*. A programação do controlador pode ser realizada diretamente no mesmo, ou ser feita através do programa *Clic02 edit* em um computador e enviada ao CLP via cabo de comunicação. O

programa carregado possui instruções com a lógica para configurar o acionamento na saída do CLP e, conseqüentemente controlar a secagem do resíduo.

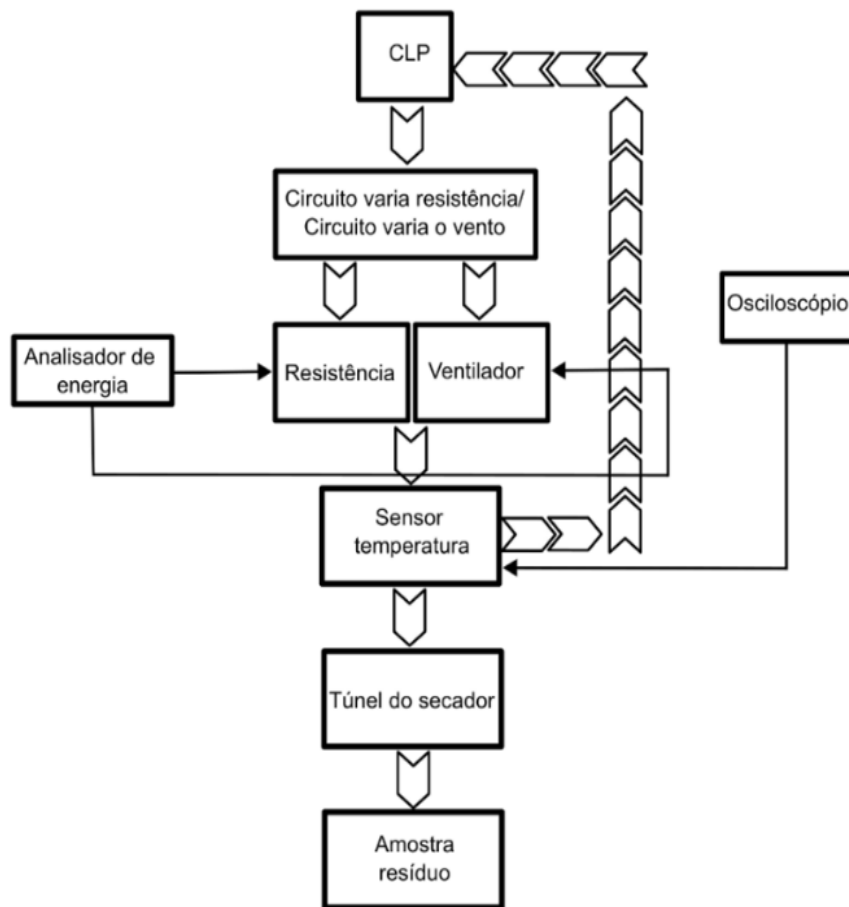
Figura 20- Vista frontal e posterior da placa eletrônica produzida no programa *Kicad*[®].



Fonte: Autoria Própria (2025).

A segunda parte da etapa experimental foi dedicada à construção do secador. O sistema de secagem desenvolvido é composto de: um túnel de secagem confeccionado em madeira (restos de embalagem), um recipiente metálico com orifícios onde será armazenado os resíduos do malte, um controlador lógico programável (CLP), um ventilador, uma resistência e circuitos que variam a tensão na resistência e a velocidade do ventilador, um módulo Analisador de energia R8000[®] EMBRASUL e sensores de tensão, corrente (TC) e temperatura (LM 35- conforme Anexo H). Na Figura 21 é ilustrado o esquemático do sistema de secagem. As setas orientam o fluxo do sistema, ao passo que o sensor de temperatura envia informações sobre a temperatura ao CLP e, baseado nesta informação o controlador (CLP) realiza cálculos e aciona uma determinada saída que aciona uma placa (gradador-ventilador) para controlar o fluido e outra placa (gradador- resistência) para controlar a resistência que gera calor.

Figura 21- Esquemático do sistema de secagem proposto neste trabalho.



Fonte: Autoria própria (2025).

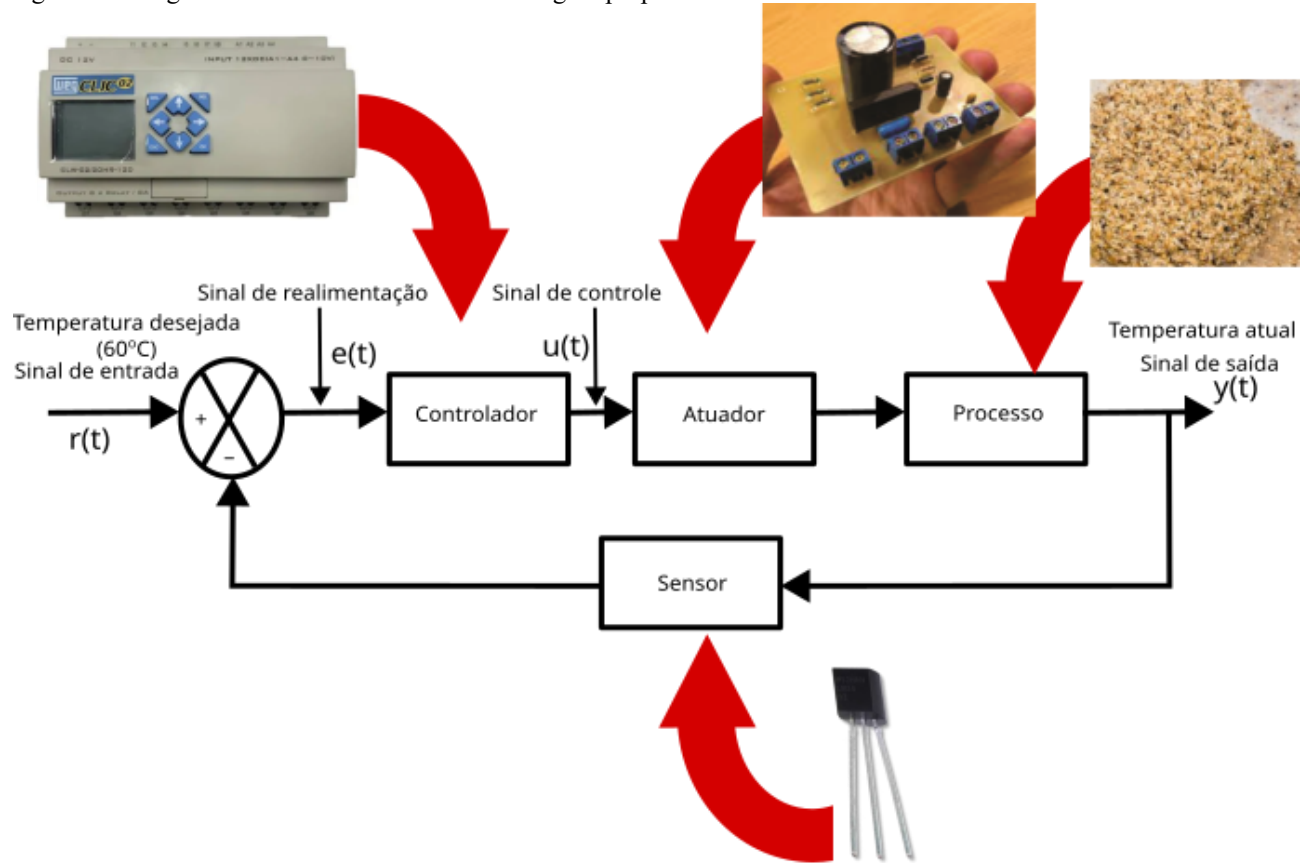
Por último, foi construído o túnel de ventilação e efetuadas as ligações elétricas tanto nos circuitos conectados na saída do CLP, como a conexão dos sensores, ventilador, analisador de energia e o osciloscópio.

Após o projeto, confecção de circuitos (gradador de tensão) e a montagem do secador (conjunto de túnel de vento - (caixa de madeira), resistência calorífica e ventilador) houve a criação do algoritmo de controle *on-off* e outro algoritmo P (proporcional) em linguagem *Ladder* empregados no CLP, conforme em apêndice A e B. Os atuadores são os circuitos gradadores conectados na saída do CLP, que controlam a resistência para fornecer calor e, também controlam a velocidade do fluido para manter a temperatura de secagem em um determinado valor e, conseqüentemente remover a umidade.

O sistema de controle empregado é em malha fechada com a finalidade de manter a temperatura interna no túnel do vento próximo ao recipiente que está o resíduo em torno de aproximadamente 60°C. A seguir é apresentado o diagrama em blocos do controle na Figura 22, constituído de um sinal de entrada desejado (no caso a temperatura de deseja), um controlador que é representado pelo CLP,

o atuador que é constituído pelo circuito gradador de tensão (*dimmer*), o resíduo que simboliza o produto no processo de secagem e o sensor de temperatura (Lm 35).

Figura 22- Diagrama em blocos do sistema de secagem proposto neste trabalho.



Fonte: Autoria Própria (2025).

Posterior foram realizados testes para o funcionamento do sistema, obtendo-se resultados experimentais preliminares. Visto que, as variáveis do processo são a temperatura, velocidade do ar (ventilador), o peso da amostra e também a umidade da amostra.

O propósito deste trabalho foi comparar qual tipo de controle fornece uma redução no consumo de energia, além da redução na massa do resíduo e na umidade e, ainda comparar os resultados de uma simulação de um sistema teste de desempenho no *Python*[®]. A simulação utilizou os dados reais obtidos do secador (através do osciloscópio e analisador de energia) para obter o modelo matemático.

O controlador empregado no CLP usará técnicas de controle tradicional, como, por exemplo, controle *on-off*, e um controlador proporcional, conforme mencionado neste trabalho.

Foram empregadas duas temperaturas distintas para remoção da umidade em função do controlador adotado, como por exemplo, o controlador *on-off*, que possui uma histerese de 5 °C, porém o *set point* é de 60 °C, logo a histerese calculada é de 55 °C. Desta forma, quando a temperatura for inferior a 55 °C aciona a saída do CLP visando fornecer energia à resistência e ao ventilador. Caso

a temperatura seja superior a 60°C, a resistência é desligada. Neste controlador utilizou-se apenas as saídas do CLP Q1 e Q8, ao passo que Q1 e Q8 são acionadas até atingir o valor de temperatura de 55 °C, quando ultrapassar esse valor apenas a saída Q8 é acionada, quando a temperatura volta a reduzir novamente é acionado a saída Q1 e Q8. As saídas do CLP controlam a temperatura próximo ao resíduo do malte.

Já o controlador P foi programado para manter um *setpoint* em 60°C, sendo empregado a variação da velocidade do ventilador, a qual varia entre uma das duas opções de 1m/s, ou 4 m/s que possui relação ao valor adotado no potenciômetro de cada um dos circuitos gradador das 2 placas. Já para controlar o calor gerado em função da temperatura de secagem estabelecida, há também a variação em função dos valores dos 3 potenciômetros de cada um dos circuitos gradador que constitui a variação de energia na resistência geradora de calor. No Quadro 4 são exibidos os valores de resistência de cada potenciômetro em função da velocidade do ventilador e da resistência de geração de calor. Na Figura 23 é elaborado um esboço da parte experimental e a imagem do protótipo na Figura 24.

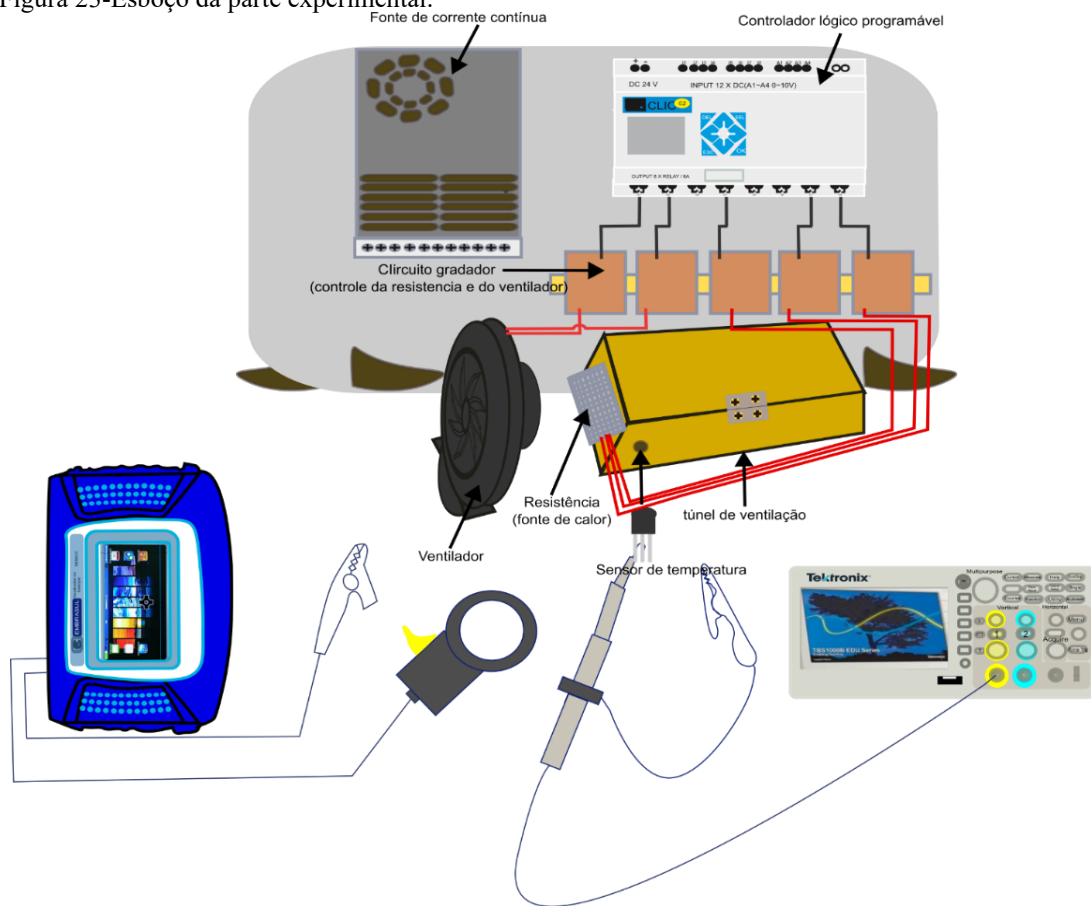
Quadro 4- Valor de cada resistência do potenciômetro de cada placa do circuito gradador.

Velocidade do ventilador		Resistencia geração de calor		
Potenciômetro placa Q1(k Ω)	Potenciômetro placa Q2(k Ω)	Potenciômetro placa Q4(k Ω)	Potenciômetro placa Q7(Ω)	Potenciômetro placa Q8(Ω)
50, 48	15,79	81,7	14,7	12,3

Fonte: Aatoria Própria (2025).

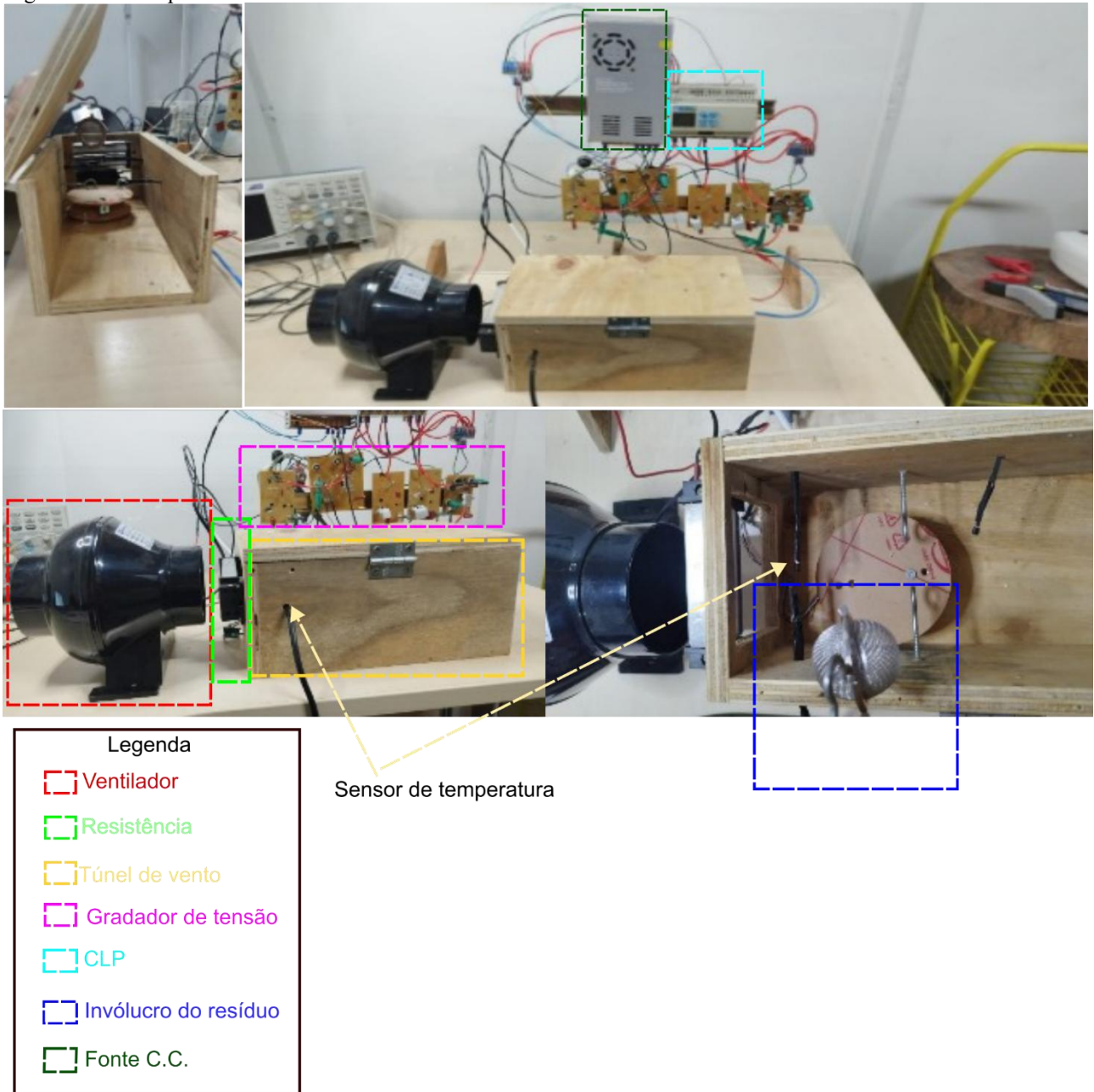
Na Figura 25 foi ilustrada a conexão elétrica do gradador de tensão na saída do CLP e do sensor de temperatura Lm 35. A ligação em paralelo dos circuitos gradadores ao ventilador e a resistência que produz calor são demonstradas como a Figura 25.

Figura 23-Esboço da parte experimental.



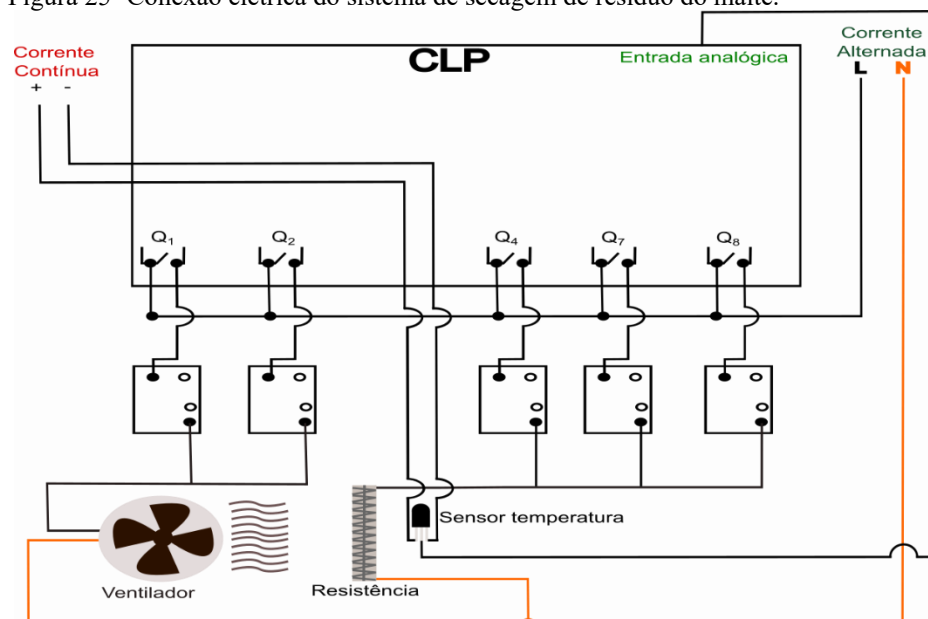
Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 24- Protótipo do secador de resíduo de malte.



Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 25- Conexão elétrica do sistema de secagem de resíduo do malte.



Fonte: Autoria Própria (2025).

A conexão elétrica mencionada anteriormente representa a inovação prática que interliga duas áreas (automação- controle e eletrônica de potência), ao passo que o gradador de tensão é um circuito consolidado desde 1979 na indústria. Outra contribuição é a análise da retirada de água do resíduo do malte em razão da técnica de controle empregada. Já que se observou que há lacunas empíricas e metodológicas.

O experimento foi baseado na implementação de um secador do tipo leito fixo intermitente. Nesse processo foram monitoradas as variáveis: temperatura no interior do túnel de secagem, empregando um sensor de temperatura conectado ao CLP, tensão, corrente elétrica e potência com o uso do analisador de energia conectado a resistência geradora de calor e a fonte de fluido (ventilador).

Por fim, efetuou-se a aferição da amostra do resíduo pré/ pós secagem. Uma massa de resíduo de aproximadamente 9 g foi inserida em um recipiente esférico com diversos orifícios. Em intervalos regulares de 15 min, o peso da amostra foi avaliado, por um período total de 2 h de análise. Para a aferição da massa do resíduo, o túnel de secagem era aberto, sem a necessidade de desligamento do controlador.

Para a determinação do teor de umidade, 10 g de amostra foram secas em estufa (SOLAB, modelo: SL- 100/81) na temperatura de 105°C por um período de 24 horas. Esse método de laboratório serve para medir a quantidade de umidade presente em amostras sólidas, como solo, sementes, resíduos e alguns alimentos. Emprega-se uma temperatura alta (105°C) o bastante para evaporar a água, mas sem prejudicar os nutrientes ou alterar a estrutura do material de forma significativa. O procedimento dura cerca de 24 horas, pois esse período garante que toda a água livre seja eliminada e que a amostra alcance um peso constante e estável. Isso é importante para obter uma medição de umidade precisa.

4.3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados os instrumentos de aferição, os componentes utilizados no circuito que modifica a tensão da resistência e, também a velocidade do ventilador, as fontes de alimentação em corrente contínua (CC) para o CLP, a resistência, túnel de ventilação, ventilador, sensores e o recipiente metálico.

Os instrumentos de aferição são: analisador de energia RE8000 EMBRASUL®, multímetro Minipa ET-1649, tacômetro digital DT-6236C, sensor de temperatura Lm35, Arduino Uno R3.

Os componentes utilizados no circuito que varia a tensão e velocidade do ventilador são: 1 potenciômetro linear (100 k ohms), tiristor Bt 136, um resistor de 10 k ohms (0,5 W), 1 resistor 330 ohms (0,125 W), 1 capacitor de poliéster 100 nF (400 V), 1 capacitor de poliéster de 47 nF (400 V), 1 diac DB3e quatro bornes fêmea do tipo banana.

A quantidade descrita foi para confeccionar uma placa, porém foram construídas cinco placas, sendo três placas para variar a tensão aplicada na resistência e, conseqüentemente fornecer o calor e as outras duas para variar a velocidade do ventilador, sendo efetuado um arranjo empírico através dos valores dos potenciômetros de cada placa juntamente com a lógica da programação do controlador lógico programável a fim de manter de manter a temperatura desejada no processo de secagem (60°C). Para adequar a velocidade do ventilador de cada placa foi utilizado um tacômetro digital, uma fita refletiva colada em uma parte da hélice do ventilador e uma régua para aferir a distância do centro do eixo de rotação até a extremidade da hélice. Anota-se o valor em metros (m). Feito isso, direciona-se o *laser* do tacômetro para a fita refletiva enquanto a hélice gira, será observada a leitura das RPM (rotações por minuto) no visor digital. Com este valor obtido basta dividir a leitura do tacômetro por sessenta e, obteve-se o RPS (rotações por segundos). Logo, substitua os valores na Equação 16 para obter a velocidade do vento em m/s.

$$v = 2 * \pi * r * RPS \quad (16)$$

As variáveis da Equação anterior são:

π : 3,14156;

r : raio do centro do eixo até a extremidade da hélice (em metros- m);

RPS : rotação por segundo.

A velocidade do fluido foi obtida de forma indireta utilizando o processo de cálculo descrito anteriormente, o ajuste era efetuado pelo potenciômetro do circuito de forma empírica. Cada placa de

controle de velocidade foi conectada em uma saída do CLP para manter o valor estipulado de velocidade constante.

O controlador lógico programável empregado é da marca WEG, modelo CLW-02/ 20 HR- D 3 rd, conforme Anexo I. O ventilador é da marca Hon&Guan[®] (AC 110V- 60 Hz 28W). Para a instrumentação da aferição de tensão, corrente, temperatura foi usado o *Arduino Uno R3*[®], os sensores LM35 (temperatura) conforme Apêndice D, analisador de energia Embrasul[®] 8000 RE, balança convencional (peso da amostra).

A fonte de energia utilizada para alimentar o CLP é uma fonte de corrente contínua que produz 24 V – 30 A.

O túnel de ventilação foi construído com madeira de embalagem nas seguintes dimensões 0,60 m x 0,20 m x 0,1 m, duas dobradiças e doze parafusos 4,5 mm x 40 mm. O recipiente esférico usado para preparar chá com orifícios para passagem do calor e da ventilação, sendo empregados para inserir o resíduo do malte para remoção da umidade. Cabos elétricos de 1,25 mm de bitola foram empregados nas conexões elétricas do controlador lógico programável e nas placas de circuitos variáveis e na resistência.

O método da pesquisa é do tipo misto, ou seja, qualitativo e quantitativo. A orientação metodológica para este estudo é a pesquisa exploratória e explicativa, mediante a utilização da pesquisa documental e, também da pesquisa experimental. O experimento é baseado na construção de um secador de resíduo do malte de leito fixo.

Para identificar o modelo matemático do sistema térmico, aplicou-se uma combinação inteligente de testes práticos (como resposta ao degrau unitário) e programas de computador modernos. Primeiro, observou-se como o sistema reage a mudanças bruscas, anotando as temperaturas e organizando os dados para manter o ritmo natural das variações.

A parte principal desse método envolveu duas etapas de otimização bem definidas. Iniciou-se com o método Nelder-Mead, que ajudou a procurar, de forma ampla, os melhores valores, sem precisar de cálculos complexos. Depois, empregou-se o algoritmo L-BFGS-B para ajustar finamente esses valores, garantindo que fizessem sentido no mundo real.

A incógnita estava em equilibrar diferentes critérios importantes em uma função complexa. Além de calcular o Erro quadrático médio, adicionou-se regras para evitar soluções que, embora corretas matematicamente, não fizessem sentido fisicamente, como oscilações exageradas, ou tempo para estabilizar muito longo.

Manipulou-se um modelo matemático padrão, conhecido como *SOPDT*, o qual simboliza um modelo linear que representou como o calor se comporta em processos industriais, para tratar a dinâmica do calor, utilizou-se a aproximação de Padé, que garante que as simulações sejam estáveis e confiáveis.

4.4 LOCAL E PERÍODO DA PESQUISA

O experimento foi conduzido na UNILA Sala G109, bloco: Ginásio- Unidade Jardim Universitário – Foz do Iguaçu – PR. O período da montagem do protótipo foi de junho de 2022 a outubro de 2023. No que refere a configuração e ajuste do secador ocorreu de novembro de 2023 a setembro de 2024. Por fim, a obtenção dos dados de consumo, potência, modelagem da planta e remoção de umidade foram obtidos de dezembro de 2024 a fevereiro de 2025.

4.5 INSTRUMENTOS DE COLETA E ANÁLISE DE DADOS

A coleta de dados de tensão, corrente, potência elétrica do equipamento analisador de energia EMBRASUL fornece um arquivo .CVS que foi convertido em arquivo .xlsx. Da mesma forma foi obtido os dados do sensor de temperatura através do Arduino Uno R3®.

Com a finalidade de aferir o peso do resíduo anteriormente a ser inserido e posteriormente a ser retirado da estufa foi utilizada a balança analítica Modelo ATX224R – Shimadzu.

Os dados obtidos são observados e analisados de forma comparativa. Em outras palavras, significa que será realizada uma comparação entre as: potências em Watts utilizando um controlador *on-off* e, o outro controlador P (Proporcional), além desse fato, a comparação entre os controladores no tocante ao consumo energético em kWh. Feito isso, também será realizada a comparação entre o controle *on-off* e o controlador P, referente ao desempenho dos controladores, como por exemplo, tempo de subida, sobre sinal, tempo de pico e tempo de acomodação.

Os procedimentos empregados para o tratamento dos dados obtidos serão do tipo qualitativo, embora contemple uma análise quantitativa. A análise quantitativa é oriunda dos resultados experimentais obtidos através dos equipamentos utilizados e citados a partir da seção 5.1.

Na análise qualitativa é feita a comparação sobre os dois controladores mencionados anteriormente e, também o nível de retirada de água do resíduo de malte.

Os dados coletados foram inseridos no *Google Colab*® (criar, executar e compartilhar documentos online em *Python*) para a modelagem da planta usando- a, ao passo que o sinal coletado do sensor de temperatura é o sinal de saída da planta e, o sinal de entrada do sistema é o degrau unitário.

A seguir é apresentado o modelo matemático para o controlador P, conforme a Equação 17. Já para o controlador *on-off* que possui um comportamento não linear, não há modelagem matemática.

$$G(s) = \frac{31,9348}{333,9364 * s^2 + 18,0762 * s + 1} * e^{-9,3221*s} \quad (17)$$

O modelo proposto é utilizado para representar, o comportamento dinâmico do processo de secagem do resíduo do malte, pois serve de base para projetar, analisar e ajustar controladores que possam regular esse sistema. O código está realizando a identificação de um sistema dinâmico (modelo de segunda ordem com atraso, *SOPDT - Second Order Plus Dead Time*) a partir de dados experimentais (temperatura), utilizando otimização para ajustar os parâmetros do modelo.

As melhorias implementadas no código resultaram em um processo de modelagem e ajuste mais robusto e acurado, possibilitando uma representação mais fiel da dinâmica observada nos dados experimentais. No pré-processamento, foi adotada uma estratégia de normalização robusta, considerando o valor inicial das séries temporais, o que contribui para reduzir distorções na escala dos dados. Adicionalmente, aplicou-se um tratamento mais criterioso dos valores ausentes, de modo a minimizar impactos indesejados no processo de estimação.

No que se refere à função objetivo, esta foi reformulada para integrar múltiplas métricas de desempenho, incluindo o erro quadrático médio (*MSE*), o *overshoot* e o tempo de acomodação, fornecendo assim uma avaliação mais abrangente da qualidade do ajuste. A utilização de interpolação cúbica possibilitou maior precisão na comparação entre curva simulada e experimental, enquanto penalidades específicas foram incorporadas para restringir comportamentos dinâmicos indesejados.

A etapa de otimização foi estruturada em duas fases: a primeira, conduzida pelo método *Nelder-Mead*, com o objetivo de realizar uma exploração global do espaço de soluções; e a segunda, com o algoritmo *L-BFGS-B*, responsável pelo refinamento local e pela convergência a soluções mais precisas. Esse processo foi potencializado pela adoção de condições iniciais inteligentes, tais como a estimativa do tempo de subida para o parâmetro de constante de tempo (*Tau*), a detecção automática de atrasos iniciais e a atribuição de um valor intermediário para o fator de amortecimento (*Zeta*).

No âmbito da visualização, foram desenvolvidos gráficos de alta resolução, com destaque visual para regiões de maior discrepância entre os dados experimentais e a curva simulada. Além disso, foram incluídas informações numéricas dos parâmetros ajustados, bem como uma apresentação gráfica com caráter mais profissional e adequado ao contexto acadêmico.

Por fim, foram introduzidos ajustes numéricos que ampliaram a confiabilidade do modelo, incluindo o uso da aproximação de *Padé* de terceira ordem, a simulação com maior número de pontos temporais e a definição de tolerâncias mais rigorosas nos cálculos.

Com esse conjunto de aprimoramentos, o código passa a proporcionar uma aproximação significativamente superior entre os dados experimentais e a curva simulada, sobretudo nas regiões caracterizadas por maior complexidade dinâmica. Tais melhorias contribuem para resultados mais consistentes, robustos e representativos da realidade do sistema analisado. Os parâmetros como *Kp*, *Tau*, *Zeta*, *Delay* - explicitam o modelo *SOPDT*; *Overshoot* - indicam o comportamento dinâmico; R^2 - representa a qualidade do ajuste e; Tempos de resposta - refletem características temporais

Esses parâmetros permitem reconstruir completamente o modelo identificado e aplicar em outras simulações ou projetos de controladores.

Posteriormente da coleta dos dados diretamente dos equipamentos, foi utilizado a estatística descritiva. As ferramentas de análise foram o *Google Colab*[®] e o MS EXCEL[®].

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na sequência serão exibidos os resultados, conforme detalhado na metodologia e a coleta de dados nas seções 4.2, 4.3 e 4.5. O modelo proposto é utilizado para representar a realidade, mesmo que não tenha sido validado por simulação. Dessa forma, demonstra-se o comportamento dinâmico do processo de secagem do resíduo do malte, pois serve de base para projetar, analisar e otimizar o controlador capaz de manter esse sistema estável.

A modelagem matemática foi baseada em dados reais em razão dos seus parâmetros, sendo aplicado o degrau unitário em malha fechada para o controlador proporcional. Foram apresentadas a resposta dinâmica para os controladores (proporcional e *on-off*), assim como a potência consumida em Watts e, em kWh e, ainda remoção de umidade em base seca empregando os controladores citados anteriormente.

5.1 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

5.1.1 Análise da Resposta do Controlador P

A modelagem matemática da planta de secagem do resíduo do malte foi desenvolvida a partir de um sistema híbrido, composto por: Modelagem *SOPDT* (*Second Order Plus Dead Time*), Aproximação de Padé (de ordem 3), Otimização por Múltiplas Métricas (Erro quadrático médio (MSE); Penalização por *overshoot* excessivo; Penalização por diferença no tempo de acomodação), Estratégia de Otimização em Duas Fases (método Nelder-Mead (sem restrições); refinamento com L-BFGS-B (com limites físicos). O modelo foi obtido através da linguagem de programação *python*[®], sendo caracterizado um modelo numérico.

A descrição matemática do sistema será apresentada de forma resumida, com o intuito de contextualizar a metodologia proposta. No entanto, o aprofundamento teórico sobre os princípios e formulações da modelagem matemática não será abordado nesta tese. Para discussões mais abrangentes e rigorosas sobre o tema, o leitor é direcionado às referências citadas na seção 3.7.

A estimação do modelo usou dados no domínio de tempo. Em consonância com a Figura 26 foi evidenciada a estimação de uma resposta ao degrau unitário (no caso do *setpoint* = 60°C). No eixo das abcissas (x) está o tempo, já para o eixo das ordenadas (y) está o valor da resposta em graus Celsius. Logo, para iniciar o valor real de temperatura em zero foi subtraída o valor da temperatura ambiente aferida no sensor (25,42°C), deste modo os valores demonstrados no gráfico são equivalentes aos valores reais partindo da temperatura ambiente, sendo o *setpoint* de 60°C equivalente a 34,58°C.

Na Figura 26 a linha azul corresponde ao sistema do modelo otimizado de segunda ordem com tempo morto. A linha vermelha no gráfico representa os dados experimentais, já no caso da linha de grandes discrepâncias em laranja representa a diferença entre os dados experimentais (vermelhos) e a simulação do modelo (linha azul) foi significativamente maior que um limite pré-definido (1,59°C).

As métricas principais dessa medida são: *MSE* (*Mean Squared Error* – Erro Quadrático Médio), *MAE* (*Mean Absolute Error* – Erro Absoluto Médio), R^2 (Coeficiente de Determinação), *Max Error* (Erro Máximo), *Overshoot* (Sobressinal), Tempo de Subida (*Rise Time*) e Acomodação (*Settling Time*).

Observa-se a Figura 26 na parte inferior têm-se as métricas principais como, por exemplo: *MSE* em torno de $2,2065^{\circ}\text{C}^2$, *MAE* aproximadamente $0,8898^{\circ}\text{C}$, o coeficiente de determinação R^2 no valor de 0,9752, erro máximo em torno de $5,6093^{\circ}\text{C}$ e para finalizar *Overshoot* em torno de 17,34%. Estes dados representam a medida 1 entre as três medidas de secagem do resíduo. No gráfico da análise de erros tem-se uma variação, a qual indica que em alguns pontos do experimento, a diferença (o erro) entre o valor medido experimentalmente e o valor previsto pelo modelo *SOPDT* foi maior que $1,59^{\circ}\text{C}$. O modelo não conseguiu prever perfeitamente o comportamento real do sistema, e em seus piores momentos, ele falha a temperatura por mais de 1,59 graus.

O erro máximo (*Max Error* = $5,6093^{\circ}\text{C}$) é o pior caso de todas as discrepâncias. O valor de $1,59^{\circ}\text{C}$ é um limite que, quando ultrapassado, destaca os pontos de maior erro. Sendo provável que $1,59^{\circ}\text{C}$ seja um valor estatisticamente significativo.

No caso do MAE (Erro Absoluto Médio) = $0,8898^{\circ}\text{C}$: Esta é a média de todos os erros. A discrepância de $1,59^{\circ}\text{C}$ está abaixo da média de erro, o que faz sentido, pois a média é puxada para cima pelos poucos erros muito grandes (como o de $5,6^{\circ}\text{C}$).

Na situação em que o $R^2 = 0,9752$: Este valor é excelente. Comprova que o modelo explica 97,52% da variância dos dados. As discrepâncias $> 1,59^{\circ}\text{C}$ representam justamente a pequena porção (2,48%) da variabilidade que o modelo *não* consegue explicar. O código está em Anexo K.

Com base nessa estimativa foi obtida a sintonia do controlador P do sistema *SISO* (*Single input Single Output*). A seguir será representada a função de transferência no domínio da frequência e os valores dos parâmetros da função de transferência na Tabela 3. Relembrando o modelo proposto anteriormente (Equação 17):

$$G(s) = \frac{31,9348}{333,9364 * s^2 + 18,0762 * s + 1} * e^{-9,3221*s}$$

Tabela 3- Valores dos parâmetros da planta.

k_p	31,9348
T	18,274
$zeta$	0,495
T_{tempo_morto}	9,322

Fonte: Autoria própria (2025).

A seguir são apresentados parâmetros da planta:

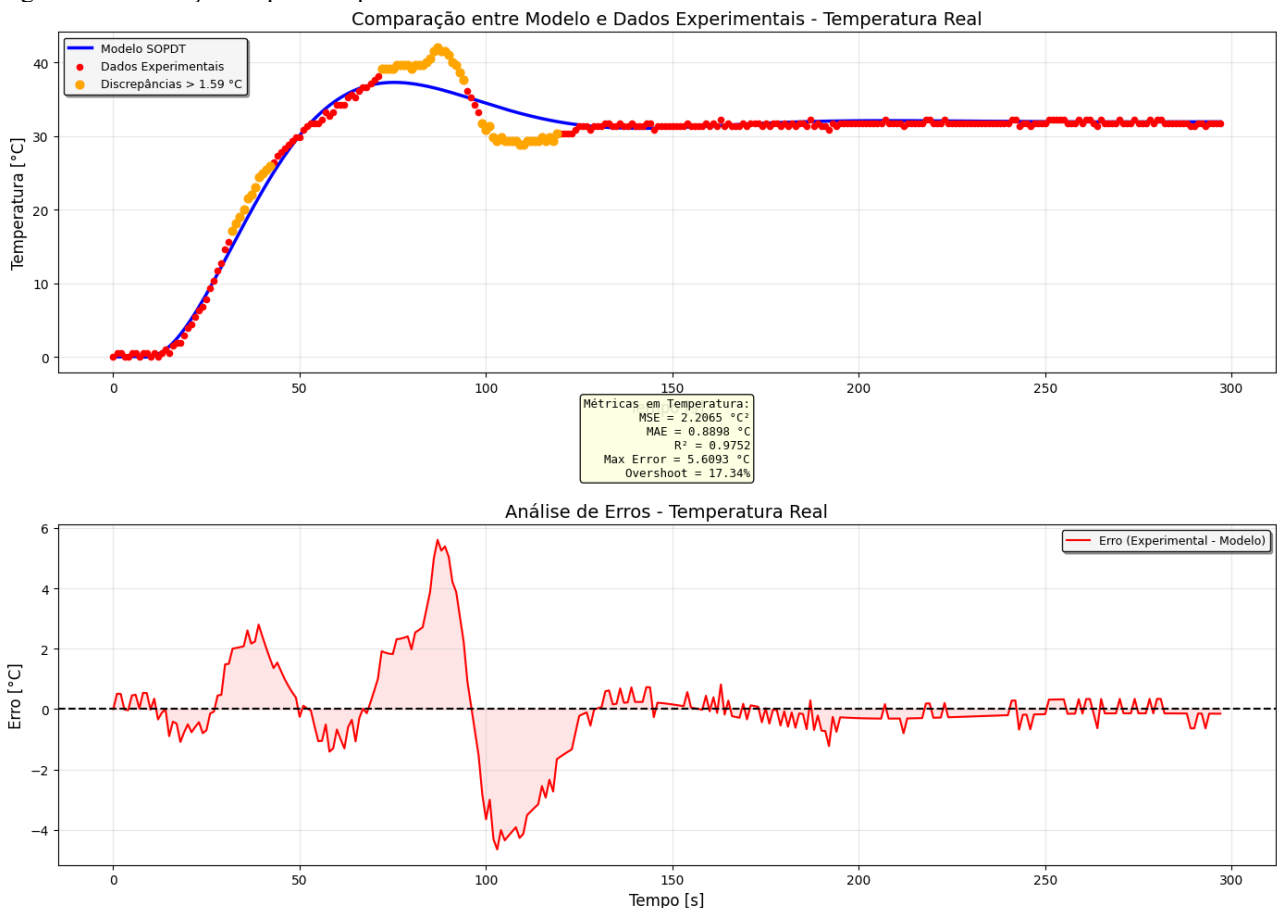
k_p : ganho do sistema- ($^{\circ}\text{C}$ / (unidade de entrada))

T : Constante de tempo- (Segundos- s)

$zeta$: Fator de amortecimento- (adimensional)

T_{tempo_morto} : Atraso de tempo ou tempo morto- (Segundos- s)

Figura 26- Estimação da planta a partir de dados reais obtidos do secador de leito fixo.



Fonte: Autoria própria (2025).

Na Tabela 3 foi evidenciada os parâmetros da planta, ao passo que o K_p foi de 31,9348 $^{\circ}\text{C}$ / (unidade de entrada), a constante de tempo T em torno 18,274 segundos, o fator de amortecimento de 0,495 e o tempo morto de aproximadamente 9,322 segundos. Apesar de se obter um modelo preciso (R^2 elevado), sua margem de erro gira em torno de 2,2 $^{\circ}\text{C}$. Contudo, nota-se que em certas situações,

em especial durante mudanças bruscas (como *overshoot* máximo ou na fase inicial de elevação), o modelo apresenta falhas consideráveis, ultrapassando 1,59 °C e chegando a picos de mais de 5,6 °C.

5.1.2 Análise da Resposta do Controlador *On-Off*

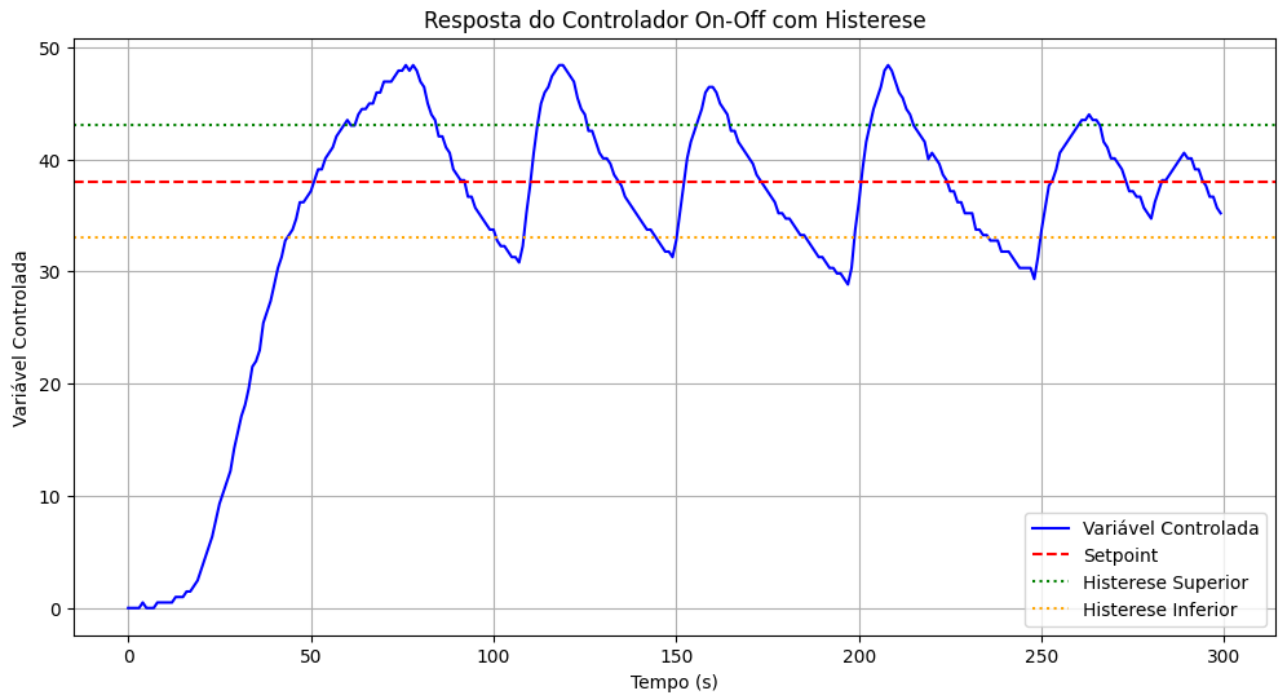
Já para o controlador *on-off* definimos um valor de $\pm 5\%$ de histerese em torno do *setpoint* que foi em torno de 60°C. Logo, o controlador aciona determinada saída do CLP que possui um gradador de tensão que fornece tensão a resistência que produz calor, quando o valor do sensor for inferior a 60°C e desaciona a saída do CLP e, conseqüentemente desliga a resistência que gera calor quando a temperatura for superior a 65°C, conforme ilustra a Figura 26. Neste caso também se emprega a medida 1, a qual foi escolhida entre as três medidas de secagem, que representa o gráfico na sequência.

Observe no gráfico da Figura 27 que a linha azul representa a resposta do controlador *on-off*, a linha tracejada vermelha retrata o valor do *setpoint* e, a linha tracejada verde representa a histerese superior (65°C) e a linha tracejada laranja corresponde ao valor da histerese inferior (55°C), código está em Anexo J.

Nota-se no gráfico da Figura 27 que as linhas tracejadas não correspondem aos valores mencionados anteriormente. Devido, ao fato que se partiu da temperatura em zero, para isso foi subtraído o valor da temperatura inicial lida pelos sensores que foi de 21,99°C, sendo desta temperatura o ponto de partida.

Justamente pelo fato descrito acima, os valores das linhas tracejadas de: variável controlada, histerese superior e histerese inferior e *setpoint* na Figura 27 são diferentes, mas são equivalentes aos valores de: *setpoint* :60°C, histerese superior: 65°C, e histerese inferior de 55°C.

Figura 27- Resposta do sistema em malha fechada para um controlador *on-off*.

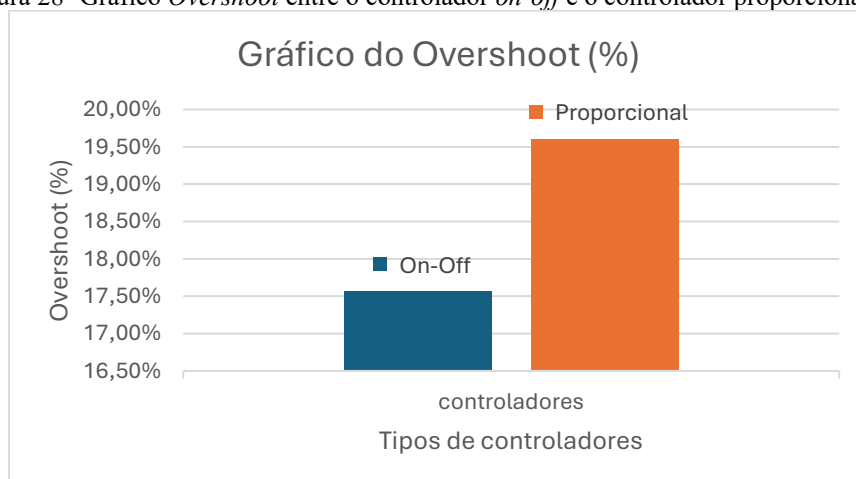


Fonte: A autoria própria (2025).

5.1.3 Análise De *Overshoot* Dos Controladores

A seguir será demonstrada a média entre três medidas tomadas para corresponder aos parâmetros de desempenho dos controladores *on-off* e proporcional. Tais parâmetros para o primeiro controlador foram: *Overshoot* (%), Erro Médio, Tempo de Estabilização (s), para o segundo controlador têm-se os seguintes parâmetros: *Overshoot* (%), Tempo de subida (10-90%), Tempo de acomodação (2%). Na Figura 28 foi exposto a média dos parâmetros de desempenho dos controladores (*on-off* e proporcional). O primeiro controlador (na cor azul) obteve um *overshoot* de 17,50%, enquanto o segundo (na cor laranja) atingiu um valor em torno de 19,60%.

Figura 28- Gráfico *Overshoot* entre o controlador *on-off* e o controlador proporcional.



Fonte: A autoria própria (2025).

5.1.4 Análise De Desempenho Do Controlador *On-Off*

Os parâmetros de desempenho do controlador *on-off* a partir da média das três medidas foi apresentada na Tabela 4, ao passo que a frequência de chaveamento foi de 0,02 Hz, o erro médio em torno de 4,083 e o tempo de estabilização em 50,6677 segundos.

Tabela 4- Parâmetros de desempenho do controlador *on-off*.

Parâmetros de desempenho	Média
Frequência de chaveamento	0,02 Hz
Erro médio	4,083
Tempo de Estabilização	50,6677 s

Fonte: Autoria Própria (2025).

5.1.5 Análise De Desempenho do Controlador P

Neste momento a média das três medidas obtidas para o desempenho do controlador proporcional, sendo elas: tempo de subida (10-90%) e tempo de acomodação (2%). A primeira foi de 28,5136 segundos e, para o último em torno de 63,9728 segundos, conforme evidencia a Tabela 5.

Tabela 5- Parâmetros de desempenho do controlador proporcional.

Parâmetros de desempenho	Média
Tempo de subida (10-90%)	28,5136 s
Tempo de acomodação (2%)	63,9728 s

Fonte: Autoria Própria (2025).

A média dos parâmetros otimizados do controlador proporcional são demonstrados na Tabela 6, no qual o Ganho (K_p) foi de 0,755266667, constante de tempo (T) de aproximadamente 17,93396667, coeficiente de amortecimento ($Zeta$) a cerca de 0,464233333 e Atraso (*Delay*) em torno de 23,37353333.

Tabela 6- Média dos parâmetros otimizados do controlador proporcional.

Média parâmetros otimizados	
Ganho (K_p)	0,755266667
Constante de tempo (Tau)	17,93396667
Coefficiente de amortecimento ($Zeta$)	0,464233333
Atraso ($Delay$)	23,37353333

Fonte: Autoria Própria (2025).

5.1.6 Análise Da Potência Consumida por Controlador

A Potência consumida foi realizada em triplicata pelo secador em função do controlador proporcional adotado e, será demonstrada na Tabela 7, e sua unidade de Watts [W]. Observa-se que foram obtidos os valores de 596,277 W, 536,271 W e 536,251 W.

Tabela 7- Potência consumida pelo controlador P.

Potência Consumida	596,277
Potência Consumida	536,271
Potência Consumida	536,251

Fonte: Autoria própria (2025).

O consumo de potência do controlador *on-off* foi obtido e apresentado na Tabela 8 correspondendo a 406,869, 382,206 e 517,2432, e, sua unidade em Watts [W].

Tabela 8- Potência consumida pelo controlador *on-off*.

Potência Consumida	406,869
Potência Consumida	382,206
Potência Consumida	517,2432

Fonte: Autoria própria (2025).

5.1.7 Análise Da Energia Consumida por Controlador

A energia consumida em kWh em função do controlador P está demonstrada na Tabela 9, a qual refere-se a 1,1925 kWh, 1,0725 kWh e 1,0725 kWh.

Tabela 9- Energia consumida em kWh em função do controlador P.

1,1925
1,0725
1,0725

Fonte: Autoria própria (2025).

O controlador *on-off* em função do seu consumo energético em kWh foi apresentado na Tabela 10. Visto que, o consumo foi de 0,8151 kWh, 0,7644 kWh e 1,0344kWh.

Tabela 10- Energia consumida em kWh em função do controlador *on-off*.

0,8151
0,7644
1,0344

Fonte: Autoria própria (2025).

5.1.8 Análise Do Teor de umidade Em Razão Do Controlador

A fim de analisar o teor de umidade em função do tipo de controlador adotado, será demonstrada a Tabela 11 com os valores em base seca do controlador P e do controlador *on-off*. Vale ressaltar que a medida do teor de umidade é adimensional. No controlador proporcional foram de: 0,471, 0,405 e 0,425. Já para o controlador *on-off* a remoção de água foi de 1,207, 1,229 e 1,364.

Tabela 11- Teor de umidade em base seca x controlador.

Controlador P	Controlador <i>on-off</i>
0,471	1,207
0,405	1,229
0,425	1,364

Fonte: Autoria própria (2025).

5.2 DISCUSSÃO DOS DADOS À LUZ DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste trabalho foi investigado se as técnicas de controle e automação contribuem para elevar a eficiência energética, ou seja, reduzir o consumo energético e reduzir a umidade do processo de secagem do resíduo do malte. A seguir, discute-se os resultados desta pesquisa e compara-se os seguintes itens: análise de desempenho dos controladores, análise de potência consumida dos controladores, análise de energia consumida entre os controladores e análise do teor de umidade em razão dos controladores empregados, sendo esta discussão de forma indireta, pois foi um tema pouco explorado.

A metodologia desenvolvida integra harmoniosamente a coleta experimental de dados com sofisticados algoritmos de otimização numérica, estabelecendo um ciclo virtuoso entre observação empírica e modelagem matemática. O ponto de partida deste processo consiste na aquisição sistemática de dados experimentais, onde um sinal do tipo degrau é meticulosamente aplicado ao sistema, desencadeando uma resposta transitória que é monitorada com precisão temporal. Estes dados brutos, originalmente expressos em graus Celsius, criando uma base consistente para a subsequente identificação paramétrica.

A arquitetura do modelo matemático adotado fundamenta-se na representação de Segunda Ordem com Atraso de Transporte (*SOPDT*), consagrada na literatura técnica pela sua capacidade de capturar realisticamente a dupla inércia térmica característica de muitos processos industriais. Esta estrutura matemática elegante sintetiza-se em quatro parâmetros fundamentais que, em conjunto, descrevem completamente o comportamento dinâmico do sistema: o ganho do processo (K_p), que quantifica a sensibilidade do sistema às variações de entrada; a constante de tempo (τ), responsável por

caracterizar a velocidade de resposta; o coeficiente de amortecimento (ζ), que governa o comportamento oscilatório; e o atraso de transporte (L), representando os inevitáveis retardos físicos do sistema.

O cerne metodológico reside na função objetivo multidimensional, cuidadosamente arquitetada para equilibrar critérios de desempenho aparentemente conflitantes. Esta função incorpora não apenas o tradicional Erro Quadrático Médio, mas também mecanismos de penalização inteligentes que previnem soluções matematicamente válidas, porém fisicamente irreais. A estratégia de otimização implementa uma abordagem em duas fases complementares: uma fase exploratória inicial utilizando o método *Nelder-Mead* para mapeamento global do espaço de parâmetros, seguida por uma fase de refinamento baseada no algoritmo L-BFGS-B, que assegura a convergência para soluções fisicamente consistentes.

A resposta do controlador P(proporcional) estimada se mostrou adequada quando comparada aos dados reais. O modelo apresentou um comportamento linear. Além disso, o modelo simulado ilustrou os pontos de divergências que foram maiores que $> 1,59$ °C, aos quais são considerados pertinentes, pois aparecem em poucos pontos no gráfico simulado, sendo que na maioria do intervalo de tempo está dentro do aceitável, tornando-se um modelo adequado.

O processo de calibração para controlador *on-off* iniciou-se com a definição da banda de histerese, elemento crucial que atua como o coração deste tipo de controle. Estabelece-se inicialmente uma histerese de ± 5 °C em relação ao *setpoint*, valor que não surgiu de forma arbitrária, mas sim de uma análise preliminar do comportamento térmico do sistema, considerando sua inércia característica e os tempos de resposta dos elementos de aquecimento.

A frequência de chaveamento emergiu como uma métrica fundamental, calculada através de um algoritmo que monitora rigorosamente cada transição de estado do sistema. A metodologia empregada contabiliza não apenas as mudanças individuais, mas sim os ciclos completos de operação- desde o acionamento até o desligamento e retorno ao estado inicial. Esta abordagem revelou-se essencial para compreender o desgaste potencial dos componentes, pois cada comutação representa um evento de stress para os elementos de potência. O cálculo preciso demonstrou como pequenas variações na histerese podem impactar significativamente a vida útil do sistema.

O *overshoot*, por sua vez, foi analisado como um indicador de segurança e eficiência. Através da identificação do pico máximo de temperatura em relação ao *setpoint* estabelecido, pode-se quantificar o excesso de energia fornecido ao sistema. Esta métrica tornou-se particularmente relevante em aplicações onde limites térmicos rigorosos devem ser observados, seja por questões de qualidade do processo ou por restrições de segurança operacional.

O tempo de estabilização recebeu uma abordagem contextual, definindo-se uma faixa de aceitação de $\pm 5\%$ em torno do *setpoint* como critério de estabilidade. Esta margem, aparentemente generosa, mostrou-se adequada para o controle *on-off*, reconhecendo as limitações inerentes a esta estratégia de controle. O momento em que o sistema atinge e mantém-se dentro desta banda representa não apenas uma conquista técnica, mas sim o ponto onde o controle passa a operar em seu regime característico de ciclagem estável.

A avaliação do erro médio focou-se especificamente na fase de regime permanente, analisando os 50% finais dos dados coletados. Esta escolha metodológica revelou-se astuta, pois permitiu isolar o desempenho do controlador de fenômenos transitórios inerentes ao início da operação. O resultado ofereceu uma visão realista da precisão que pode ser efetivamente esperada deste tipo de controle em operação contínua.

A interação entre esses parâmetros revelou-se interessante: uma histerese mais estreita melhora a precisão, mas aumenta a frequência de chaveamento; uma histerese mais ampla protege os componentes, mas sacrifica a exatidão. O método da sintonia consistiu precisamente em encontrar o ponto ótimo onde a precisão atendia aos requisitos do processo sem comprometer a confiabilidade do sistema a longo prazo.

A validação visual através dos gráficos de operação permitiu correlacionar as métricas quantitativas com o comportamento observável do sistema. As zonas de histerese claramente demarcadas, os pontos de comutação precisamente identificados e os ciclos regulares de operação confirmaram que os ajustes realizados se promoveram não apenas um controle funcional, mas sim uma operação harmonicamente equilibrada.

Na resposta do controlador *on-off* nota-se que é um controlador não linear e, possui uma frequência baixa de chaveamento, porém ao decorrer do tempo os componentes eletroeletrônicos acabam resultando em desgastes físicos e estresse do mesmo, reduzindo sua vida útil. Devido a histerese do sistema em torno de $\pm 5\%$, possui uma faixa de acionamento considerável, que reduz o chaveamento, tendo o comportamento de resposta característico ao que foi visualizado na seção 5.1.

A comparação do *overshoot* (OS) do controlador *on-off* e do controlador P teve pouca diferença, algo em torno de aproximadamente 11% OS do controle P em relação ao controle *on-off*. O primeiro controlador apresentou um OS inferior, caracterizando uma resposta mais amortecida, sendo o valor que ultrapassou o do *setpoint* seja menor, do que o valor excedente do mesmo no segundo controlador (P), o qual pode-se sugerir que o ganho proporcional está elevado, resultando em um elevado *overshoot* de 19,60%.

Os parâmetros de desempenho do controlador baseado na média das medidas apresentada na seção 5.1, como por exemplo, o erro estacionário (precisão) no controlador *on-off* apresentou oscilações em torno do *setpoint* (erro estacionário variável) que está se referindo a histerese, logo esse

sistema não estabiliza e, fica oscilando no da mesma. Já para o controlador P houve a redução do erro estacionário em relação ao *setpoint*, mas mantém um pequeno desvio constante dependendo do ganho K_p . Deste modo, devido a precisão (temperatura aproximadamente constante) o controle proporcional mostrou-se superior.

Com relação à média ao *Overshoot* e Estabilidade o controlador *on-off*, pode gerar OS elevados se a histerese não estiver ajustada adequadamente, porém neste trabalho está dentro do esperado, logo as oscilações são inevitáveis, pois o controlador é cíclico, mas são aceitáveis. No caso do outro controlador (P) o OS pode ser ajustado via K_p , mesmo com o valor sendo superior, mas ainda menores que os picos típicos de controladores *on-off*. Visto que, o resíduo não é considerado um material sensível, ambos os controladores se apresentam como satisfatórios.

Em linhas gerais, o tempo de resposta do controlador *on-off* foi mais rápido inicialmente, mas com oscilações prolongadas. Já para o controlador proporcional (P) a resposta foi mais suave, contudo, pode ser lenta caso o valor de K_p seja inferior. Caso fosse necessária uma mudança abrupta de carga, o mais adequado seria o controlador *on-off*, mas para a aplicação em questão o controle proporcional se torna mais adequado.

Na questão de consumo de energia e degradação do sistema que emprega o controlador *on-off* por ser acionada frequentemente o circuito atuador e, por conseguinte a resistência, ocorrerá mais picos de energia e, conseqüentemente um maior desgaste dos componentes do sistema. Em contrapartida, o controle proporcional fornece uma atuação contínua e suave, fazendo com que o sistema tenha um estresse menor. Em virtude, do que foi exposto, se a eficiência energética é crítica (ambientalmente melhor), o último controlador (P) seja o mais adequado.

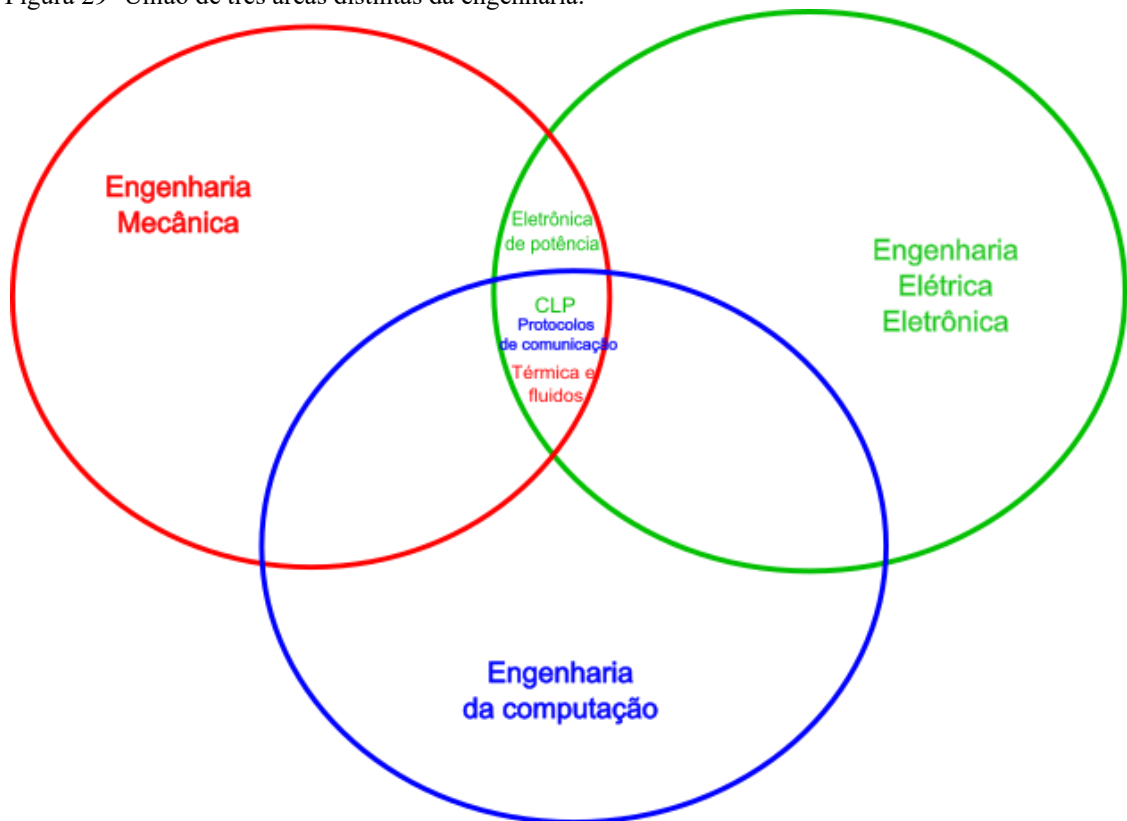
Em razão do que foi explicado acima, e sobre o que a literatura menciona sobre consumo energético em função do controlador, uma lacuna de estudo foi aberta quando analisamos a remoção de água do resíduo em função do controlador empregado, pois observamos que o controlador P teve um consumo maior de energia e removeu uma quantidade maior de umidade em comparação ao controlador *on-off*. Como intuito, foi retirar água do resíduo para torná-lo futuramente uma fonte de energia o controle P demonstrou mais adequado em detrimento ao outro controlador, já que removeu mais água, tornando-se apropriado para ser uma fonte de energia (*pellet*).

Esta tese aborda aplicação de dois tipos de controladores para remoção de umidade de resíduos da produção cervejeira e quais são os efeitos de cada tipo de controle utilizado em razão da retirada de água do resíduo, pois geralmente o foco é apenas na eficiência energética e, soma-se a esse fato a adição de um circuito de eletrônica de potência (gradador de tensão) na saída do controlador lógico programável (CLP) sob uma perspectiva inédita, já que a literatura existente não explora [essa união de áreas como eletrônica de potência e CLP, num contexto de aplicação de um secador de resíduo em escala laboratorial de forma direta. Na Figura 29 apresentamos as áreas de engenharia mecânica,

elétrica e da computação. Nesta pesquisa foi conectada as subáreas: eletrônica de potência, eletrônica analógica-digital, CLP, protocolos, controle de processo. Sendo a contribuição a união de um circuito de eletrônica de potência de 1979 operando em conjunto com o CLP de 2002 (modelo: 20 hr-d-R\$2.170,21), o qual também representa uma economia se necessitássemos um controlador com saída analógica (modelo: 20vt-d R\$2.878,00). Além disso, utilizamos um sensor de temperatura eletrônica Lm-35 e um ventilador eficiente com baixo ruído.

De acordo com o exposto na Figura 29, temos três grandes áreas da engenharia e suas intersecções, como por exemplo, engenharia mecânica, engenharia elétrica/ eletrônica e engenharia da computação. Nesta pesquisa conectamos a área térmica e fluidos da engenharia mecânica com a área da engenharia eletrônica mais precisamente microprocessador, CLP e eletrônica de potência, sendo a originalidade alcançada neste trabalho a união do CLP ao circuito gradador de tensão de 1979 da área de eletrônica de potência na construção e desenvolvimento do secador de leite fixo em escala laboratorial. Ademais, outra inovação foi a análise da retirada de água do resíduo em função da técnica de controle empregada (comparação do controlador P com o controlador *on-off*).

Figura 29- União de três áreas distintas da engenharia.



Fonte: Aatoria Própria (2025).

A escassez de estudos similares pode ser atribuída a recursos limitados como falta de financiamento para equipamentos, *softwares*, pouca literatura consolidada e a interdisciplinaridade que abordam diversas áreas. Na sequência apresentaremos alguns trabalhos similares ao que foi feito.

Apesar de não existir pesquisas sobre a influência do uso de determinado tipo de controlador afeta na qualidade da remoção de umidade do resíduo, as descobertas dialogam com o conceito de implementação de um sistema de controle digital multicascata melhorou significativamente o desempenho do controle e economizou combustível na secagem da polpa na indústria açucareira, proposto por Mann (1980), que discute ideia similar só que em outro contexto.

Considerando que foi realizada análise de retirada de umidade do resíduo da produção cervejeira empregando controladores *on-off* e controlador P juntamente com o circuito gradador de tensão na saída do CLP tanto para controlar o fluido (vento) como controlador a resistência geradora de calor compartilha características similares com o proposto por Rodriguez, Vasseur e Courtois (1996), o qual empregou o controle PI, aplicado um secador a tambor e mostrou-se eficaz no controle da umidade média final na indústria alimentícia de purê de batata, fazendo uso de um aquecedor indutivo complementar.

Na mesma linha, proposto por Bück, Seidel, Dürr e Neugebauer (2018), projetar um controlador de feedback robusto para garantir a umidade desejada do produto, sendo utilizado para o caso da secagem em leito fluidizado de partículas de levedura para padaria.

Em estudos sobre o efeito da secagem com redução gradual de temperatura no consumo de energia e na qualidade do produto de nozes em um secador de coluna, observa-se que a secagem com redução gradual de temperatura reduziu efetivamente o tempo de secagem em até 40% e o consumo de energia em 24%, mantendo qualidade e vida útil das nozes, o que parcialmente corrobora para nossas evidências, os achados dialogam com o conceito de secagem e consumo energético, proposto por Chen, Venkitasamy, Zhang, Deng, Meng e Pan (2020), que discute ideias similar, porém em outro contexto.

A aplicação do controlador PID no sistema de secagem demonstrou que o secador híbrido pode reduzir significativamente o consumo de energia em 48,32% e o consumo de potência em 49,18% em comparação com o secador de convecção forçada. Isso se deve à utilização da energia térmica solar no sistema híbrido, reduzindo a necessidade do aquecedor elétrico, conforme sustenta Pramudita (2024).

Segundo os autores Ma, Zhou e Wen (2025), a atualização das secadoras domésticas totalmente automáticas apresentaram o controle preciso alcançado por meio do CLP e, conseqüentemente reduz o consumo de energia e simplifica a operação da mesma.

Posteriormente evidencia-se a conclusão deste trabalho e sugestões de trabalho futuro.

6 CONCLUSÕES

Nesta tese analisaram-se técnicas de controle aplicadas a um secador de resíduos do malte. Este estudo tem por finalidade, modelar matematicamente a planta, implementar e comparar a eficiência energética de um controlador *on-off* e um controlador P (proporcional), analisando o consumo de energia [kWh], potência elétrica [W] e remoção de umidade do resíduo do malte.

Portanto, foram apresentados os objetos de estudo deste trabalho, os quais serão elucidados na sequência.

Primeiro, analisou-se diferentes tipos de secadores, o que foi essencial para planejar o projeto. Depois, escolheu-se as melhores formas de controlar o processo para torná-lo automático e economizar energia. Na prática, isso se concretizou na terceira etapa, com a montagem de um secador de leito fixo, peça-chave da pesquisa.

A quarta etapa foi importante, pois comparou-se dois tipos de controladores, o *on-off* e o proporcional. Notou-se que o controlador P era melhor em termos de gasto de energia e potência. Na sexta etapa, foi-se mais a fundo e analisou o desempenho, como a rapidez e a estabilidade do sistema, confirmando que ele realmente funciona adequadamente.

Na quinta etapa, uniram-se modelos, experimentos e simulações, mostrando que, além de economizar energia, o processo também é viável financeiramente.

Além dos resultados técnicos, o estudo alcançou as metas de sustentabilidade. Já que, mostra o compromisso com energia moderna e confiável, enquanto incentiva a indústria responsável e a inovação. Por fim, garante que a produção e o consumo sigam a linha da economia circular, aproveitando ao máximo os recursos e reduzindo os danos ao meio ambiente.

Em linhas gerais, pode-se afirmar que a escolha da técnica de controle influencia diretamente na remoção de umidade do resíduo. Pelo fato que, a técnica de controle proporcional consumiu uma potência de 556,26 W, enquanto o controlador *on-off* teve um consumo de 435,43 W. Logo, a economia do controlador *on-off* foi de 21,72% em relação ao controlador proporcional. Outra análise é referente ao consumo energético em kWh, ao passo que o controlador P teve um consumo de 1,1125 kWh, já o controlador *on-off* obteve um consumo de 0,8713 kWh. O controlador *on-off* evidenciou uma economia de 21,68% em relação ao controlador P. Em seguida, foi investigado sobre remoção de água no resíduo do malte em base seca em função do controlador adotado (P; *on-off*). O controle P exibiu um valor em base seca de 0,4336, em contrapartida, o controle *on-off* demonstrou um valor em base de 1,2667. Deste modo, o controlador P removeu 65,76% de umidade do resíduo do malte do que o controlador *on-off*. Em vista dos resultados obtidos, notou-se que o consumo de potência e energético foi menor no controlador *on-off* em relação ao controlador P, porém na redução de umidade o controlador removeu mais água do que o controlador *on-off* para o mesmo período de 2 horas de

secagem. Logo, a eficiência em termos de redução de água no resíduo do malte para utilizá-lo para fins energético se mostrou mais eficiente do que o controlador *on-off*, mesmo tendo um gasto energético maior.

O controlador P em relação ao controle *on-off* evidenciou que possui baixa oscilação e estabiliza abaixo do degrau unitário, apresentando um desempenho de controle pertinente ao do controle *on-off*, porém este oscila em por causa da histerese de $\pm 5\%$, no qual o controlador é acionado por diversas vezes, forçando o estresse de componentes eletroeletrônicos, pois funciona com picos de energia, e assim reduzindo sua vida útil.

Com a utilização do circuito gradador de tensão na saída do CLP, operamos com um CLP simples e mais barato, o qual não possuía saída analógica. Logo, em virtude dos valores citados do CLP de 2002 (modelo: 20 hr-d- R\$2.170,21), o qual também representa uma economia se necessitássemos um controlador com saída analógica (modelo: 20vt-d R\$2.878,00), além disso, utilizou-se um sensor de temperatura eletrônica (Lm-35) e um ventilador eficiente com baixo ruído, notamos uma economia de aproximadamente 24%.

Este estudo contribui para a área de remoção de umidade e secadores ao analisar a remoção de umidade do resíduo em razão da escolha do controlador, sendo eles: controlador P e o controlador *on-off*, conforme evidenciado acima. Outro fato foi a adição de um circuito de eletrônica de potência juntamente com o controlador lógico na construção do secador de leito fixo para remoção de umidade do resíduo do malte, ao passo que ocorreu a união de duas áreas que antes operavam de forma isolada. A abordagem proposta oferece uma nova perspectiva sobre análise de consumo energético versus controladores versus redução de umidade em resíduo, preenchendo lacunas identificadas na literatura sobre secadores, eficiência energética, umidade e inovação experimental.

Em suma, esta tese avançou no entendimento de técnicas de controle aplicados aos secadores e a influência que o tipo de controle definido afeta na retirada de água do resíduo do malte e seu dispêndio energético, oferecendo contribuições teóricas e práticas para área de secagem, controle e automação. Espera-se que os resultados aqui apresentados inspirem novas investigações e promovam o desenvolvimento de pesquisas e união de áreas mencionadas acima que corroboram para um mundo com menor dependência do petróleo, que diversifique a matriz energética, reduza a produção de dióxido de carbono e mitigar o gasto energético no processo de secagem para alimentos e resíduos, fazendo com que o planeta se torne mais sustentável.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Embora este estudo tenha avançado na compreensão de secagem, secadores e suas tecnologias, algumas limitações devem ser consideradas, como possuir uma gama ampla de *hardwares*, sendo: controladores lógicos que possuem saídas analógicas e, com protocolos de comunicações, como por exemplo: *MQTT*, *Modbus TCP* e *Ethernet IP*. Ter acesso a diversos outros materiais como ventiladores e materiais térmicos e, ainda dispositivos embarcados como *Raspberry* e *Esp 32*. Outro fator limitante foi a verba destinada para compras de *hardwares* e acessórios e também o procedimento de aquisição. Esses aspectos podem ser explorados em pesquisas futuras

Futuras pesquisas poderiam investigar o uso de outras técnicas de controle com sua implementação real no secador, como por exemplo, controle PID, PI, *Fuzzy*, Redes neurais e, outros controladores e, ainda outras fontes de energias no sistema do secador, como por exemplo um painel solar para alimentar o secador, ou outras fontes renováveis.

REFERÊNCIAS

- A., Setel *et al.* AUTOMATIC CONTROL FOR WOOD DRYING PROCESS USING GEOTHERMAL ENERGY. **Journal Of Sustainable Energy**.. Oradea, p. 159-162. dez. 2015.
- ADUEWA, O. Taiwo; OYERINDE, S. Ajiboye; OLALUSI, P. Ayoola. Development of an Automated Solar Powered Hot-air Supplemented Dryer. **Asian Journal Of Advances In Agricultural Research**, [S.L.], p. 1-14, 1 nov. 2019. Sciencedomain International. <http://dx.doi.org/10.9734/ajaar/2019/v11i330052>.
- AGUIRRE, Luis Antonio. **Enciclopédia de Automática:: controle e automação**. São Paulo: Blucher, 2007. 472 p.
- AILER, P.; SZEDERKÉNYI, G.; HANGOS, K.M.. MODEL-BASED NONLINEAR CONTROL OF A LOW-POWER GAS TURBINE. **Ifac Proceedings Volumes**, [S.L.], v. 35, n. 1, p. 375-380, 2002. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.3182/20020721-6-es-1901.00224>.
- ALAM, Md. Ashraful; SAHA, Chayan Kumer; ALAM, Md. Monjurul; ASHRAF, Md. Ali; BALA, Bilash Kanti; HARVEY, Jagger. Neural network modeling of drying of rice in BAU-STR dryer. **Heat And Mass Transfer**, [S.L.], v. 54, n. 11, p. 3297-3305, 9 maio 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s00231-018-2368-5>.
- ALBINI, Geisa; FREIRE, Fábio Bentes; FREIRE, José Teixeira. Barley: effect of airflow reversal on fixed bed drying. **Chemical Engineering And Processing - Process Intensification**, [S.L.], v. 134, p. 97-104, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2018.11.001>.
- ALDANA, Carolina Duque; OLIVEIRA, Luciana Camargo de; WALDMAN, Walter Ruggeri. Overview of the valorization of brewery industry by-products. **Revista Virtual de Química**, [S.L.], v. 13, n. 4, p. 926-932, abr. 2021. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/1984-6835.20210017>.
- ALPHONSUS, Ephrem Ryan; ABDULLAH, Mohammad Omar. A review on the applications of programmable logic controllers (PLCs). **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 60, p. 1185-1205, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.025>.
- ANTSAKLIS, P.J.. **Intelligent Control**. Nova Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- ASTRÖM, Karl J.; HÄGGLUND, Tore. **PID Controllers:: theory, design and tuning**.. 2. ed. Usa: Instrument And Society Of America, 1988. 354 p.
- BARBI, Ivo. **Eletrônica de Potência**. 4. ed. Florianópolis: Edição do Autor, 2002. 408 p.
- BAVARIAN, B.. Introduction to neural networks for intelligent control. **Ieee Control Systems Magazine**, [S.L.], v. 8, n. 2, p. 3-7, abr. 1988. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/37.1866>.
- BERNER, Marc Oliver; SCHERER, Viktor; MÖNNIGMANN, Martin. Controllability analysis and optimal control of biomass drying with reduced order models. **Journal Of Process Control**, [S.L.], v. 89, p. 1-10, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jprocont.2020.03.002>.
- BOX, George E. P.; JENKINS, Gwilym M.; REINSEL, Gregory C.; LJUNG, Greta M.. **Time series analysis: forecasting and control**. 5. ed. Hoboken: Wiley, 2016. 709 p.

BOYD, Stephen; VANDENBERGHE, Lieven. **Convex Optimization**. New York: Cambridge University Press, 2004. 714 p.

BÜCK, Andreas; SEIDEL, Carsten; DÜRR, Robert; NEUGEBAUER, Christoph. Robust feedback control of convective drying of particulate solids. **Journal Of Process Control**, [S.L.], v. 69, p. 86-96, set. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jprocont.2018.07.010>.

BYRD, Richard H.; LU, Peihuang; NOCEDAL, Jorge; ZHU, Ciyou. A Limited Memory Algorithm for Bound Constrained Optimization. **Siam Journal On Scientific Computing**, [S.L.], v. 16, n. 5, p. 1190-1208, set. 1995. Society for Industrial & Applied Mathematics (SIAM). <http://dx.doi.org/10.1137/0916069>.

CHEN, Chang; VENKITASAMY, Chandrasekar; ZHANG, Weipeng; DENG, Lizhen; MENG, Xiangyong; PAN, Zhongli. Effect of step-down temperature drying on energy consumption and product quality of walnuts. **Journal Of Food Engineering**, [S.L.], v. 285, p. 110105, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110105>.

COUPER, James R.; PENNEY, W. Roy; FAIR, James R.; WALAS, Stanley M.. Dryers and Cooling Towers. **Chemical Process Equipment**, [S.L.], p. 223-275, 2012. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-396959-0.00009-4>.

DAI, Aini; ZHOU, Xiaoguang; LIU, Xiangdong. Design and Simulation of a Genetically Optimized Fuzzy Immune PID Controller for a Novel Grain Dryer. **Ieee Access**, [S.L.], v. 5, p. 14981-14990, 2017. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/access.2017.2733760>.

DIMMERS E CONTROLES DE POTÊNCIA. São Paulo: Revista Saber Eletrônica, abr. 1979. Mensal. Disponível em: <https://www.newtoncbraga.com.br/index.php/como-funciona/619-dimmers-e-controles-de-potencia-art071>. Acesso em: 20 jun. 2021.

DEMIRBA?, Ayhan. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. **Energy Conversion And Management**, [S.L.], v. 42, n. 11, p. 1357-1378, jul. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0196-8904\(00\)00137-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0196-8904(00)00137-0).

DIAS, Jose Manuel Cabral de Sousa *et al.* **Produção de briquetes e peletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. 2012. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/952626/producao-de-briquetes-e-peletes-a-partir-de-residuos-agricolas-agroindustriais-e-florestais>. Acesso em: 05 set. 2025.

DINCER, Ibrahim. Exergy as a potential tool for sustainable drying systems. **Sustainable Cities And Society**, [S.L.], v. 1, n. 2, p. 91-96, jul. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2011.04.001>.

EBRAHIMIFAKHAR, Amir; YUILL, David. Inverse estimation of thermophysical properties and initial moisture content of cereal grains during deep-bed grain drying. **Biosystems Engineering**, [S.L.], v. 196, p. 97-111, ago. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2020.05.021>.

EUA. W.A. AMOS. . **Report on Biomass Drying Technology**. 1998. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy99osti/25885.pdf>. Acesso em: 30 set. 2020.

FRISO, Dario. Mathematical Modelling of Rotary Drum Dryers for Alfalfa Drying Process Control. **Inventions**, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 11, 6 jan. 2023. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/inventions8010011>.

GEREMIAS, Rodrigo; MILANI, Heloísa de Bortoli; HOLLAS, Fernanda Farias. ESTUDO DAS PROPRIEDADES FUNCIONAIS DO HIDROLISADO DO BAGAÇO DAS CERVEJAS DO TIPO LAGER E PILSEN / STUDY OF THE FUNCTIONAL PROPERTIES OF LAGER AND PILSEN BEER HYDROLYSATE. **Brazilian Journal Of Development**, [S.L.], v. 7, n. 3, p. 32469-32477, 2021. Brazilian Journal of Development. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv7n3-796>.

GONÇALVES, Gilberto da C.; NAKAMURA, Patrick K.; FURTADO, Damaris F.; VEIT, Marcia T.. Utilization of brewery residues to produces granular activated carbon and bio-oil. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 168, p. 908-916, dez. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.089>.

GROOVER, Mikell. **Automação Industrial e sistemas de manufatura**. 3. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011. 584 p.

HOSSEINPOUR, Soleiman; MARTYNENKO, Alex. Application of fuzzy logic in drying: a review. **Drying Technology**, [S.L.], v. 40, n. 5, p. 797-826, 18 nov. 2020. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/07373937.2020.1846192>.

KALATHINGAL, Muhammed Sirajul Huda; BASAK, Suradeep; MITRA, Jayeeta. Artificial neural network modeling and genetic algorithm optimization of process parameters in fluidized bed drying of green tea leaves. **Journal Of Food Process Engineering**, [S.L.], v. 43, n. 1, p. 1-7, 7 jun. 2019. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/jfpe.13128>.

KARLOVI?, Andrea; JURI?, Anita; ?ORI?, Nevena; HABSCHIED, Kristina; KRSTANOVI?, Vinko; MASTANJEVI?, Krešimir. By-Products in the Malting and Brewing Industries—Re-Usage Possibilities. **Fermentation**, [S.L.], v. 6, n. 3, p. 82, 8 ago. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/fermentation6030082>.

KERR, William L.. Food Drying and Evaporation Processing Operations. **Handbook Of Farm, Dairy And Food Machinery Engineering**, [S.L.], p. 353-387, 2019. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-814803-7.00014-2>.

LIMA, A. G. Barbosa de; SILVA, J. V. da; PEREIRA, E. M. A.; SANTOS, I. B. dos; LIMA, W. M. P. Barbosa de. Drying of Bioproducts: quality and energy aspects. **Advanced Structured Materials**, [S.L.], p. 1-18, 12 jul. 2015. Springer International Publishing. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-19767-8_1.

LIMA, A. Gilson Barbosa de; DELGADO, J.M.P.Q. (ed.). Drying and Energy Technologies. **Advanced Structured Materials**, [S.L.], v. 63, p. 8-18, jun. 2016. Springer International Publishing. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-19767-8>.

LJUNG, Lennart. **System Identification: theory for the user**. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 631 p.

LYNCH, Kieran M.; STEFFEN, Eric J.; ARENDT, Elke K.. Brewers' spent grain: a review with an emphasis on food and health. **Journal Of The Institute Of Brewing**, [S.L.], v. 122, n. 4, p. 553-568, out. 2016. Chartered Institute of Brewers and Distillers. <http://dx.doi.org/10.1002/jib.363>.

MACHADO, Lauren M.M.; LÜTKE, Sabrina F.; PERONDI, Daniele; GODINHO, Marcelo; OLIVEIRA, Marcos L.s.; COLLAZZO, Gabriela C.; DOTTO, Guilherme L.. Simultaneous

production of mesoporous biochar and palmitic acid by pyrolysis of brewing industry wastes. **Waste Management**, [S.L.], v. 113, p. 96-104, jul. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2020.05.038>.

MANN, W.. DIGITAL CONTROL OF A ROTARY DRYER IN THE SUGAR INDUSTRY. **Digital Computer Applications To Process Control**, [S.L.], p. 73-90, 1980. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-08-026749-4.50013-8>.

MARKOWSKI, Marek; BIA?OBRZEWSKI, Ireneusz; MODRZEWSKA, Agnieszka. Kinetics of spouted-bed drying of barley: diffusivities for sphere and ellipsoid. **Journal Of Food Engineering**, [S.L.], v. 96, n. 3, p. 380-387, fev. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodeng.2009.08.011>.

MARTINS, Euler Cunha; RABELLO, Anderson Arthur; GOMES, Fátima de Cássia Oliveira; GARCIA, Cleverson Fernando. Evaluation of green banana pulp drying using infrared radiation with temperature control. **Research, Society And Development**, [S.L.], v. 13, n. 2, p. 1-11, 25 fev. 2024. Research, Society and Development. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v13i2.45087>.

MARTINS, Fernanda Pereira; BOSCH NETO, Juan Canellas; SILVA, Alex Júnior Oliveira; SIQUEIRA, Antonio Marcos de Oliveira. Secagem: uma revisão. **The Journal Of Engineering And Exact Sciences**, [S.L.], v. 6, n. 4, p. 0600-0607, 20 out. 2020. Universidade Federal de Vicosa. <http://dx.doi.org/10.18540/jcecvl6iss4pp0600-0607i>.

MASUD, Mahadi Hasan; KARIM, Azharul; ANANNO, Anan Ashrabi; AHMED, Asif (org.). **Sustainable Food Drying Techniques in Developing Countries: Prospects and Challenges**. Cham: Springer Cham, 2020. 189 p.

MAYA, Paulo Alvaro; LEONARDI, Fabrizio. **Controle essencial**. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2014. 370 p.

MELLO, Léa Rita Pestana Ferreira; MALI, Suzana. A combination of chemical and physical pretreatments in the saccharification of malt bagasse: the effects of ultrasonication in diluted acid medium. **Biomass Conversion And Biorefinery**, [S.L.], v. 12, n. 12, p. 5493-5504, 26 out. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s13399-020-01106-0>.

MOSES, J. A.; NORTON, Tomás; ALAGUSUNDARAM, K.; TIWARI, B. K.. Novel Drying Techniques for the Food Industry. **Food Engineering Reviews**, [S.L.], v. 6, n. 3, p. 43-55, 23 maio 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12393-014-9078-7>.

MUJUMDAR, Arun S.. Handbook of Industrial Drying. **Handbook Of Industrial Drying**, [S.L.], p. 1-741, 29 set. 2020. CRC Press. <http://dx.doi.org/10.1201/9780429289774>.

NELDER, J. A.; MEAD, R.. A Simplex Method for Function Minimization. **The Computer Journal**, [S.L.], v. 7, n. 4, p. 308-313, 1 jan. 1965. Oxford University Press (OUP). <http://dx.doi.org/10.1093/comjnl/7.4.308>.

NIGAM, Poonam Singh. An overview: recycling of solid barley waste generated as a by-product in distillery and brewery. **Waste Management**, [S.L.], v. 62, p. 255-261, abr. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.02.018>.

OBERNBERGER, Ingwald; THEK, Gerold. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. **Biomass And Bioenergy**,

[S.L.], v. 27, n. 6, p. 653-669, dez. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.07.006>.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 822 p.

OMER, Abdu Idris; M.M., Taleb. ARCHITECTURE OF INDUSTRIAL AUTOMATION SYSTEMS. **European Scientific Journal**. Cambridge, p. 273-283. jan. 2014.

PEREA-MORENO, Miguel-Angel; SAMERÓN-MANZANO, Esther; PEREA-MORENO, Alberto-Jesus. Biomass as Renewable Energy: worldwide research trends. **Sustainability**, [S.L.], v. 11, n. 3, p. 863, 7 fev. 2019. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su11030863>.

PINHEIRO, Carlos Alberto Murari; MACHADO, Jeremias Nabosa; FERREIRA, Luís Henrique de Carvalho. **Sistemas de controles digitais e processamento de sinais: projetos, simulações e experiências de laboratório**. Rio de Janeiro: Interciência, 2017. 332 p.

PRAMUDITA, Brahmantya Aji. Utilization of PID Controller to Optimize Energy Consumption in Hybrid Forced Convection Dryer. **Jurnal Infotel**, [S.L.], v. 16, n. 3, p. 614-625, 24 set. 2024. LPPM Institut Teknologi Telkom Purwokerto. <http://dx.doi.org/10.20895/infotel.v16i3.1096>.

PROCEEDINGS OF THE 14TH INTERNATIONAL DRYING SYMPOSIUM (IDS 2004), 14., 2004, São Paulo. **ENERGY ASPECTS OF NOVEL TECHNIQUES FOR DRYING BIOLOGICAL MATERIALS**. São Paulo: International Drying Symposium, 2004. 8 p.

PROCEEDINGS OF THE AUSTRALIAN POSTHARVEST TECHNICAL CONFERENCE., 2003, Canberra. **Malting barley: storage, dormancy and processing quality**. Canberra: E.J. Wright, M.C. Webb And E. Highley, 2003. 253 p.

PROTÁSIO, Thiago de P.; BUFALINO, Lina; MENDES, Rafael F.; RIBEIRO, Marcelo X.; TRUGILHO, Paulo F.; LEITE, Edson R. da S.. Torrefação e carbonização de briquetes de resíduos do processamento dos grãos de café. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 16, n. 11, p. 1252-1258, nov. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662012001100015>.

RAGHAVAN, G. S. V.; LI, Zhenfeng; WANG, Ning; GARIÉPY, Yvan. Control of Microwave Drying Process Through Aroma Monitoring. **Drying Technology**, [S.L.], v. 28, n. 5, p. 591-599, 13 maio 2010. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/07373931003788049>.

ROCHA, Amanda Alves; STOPPE, Ana Carolina Ribeiro; SILVÉRIO, Beatriz Cristina; SANTOS, Kássia Graciele dos; VIEIRA NETO, José Luiz. Secagem de resíduos de malte em uma estufa solar e em um secador solar de leito fixo. **Research, Society And Development**, [S.L.], v. 9, n. 7, p. 1-27, 21 maio 2020. Research, Society and Development. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i7.4335>.

RODRIGUEZ, G.; VASSEUR, J.; COURTOIS, F.. Design and control of drum dryers for the food industry. Part 2. Automatic control. **Journal Of Food Engineering**, [S.L.], v. 30, n. 1-2, p. 171-183, out. 1996. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0260-8774\(95\)00054-2](http://dx.doi.org/10.1016/0260-8774(95)00054-2).

RYNIECKI, A.; GAWRYSIAK-WITULSKA, M.; WAWRZYNIAK, J.. Correlation for the automatic identification of drying endpoint in near-ambient dryers: application to malting barley. **Biosystems Engineering**, [S.L.], v. 98, n. 4, p. 437-445, dez. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.09.014>.

SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO., 10., 2018, Santa do Livramento. **ESTUDO COMPARATIVO DE SECAGEM DE CEVADA (HORDEUM VULGARE L.)**. Santa do Livramento: Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão., 2018. 5 p.

SCHÖRGHUBER, Christoph; GÖLLES, Markus; REICHHARTINGER, Markus; HORN, Martin. Control of biomass grate boilers using internal model control. **Control Engineering Practice**, [S.L.], v. 96, p. 104274, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2019.104274>.

SEBORG, Dale E. *et al.* **Process Dynamics and Control**. 4. ed. Hoboken: Wiley, 2016. 515 p.

SHIH, Yi-Ting; WANG, Wenjun; HASENBECK, Aimee; STONE, Dave; ZHAO, Yanyun. Investigation of physicochemical, nutritional, and sensory qualities of muffins incorporated with dried brewer's spent grain flours as a source of dietary fiber and protein. **Journal Of Food Science**, [S.L.], v. 85, n. 11, p. 3943-3953, 10 out. 2020. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/1750-3841.15483>.

SIDDIQUE, Nazmul. Intelligent Control. **Studies In Computational Intelligence**, [S.L.], v. 517, n. 1, p. 1-82, 2014. Springer International Publishing. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-02135-5>.

SINGH, Anubhav Pratap; MANDAL, Ronit; SHOJAEI, Maryam; SINGH, Anika; KOWALCZEWSKI, Przemysław; LIGAJ, Marta; PAWLICZ, Jarosław; JARZĘBSKI, Maciej. Novel Drying Methods for Sustainable Upcycling of Brewers' Spent Grains as a Plant Protein Source. **Sustainability**, [S.L.], v. 12, n. 9, p. 3660, 1 maio 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su12093660>.

SOARES, Maiara Aparecida Bomfim; JORGE, Luiz Mario de Matos; MONTANUCI, Flávia Daiana. Drying kinetics of barley grains and effects on the germination index. **Food Science And Technology**, [S.L.], v. 36, n. 4, p. 638-645, 24 out. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1678-457x.11916>.

STÅHL, M.; GRANSTRÖM, K.; BERGHEL, J.; RENSTRÖM, R.. Industrial processes for biomass drying and their effects on the quality properties of wood pellets. **Biomass And Bioenergy**, [S.L.], v. 27, n. 6, p. 621-628, dez. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2003.08.019>.

SWANSTON, J.s.; WILHELMSON, A.; RITALA, A.; GIBSON, B.R.. Malting, Brewing, and Distilling. **Barley**, [S.L.], p. 193-222, 2014. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-1-891127-79-3.50008-1>.

TAKOUGNADI, Essouhouna; BOROZE, Tcha-Esso Tchamye; AZOUMA, Ouézou Yaovi. Effects of drying conditions on energy consumption and the nutritional and organoleptic quality of dried bananas. **Journal Of Food Engineering**, [S.L.], v. 268, p. 109747, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2019.109747>.

THOMAZINI, Daniel; ALBUQUERQUE, Pedro Urbano Braga de. **Sensores industriais : Fundamentos e aplicações**. 9. ed. São Paulo: Erica, 2020. 372 p.

TRELEA, Ioan-Cristian; COURTOIS, Francis; TRYSTRAM, Gilles. Dynamics analysis and control strategy for a mixed flow corn dryer. **Journal Of Process Control**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 57-64, fev. 1997. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0959-1524\(96\)00013-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0959-1524(96)00013-3).

TSAOUSHI, Konstantina; KOUTINAS, Athanasios A.; BEKATOROU, Argyro; LOUKATOS, Paul. Fermentation Efficiency of Cells Immobilized on Delignified Brewers' Spent Grains after Low- and

High-Temperature Thin Layer Thermal Drying. **Applied Biochemistry And Biotechnology**, [S.L.], v. 162, n. 2, p. 594-606, 29 nov. 2009. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12010-009-8848-9>.

Y., Liu; M., Aziz; Y., Kansha; A., Tsutsumi. Drying energy saving by applying self-heat recuperation technology to biomass drying system. **Chemical Engineering Transactions**, [S.L.], v. 29, p. 577-582, set. 2012. AIDIC: Italian Association of Chemical Engineering. <http://dx.doi.org/10.3303/CET1229097>.

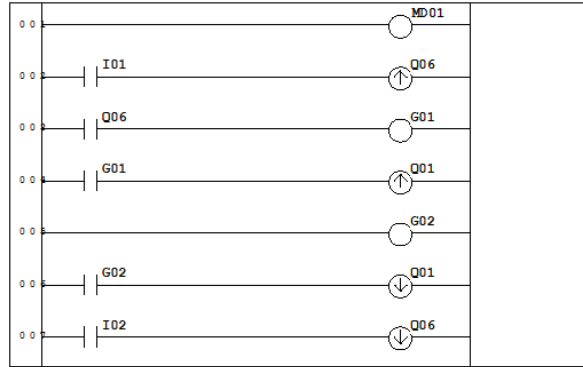
YANG, Lulu; MA, Wenhao; ZHOU, Jiajia; WEN, Rongchao. The Control System of the Full-automatic Dryer Based on PLC. **Frontiers In Computing And Intelligent Systems**, [S.L.], v. 12, n. 2, p. 35-40, 29 maio 2025. Darcy & Roy Press Co. Ltd.. <http://dx.doi.org/10.54097/s4wmrb88>.

ZILOUCHIAN, Ali; JAMSHIDI, Mohammad. Intelligent Control Systems Using Soft Computing Methodologies. **Crc Press**, [S.L.], v. 1, n. 1, p. 1-504, 27 mar. 2001. CRC Press. <http://dx.doi.org/10.1201/9781420058147>.

APÊNDICE A – DIAGRAMA LADDER CONTROLE ON-OFF

Título	Controle On-Off	Versão	1.0
Nome da Empresa	UNILA	Data	21/01/2024
Programador	Hebert H. Amaral	Página	1/6
Comentário: Controle On-Off aplicador ao secador leito fixo			

Linha Programa

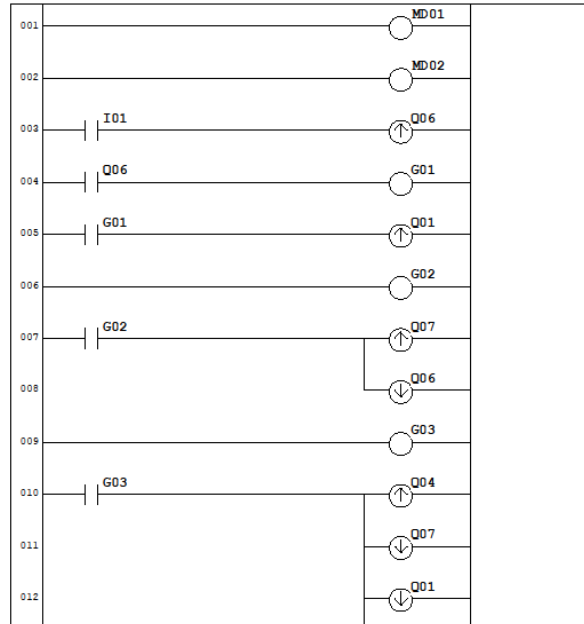


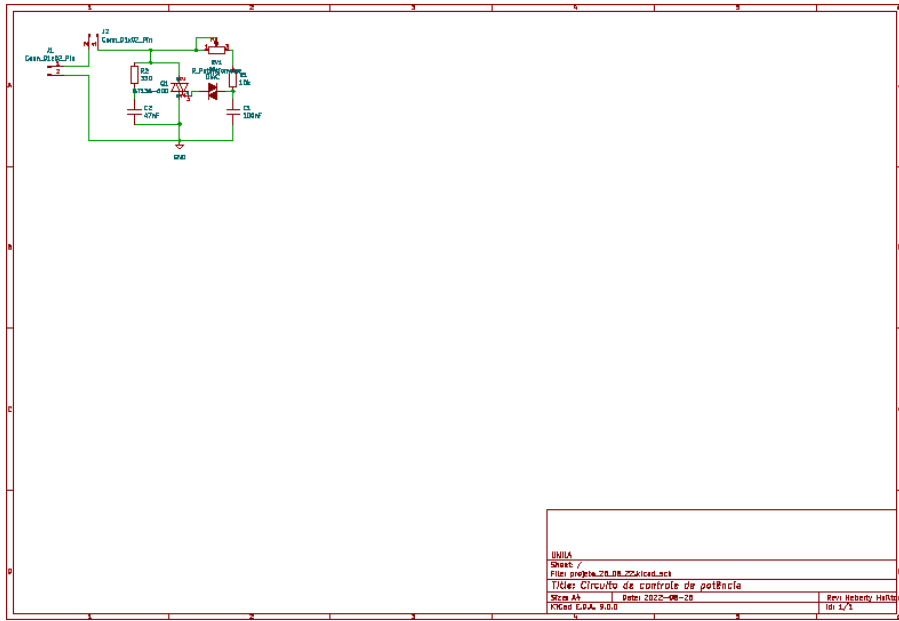
APÊNDICE B – DIAGRAMA LADDER CONTROLE P

Título	Controle P secador	Versão	1.1
Nome da Empresa	UNILA	Data	31/10/23
Programador	Heberty H. Amaral	Página	1/7

Comentário	Controlador P para um secador produção cervejeira.		

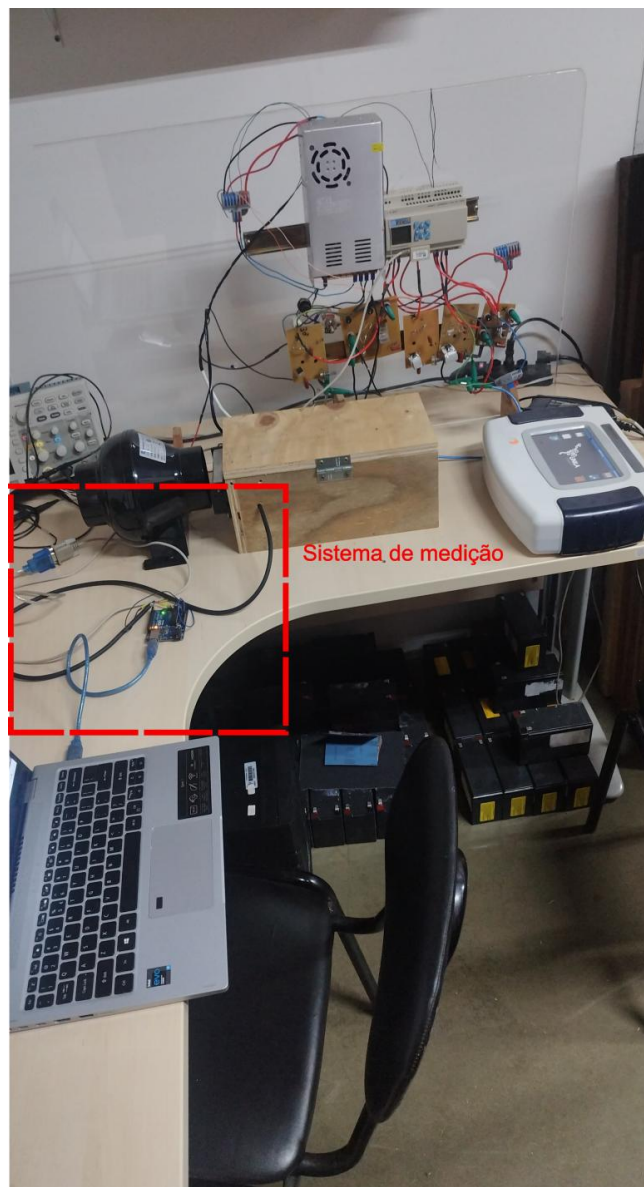
Linha Programa



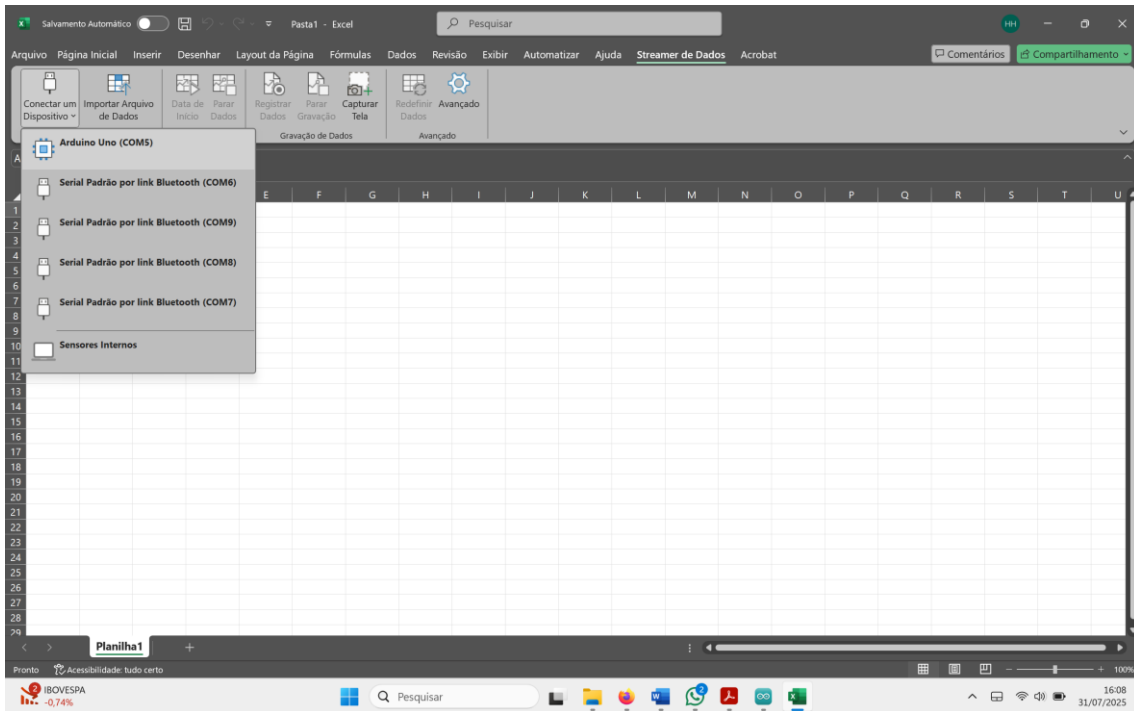
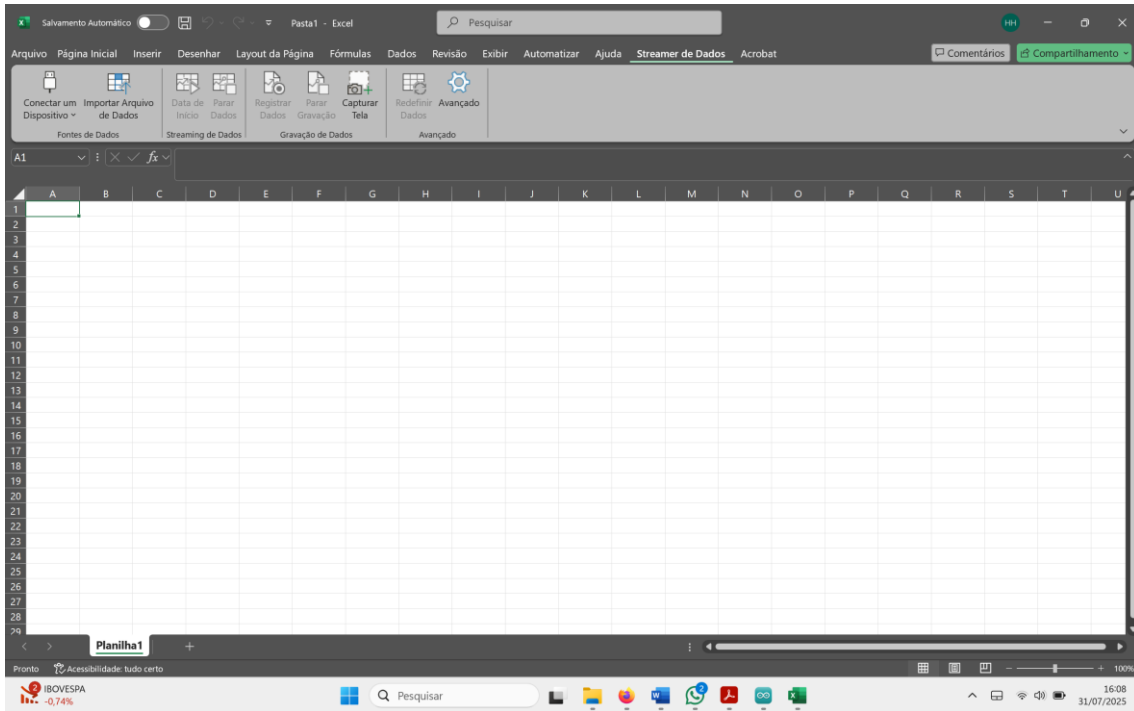


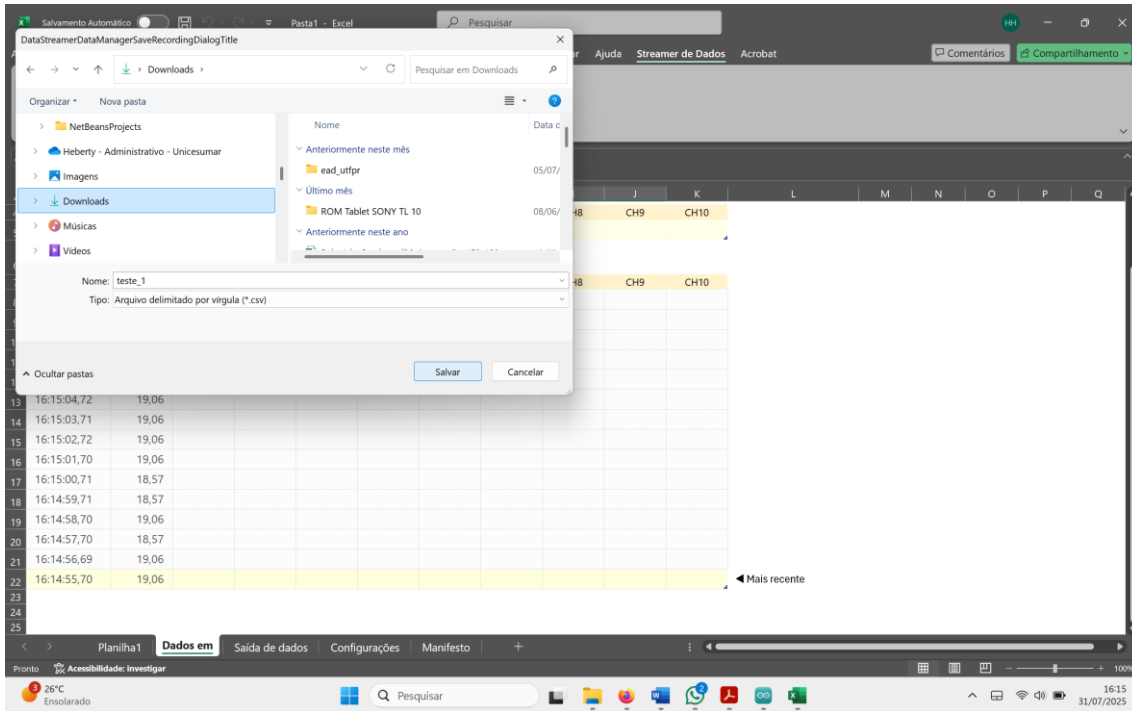
APÊNDICE D – SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TEMPERATURA EMPREGANDO ARDUINO JUNTAMENTE COM EXCEL

O sistema de medição de temperatura é constituído de um Arduino uno R3, um sensor de temperatura LM 35 e o programa Excel[®]. Na Figura abaixo ilustramos o sistema de aferição.

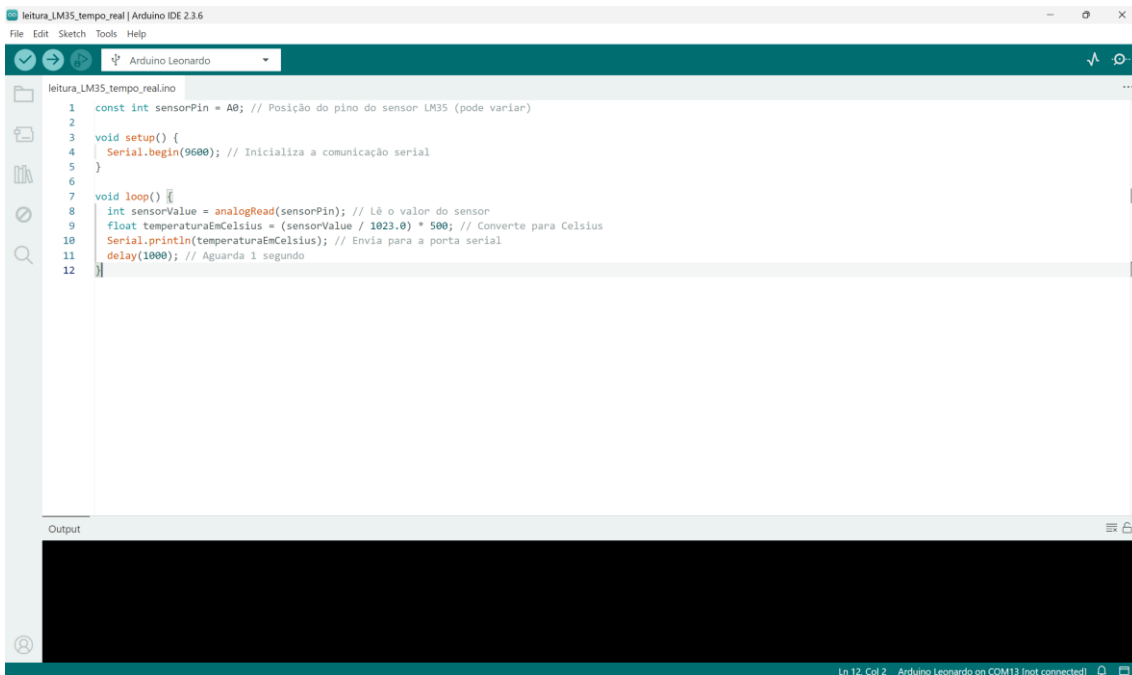


Na sequência são apresentadas as telas de configuração do Excel[®], como segue as Figuras abaixo.

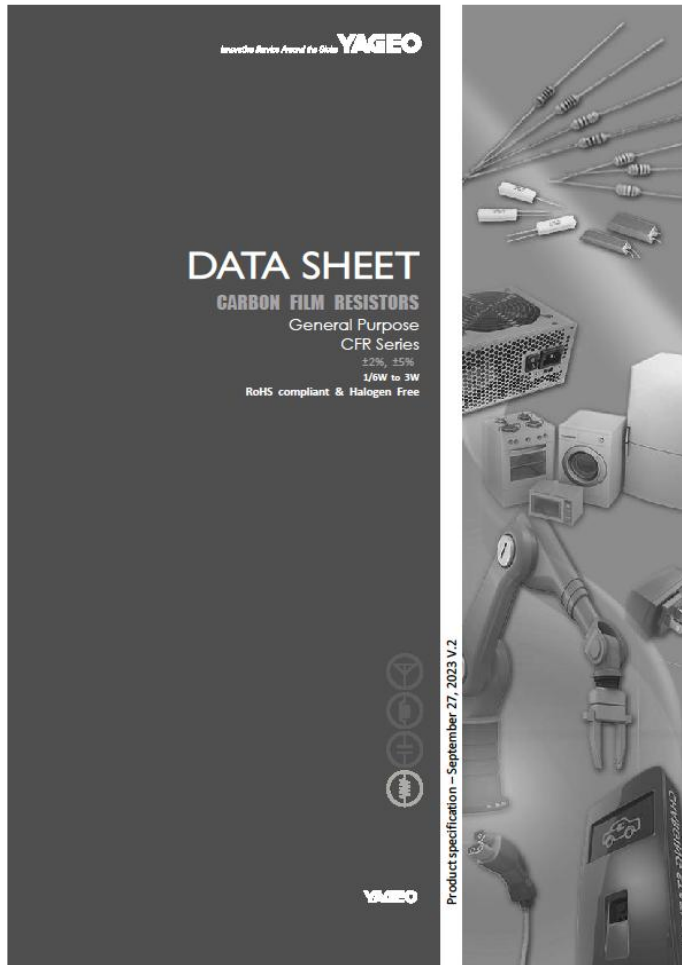




A seguir é explicitaremos o código de leitura do sensor de temperatura conjuntamente com o Arduino.



ANEXO A – DATASHEET SOBRE OS RESISTORES



ANEXO B – DATASHEET SOBRE O POTENCIÔMETRO

Rotary Potentiometer

P160 Series

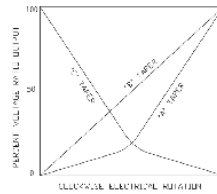
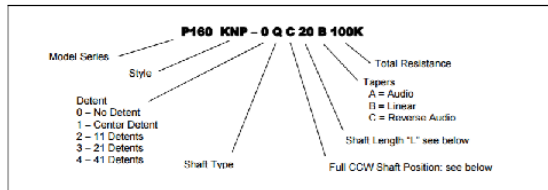


- Features:**
- 16 mm
 - Conductive plastic element
 - 100,000 cycle life
 - Metal shaft/bushing
 - Multi-ganged available
 - RoHS compliant



Model Styles

Side Adjust - Solder Lugs	P160KNP
Side Adjust - PC pins	P160KN
Side Adjust - PC Pins, Long pins	P160KN2
Rear Adjust - PC pins	P160KNPD



General Note
TT Electronics reserves the right to make changes in product specification without notice or liability. All information is subject to TT Electronics' own data and is considered accurate at time of going to print.
© TT electronics plc

TT Electronics | Hi Technologies
413 Hood Rd, Suite 7
Culver, CA 92331
Ph: +1 714 447 2345
www.ttelectronics.com/hi-technologies
Issue B 04/2019 Page 1

ANEXO C – DATASHEET SOBRE O VENTILADOR

HON&GUAN



Bear Motor IPX2 Waterproof Eco-Material Energy Conservation

AIR FRESHING
BRING THE FRESH AIR INTO THE PLACE

 Little Noise  Green & Safe  High Quality



Normal Air Fresh Air


CENTRIFUGAL IMPELLER
Strong Air Flow, Low Noise

STRONG MOTOR
Extra Durable, Long Lasting

LOW NOISE LEVEL

NEVER DISTURB YOUR LIFE



Basically quiet  15DB

 **30DB**
Ensure sleep quality

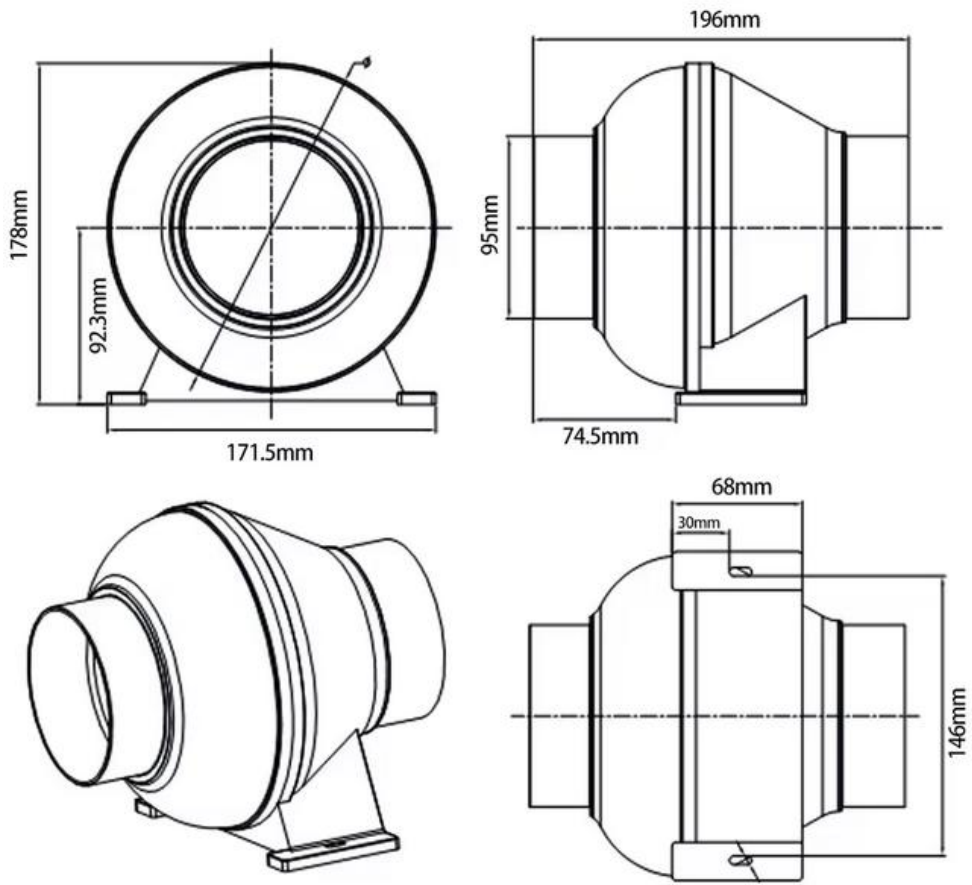
Refrigerator sound  40DB

Normal talking  50DB

SPECIFICATIONS



Model	Voltage(v)	Power(w)	Current(A)
GDF-100PA	120	28	0.45
Speed(Rpm)	Air Flow(m³/h)	Frequency(Hz)	Noise(dB)
2500	195	60	30



ANEXO D – DATASHEET TRIAC (BT136)

Philips Semiconductors Product specification

Triacs BT136 series

GENERAL DESCRIPTION

Glass passivated triacs in a plastic envelope, intended for use in applications requiring high bidirectional transient and blocking voltage capability and high thermal cycling performance. Typical applications include motor control, industrial and domestic lighting, heating and static switching.

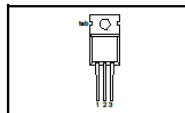
QUICK REFERENCE DATA

SYMBOL	PARAMETER	MAX.	MAX.	MAX.	UNIT
V_{DRM}	Repetitive peak off-state voltages	BT136-500F	500	600	800
		BT136-600F	500	600	800
		BT136-800G	500	600	800
$I_{T(RMS)}$	RMS on-state current	4	4	4	A
I_{TSM}	Non-repetitive peak on-state current	25	25	25	A

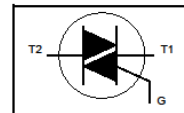
PINNING - TO220AB

PIN	DESCRIPTION
1	main terminal 1
2	main terminal 2
3	gate
tab	main terminal 2

PIN CONFIGURATION



SYMBOL



LIMITING VALUES

Limiting values in accordance with the Absolute Maximum System (IEC 134).

SYMBOL	PARAMETER	CONDITIONS	MIN.	MAX.			UNIT
				500	600	800	
V_{DRM}	Repetitive peak off-state voltages		-	500	600	800	V
$I_{T(RMS)}$	RMS on-state current	full sine wave; $T_{vj} \leq 107^\circ\text{C}$	-	4			A
I_{TSM}	Non-repetitive peak on-state current	full sine wave; $T_j = 25^\circ\text{C}$ prior to surge $t = 20\text{ ms}$	-	25			A
I^2t	I^2t for fusing	$t = 18.7\text{ ms}$	-	27			A ² s
di_v/dt	Repetitive rate of rise of on-state current after triggering	$t = 10\text{ ms}$ $I_{SM} = 6\text{ A}$; $I_G = 0.2\text{ A}$; $di_v/dt = 0.2\text{ A}/\mu\text{s}$	-	3.1			A ² s
I_{GM}	Peak gate current	T2+ G+	-	50			A/ μs
V_{GM}	Peak gate voltage	T2+ G-	-	50			A/ μs
P_{GM}	Peak gate power	T2- G-	-	10			A/ μs
$P_{GM(AV)}$	Average gate power	T2- G+	-	2			A
T_{stg}	Storage temperature		-	5			V
T_j	Operating junction temperature		-	5			W
		over any 20 ms period	-	0.5			W
			-40	150			$^\circ\text{C}$
			-	125			$^\circ\text{C}$

¹ Although not recommended, off-state voltages up to 800V may be applied without damage, but the triac may switch to the on-state. The rate of rise of current should not exceed 3 A/ μs .

ANEXO E – DATASHEET DIAC (BD3)



DB3 DB4 SMDB3

DIAC

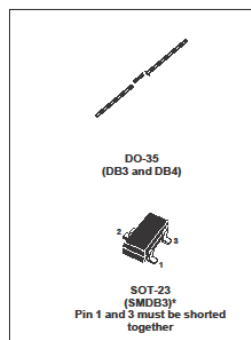
FEATURES

- V_{BO} : 32V and 40V
- LOW BREAKOVER CURRENT

DESCRIPTION

Functioning as a trigger diode with a fixed voltage reference, the DB3/DB4 series can be used in conjunction with triacs for simplified gate control circuits or as a starting element in fluorescent lamp ballasts.

A new surface mount version is now available in SOT-23 package, providing reduced space and compatibility with automatic pick and place equipment.



ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS (limiting values)

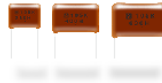
Symbol	Parameter		Value	Unit
I_{TRM}	Repetitive peak on-state current $t_p = 20 \mu s$ $F = 120 \text{ Hz}$	SMDB3	1.00	A
		DB3 / DB4	2.00	
T_{stg} T_J	Storage temperature range Operating junction temperature range		- 40 to + 125	$^{\circ}C$

Note: * SMDB3 indicated as Preliminary spec as product is still in development stage.

ANEXO F – DATASHEET CAPACITOR POLIÉSTER



Some part numbers are discontinued



Plastic Film Capacitors Metallized Polyester Film Capacitor ECQE(F) series

Non-inductive construction using metallized polyester film with flame retardant epoxy resin coating

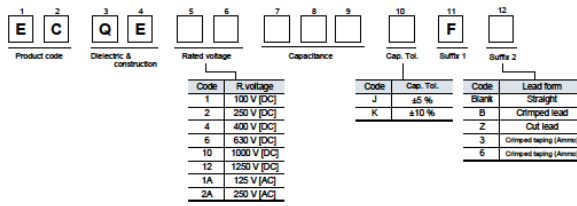
Features

- Self-healing property
- Excellent electrical characteristics
- Flame retardant epoxy resin coating
- RoHS compliant

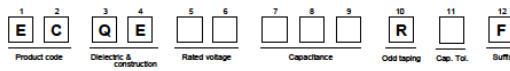
Recommended applications

- General purpose usage
- ※ Please contact us when applications are CDI, ignitor etc.

Explanation of part number



● Odd size taping

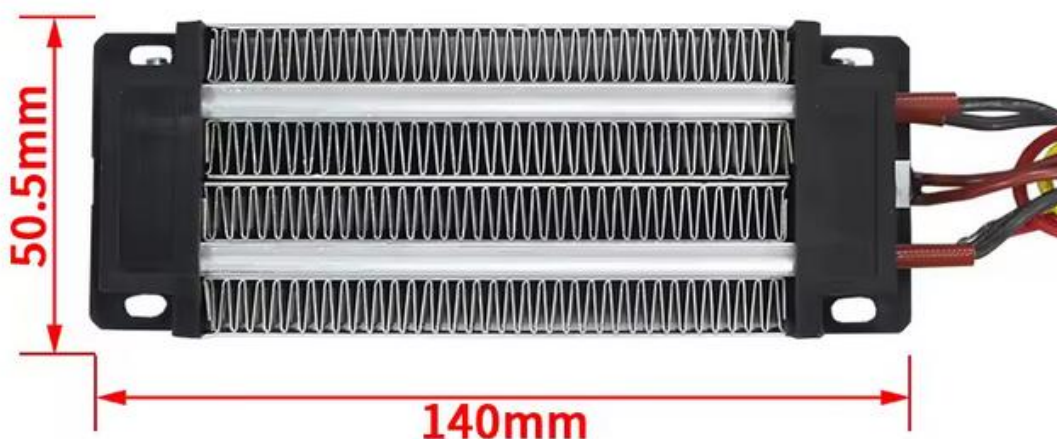


Design and specifications are each subject to change without notice. Ask factory for the current technical specifications before purchase and/or use. Should a safety concern arise regarding this product, please be sure to contact us immediately.

ANEXO G – DATASHEET RESISTÊNCIA CALORÍFICA



Size: 140x50.5x26mm



 **PTCYIDU**

 100%
New Brand

 Quality
Assurance

 Fast
Shipping

 Competitive
Prices

Informações Gerais

[Denuncie o Item](#)

Somos um fabricante profissional de aquecedores PTC, com nossas próprias fábricas e certificações de produtos relacionadas, e podemos fornecer serviços personalizados.

100% novo e de alta qualidade

Product Description

Potência nominal: 500W

Tensão nominal: 110V

Dimensão (C x L x A): 140x50,5x26mm

Material térmico: termistor PTC

Métodos de calor: radiação de calor por fluxo de ar

Fio condutor: linha de silicone de alta temperatura

O comprimento dos fios condutores: 200mm

O comprimento dos fios nus: 10mm

Principal usado em: Aquecedor Elétrico / Ar Condicionado / Equipamento / Umidificador / Purificador de Ar / Secador de Roupas / Desumidificador

ANEXO H – DATASHEET SENSOR TEMPERATURA LM 35

LM35

LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors



Literature Number: SNIS159B

ANEXO I – MANUAL DE USUÁRIO DO CLIC 02

Motors | Automation | Energy | Transmission & Distribution | Coatings

Programmable Micro Controller Microcontrolador Programable Micro Controlador Programável

CLIC-02

User Manual
Manual del Usuario
Manual do Usuário



ANEXO J – PROGRAMA EM PYTHON CONTROLADOR ON-OFF

```

!PIP INSTALL PANDAS NUMPY MATPLOTLIB

!PIP INSTALL CONTROL

!PIP INSTALL NUMPY

!PIP INSTALL PANDAS

!PIP INSTALL MATPLOTLIB

IMPORT PANDAS AS PD
IMPORT NUMPY AS NP
IMPORT MATPLOTLIB.PYPLOT AS PLT

# CARREGAR DADOS DO EXCEL
DF = PD.READ_EXCEL('DADOS_EXPERIMENTOS_PYTHON_05_05)25.XLSX') # SUBSTITUA PELO
NOME DO SEU ARQUIVO

# VISUALIZAR AS PRIMEIRAS LINHAS
PRINT(DF.HEAD())

PLT.FIGURE(FIGSIZE=(12, 6))
PLT.PLOT(DF['TEMPO (S)'], DF['VARIÁVEL CONTROLADA'], LABEL='VARIÁVEL CONTROLADA',
COLOR='BLUE')
PLT.AXHLINE(Y=DF['SETPOINT'][[0]], COLOR='RED', LINESTYLE='--', LABEL='SETPOINT')

# OPCIONAL: DESTACAR ZONAS DE HISTERESE (SE CONHECIDAS)
HISTERESE_SUPERIOR = DF['SETPOINT'][[0]] + 5 # EXEMPLO: +5°C
HISTERESE_INFERIOR = DF['SETPOINT'][[0]] - 5 # EXEMPLO: -5°C
PLT.AXHLINE(Y=HISTERESE_SUPERIOR, COLOR='GREEN', LINESTYLE=':', LABEL='HISTERESE
SUPERIOR')
PLT.AXHLINE(Y=HISTERESE_INFERIOR, COLOR='ORANGE', LINESTYLE=':', LABEL='HISTERESE
INFERIOR')

PLT.XLABEL('TEMPO (S)')
PLT.YLABEL('VARIÁVEL CONTROLADA')
PLT.TITLE('RESPOSTA DO CONTROLADOR ON-OFF COM HISTERESE')

```

```
PLT.LEGEND()
```

```
PLT.GRID()
```

```
PLT.SHOW()
```

```
OVERSHOOT = (DF['VARIÁVEL CONTROLADA'].MAX() - DF['SETPOINT'][0]) / DF['SETPOINT'][0] *  
100
```

```
PRINT(F'OVERSHOOT: {OVERSHOOT:.2F}%')
```

```
# CONTAR TRANSIÇÕES DE ON PARA OFF (ASSUMINDO QUE 1 = ON, 0 = OFF)
```

```
TRANSICOES = NP.SUM(NP.ABS(NP.DIFF(DF['SINAL DE CONTROLE (ON/OFF)'])))
```

```
TEMPO_TOTAL = DF['TEMPO (S)'].ILOC[-1] - DF['TEMPO (S)'].ILOC[0]
```

```
FREQUENCIA_CHAVEAMENTO = TRANSICOES / (2 * TEMPO_TOTAL) # DIVIDE POR 2 PARA CONTAR  
CICLOS COMPLETOS
```

```
PRINT(F'FREQUÊNCIA DE CHAVEAMENTO: {FREQUENCIA_CHAVEAMENTO:.2F} HZ')
```

```
# FILTRAR DADOS APÓS ESTABILIZAÇÃO (EX: ÚLTIMOS 50% DOS DADOS)
```

```
DADOS_ESTABILIZADOS = DF.ILOC[INT(LEN(DF)*0.5):]
```

```
ERRO_MEDIO = NP.MEAN(NP.ABS(DADOS_ESTABILIZADOS['VARIÁVEL CONTROLADA'] -  
DADOS_ESTABILIZADOS['SETPOINT']))
```

```
PRINT(F'ERRO MÉDIO: {ERRO_MEDIO:.2F} UNIDADES')
```

```
# DEFINIR FAIXA ACEITÁVEL (EX: ±5% DO SETPOINT)
```

```
FAIXA_ACEITAVEL = 0.05 * DF['SETPOINT'][0]
```

```
INDICE_ESTABILIZACAO = NP.WHERE(NP.ABS(DF['VARIÁVEL CONTROLADA'] - DF['SETPOINT']) <=  
FAIXA_ACEITAVEL)[0][0]
```

```
TEMPO_ESTABILIZACAO = DF['TEMPO (S)'].ILOC[INDICE_ESTABILIZACAO]
```

```
PRINT(F'TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO: {TEMPO_ESTABILIZACAO:.2F} S')
```

```
PLT.FIGURE(FIGSIZE=(12, 6))
```

```
PLT.PLOT(DF['TEMPO (S)'], DF['VARIÁVEL CONTROLADA'], LABEL='VARIÁVEL CONTROLADA',  
COLOR='BLUE')
```

```
PLT.AXHLINE(Y=DF['SETPOINT'][0], COLOR='RED', LINESSTYLE='--', LABEL='SETPOINT')
```

```
PLT.AXHLINE(Y=PONTOS_LIGAR, COLOR='GREEN', LINESSTYLE=':', LABEL='LIGA (ON)')
```

```
PLT.AXHLINE(Y=PONTOS_DESLIGAR, COLOR='ORANGE', LINESSTYLE=':', LABEL='DESLIGA  
(OFF)')
```

```
# DESTACAR AÇÕES DE CONTROLE
PLT.FILL_BETWEEN(DF['TEMPO (S)'], PONTOS_LIGAR, PONTOS_DESLIGAR, ALPHA=0.1,
COLOR='GRAY', LABEL='ZONA DE HISTERESE')

PLT.XLABEL('TEMPO (S)')
PLT.YLABEL('VARIÁVEL CONTROLADA')
PLT.TITLE('RESPOSTA DO CONTROLADOR ON-OFF COM HISTERESE')
PLT.LEGEND()
PLT.GRID()
PLT.SHOW()

RESULTADOS = {
    'OVERSHOOT (%)': OVERSHOOT,
    'FREQUÊNCIA DE CHAVEAMENTO (Hz)': FREQUENCIA_CHAVEAMENTO,
    'ERRO MÉDIO': ERRO_MEDIO,
    'TEMPO DE ESTABILIZAÇÃO (S)': TEMPO_ESTABILIZACAO,
    'HISTERESE ESTIMADA': HISTERESE_CALCULADA
}

DF_RESULTADOS = PD.DATAFRAME(RERESULTADOS, INDEX=[0])
DF_RESULTADOS.TO_EXCEL('RESULTADOS_ANALISE.XLSX', INDEX=FALSE)
```

ANEXO K – PROGRAMA EM PYTHON CONTROLADOR P

```

!PIP INSTALL CONTROL
IMPORT CONTROL
IMPORT PANDAS AS PD
IMPORT NUMPY AS NP
IMPORT MATPLOTLIB.PYPLOTT AS PLT
FROM SCIPY.OPTIMIZE IMPORT MINIMIZE
FROM SKLEARN.METRICS IMPORT MEAN_SQUARED_ERROR, MEAN_ABSOLUTE_ERROR, R2_SCORE
FROM SCIPY.INTERPOLATE IMPORT INTERP1D
IMPORT TIME
IMPORT SYMPY AS SP

#=====
# CONFIGURAÇÃO DE UNIDADES
#=====

UNIDADE_TEMPO = "s"
UNIDADE_TEMPERATURA = "°C"

#=====
# CARREGAR DADOS ORIGINAIS (SEM MODIFICAÇÃO)
#=====

# CARREGAR DADOS DO EXCEL
DF = PD.READ_EXCEL('TESTE_P_2.XLSX').DROPNA()

# SALVAR VALORES ORIGINAIS DE TEMPERATURA PARA VISUALIZAÇÃO
T_EXP = DF['T'].VALUES
Y_TEMP_ORIGINAL = DF['Y'].VALUES # VALORES ORIGINAIS DE TEMPERATURA

# NORMALIZAÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO (MANTENDO A MESMA LÓGICA)
Y_INITIAL = Y_TEMP_ORIGINAL[0]
Y_FINAL_ORIGINAL = Y_TEMP_ORIGINAL[-1]
DELTA_TEMP = Y_FINAL_ORIGINAL - Y_INITIAL

```

NORMALIZAR PARA IDENTIFICAÇÃO (0 A 1)

Y_EXP = (Y_TEMP_ORIGINAL - Y_INITIAL) / DELTA_TEMP

MAX_T = T_EXP[-1]

COUNT_T = LEN(T_EXP)

S = CONTROL.TF('S')

=====

FUNÇÃO OBJETIVO ORIGINAL (COM DADOS NORMALIZADOS)

=====

DEF OBJECTIVE_FUNCTION(X):

"""FUNÇÃO OBJETIVO COM MÚLTIPLAS MÉTRICAS DE ERRO"""

KP, TAU, ZETA, DELAY = X

PENALIZAR PARÂMETROS INVÁLIDOS IMEDIATAMENTE

IF ANY(P <= 0 FOR P IN [TAU, DELAY]) OR ZETA < 0.05:

RETURN 1E12 # VALOR ALTO PARA REJEITAR

TRY:

SISTEMA DE SEGUNDA ORDEM COM ATRASO

SYS = KP / (TAU2 * S**2 + 2*ZETA*TAU*S + 1)**

APROXIMAÇÃO DE PADE DE 3ª ORDEM PARA MELHOR PRECISÃO NO ATRASO

NUM, DEN = CONTROL.PADE(DELAY, N=3)

PADE = CONTROL.TF(NUM, DEN)

SOPDT = CONTROL.SERIES(SYS, PADE)

SIMULAÇÃO COM MAIS PONTOS PARA PRECISÃO

T_SIM, Y_SIM = CONTROL.STEP_RESPONSE(SOPDT, T=MAX_T, T_NUM=COUNT_T*10)

INTERPOLAÇÃO CÚBICA PARA MELHOR PRECISÃO

**INTERP_FUNC = INTERP1D(T_SIM, Y_SIM, KIND='CUBIC', BOUNDS_ERROR=FALSE,
FILL_VALUE=(0, Y_SIM[-1]))**

Y_SIM_INTERP = INTERP_FUNC(T_EXP)

CÁLCULO DE MÚLTIPLAS MÉTRICAS DE ERRO

MSE = MEAN_SQUARED_ERROR(Y_EXP, Y_SIM_INTERP)

PENALIZAR OVERSHOOT EXCESSIVO

OVERSHOOT_PENALTY = MAX(0, (Y_SIM.MAX() - Y_EXP.MAX()) * 1000)

PENALIZAR TEMPO DE ACOMODAÇÃO DIFERENTE

SETTLING_IDX_EXP = NP.ARGMAX(Y_EXP >= 0.98*Y_EXP[-1])

SETTLING_IDX_SIM = NP.ARGMAX(Y_SIM >= 0.98*Y_SIM[-1])

SETTLING_PENALTY = ABS(T_SIM[SETTLING_IDX_SIM] - T_EXP[SETTLING_IDX_EXP]) * 100

RETURN MSE + OVERSHOOT_PENALTY + SETTLING_PENALTY

EXCEPT:

RETURN 1E12 # RETORNO ALTO PARA FALHAS

#=====

CHUTES INICIAIS (MANTENDO A MESMA LÓGICA)

#=====

Y_FINAL_NORM = Y_EXP[-1]

RISE_TIME = T_EXP[NP.ARGMAX(Y_EXP >= 0.9*Y_FINAL_NORM)] - T_EXP[NP.ARGMAX(Y_EXP >= 0.1*Y_FINAL_NORM)]

CHUTEKP = Y_FINAL_NORM

CHUTETAU = RISE_TIME / 2.5

CHUTEDELAY = T_EXP[NP.ARGMAX(Y_EXP >= 0.05*Y_FINAL_NORM)]

CHUTEZETA = 0.7 # VALOR INTERMEDIÁRIO

x0 = [CHUTEKP, CHUTETAU, CHUTEZETA, CHUTEDELAY]

LIMITES FÍSICOS COM MARGENS

BOUNDS = [

(0.9*Y_FINAL_NORM, 1.1*Y_FINAL_NORM), # KP

(0.01*MAX_T, MAX_T), # TAU

```

(0.05, 5.0),      # ZETA (AMPLIADO PARA COBRIR MAIS CASOS)
(0, MAX_T*0.4)   # DELAY
]

# =====
# OTIMIZAÇÃO (MESMA LÓGICA)
# =====

PRINT("OTIMIZAÇÃO EM ANDAMENTO...")
START_TIME = TIME.TIME()

RES1 = MINIMIZE(OBJECTIVE_FUNCTION, x0, METHOD='NELDER-MEAD',
               OPTIONS={'MAXITER': 500, 'XATOL': 1E-4, 'FATOL': 1E-4})
RES2 = MINIMIZE(OBJECTIVE_FUNCTION, RES1.X, METHOD='L-BFGS-B', BOUNDS=BOUNDS,
               OPTIONS={'MAXITER': 1000, 'FTOL': 1E-8})

OPTIMIZATION_TIME = TIME.TIME() - START_TIME

# RESULTADOS FINAIS
KP_OPT, TAU_OPT, ZETA_OPT, DELAY_OPT = RES2.X

# =====
# SISTEMA IDENTIFICADO
# =====

# SISTEMA DE SEGUNDA ORDEM
SECOND_ORDER_NUM = [KP_OPT]
SECOND_ORDER_DEN = [TAU_OPT**2, 2*ZETA_OPT*TAU_OPT, 1]
SECOND_ORDER_SYS = CONTROL.TF(SECOND_ORDER_NUM, SECOND_ORDER_DEN)

# APROXIMAÇÃO DE PADE PARA O ATRASO
PADE_NUM, PADE_DEN = CONTROL.PADE(DELAY_OPT, N=3)
PADE_SYS = CONTROL.TF(PADE_NUM, PADE_DEN)

# SISTEMA COMPLETO SOPDT

```

```

SOPDT_SYS = CONTROL.SERIES(SECOND_ORDER_SYS, PADE_SYS)

# =====
# SIMULAÇÃO E CONVERSÃO PARA TEMPERATURA
# =====

# SIMULAÇÃO COM DADOS NORMALIZADOS
T_SIM, Y_SIM_NORM = CONTROL.STEP_RESPONSE(SOPDT_SYS, T=MAX_T, T_NUM=COUNT_T*10)

# CONVERTER SIMULAÇÃO PARA TEMPERATURA REAL
Y_SIM_TEMP = Y_INITIAL + Y_SIM_NORM * DELTA_TEMP

# CONVERTER DADOS EXPERIMENTAIS NORMALIZADOS DE VOLTA PARA TEMPERATURA
Y_EXP_TEMP = Y_INITIAL + Y_EXP * DELTA_TEMP

# INTERPOLAÇÃO PARA COMPARAÇÃO
INTERP_FUNC = INTERP1D(T_SIM, Y_SIM_TEMP, KIND='CUBIC', BOUNDS_ERROR=FALSE,
                       FILL_VALUE=(Y_INITIAL, Y_SIM_TEMP[-1]))
Y_SIM_INTERP_TEMP = INTERP_FUNC(T_EXP)

# =====
# CÁLCULO DE MÉTRICAS EM TEMPERATURA
# =====

MSE_TEMP = MEAN_SQUARED_ERROR(Y_TEMP_ORIGINAL, Y_SIM_INTERP_TEMP)
MAE_TEMP = MEAN_ABSOLUTE_ERROR(Y_TEMP_ORIGINAL, Y_SIM_INTERP_TEMP)
R2_TEMP = R2_SCORE(Y_TEMP_ORIGINAL, Y_SIM_INTERP_TEMP)
MAX_ERROR_TEMP = NP.MAX(NP.ABS(Y_TEMP_ORIGINAL - Y_SIM_INTERP_TEMP))
STD_ERROR_TEMP = NP.STD(Y_TEMP_ORIGINAL - Y_SIM_INTERP_TEMP)

# CÁLCULO DE CARACTERÍSTICAS DINÂMICAS EM TEMPERATURA
Y_MAX_SIM_TEMP = NP.MAX(Y_SIM_TEMP)
OVERSHOOT_TEMP = (Y_MAX_SIM_TEMP - Y_FINAL_ORIGINAL) / DELTA_TEMP * 100 IF
Y_MAX_SIM_TEMP > Y_FINAL_ORIGINAL ELSE 0

```

```

# TEMPO DE SUBIDA (10% A 90% EM TEMPERATURA)
IDX_10_TEMP = NP.ARGMAX(Y_SIM_TEMP >= Y_INITIAL + 0.1*DELTA_TEMP)
IDX_90_TEMP = NP.ARGMAX(Y_SIM_TEMP >= Y_INITIAL + 0.9*DELTA_TEMP)
RISE_TIME_SIM_TEMP = T_SIM[IDX_90_TEMP] - T_SIM[IDX_10_TEMP]

# TEMPO DE ACOMODAÇÃO (2% EM TEMPERATURA)
SETTLING_BAND_TEMP = 0.02 * DELTA_TEMP
SETTLING_IDX_TEMP = NP.ARGMAX((NP.ABS(Y_SIM_TEMP - Y_FINAL_ORIGINAL) <=
SETTLING_BAND_TEMP) & (T_SIM >= T_SIM[IDX_90_TEMP]))
SETTLING_TIME_TEMP = T_SIM[SETTLING_IDX_TEMP] IF SETTLING_IDX_TEMP > 0 ELSE MAX_T

# =====
# RELATÓRIO DE DESEMPENHO EM TEMPERATURA
# =====

PRINT("\n" + "="*60)
PRINT("RELATÓRIO DE DESEMPENHO DO MODELO - TEMPERATURA REAL")
PRINT("="*60)

PRINT(F"\nCONDIÇÕES DO EXPERIMENTO:")
PRINT(F"TEMPERATURA INICIAL: {Y_INITIAL:.2F} {UNIDADE_TEMPERATURA}")
PRINT(F"TEMPERATURA FINAL: {Y_FINAL_ORIGINAL:.2F} {UNIDADE_TEMPERATURA}")
PRINT(F"VARIAÇÃO TOTAL: {DELTA_TEMP:.2F} {UNIDADE_TEMPERATURA}")

PRINT(F"\nTEMPO TOTAL DE OTIMIZAÇÃO: {OPTIMIZATION_TIME:.2F} SEGUNDOS")
PRINT(F"NÚMERO DE ITERAÇÕES: {RES1.NIT + RES2.NIT}")

PRINT("\nMÉTRICAS DE AJUSTE EM TEMPERATURA:")
PRINT(F"- MSE: {MSE_TEMP:.4F} ({UNIDADE_TEMPERATURA}^2)")
PRINT(F"- MAE: {MAE_TEMP:.4F} {UNIDADE_TEMPERATURA}")
PRINT(F"- R² SCORE: {R2_TEMP:.4F}")
PRINT(F"- ERRO MÁXIMO: {MAX_ERROR_TEMP:.4F} {UNIDADE_TEMPERATURA}")
PRINT(F"- DESVIO PADRÃO DO ERRO: {STD_ERROR_TEMP:.4F} {UNIDADE_TEMPERATURA}")

PRINT("\nCARACTERÍSTICAS DINÂMICAS:")

```

```

PRINT(F"- OVERSHOOT: {OVERSHOOT_TEMP:.2F}%")
PRINT(F"- TEMPO DE SUBIDA (10-90%): {RISE_TIME_SIM_TEMP:.4F} {UNIDADE_TEMPO}")
PRINT(F"- TEMPO DE ACOMODAÇÃO (2%): {SETTLING_TIME_TEMP:.4F} {UNIDADE_TEMPO}")

```

```

PRINT("\nPARÂMETROS OTIMIZADOS (MODELO NORMALIZADO):")
PRINT(F"- GANHO (Kp): {Kp_OPT:.4F} (ADIMENSIONAL)")
PRINT(F"- CONSTANTE DE TEMPO (TAU): {TAU_OPT:.4F} {UNIDADE_TEMPO}")
PRINT(F"- COEFICIENTE DE AMORTECIMENTO (ZETA): {ZETA_OPT:.4F}")
PRINT(F"- ATRASO (DELAY): {DELAY_OPT:.4F} {UNIDADE_TEMPO}")

```

```

#=====
# FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA CANÔNICA
#=====

```

```

DEF GENERATE_CANONICAL_TRANSFER_FUNCTION(Kp, TAU, ZETA, DELAY):
    """"GERA A FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA CANÔNICA NO DOMÍNIO DE LAPLACE""""

```

```

# CRIAR VARIÁVEL SIMBÓLICA S

```

```

S_SYM = SP.SYMBOL('S')

```

```

# PARTE DE SEGUNDA ORDEM

```

```

G_SECOND_ORDER = Kp / (TAU**2 * S_SYM**2 + 2*ZETA*TAU * S_SYM + 1)

```

```

# APROXIMAÇÃO DE PADÉ DE 3ª ORDEM PARA O ATRASO

```

```

L = DELAY

```

```

A0 = 1

```

```

A1 = -L/2

```

```

A2 = L**2/10

```

```

A3 = -L**3/120

```

```

B0 = 1

```

```

B1 = L/2

```

```

B2 = L**2/10

```

```

B3 = L**3/120

```

```

NUMERATOR_PADE = A0 + A1*S_SYM + A2*S_SYM**2 + A3*S_SYM**3

```

```
DENOMINATOR_PADE = B0 + B1*S_SYM + B2*S_SYM**2 + B3*S_SYM**3
```

```
G_PADE = NUMERATOR_PADE / DENOMINATOR_PADE
```

```
# SISTEMA COMPLETO
```

```
G_TOTAL = G_SECOND_ORDER * G_PADE
```

```
RETURN G_TOTAL, G_SECOND_ORDER, G_PADE, S_SYM
```

```
# GERAR FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA CANÔNICA
```

```
G_TOTAL, G_SECOND_ORDER, G_PADE, S_SYM = GENERATE_CANONICAL_TRANSFER_FUNCTION(
    KP_OPT, TAU_OPT, ZETA_OPT, DELAY_OPT
)
```

```
PRINT("\n" + "="*60)
```

```
PRINT("FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DO MODELO IDENTIFICADO")
```

```
PRINT("="*60)
```

```
PRINT(F"\nPARA SISTEMA NORMALIZADO (ENTRADA 0→1, SAÍDA 0→1):")
```

```
PRINT(F"G(S) = {KP_OPT:.4F} / ({TAU_OPT**2:.4F}S2 + {2*ZETA_OPT*TAU_OPT:.4F}S + 1) × E^(-{DELAY_OPT:.4F}S)")
```

```
PRINT(F"\nPARA SISTEMA EM TEMPERATURA REAL:")
```

```
PRINT(F"G(S) = [{DELTA_TEMP * KP_OPT:.4F} {UNIDADE_TEMPERATURA}] /
({TAU_OPT**2:.4F}S2 + {2*ZETA_OPT*TAU_OPT:.4F}S + 1) × E^(-{DELAY_OPT:.4F}S)")
```

```
#=====
```

```
# VISUALIZAÇÃO EM TEMPERATURA COM LEGENDAS OTIMIZADAS
```

```
#=====
```

```
PLT.FIGURE(FIGSIZE=(14, 10))
```

```
# GRÁFICO PRINCIPAL EM TEMPERATURA
```

```
PLT.SUBPLOT(2, 1, 1)
```

```
PLT.PLOT(T_SIM, Y_SIM_TEMP, 'b-', LINEWIDTH=2.5, LABEL='MODELO SOPDT')
```

```
PLT.SCATTER(T_EXP, Y_TEMP_ORIGINAL, COLOR='RED', S=20, LABEL='DADOS EXPERIMENTAIS',
ZORDER=3)
```

```
# DESTAQUE PARA ÁREAS DE MAIOR ERRO
```

```
ERROR_TEMP = NP.ABS(Y_TEMP_ORIGINAL - Y_SIM_INTERP_TEMP)
```

```
LARGE_ERROR_THRESHOLD = 0.05 * DELTA_TEMP # 5% DA VARIAÇÃO TOTAL
```

```
LARGE_ERROR = ERROR_TEMP > LARGE_ERROR_THRESHOLD
```

```
PLT.SCATTER(T_EXP[LARGE_ERROR], Y_TEMP_ORIGINAL[LARGE_ERROR], COLOR='ORANGE',
S=40,
```

```
    LABEL=F'DISCREPÂNCIAS > {LARGE_ERROR_THRESHOLD:.2F}
```

```
{UNIDADE_TEMPERATURA}', ZORDER=4)
```

```
PLT.XLABEL(F'TEMPO [{UNIDADE_TEMPO}]', FONTSIZE=12)
```

```
PLT.YLABEL(F'TEMPERATURA [{UNIDADE_TEMPERATURA}]', FONTSIZE=12)
```

```
PLT.TITLE('COMPARAÇÃO ENTRE MODELO E DADOS EXPERIMENTAIS - TEMPERATURA REAL',
FONTSIZE=14)
```

```
# LEGENDA NO CANTO SUPERIOR ESQUERDO (ÁREA GERALMENTE LIVRE)
```

```
PLT.LEGEND(FONTSIZE=9, LOC='UPPER LEFT', FRAMEON=TRUE, FANCYBOX=TRUE,
    SHADOW=TRUE, FACECOLOR='WHITE', EDGECOLOR='BLACK', FRAMEALPHA=0.9)
```

```
PLT.GRID(TRUE, ALPHA=0.3)
```

```
# GRÁFICO DE ERROS EM TEMPERATURA
```

```
PLT.SUBPLOT(2, 1, 2)
```

```
PLT.PLOT(T_EXP, Y_TEMP_ORIGINAL - Y_SIM_INTERP_TEMP, 'r-', LINEWIDTH=1.5, LABEL='ERRO
(EXPERIMENTAL - MODELO)')
```

```
PLT.FILL_BETWEEN(T_EXP, 0, Y_TEMP_ORIGINAL - Y_SIM_INTERP_TEMP, COLOR='RED',
ALPHA=0.1)
```

```
PLT.AXHLINE(0, COLOR='BLACK', LINESSTYLE='--')
```

```
PLT.XLABEL(F'TEMPO [{UNIDADE_TEMPO}]', FONTSIZE=12)
```

```
PLT.YLABEL(F'ERRO [{UNIDADE_TEMPERATURA}]', FONTSIZE=12)
```

```
PLT.TITLE('ANÁLISE DE ERROS - TEMPERATURA REAL', FONTSIZE=14)
```

```
# LEGENDA NO CANTO SUPERIOR DIREITO (ÁREA GERALMENTE LIVRE EM GRÁFICOS DE
```

ERRO)

```
PLT.LEGEND(FONTSIZE=9, LOC='UPPER RIGHT', FRAMEON=TRUE, FANCYBOX=TRUE,
          SHADOW=TRUE, FACECOLOR='WHITE', EDGECOLOR='BLACK', FRAMEALPHA=0.9)
```

```
PLT.GRID(TRUE, ALPHA=0.3)
```

ANOTAÇÃO COM MÉTRICAS - POSICIONADA NO CANTO INFERIOR DIREITO DA FIGURA

```
METRICS_TEXT = (F'MÉTRICAS EM TEMPERATURA:\n'
                F'MSE = {MSE_TEMP:.4F} {UNIDADE_TEMPERATURA}^2\n'
                F'MAE = {MAE_TEMP:.4F} {UNIDADE_TEMPERATURA}\n'
                F'R^2 = {R2_TEMP:.4F}\n'
                F'MAX ERROR = {MAX_ERROR_TEMP:.4F} {UNIDADE_TEMPERATURA}\n'
                F'OVERSHOOT = {OVERSHOOT_TEMP:.2F}%)
```

POSIÇÃO NO CANTO INFERIOR DIREITO DA FIGURA (FORA DOS GRÁFICOS)

```
PLT.ANOTATE(METRICS_TEXT, XY=(0.58, 0.52), XYCOORDS='FIGURE FRACTION',
           BBOX=DICTIONARY('BOXSTYLE','ROUND', 'ALPHA',0.9, 'FACECOLOR','LIGHTYELLOW',
                           'EDGECOLOR','BLACK', 'LINEWIDTH',1),
           VERTICALALIGNMENT='CENTER_BASELINE', HORIZONTALALIGNMENT='RIGHT',
           FONTSIZE=9, FONTFAMILY='MONOSPACE')
```

```
PLT.TIGHT_LAYOUT()
```

```
PLT.SHOW()
```

```
PRINT(F"\n  IDENTIFICAÇÃO CONCLUÍDA! GRÁFICOS MOSTRADOS EM
      {UNIDADE_TEMPERATURA}.")
```