



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FILIFE MARQUES PEREIRA MARTINS

**CONTROLE DE TEMPERATURA *ON/OFF* APLICADO EM UMA ESTUFA
ESTACIONÁRIA INDUSTRIAL**

FORTALEZA

2020

FILIFE MARQUES PEREIRA MARTINS

CONTROLE DE TEMPERATURA *ON/OFF* APLICADO EM UMA ESTUFA
ESTACIONÁRIA INDUSTRIAL

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Automação e controle.

Orientador: Prof. Dr. Wilkley Bezerra Correia.

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P491c Pereira Martins, Filipe Marques.
Controle de temperatura on/off aplicado em uma estufa estacionário industrial / Filipe Marques Pereira Martins. – 2020.
68 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2020.
Orientação: Prof. Dr. Wilkley Bezerra Correia.

1. Automação industrial. 2. Controle on/off. 3. Temperatura. I. Título.

CDD 621.3

FILIFE MARQUES PEREIRA MARTINS

CONTROLE DE TEMPERATURA *ON/OFF* APLICADO EM UMA ESTUFA
ESTACIONÁRIA INDUSTRIAL

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Automação e controle.

Aprovada em: ___/___/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Wilkley Bezerra Correia (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. MSc. Rômulo Nunes de Carvalho Almeida
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Gilnei de Lima Pereira
(Resibras Indústria de Castanhas Ltda.)

Dedico este trabalho a Deus.

Aos meus pais, Marcos e Rosa.

À minha esposa Caroline.

Ao meu irmão Marcos.

Aos meus familiares.

Aos meus amigos do grupo *RAPOKER*.

Aos meus amigos do grupo Gábirus.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais Marcos e Rosa, que sempre me incentivaram e sempre me mostraram a importância dos estudos.

À minha esposa Caroline que esteve presente ao longo de toda a graduação e nos momentos mais difíceis sempre me apoiou, me compreendeu e foi paciente.

Ao meu orientador Prof. Wilkley, pela sua disponibilidade e atenção em todos os momentos durante a elaboração deste trabalho e por ampliar meus conhecimentos na área de atuação que escolhi me aprofundar.

Ao meu irmão Marcos que é motivo de grande orgulho para mim pelo seu caráter e modo de lidar com a vida.

A Resibras Indústria de Castanhas Ltda por ter possibilitado a realização das melhorias no processo produtivo, proporcionando assim a elaboração deste trabalho.

Ao colega de trabalho e gerente da fábrica na qual este trabalho foi elaborado Eng. Gilnei de Lima Pereira, por gentilmente ceder informações e por sempre estar a disposição para discussões sobre o assunto.

Aos professores Sérgio Daher pela sua entrega durante o ensino das disciplinas de máquinas elétricas que tive o prazer de participar; Tobias que abriu minha mente para enxergar melhor a atuação do engenheiro eletricitista no mercado; Ruth pela sua postura e dedicação nas disciplinas que tive a oportunidade de ser aluno; Fernando Antunes por possibilitar uma visão diferenciada de muitos assuntos.

Aos meus amigos Allan Gomes, Hallison Aguiar, Jucelino Taleires, Mateus Pinheiro, Rafael Sousa, Raimundo Jackson e Vinícius Alexandre do grupo Gábitus Alados. Sem dúvida são amigos que a Universidade me proporcionou e levarei para o resto da vida. Também aos amigos Anderson Douglas, Ítalo, Isaac Medeiros, Igor, Jefferson Bruno, Lucas Pereira, Lucas Miranda, Thiago Dias e Wilkerson Carvalho pelos momentos de descontração tão importantes durante a caminhada.

“Nunca ande por trilhas, pois assim só irá
até onde os outros já foram.”

(Alexander Graham Bell)

RESUMO

Este trabalho apresenta as características de uma solução de automação proposta para a melhoria de um processo industrial em uma fábrica de castanhas. O processo no qual o trabalho foi desenvolvido envolve a secagem de amêndoas de castanhas de caju e foi desenvolvido em uma das estufas existentes no setor. As amêndoas são inseridas em estufas estacionárias que são dotadas de um sistema de aquecimento que trabalha por convecção. No topo das estruturas existe uma tubulação que é percorrida por vapor saturado produzido por uma caldeira industrial. O processo de secagem acontece por convecção no interior das estufas. Observou-se a necessidade de garantir uma operação mais precisa das estufas, uma vez que o controle da temperatura das salas era feito de forma manual pelos operadores e bastante suscetível a falhas e desvios. Assim, foi realizado o levantamento das condições da aplicação e proposta uma automação de baixo custo que atendesse às necessidades da empresa. A melhoria consiste em um sistema de controle do tipo *ON/OFF* utilizando um dispositivo conhecido como controlador de temperatura. Esse equipamento monitora a temperatura do sistema através do sinal enviado por um sensor de temperatura do tipo PT-100 instalado no interior das salas e controla o fluxo de vapor nas serpentinas das estufas através de uma válvula eletropneumática instalada na tubulação. O trabalho traz o detalhamento dos principais componentes utilizados na implementação da solução e é feito um comparativo entre a operação manual e a automática. Foram realizados ensaios com diversas condições de trabalho nas salas e os resultados ilustrados em gráficos. Os resultados obtidos durante a operação automatizada foram confrontados com a operação manual e foi justificada a implementação da melhoria.

Palavras-chave: Automação industrial. Controle *ON/OFF*. Temperatura.

ABSTRACT

This work presents the characteristics of an automation solution proposed for the improvement of an industrial process in a nut factory. This work process deals with the drying of cashew nut almonds and was developed in one of the greenhouses in the sector. The almonds are inserted in stationary greenhouses that are equipped with a heating system that works by convection. At the top of the structures there is a pipe that is traversed by saturated steam produced by an industrial boiler. The drying process takes place by convection inside the greenhouses. The need to ensure a more precise operation of the greenhouses was observed, since the temperature control of the rooms was done manually by the operators and very susceptible to failures and deviations. Thus, a survey of the application conditions was carried out and a low-cost automation that would meet the company's needs was proposed. A ON/OFF control system using a temperature controller is proposed to deal with this issue. The equipment monitors the temperature of the system through the signal sent by a temperature sensor of the type PT-100 installed inside the rooms and controls the flow of steam in the greenhouse's pipe through an electropneumatic valve installed in the pipeline. The work provides details of the main components used in the implementation of the solution and a comparison is made between manual and automatic operation. Different setups were tested and the results are shown in graphs. The proposed improvement technique was justified by the comparison between the experimental data and the manual operation.

Keywords: Automation. ON/OFF control. Temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Pirâmide de automação.....	21
Figura 2	– Variedade de CLPs do fabricante <i>Rockwell Automation</i>	23
Figura 3	– Estrutura básica de um CLP.....	23
Figura 4	– Exemplo de configuração de automação envolvendo os níveis 1, 2 e 3.....	24
Figura 5	– Exemplo de configuração utilizando Sistema SCADA para o monitoramento de 4 CLPs.....	25
Figura 6	– Exemplo de sistema de controle em malha fechada.....	28
Figura 7	– Exemplo de ação de controle ON/OFF.....	30
Figura 8	– Funcionamento de uma válvula de controle proporcional.....	31
Figura 9	– Exemplo de ação de controle proporcional utilizando tempo de chaveamento	32
Figura 10	– Exemplo de uma estrutura de secagem natural para grãos.....	35
Figura 11	– Modelo de estufa contínua do fabricante <i>Grantham</i>	36
Figura 12	– Modelo de estufa estacionária do fabricante <i>Mekong</i>	37
Figura 13	– Exemplo de termômetro analógico industrial.....	38
Figura 14	– Resumo da operação antes da automação.....	39
Figura 15	– Resumo da operação com a proposta de automação.....	40
Figura 16	– Pinagem do controlador modelo LK48PHCRRRD.....	41
Figura 17	– Descrição da referência do controlador utilizado.....	41
Figura 18	– Controlador de temperatura modelo LWK48 do fabricante <i>Coel</i>	42
Figura 19	– Exemplo de operação configurada para controle <i>ON/OFF</i> e histerese simétrica.....	43
Figura 20	– Exemplo de operação configurada para controle <i>ON/OFF</i> e histerese assimétrica.....	44
Figura 21	– Atuador pneumático rotativo para válvulas fabricante <i>MGA</i>	46

Figura 22 – Conjunto válvula, atuador pneumático, válvula solenoide e indicador de posição.....	47
Figura 23 – Diferentes modelos construtivos de sensores do tipo PT-100.....	48
Figura 24 – Esquema de ligação do sensor PT-100 ao controlador.....	49
Figura 25 – Possíveis configurações para temporização no controlador de temperatura.....	53
Figura 26 – Acompanhamento da temperatura e funcionamento da válvula durante uma operação sem intervenção de automação.....	56
Figura 27 – Acompanhamento de temperatura e funcionamento da válvula durante uma operação com a solução de automação e sem produto na estrutura.....	58
Figura 28 – Acompanhamento de temperatura e funcionamento da válvula durante uma operação com a solução de automação e com produto na estrutura.....	59
Figura 29 – Acompanhamento de temperatura e funcionamento da válvula durante uma operação com a solução de automação e com produto na estrutura.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Especificação do conjunto válvula, atuador pneumático e solenoide utilizados no processo.....	47
Tabela 2	- Especificação do sensor de temperatura utilizado no processo.....	49
Tabela 3	- Conjunto de parâmetros de entrada.....	50
Tabela 4	- Conjunto de parâmetros de saída.....	51
Tabela 5	- Conjunto de parâmetros de controle.....	51
Tabela 6	- Conjunto de parâmetros do SET POINT.....	51
Tabela 7	- Conjunto de parâmetros do Temporizador.....	51
Tabela 8	- Conjunto de parâmetros de interface do usuário.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CLP	Controlador Lógico Programável
CPU	<i>Central Process Unit</i>
E/S	Entrada e Saída
IHM	Interface Humano-Máquina
PD	Proporcional-Derivativo
PI	Proporcional-Integrativo
PID	Proporcional-Integrativo-Derivativo
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Aquisition</i>
VDC	Tensão contínua
VR	Valor de Referência

LISTA DE SÍMBOLOS

% Porcentagem

°C Grau Celsius

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	Objetivos.....	17
1.2	Motivação.....	17
1.3	Metodologia.....	18
1.4	Estrutura do trabalho.....	18
2	TÓPICOS SOBRE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL.....	20
2.1	Introdução.....	20
2.2	Evolução da automação industrial.....	20
2.3	A proposta de automação e sua posição na pirâmide.....	26
2.4	Controle de processos.....	27
2.4.1	<i>Malha Aberta x Malha Fechada.....</i>	27
2.4.2	<i>Classificação de controladores industriais.....</i>	28
2.4.2.1	<i>Controle ON/OFF.....</i>	28
2.4.2.2	<i>Controle PID.....</i>	29
2.5	Conclusão.....	33
3	DESCRIÇÃO DO SISTEMA.....	34
3.1	Introdução.....	34
3.2	O processo de secagem de grãos na indústria.....	34
3.2.1	<i>Estufas Contínuas.....</i>	36
3.2.2	<i>Estufas Estacionárias.....</i>	36
3.3	Operação.....	38
3.4	Proposta de automação.....	39
3.4.1	<i>Controlador de temperatura.....</i>	40
3.4.2	<i>Histerese.....</i>	43
3.4.3	<i>Atuador.....</i>	44
3.4.4	<i>Válvulas industriais.....</i>	45
3.4.5	<i>Sensor de temperatura.....</i>	48
3.5	Operação após a implementação da automação.....	50
3.6	Conclusão.....	54
4	RESULTADOS.....	55
4.1	Introdução.....	55

4.2	Ensaio 1	55
4.3	Ensaio 2	57
4.4	Ensaio 3	59
4.5	Ensaio 4	61
4.6	Conclusão	63
5	CONCLUSÃO	64
	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é descrever a automação do controle de temperatura implementada em uma das estufas do setor de estufagem de amêndoas de castanhas de caju em uma indústria de beneficiamento de castanhas.

1.2 Motivação

No Brasil é possível observar, do ponto de vista tecnológico, diversos tipos de plantas industriais. De uma maneira simples, existem fábricas operando com tecnologia de ponta enquanto outras sequer possuem uma padronização adequada de seus processos.

De fato, investir em tecnologia não é uma alternativa de baixo custo. Porém, ao longo dos anos tem se observado que está cada vez mais acessível para indústrias de menor porte adquirir equipamentos mais sofisticados. De certa forma, não é só uma questão financeira e nem específica de indústrias de pequeno porte. É possível ver indústrias de médio e até grande porte que ainda operam de forma imprecisa, sobretudo na forma de conduzir suas atividades.

Tendo em mente a necessidade de criar padrões mais seguros de operação, com variáveis bem definidas e, conseqüentemente, uma maior confiabilidade das rotinas, é cada vez maior a busca das empresas por soluções que resolvam esses problemas.

Segundo Moraes (2010), entende-se por automação qualquer sistema, apoiado em computadores, que substitua o trabalho humano em favor da segurança das pessoas, da qualidade dos produtos, da rapidez da produção ou da redução de custos, assim aperfeiçoando os complexos objetivos das indústrias e dos serviços. Um ponto importante é a segurança das pessoas que trabalham na operação. Além dos aspectos de desvios de padrões e imprecisão, a segurança das pessoas é um dos objetivos da automação de processos.

Com base neste contexto, identificou-se no ambiente industrial em que este trabalho foi desenvolvido a possibilidade de automação de um dos processos. Com a proposta é possível reduzir a interferência dos operadores no resultado final da etapa produtiva, além de proporcionar uma operação mais segura, precisa e passível de auditoria pela gerência, setor de qualidade ou outro setor da empresa que deseje avaliar com segurança os resultados do processo.

No processo de estufagem de amêndoas de castanhas de caju, o binômio tempo-temperatura relaciona duas variáveis da etapa que devem ser monitoradas com precisão. O objetivo do processo é reduzir a umidade do produto para que ocorra a eliminação de microrganismos e garantir que o teor de umidade das amêndoas se estabeleça numa faixa de 2,5% a 3%. A faixa de umidade admitida visa as próximas do processo produtivo (normalmente há ganhos de umidade ao longo da linha após a estufagem), uma vez que o teor de umidade admitido para que o produto seja embalado deve estar numa faixa de 3% a 5% (*SPECIFICATIONS FOR CASHEW KERNELS*, 2012). Além dos requisitos de embalagem e eliminação de microrganismos, a redução da umidade do produto também tem como objetivo tornar a película da amêndoa quebradiça, facilitando assim o processo que ocorre na etapa seguinte à etapa de estufagem (despeliculagem de amêndoas).

Outro ponto importante do trabalho é a avaliação de como uma proposta de automação relativamente simples pode trazer melhorias na operação, mostrando assim como atualmente com pequenos investimentos já é possível melhorar a eficiência dentro das indústrias.

1.3 Metodologia

A metodologia consiste em apresentar um breve histórico da automação industrial e situar a proposta dentro da pirâmide de automação para se entender em que nível o projeto se encontra. Os aspectos básicos relativos ao tipo de sistema abordado são apresentados e é feita a descrição do sistema antes e após a intervenção da automação. Em seguida os resultados da melhoria são avaliados para se estabelecer um comparativo entre as duas operações e assim validar a proposta.

1.4 Estrutura do Trabalho

O capítulo 1 traz objetivos do trabalho, bem como sua motivação e metodologia.

No capítulo 2 são abordados os aspectos da automação industrial e os conceitos relativos ao tipo de sistema no qual o trabalho foi desenvolvido.

O capítulo 3 discute a descrição do sistema de estufagem de amêndoas. É feita a descrição da operação antes da automação e após a automação. Também são informadas características operacionais e requisitos da rotina de trabalho das estufas.

O capítulo 4 é destinado a se discutir os resultados obtidos durante os ensaios realizados no sistema. O método de obtenção dos dados é detalhado, bem como foram conduzidos os ensaios. É feito um comparativo dos ensaios e avaliados os impactos na operação.

O capítulo 5 apresenta as conclusões acerca do trabalho e as perspectivas para trabalhos futuros.

2 TÓPICOS SOBRE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

2.1 Introdução

Neste capítulo serão abordados alguns conceitos importantes sobre automação industrial. Serão apresentados os níveis de automação existentes e feita uma breve descrição de cada camada da chamada pirâmide da automação. Além disso, serão comentadas novas tecnologias que estão surgindo na área e seu impacto nas plantas industriais.

Conceitos fundamentais sobre instrumentação e controle de processos também são apresentados a fim de garantir o embasamento para os capítulos seguintes deste trabalho.

2.2 Evolução da Automação industrial

O desenvolvimento dos processos industriais está intrinsecamente ligado ao surgimento da automação. De uma maneira mais ampla, o homem sempre desenvolveu mecanismos e ferramentas que diminuíssem o esforço físico na realização das tarefas. É importante lembrar desses fatos para se ter uma noção maior do que é automação antes de analisar o ramo industrial. De fato, este trabalho está focado em ferramentas utilizadas em plantas industriais, porém é importante entender que a automação não está restrita a estes ambientes.

Hoje entende-se por automação qualquer sistema apoiado em computadores que substitua o trabalho humano em favor da segurança das pessoas, da qualidade dos produtos, da rapidez da produção ou da redução de custos (MORAES, 2010). Com esta abordagem é possível notar que atualmente não é uma ferramenta exclusiva das indústrias.

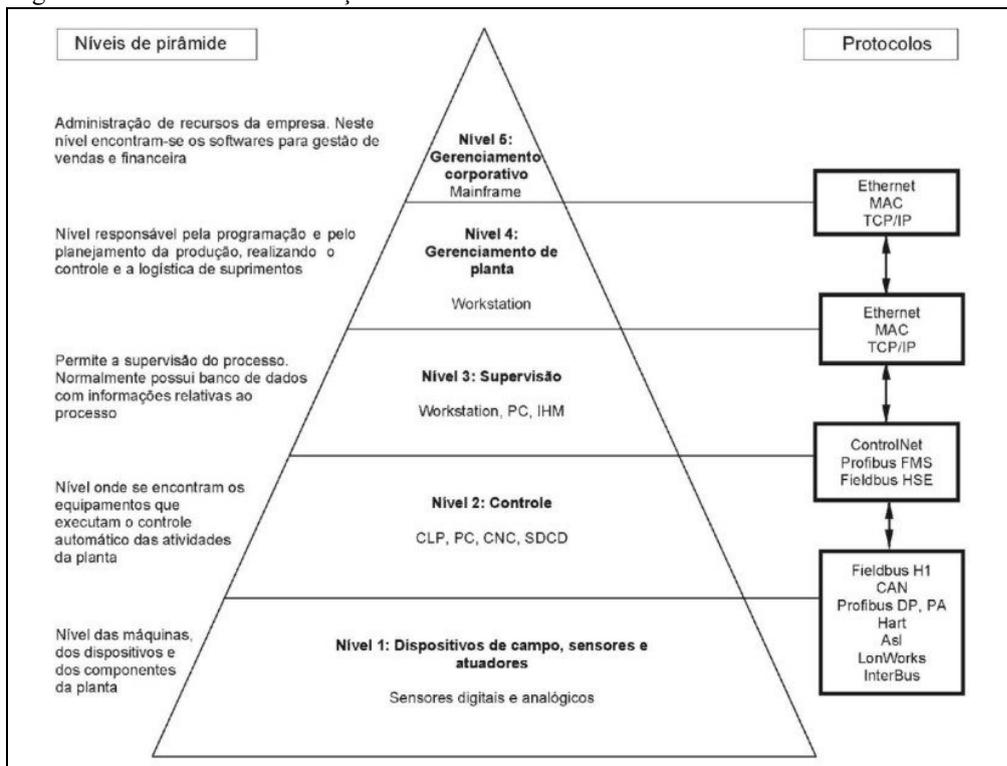
O termo automação surgiu na década de 1960 como forma de *marketing* industrial. De fato, a grande impulsionadora do desenvolvimento da automação foi a indústria com a sua necessidade de aumentar a capacidade produtiva dos processos e de

possuírem uma maior versatilidade. Somado a isso vem a questão da eficiência e segurança operacional. Para isso os dispositivos conhecidos como CLPs (Controladores Lógicos Programáveis) são elementos de grande importância.

O CLP surgiu principalmente da necessidade de indústrias que precisavam de alterações no sistema de controle de suas linhas para produzir diferentes produtos. Tal tarefa se tornava exaustiva e de alto custo com a tecnologia de relés que era utilizada no controle dos processos. Em meados da década de 1960 a *General Motors* constatou essa necessidade de se desenvolver um dispositivo que permitisse a alteração do controle de processos sem grandes intervenções de *hardware*, que fosse adequado para o ambiente industrial em termos de suportar altas temperaturas e condições severas de operação, tivessem baixo custo e alta confiabilidade.

De fato, o CLP está no nível 2 da pirâmide. Isso ilustra, dos pontos de vista cronológico e estrutural, a sua importância no desenvolvimento da automação industrial. A Figura 1 ilustra a pirâmide da automação.

Figura 1 – Pirâmide de automação



Fonte: Moraes, 2010.

A Pirâmide de Automação traz a hierarquia nos níveis de uma automação industrial. No nível 1 desta estrutura estão os dispositivos de campo. Estes são sensores e

atuadores. Sensor é o elemento que está conectado à variável de processo e mede suas variações (ROGGIA, 2016). São dispositivos que têm alguma mudança nas suas propriedades de acordo com mudanças nas condições do processo. Ainda segundo Roggia (2016), atuador é o elemento que age para alterar fisicamente uma variável manipulada.

Como exemplos de sensores pode-se citar sensores de nível, sensores de temperatura, sensores de vazão, sensores ópticos, etc. O sinal fornecido por um sensor nem sempre está adequado para ser utilizado por um dispositivo de controle. Normalmente o sinal precisa ser manipulado por um circuito de interface de modo a torná-lo adequado para o controlador. Quando esse circuito está unido ao sensor o equipamento é chamado de transdutor.

Segundo Roggia (2016), de acordo com a natureza do sinal de saída os sensores podem ser classificados em dois tipos:

- **Sensores digitais:** Apresentam em sua saída apenas dois estados distintos, ligado (*on*) ou desligado (*off*). Ou ainda, a presença ou ausência de determinada grandeza elétrica.
- **Sensores analógicos:** monitoram uma grandeza física em uma faixa contínua de valores entre os limites máximo e mínimo. Apresentam em sua saída um sinal de tensão, corrente ou resistência proporcional à grandeza física medida.

Como exemplos de atuadores pode-se citar as válvulas, os motores elétricos, aquecedores, inversores de frequência, atuadores hidráulicos, atuadores pneumáticos, etc.

No nível 2 da pirâmide encontram-se os dispositivos que realizam o controle dos processos. É onde está o CLP. O controlador lógico programável (CLP) é um tipo de computador industrial que pode ser programado para executar funções de controle. Ele é basicamente um computador digital usado no controle de máquinas, mas diferentemente de um computador pessoal, ele foi projetado para funcionar em ambiente industrial e é equipado com interfaces especiais de entrada e saída e uma linguagem de programação de controle (PETRUZELLA, 2014).

Como dito anteriormente, os controladores lógicos programáveis foram os equipamentos desenvolvidos para substituir os relés lógicos nas fábricas. A sua facilidade

de programação e alteração das rotinas sem grandes alterações de *hardware* trouxeram maior versatilidade e agilidade para as indústrias, sem falar na redução de custos.

A Figura 2 traz alguns modelos de CLPs.

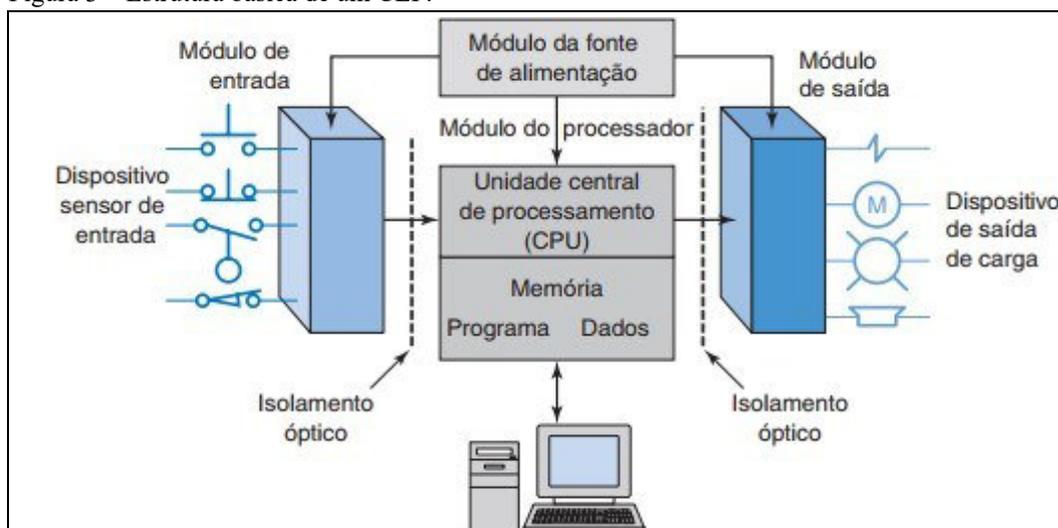
Figura 2 – Variedade de CLPs do fabricante *Rockwell Automation*.



Fonte: <https://www.rockwellautomation.com/pt-br.html>. Acesso em: 13/10/2020.

A estrutura básica de um CLP está exemplificada na Figura 3. Pode-se identificar as unidades de entrada e saída, a unidade central de processamento (*CPU*), a unidade de alimentação e a unidade de programação. Existem CLPs com entradas e saídas fixas, ou seja, um número de entradas e saída já incorporado ao equipamento e que não pode ser alterado. Isso é bastante comum em equipamentos de pequeno porte.

Figura 3 – Estrutura básica de um CLP.

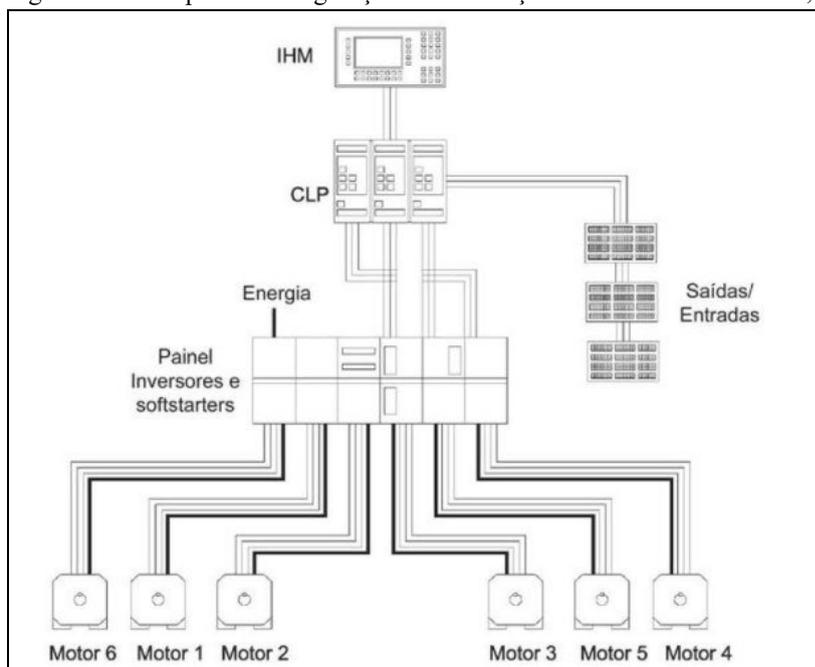


Fonte: Petruzella, 2014.

Têm como vantagem o baixo custo em relação aos dispositivos modulares, porém isso reduz a flexibilidade do equipamento. Os controladores modulares são divididos em compartimentos onde os módulos podem ser adicionados. Isso aumenta de maneira significativa as capacidades do dispositivo, permitindo um maior número de equipamentos acionados, implementação de diferentes formas de comunicação e conexão de diferentes dispositivos de E/S.

Os níveis 1 e 2 da pirâmide podem ser resumidos na Figura 4.

Figura 4 – Exemplo de configuração de automação envolvendo os níveis 1, 2 e 3.



Fonte: Moraes, 2010.

Na Figura 4, além dos níveis 1 e 2 já é apresentado o terceiro nível da pirâmide de automação através de uma IHM. A Interface Humano-Máquina é um dispositivo que tem como objetivo apresentar uma interface mais amigável do processo para os operadores. No nível 3 de automação tem-se os chamados sistemas de supervisão ou sistemas supervisórios. Nesta camada ferramentas de como índices, relatórios, bancos de dados estão presentes de modo a garantir uma visão mais ampla das operações.

De acordo com Moraes (2010), Sistemas Supervisórios são sistemas digitais de monitoração e operação da planta que gerenciam as variáveis do processo. Estas são atualizadas continuamente e podem ser guardadas em bancos de dados locais ou remotos para fins de registro histórico. Os sistemas de supervisão podem ser classificados quanto

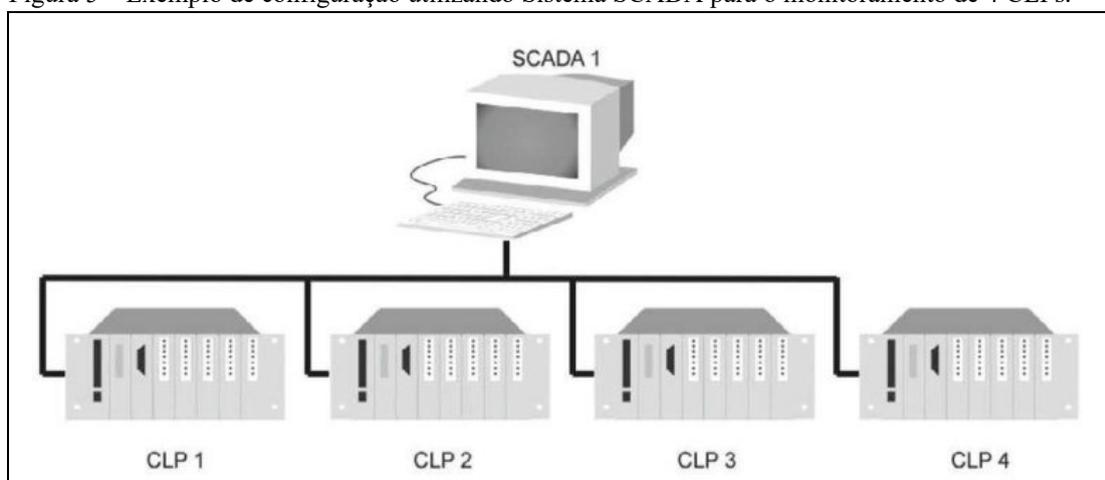
a complexidade, robustez e número de entradas e saídas monitoradas. Dois grandes grupos são conhecidos:

- IHM (Interface Homem-Máquina);
- SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition* – Aquisição de dados e Controle do Supervisório).

As IHMs são os dispositivos normalmente encontrados no “chão de fábrica” e além de ser a interface operacional para acionamento dos processos mais próxima dos operários, também, dependendo do modelo e fabricante, conta com as principais funcionalidades de um equipamento que está na terceira camada da pirâmide.

Os sistemas SCADA normalmente estão hospedados em um computador dedicado a um conjunto de processos e lidam com um volume de dados maior que as IHMs. São sistemas configuráveis, destinados à supervisão, ao controle e à aquisição de dados de plantas industriais (MORAES, 2010). A Figura 5 traz uma configuração típica que utiliza um sistema deste tipo para monitoramento:

Figura 5 – Exemplo de configuração utilizando Sistema SCADA para o monitoramento de 4 CLPs.



Fonte: Moraes, 2010.

Os níveis 4 e 5 da pirâmide são de caráter gerencial. O nível 4 estabelece o planejamento e programação das operações a nível fabril e o nível 5 a nível corporativo. Ambos trabalham com *softwares* de gestão de ativos e planejamento.

2.3 A proposta de automação e sua posição na pirâmide

A proposta de automação que serve de base para este trabalho localiza-se nos níveis 1 e 2 da pirâmide. O controle de temperatura do processo em questão é feito por um controlador de temperatura. Trata-se de um equipamento que não é um CLP, porém permite a leitura de dispositivos de entrada (sensores de temperatura, chaves ou botoeiras), executa uma sequência de comandos que pode ser configurada por um técnico responsável e age sobre o processo através de saídas que estão ligadas a atuadores. Existe no mercado uma variedade de fabricantes e modelos destes equipamentos que diferem basicamente pelo número de entradas e saídas e a quantidade de parâmetros. Alguns dispositivos são específicos para processos de resfriamento ou aquecimento enquanto outros permitem os dois tipos de situação.

O controlador de temperatura é um dispositivo específico para controle de processos térmicos e esta é mais uma diferença entre este equipamento e os controladores lógicos programáveis. O CLP tem a versatilidade de poder ser programado para qualquer processo, seja ele a regulação da temperatura de um sistema, o controle do nível de um reservatório ou sistema de posicionamento. Enquanto o controlador de temperatura só aceita um tipo de sensor (sensor de temperatura), os controladores lógicos programáveis trabalham com uma grande variedade de sensores.

Controladores de temperatura possuem um conjunto de parâmetros definidos pelo fabricante que se aplicam a sistemas térmicos e não executam funções matemáticas. Assim é possível configurá-lo de acordo com as necessidades do processo acessando esse conjunto de parâmetros fixos e não através de um programa em *ladder* ou outra linguagem usual utilizada em CLPs. Além disso, o tipo de controle realizado por esses equipamentos é do tipo *ON/OFF* com banda de histerese. Alguns fabricantes oferecem modelos que possuem controle do tipo proporcional e em seu conjunto de instruções é possível configurar os parâmetros P, I e D ou utilizar uma rotina de sintonia automatizada, *self-tuning* e *auto-tuning*, respectivamente.

2.4 Controle de processos

A atividade industrial é baseada em uma série de processos aplicados em matérias-primas. Em termos de classificação, de acordo com Petruzella (2014) existem dois tipos de operação: processos contínuos e processos em lote.

Um processo contínuo é aquele em que as matérias-primas entram por um lado do sistema e saem como produtos acabados do outro lado. O processo em si é executado continuamente. No processamento em lote, não há movimento de material de uma seção do processo para outra. Uma quantidade definida de cada uma das entradas para o processo é recebida em um lote e depois é realizada alguma operação para se obter o produto final (PETRUZELLA, 2014).

As operações mecanizadas podem ou não contar com algum tipo de controle das variáveis envolvidas. Algumas atividades menos complexas podem ocorrer com supervisão de operadores que monitoram as condições do maquinário e das variáveis. Já outras mais complexas necessitam de instrumentação e equipamentos adequados para a regulação das principais variáveis. Em termos de controle de sistemas, é necessário falar sobre sistemas que operam com malha fechada e sistemas que operam em malha aberta.

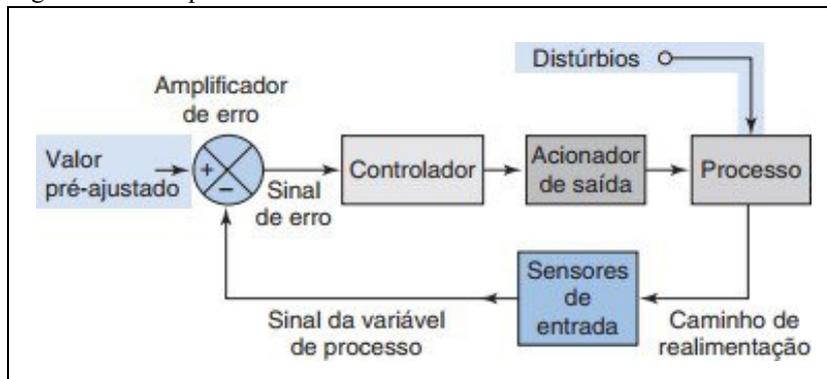
2.4.1 Malha Aberta x Malha Fechada

De acordo com Ogata (2010), em um sistema de controle em malha fechada o sinal de erro atuante, que é a diferença entre o sinal de entrada e o sinal de realimentação (que pode ser o próprio sinal de saída ou uma função de do sinal de saída e suas derivadas/integrais), realimenta o controlador de modo a minimizar o erro e acertar a saída do sistema ao valor desejado.

Segundo Petruzella (2014), um sistema de controle em malha fechada mede a saída atual do processo e a compara com a saída desejada. Os ajustes são feitos continuamente pelo sistema de controle até que a diferença entre a saída desejada e a atual fique dentro de uma tolerância pré determinada.

A Figura 6 traz um diagrama que exemplifica o sistema de controle em malha fechada:

Figura 6 – Exemplo de sistema de controle em malha fechada.



Fonte: Petruzella, 2014.

Sistema de controle em malha aberta é aquele em que o sinal de saída não exerce nenhuma ação de controle sobre o sistema. Assim, o sinal de saída não é medido e nem realimentado para comparação com a entrada. Sendo assim, para cada entrada de referência existe uma condição fixa de operação. Sem a malha de realimentação, as variações no sistema que causam desvios no valor predefinido na saída (perturbações) não são detectadas (OGATA, 2010).

A título de comparação, uma das vantagens de sistemas em malha fechada é que a realimentação faz com que o comportamento do sistema seja relativamente insensível a distúrbios externos e variações internas dos parâmetros do sistema. Isso permite a utilização de componentes mais simples e não muito precisos, o que não pode acontecer em sistema de malha aberta. No entanto, a construção de sistemas em malha fechada é mais complexa.

2.4.2 Classificação de controladores industriais

Segundo Ogata (2010), a maioria dos controladores industriais pode ser classificada, de acordo com suas ações de controle, em:

- a. Controladores de duas posições ou *ON/OFF* (ou liga/desliga).
- b. Controladores proporcionais.
- c. Controladores integrais.

- d. Controladores proporcional-integrais.
- e. Controladores proporcional-derivativos.
- f. Controladores proporcional-integral-derivativos.

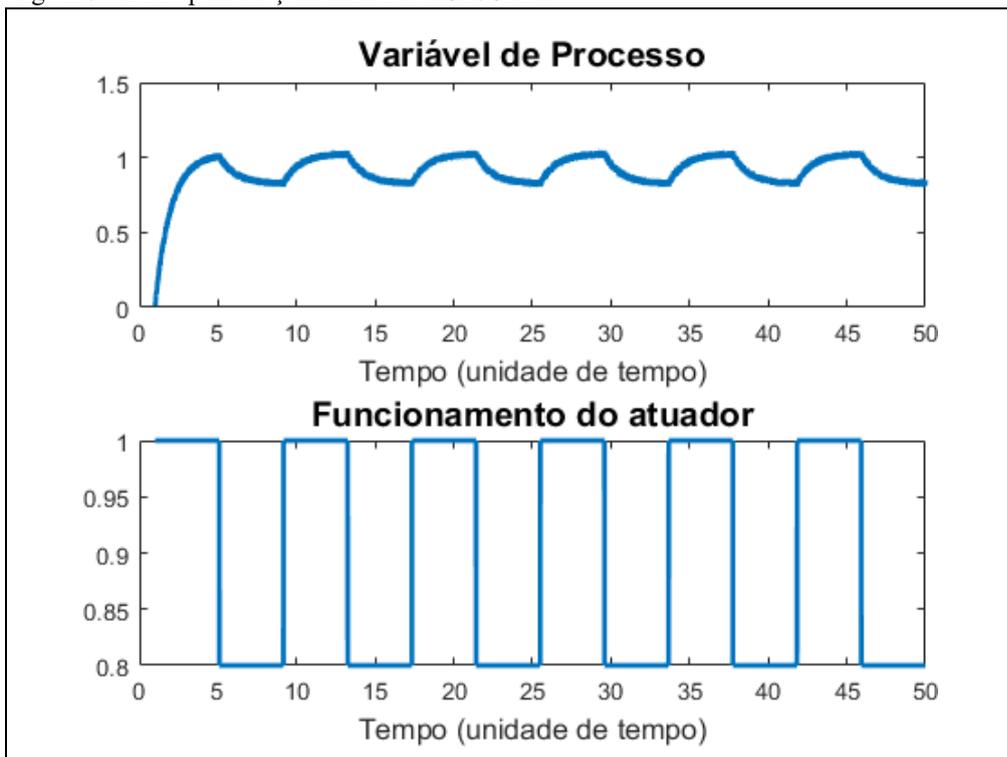
De maneira mais resumida, é comum abordar o controle *ON/OFF* e o controle PID.

2.4.2.1 Controle *ON/OFF*

No controle de duas posições o elemento atuante tem somente duas posições fixas (OGATA, 2010). De acordo com Petruzella (2014), o elemento final de controle é ligado ou desligado – um para quando o valor da variável medida for acima do valor predefinido e o outro para quando for abaixo do valor predefinido.

Trata-se de uma estratégia de controle simples, porém imprecisa. Sendo assim, é utilizado quando não há necessidade de um controle preciso. Uma banda morta ou histerese normalmente é estabelecida em torno do valor pré-definido. Esta banda geralmente é um valor ajustável que determina a faixa de erro acima ou abaixo do valor pré-ajustado que não altera a saída enquanto a variável medida estiver dentro da faixa.

A Figura 7 exemplifica o funcionamento de um sistema genérico com controlador do tipo *ON/OFF*:

Figura 7 – Exemplo de ação de controle *ON/OFF*.

Fonte: Elaborada pelo autor.

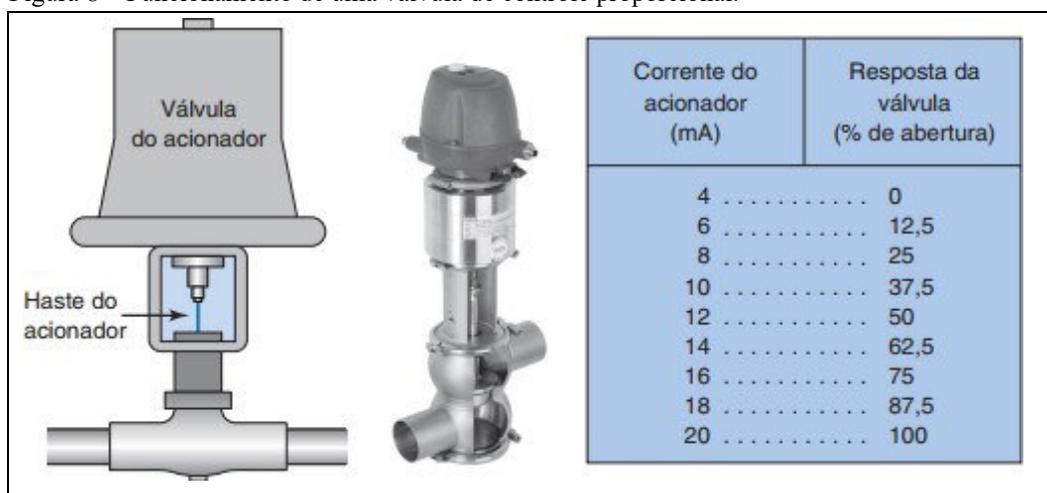
No gráfico superior da Figura 7 observa-se o comportamento da variável medida em um processo. No gráfico inferior tem-se o funcionamento do atuador, onde “1” significa que o atuador está ligado e “0” significa que o atuador está desligado. Na ação de controle do tipo *ON/OFF* exemplificada na figura, quando o elemento atuante é acionado observa-se que o valor da variável medida começa a aumentar. Quando o atuador é desligado o valor da variável monitorada começa a cair. Não existe uma situação intermediária para o elemento que atua sobre o processo, ou seja, ou ele está ligado ou está desligado.

2.4.2.2 Controle PID

Optou-se por reunir neste tópico a discussão acerca das estratégias de controle proporcional, integral e derivativa (PID). É comum encontrar na literatura diversas abordagens sobre estes algoritmos, seja falando separadamente de cada ação ou reunindo numa única seção os três tipos. Isso ocorre porque, como dito na seção 2.4.2.1, é possível se trabalhar com associações destes controladores.

Segundo Petruzella (2014), os controladores proporcionais são projetados para eliminar a oscilação ou deslocamento cíclico associado ao controle liga/desliga, além de permitirem que o elemento final de controle tome posições intermediárias entre ligado e desligado. Normalmente na implementação de um controlador deste tipo o atuador deve permitir a operação além das situações *ON/OFF*. Tomando como exemplo uma válvula para controle do fluxo de um determinado fluido em um processo, para implementação de uma ação de controle proporcional seria necessária a utilização de uma válvula proporcional. Trata-se de uma válvula que pode operar em posições intermediárias além das posições aberta/fechada. A Figura 8 ilustra a operação de uma válvula desse tipo:

Figura 8 – Funcionamento de uma válvula de controle proporcional.



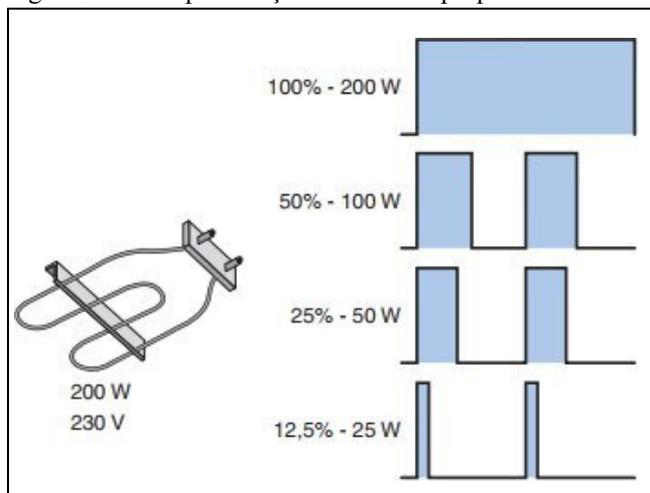
Fonte: Petruzella, 2014.

Para este exemplo de válvula, o acionador recebe um sinal analógico de corrente em uma faixa de 4 a 20mA. O valor mínimo de 4mA corresponde à válvula totalmente fechada (0% de abertura) e o valor de 20mA corresponde à válvula totalmente aberta (100% de abertura). Este é um exemplo de sinal analógico utilizado em atuadores dinâmicos. Utilizando-se um valor mínimo de 4mA é possível detectar uma falha no sistema. Em uma situação, por exemplo, em que o cabeamento que transmite o sinal para o atuador esteja rompido, tem-se uma corrente de 0mA. Caso a faixa de valores utilizada fosse de 0 a 20mA, não haveria distinção entre o valor enviado para fechar totalmente a válvula e uma condição de falha.

Caso o atuador ou o dispositivo de controle não opere com sinais analógicos, ainda é possível obter uma ação de controle proporcional através de chaveamento liga/desliga. Esta proporcionalidade no tempo, conhecida como modulação por largura

de pulso, varia a taxa de chaveamento liga/desliga (PETRUZELLA, 2014). A Figura 9 traz o exemplo de um elemento de aquecimento recebendo ação de controle proporcional através de modulação por largura de pulso *ON/OFF*:

Figura 9 – Exemplo de ação de controle proporcional utilizando tempo de chaveamento.



Fonte: Petruzella, 2014.

Como dito anteriormente, alguns fabricantes de controladores de temperatura além do controle do tipo *ON/OFF* com banda de histerese oferecem em seus equipamentos a possibilidade de se implementar um controle proporcional. Sendo as saídas destes dispositivos do tipo a relé, a ação proporcional acontece através de lógica de tempo de chaveamento.

O controle proporcional ainda não é suficiente para o controle de todos os tipos de processo. Esta ação de controle pode levar a um erro de regime permanente conhecido como sinal de desvio. O erro de regime permanente é a diferença entre o valor obtido do controlador e o valor pré-ajustado que resulta em um sinal de desvio. Assim, geralmente a ação de controle proporcional é utilizada juntamente com uma ação de controle integral ou com uma ação de controle derivativa (PETRUZELLA, 2014).

A ação integral responde ao tamanho e ao tempo de sinal de erro. Esta ação faz com que a saída mude, e continue a mudar, até que não exista mais erro. Esta ação elimina o erro de desvio e seu valor é medido como minutos por repetição, que é a relação entre variações e tempo (PETRUZELLA, 2014).

A ação derivativa responde à velocidade do sinal de erro. Ou seja, quanto maior for o sinal de erro, maior será o rendimento da correção na saída. Esta ação é medida em termos do tempo. As combinações entre estas ações de controle resultam em

controladores bastante implementados na indústria, que são: o controlador proporcional-integrativo (PI), o controlador o proporcional-derivativo (PD) e o controlador proporcional-integrativo-derivativo (PID).

Na solução de automação proposta para o processo abordado neste trabalho, o controlador de temperatura foi configurado com uma ação de controle do tipo *ON/OFF* com banda de histerese. O elemento final de controle é uma válvula do tipo *ON/OFF* acoplada a um atuador pneumático com válvula solenoide.

2.5 Conclusão

Este capítulo trouxe um apanhado geral sobre conceitos de automação industrial relevantes para os próximos capítulos deste trabalho. Foi abordada evolução da automação nas fábricas e os níveis que ela pode atingir nos processos através da pirâmide de automação. Cada faixa ou base da pirâmide foi discutida e exemplificada.

Ainda foi abordado o controle dos processos industriais. Foi discutida a classificação dos controladores utilizados nos ambientes fabris, bem como definidos os conceitos de malha aberta e malha fechada e as principais ações de controle aplicada na indústria.

3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

3.1 Introdução

Este capítulo descreve o sistema para o qual foi proposta a melhoria técnica, trazendo os detalhes da operação antes e depois da intervenção. Com o objetivo de contextualizar o leitor, é apresentado um breve resumo do processo de secagem na indústria alimentícia, mais especificamente para fábricas que trabalham com grãos.

Serão vistas as características operacionais de uma estufa para grãos, os tipos, seus principais componentes, sua função na cadeia produtiva e a descrição dos equipamentos usados na automação do processo de estufagem.

3.2 O processo de secagem de grãos na indústria

De maneira objetiva, secagem é a operação que tem como finalidade a redução do teor de umidade do produto a um nível adequado para armazenamento ou como requisito para uma etapa do processo (ZONTA, 2011). Além disso, esse processo também tem a função de reduzir a atividade de microrganismos que podem comprometer as características do produto.

Quando ocorre na chegada de matéria prima, por exemplo, a diminuição da umidade tem por objetivo garantir um armazenamento seguro e dentro dos padrões estabelecidos pelo planejamento. Quando utilizado ao longo do processamento do material, a redução do teor de umidade do produto ocorre através do processo de estufagem. Os objetivos desta etapa são: reduzir a umidade das amêndoas para valores numa faixa de 2,5% a 3%, eliminar a presença de microrganismos e compensar futuras elevações de umidade ao longo do processo. Ao final do processo produtivo, a umidade com a qual as amêndoas podem ser embaladas deve estar na faixa de 3% a 5% (*SPECIFICATIONS FOR CASHEW KERNELS*, 2012).

A estufagem é um ponto crítico do processo, uma vez que a umidade do produto influencia diretamente na etapa seguinte, a despelliculagem das amêndoas. A

redução da umidade, além dos objetivos citados no parágrafo anterior, também tem como objetivo tornar a película da amêndoa frágil para que a etapa de despeliculagem atinja os padrões de produção. O fato de ser um ponto crítico do processo significa que erros nesta etapa representam sérios problemas para a produção e com poucas possibilidades de resolução.

O binômio tempo-temperatura é a chave do processo. Características fundamentais da amêndoa de castanha de caju como cor, crocância e sabor são definidas na estufagem. Uma combinação errada de tempo e temperatura do produto no interior das salas de estufagem causam o escurecimento do produto, alterações de sabor e qualidade. Erros que causem o escurecimento do produto não podem ser resolvidos nas etapas seguintes e significa vendê-lo a um valor inferior ao do produto que sai do processo sem ser queimado.

A secagem pode ocorrer de forma natural ou artificial. A escolha do método de secagem varia de acordo com a estratégia e o planejamento da empresa, bem como do tipo de material que vai ser processado. A secagem natural é baseada na ação do sol e do vento e normalmente é usada na matéria prima, onde são utilizadas estruturas chamadas de secadores.

Os secadores são grandes áreas semiabertas onde o material que deve perder umidade é acomodado. São semelhantes a estufas agrícolas e normalmente possuem uma cobertura de filme plástico fixada com estruturas metálicas. A figura 10 exemplifica um secador natural:

Figura 10 – Exemplo de uma estrutura de secagem natural para grãos.



Fonte: <https://www.cafepoint.com.br/noticias/tecnicas-de-producao>. Acesso em: 15/10/2020.

Em algumas indústrias o processo de secagem da matéria prima pode ocorrer por meio de secadores artificiais, mas não é o objetivo deste tópico avaliar onde os tipos e estratégias de secagem são usados.

O processo de secagem artificial é assim chamado por recorrer ao auxílio de alternativas mecânicas, elétricas ou eletrônicas para reduzir a umidade do produto. Neste processo a fonte de calor é variável. Pode ser usado um fluido com temperatura elevada que atravessa uma tubulação ou incide diretamente sobre o material ou resistências elétricas. O ar é normalmente forçado a passar pelo produto com o uso de ventiladores industriais.

Na indústria dois equipamentos se destacam nesta operação: as estufas dinâmicas e as estufas estacionárias. A seguir será apresentado um breve resumo sobre cada um destes equipamentos.

3.2.1 Estufas Contínuas

A característica das estufas contínuas na secagem de materiais é que o produto não fica parado. O material é transportado ao longo de compartimentos e para cada estágio existe uma temperatura e um tempo de permanência do produto. Normalmente esse transporte é feito ao longo de esteiras que atravessam cada estágio da estrutura.

O produto normalmente é inserido no equipamento por meio de elevadores que derramam o produto na entrada da estufa. O calor flui no interior da estrutura por meio de ventilação forçada realizada por ventiladores. A Figura 11 ilustra um modelo de estufa contínua:

Figura 11 – Modelo de estufa contínua do fabricante Grantham.



Fonte: <http://www.grantham.com.br/>. Acesso em: 08/10/2020.

3.2.2 Estufas Estacionárias

A estufa estacionária para secagem de grãos é basicamente uma sala com um ou dois compartimentos para inserção do material a ser processado. O produto é usualmente inserido em carros com várias bandejas dispostas verticalmente e com espaçamento fixo. O Equipamento conta com um sistema de aquecimento que pode usar fontes como gás, vapor saturado, resistência elétrica ou outra tecnologia de aquecimento. A Figura 12 ilustra uma estufa genérica utilizada em amêndoas de castanhas de caju:

Figura 12 – Modelo de estufa estacionária do fabricante Mekong



Fonte: <http://www.mekongmachine.com/>. Acesso em: 08/10/2020.

Para um sistema deste tipo espera-se que exista algum sistema de controle de temperatura, afinal alguns requisitos de qualidade e de operação precisam ser alcançados. A estufa que foi usada no desenvolvimento deste trabalho inicialmente não contava com nenhum tipo de controle.

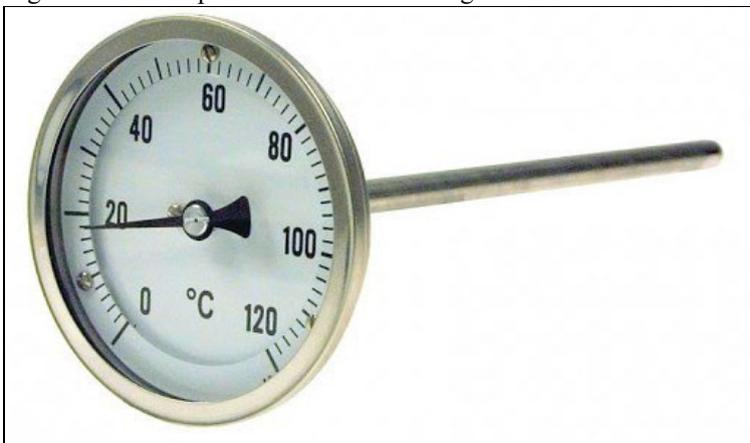
Este trabalho foi desenvolvido em uma estufa estacionária. O equipamento possui dois compartimentos. O aquecimento das salas é feito por serpentinas localizadas no topo de cada sala. Essas serpentinas são percorridas por vapor saturado produzido por uma caldeira industrial. Além disso, o sistema conta com três ventiladores fixados na parte superior externa da estufa. Esses ventiladores são constituídos de motores de indução trifásicos com um conjunto de hélices acopladas a seus eixos e promovem a circulação do ar no interior da estrutura.

Entre os dois compartimentos da estufa existe um termômetro bimetálico analógico para verificação da temperatura pelo operador. Este equipamento é usado somente para leitura visual e não é integrado a nenhum dispositivo que regule a temperatura das salas.

O termômetro possui uma haste com o dispositivo sensor. É constituído de um feixe bimetálico em forma de espiral com uma das extremidades fixa na dilatação e com giro proporcional a variação da temperatura registrada. O acoplamento à estrutura da estufa é feito através de rosca e a haste do dispositivo fica inserida no interior da região

que fica entre os compartimentos. O visor de vidro fica do lado externo da estrutura. A Figura 13 mostra um exemplo de termômetro analógico industrial:

Figura 13 – Exemplo de termômetro analógico industrial



Fonte: <http://www.imperialvalvulas.com.br/>. Acesso em: 08/10/2020.

3.3 Operação

O material é inserido na estufa por meio dos carros e o vapor é liberado para percorrer as serpentinas através de válvulas localizadas na parte traseira dos compartimentos. O requisito de qualidade estabelece que o material seja submetido a uma temperatura de 64°C durante 4 horas. O equipamento em seu funcionamento padrão (sem anomalias ou defeitos) alcança esta temperatura facilmente. Nestas condições a estufa chega a temperaturas na faixa de 80°C a 85°C. No entanto, temperaturas muito elevadas afetam negativamente o produto e o operador precisa ficar atento a isso. Sendo assim, ocorre o monitoramento da temperatura das estufas a cada hora e, dependendo do valor observado, o operador regula gradualmente a válvula que permite a entrada de vapor, reduzindo assim a fonte de calor e fazendo com que a temperatura diminua ou estabilize.

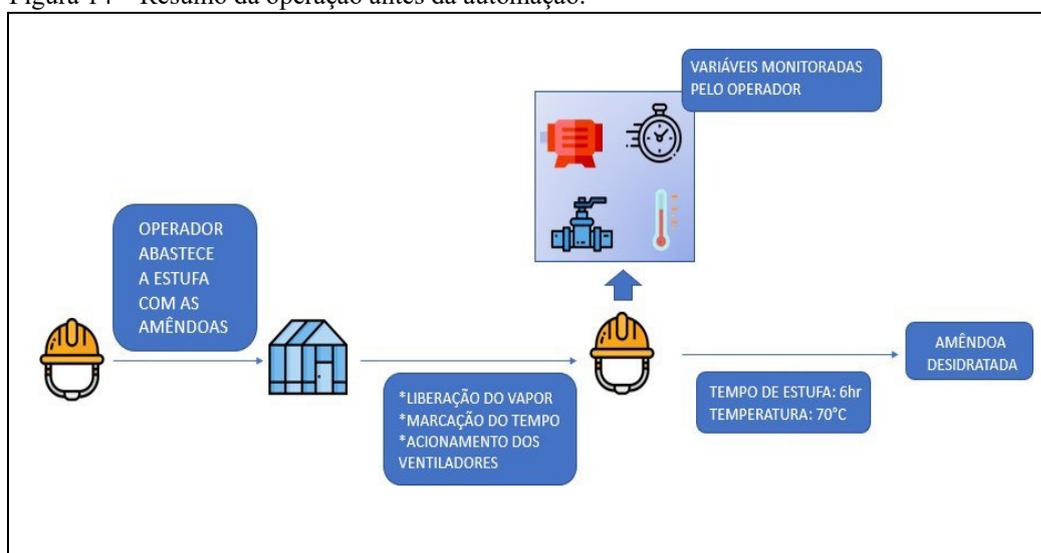
Trata-se de uma operação bastante imprecisa e suscetível a falhas. Não existe precisão na operação e desta forma tem-se uma baixa confiabilidade dos resultados esperados. Dos dois requisitos desta etapa do processo de beneficiamento, somente a eliminação de microrganismos é totalmente garantida. A preparação adequada do produto para as próximas etapas da produção e a garantia de alguns requisitos de mercado do produto ficam comprometidas.

A proposta de melhoria consiste em uma solução de automação para uma das estufas do setor destinado ao processo de secagem. Baseado nos requisitos de operação, que envolvem basicamente tempo e temperatura, optou-se por uma solução utilizando um dispositivo controlador de temperatura.

3.4 Proposta de automação

Em resumo, pode-se representar a operação da estufa piloto antes da intervenção de um sistema com automação na Figura 14:

Figura 14 – Resumo da operação antes da automação.



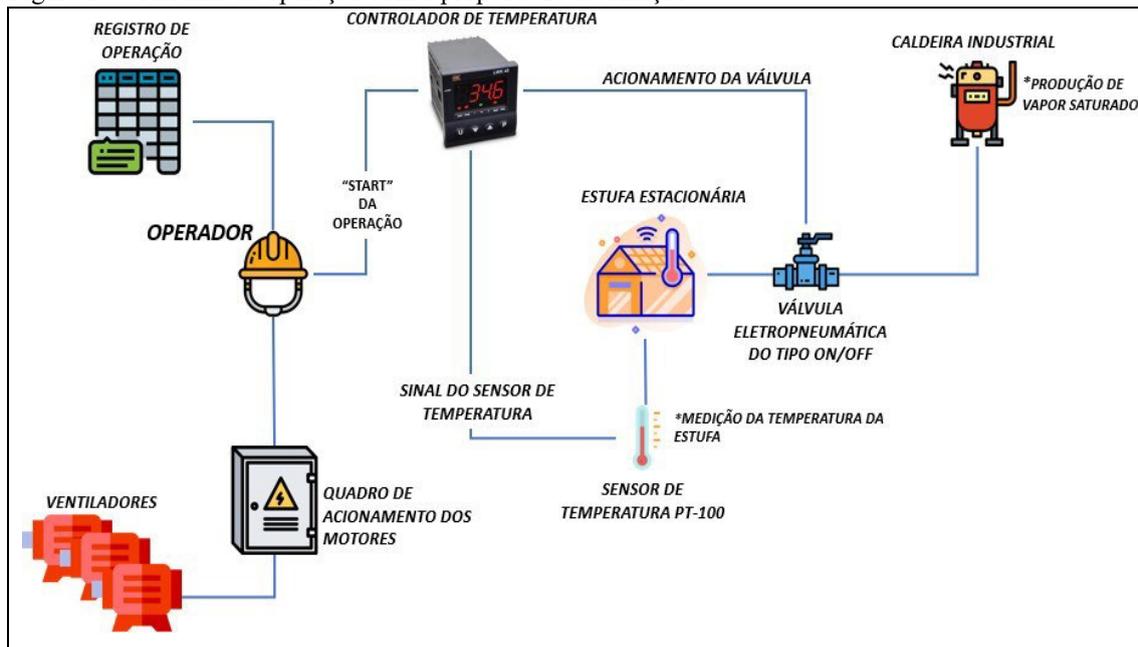
Fonte: Elaborada pelo autor.

A solução de automação consiste em utilizar um controlador de temperatura para atuar sobre o fluxo de vapor nas serpentinas da estufa. A leitura da temperatura das salas é feita através de um sensor de temperatura do tipo PT-100 cujo sinal é lido pelo controlador. O atuador é uma válvula eletropneumática do tipo *ON/OFF* instalada na tubulação de entrada de vapor da estufa que é acionada pelo controlador bloqueando ou liberando totalmente a passagem de vapor. A caldeira produz vapor exclusivamente para o setor de estufagem e a produção é controlada pelos operadores da caldeira. O fornecimento de vapor é feito através de um circuito fechado, onde existe uma tubulação principal que sai da caldeira e vai até o setor do processo. Já no setor, deriva-se da tubulação principal a alimentação de vapor de cada estufa. A saída de cada serpentina é

ligada a uma tubulação de retorno que fecha o circuito de distribuição de vapor. A partir da demanda de vapor do setor, os operadores da caldeira aumentam ou diminuem a quantidade de combustível na fornalha para regular a pressão do vapor produzido. A seguir tem-se uma breve explanação sobre os componentes da proposta.

A Figura 15 é um resumo da solução sugerida:

Figura 15 – Resumo da operação com a proposta de automação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4.1 Controlador de temperatura

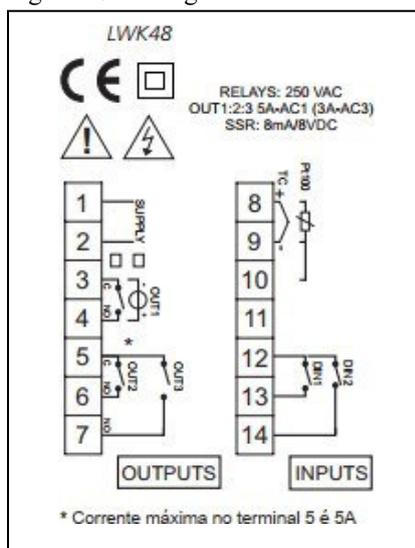
O controlador de temperatura é um dispositivo bastante presente nas indústrias quando se precisa regular a temperatura de um processo com uma solução de baixo custo. Existem diversos modelos disponíveis no mercado, porém todos apresentam as mesmas funções básicas e, dependendo do modelo, alguns incrementos como temporizadores, mais entradas e saídas digitais, interface de comunicação, etc.

O princípio de funcionamento consiste em receber o sinal de um dispositivo de leitura de temperatura (sensor de temperatura). Atualmente existem diversos modelos de sensores de temperatura, a saber: PT-100 (termoresistências RTD), termopares, sensor infravermelho, etc. O sensor é o equipamento sensível à variação de temperatura no processo e a partir do sinal deste equipamento o controlador de temperatura executa ação de controle. Normalmente é possível encontrar nestes equipamentos três tipos de controle:

controle *ON/OFF*, controle proporcional e controle PID. Sendo assim, a partir do sinal de temperatura ambiente e da configuração do modo de controle, estes dispositivos conseguem regular a temperatura dos mais variados processos na indústria e em vários outros segmentos como sistemas de fornos, câmaras frigoríficas, etc.

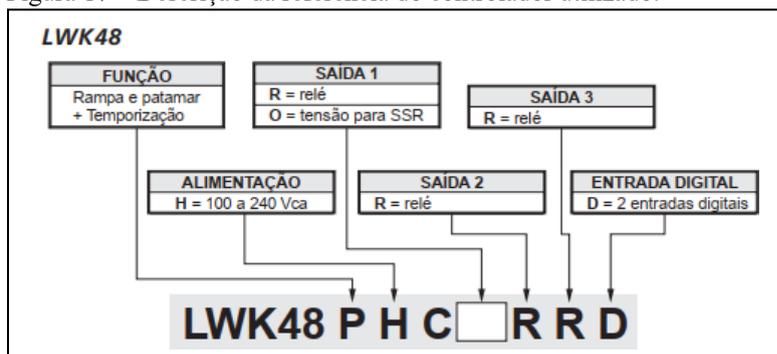
Para o processo em que o trabalho se baseia, optou-se por escolher o controlador de temperatura modelo **LK48PHCRRRD**. As Figuras 16 e 17 ilustram a pinagem do dispositivo e suas funções:

Figura 16 – Pinagem do controlador modelo LK48PHCRRRD.



Fonte: Manual de instruções da família de controladores LK48 do fabricante Coel.

Figura 17 – Descrição da referência do controlador utilizado.



Fonte: Manual de instruções da família de controladores LK48 do fabricante Coel.

O controlador possui 3 saídas a relé, duas entradas digitais e função de temporização. O processo a ser controlado trabalha com tempo e temperatura de estufagem, por isso a escolha de um modelo contendo um temporizador interno.

No processo, utilizou-se uma entrada digital do equipamento acionada por botoeira de pulso para iniciar a temporização. Uma saída digital atua sobre a válvula de controle que libera ou bloqueia o fluxo de vapor nas serpentinas. Uma segunda saída do dispositivo é utilizada vinculado ao temporizador de forma que quando o tempo pré-definido seja cumprido o processo seja interrompido a só seja possível reiniciá-lo reiniciando a contagem. Estas configurações são parametrizadas através da interface do controlador. A Figura 18 ilustra o modelo de controlador e sua interface com display de sete segmentos:

Figura 18 – Controlador de temperatura modelo LWK48 do fabricante Coel.



Fonte: <https://www.coel.com.br/>. Acesso em: 15/10/2020.

O equipamento pode ser usado como dispositivo de aquecimento ou resfriamento. Isto é definido no momento da configuração de suas saídas. Para a aplicação das estufas, sua saída principal foi configurada com saída de aquecimento. Uma vez que pelo menos uma saída do controlador é definida como saída de aquecimento ou resfriamento, o grupo de parâmetros de controle passa a estar disponível para configuração. Este dispositivo apresenta dois tipos de controle: controle PID para aquecimento ou resfriamento e controle *ON/OFF* com histerese assimétrica ou simétrica.

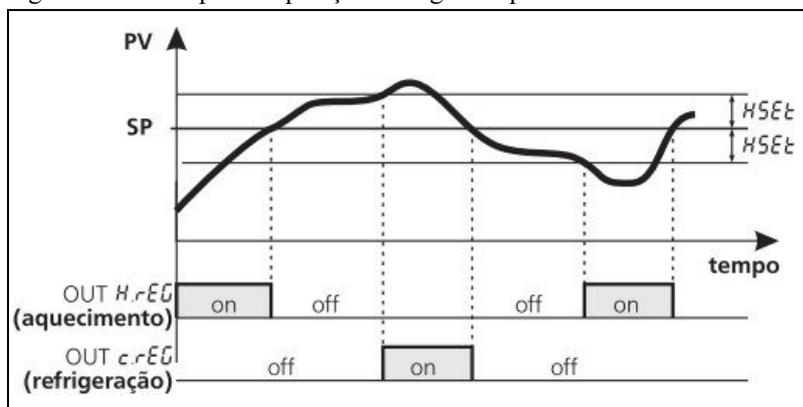
Na atual aplicação, foi escolhido o controle *ON/OFF* com banda de histerese. Foram conduzidos ensaios com histerese simétrica e assimétrica cujos resultados encontram-se no capítulo 4 deste trabalho.

3.4.2 Histerese

Histerese ou banda morta é um valor ajustável que determina a faixa de erro acima ou abaixo do valor pré-ajustado que não produzirá uma saída enquanto a variável de processo estiver dentro do limite ajustado (PETRUZELLA, 2014). Trata-se de um termo bastante comum em instrumentação e processos. Particularmente, em sistemas de temperatura ela vai representar o atraso no acionamento de um atuador, providenciando uma faixa de ajuste da variável controlada. O controle *ON/OFF* basicamente liga e desliga o atuador baseado no valor de referência definido para a temperatura do processo. Se o sistema está com a temperatura abaixo do valor de referência, a saída é acionada e a temperatura sobe até chegar no valor definido para a temperatura do processo. A partir deste ponto, o atuador pode ser desligado exatamente quando a temperatura atingir o valor de referência ou quando atingir o valor de referência somado a um valor de histerese. Em uma configuração de controle com histerese, a depender se foi configurada como simétrica ou assimétrica, o atuador ainda fica acionado em um intervalo que corresponde ao valor de referência somado ao valor da histerese que foi configurado no controlador.

Quando é definida uma histerese assimétrica a faixa de ajuste corresponde ao intervalo ($VR - \text{Histerese}$, $VR + \text{Histerese}$), onde VR representa o valor de referência. Configurando-se a histerese como assimétrica, o intervalo fica ($VR - \text{Histerese}$, VR). A Figura 19 mostra a operação de um sistema de temperatura configurado com controle *ON/OFF* e histerese assimétrica. No gráfico, *SP* significa *SET POINT*.

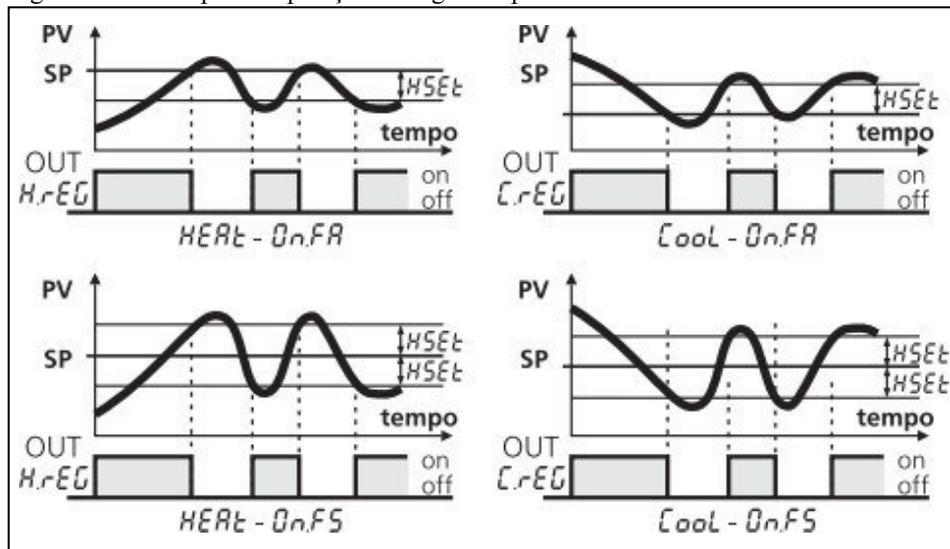
Figura 19 – Exemplo de operação configurada para controle *ON/OFF* e histerese simétrica.



Fonte: Manual de instruções da família de controladores LWK48 do fabricante Coel.

Para uma operação configurada com controle do tipo *ON/OFF* e histerese assimétrica, a Figura 20 traz as possíveis formas de se parametrizar a operação:

Figura 20 – Exemplo de operação configurada para controle *ON/OFF* e histerese assimétrica.



Fonte: Manual de instruções da família de controladores LWK48 do fabricante Coel.

3.4.3 Atuador

Atuador é o elemento que atua sobre uma variável do processo. Ele trabalha convertendo energia elétrica, hidráulica ou pneumática em energia mecânica. A depender da operação, têm-se atuadores como válvulas, motores elétricos, motores hidráulicos, cilindros, etc.

No processo de estufagem analisado, o aquecimento da estufa ocorre pela passagem de vapor saturado através das serpentinas na parte superior das salas. O operador do processo já modifica a temperatura de operação das salas abrindo ou fechando as válvulas que liberam vapor para cada estufa. Sendo assim, decidiu-se utilizar para automação do processo um atuador pneumático para realizar a abertura e fechamento da válvula. A escolha de um equipamento pneumático foi uma particularidade do projeto, tendo em vista que no setor em que as estufas se encontram existia rede de ar comprimido e era relativamente simples criar uma derivação para alimentar esse tipo de acionamento para válvulas. Outro ponto importante avaliado em relação a outro tipo de acionamento da válvula foi a robustez do atuador pneumático.

Sendo assim, não é uma condição para uma automação desse tipo que seja utilizado um atuador pneumático.

3.4.4 Válvulas Industriais

Válvulas são dispositivos com a função de estabelecer, controlar ou interromper o fluxo em alguma tubulação. Na automação de processos industriais, dois tipos de válvulas são os mais comuns: as válvulas de bloqueio e as válvulas de regulagem (ou válvula proporcional).

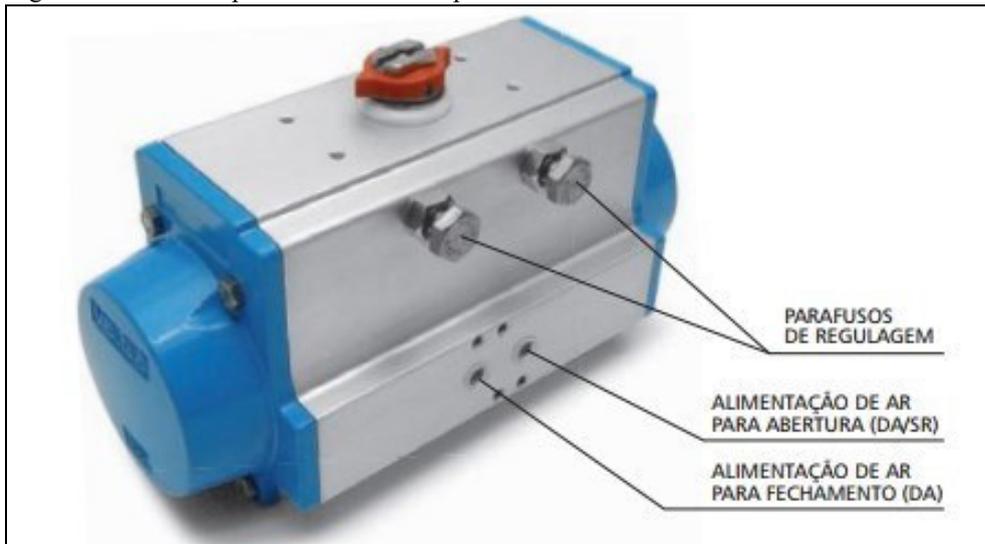
As válvulas de bloqueio estabelecem ou interrompem o fluxo em uma tubulação. São equipamentos que operam totalmente abertos ou totalmente fechados. O diâmetro nominal costuma ser o mesmo da tubulação. Já as válvulas de regulagem são utilizadas para controlar o fluxo e podem operar em qualquer posição de fechamento parcial. Para o processo em questão, foi escolhida uma válvula de bloqueio do tipo globo.

Válvulas de bloqueio normalmente são operadas manualmente. É comum em algumas situações ser feita uma “regulagem” por parte dos operadores posicionando a alavanca de abertura da válvula em posições intermediárias, mas não é esse o uso correto. Para automação da operação de uma válvula são usados atuadores. Tratando-se de válvulas, estes dispositivos podem ser elétricos, pneumáticos ou hidráulicos. Na aplicação atual, optou-se pela utilização de um atuador pneumático acionado por uma válvula solenoide.

O atuador fica acoplado à haste da válvula e substitui a alavanca que fazia a abertura ou fechamento. Independente do princípio de operação, este equipamento recebe o acionamento e converte a energia em movimento para realizar a abertura da válvula.

O atuador pneumático escolhido é acionado por uma válvula solenoide de 24VDC. A Válvula solenoide é um dispositivo eletromecânico controlado por corrente elétrica que atravessa uma bobina. Quando a bobina é energizada um campo magnético é criado fazendo com que um êmbolo dentro da bobina se mova. Dependendo do desenho da válvula, o êmbolo irá abri-la ou fechá-la. A Figura 21 ilustra um modelo de atuador pneumático:

Figura 21 – Atuador pneumático rotativo para válvulas fabricante MGA

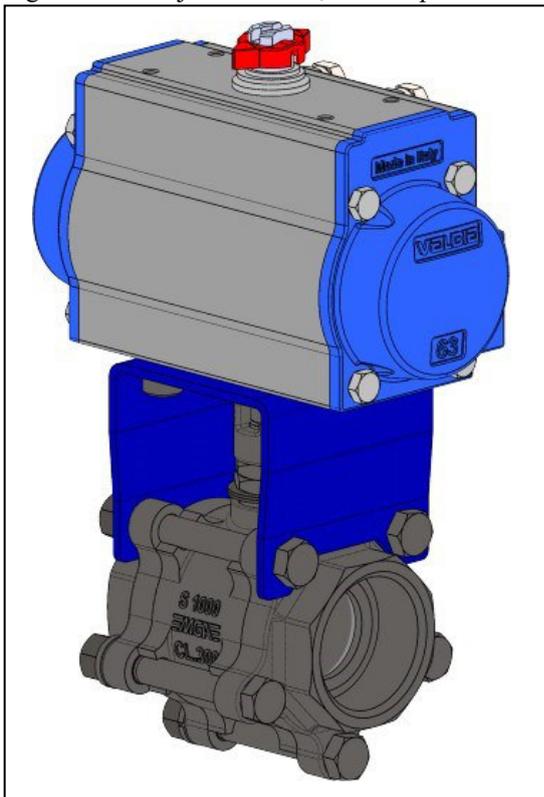


Fonte: Catálogo de válvulas fabricante MGA.

O atuador pneumático pode contar com um acessório que fica acoplado na sua parte superior para indicação da posição da válvula. A válvula solenoide, dependendo do fabricante, normalmente pode ser encontrada acoplada ao corpo do atuador ou posicionada numa derivação da tubulação de ar comprimido e ligada ao atuador por meio de mangueiras de ar comprimido.

A Figura 22 mostra o conjunto completo de válvula, atuador pneumático, válvula solenoide e indicador de posição utilizados no processo:

Figura 22 – Conjunto válvula, atuador pneumático, válvula solenoide e indicador de posição.



Fonte: Catálogo de válvulas fabricante MGA.

Foi especificada uma válvula com base nas condições do vapor e na seção da tubulação. A estufa possui dois compartimentos cada um com uma serpentina na parte superior da sala. A seção da tubulação é ½” e o fluxo é controlado por uma válvula de acionamento manual na parte exterior traseira da sala. Sendo assim, decidiu-se utilizar uma válvula de esfera tripartida com diâmetro de 1” e a partir desse registro distribuir para as duas salas. As válvulas manuais já existentes ficam sempre na posição aberta e o controle é feito na válvula de 1”.

A Tabela 1 traz a especificação do conjunto válvula, atuador pneumático e solenoide utilizados:

Tabela 1 - Especificação do conjunto válvula, atuador pneumático e solenoide utilizados no processo.

Item	Descrição
Válvula de esfera	Válvula de esfera tripartida classe 300 BSI/ montagem flutuante/ passagem plena/ acionamento pneumático por atuador simples ação RAT com entrada de ar para acionamento 6 Bar / válvula solenoide 3/2 vias / Diâmetro nominal de 1”.

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4.5 Sensor de temperatura

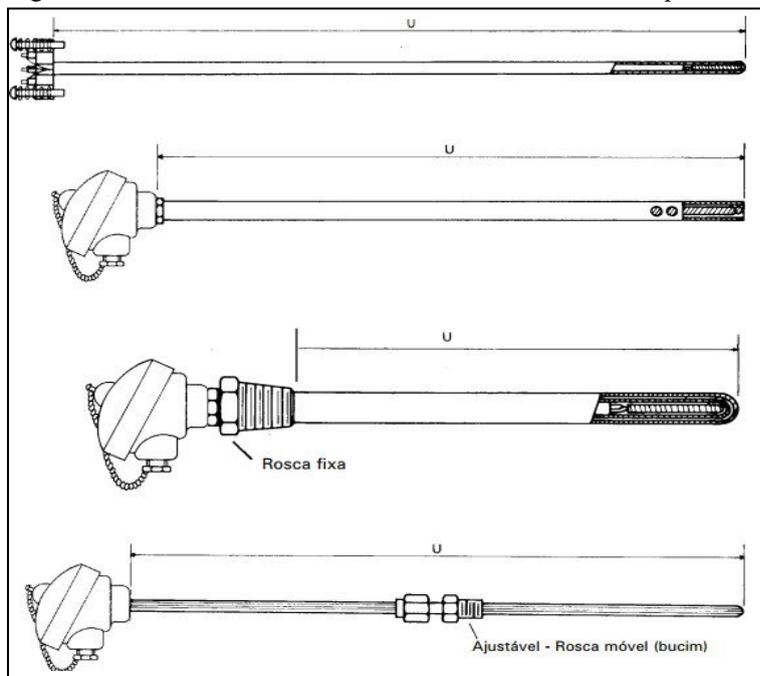
O controlador de temperatura utilizado permite a conexão de vários tipos de sensores de temperatura, tais como: termopares, sensor infravermelho e termorresistência RTD (PT-100). Dadas a condições do processo a ser controlado, o sensor de temperatura adotado foi o PT-100.

Os bulbos de resistência são sensores de temperatura que operam baseados no princípio de variação da resistividade elétrica de um material em função da temperatura. As principais características são a alta estabilidade térmica e relação resistência-temperatura bastante linear, além de um sinal elétrico de saída alto. A seguir foram listadas algumas características técnicas deste equipamento:

- Resistência nominal de 100 Ohms a 0°C;
- Faixa de medida: níquel (-60°C a +150°C) / platina (-220°C a 850°C);
- Tempo de resposta: 5s;
- Proteção: o elemento sensor é montado em uma capa de aço inox.

A Figura 23 mostra alguns modelos de sensores do tipo PT-100 com variações na forma construtiva:

Figura 23 - Diferentes modelos construtivos de sensores do tipo PT-100.



Fonte: Manual de sensores de temperatura do fabricante NAKA.

Para evitar erros de medição é importante ficar atento à distância do sensor ao elemento de controle. A resistência dos cabos e interferências eletromagnéticas podem causar desvios no valor real da temperatura. O cabeamento para o sensor deve ser passado em eletroduto individualizado para instrumentação e não junto com condutores que alimentam motores elétricos ou outras cargas de maior potência. No projeto, o sensor escolhido tem a especificação resumida na Tabela 2 a seguir:

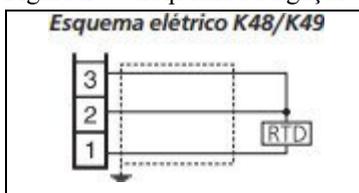
Tabela 2 - Especificação do sensor de temperatura utilizado no processo.

Item	Descrição
Sensor de temperatura	PT100<100°C / Haste de 6 x 200 mm / Rosca ¼" NPT / cabeçote grande

Fonte: Elaborada pelo autor.

A conexão do sensor ao controlador de temperatura é ilustrada na Figura 24.

Figura 24 – Esquema de ligação do sensor PT-100 ao controlador.



Fonte: Manual de instruções da família de controladores LWK48 do fabricante Coel.

O posicionamento do sensor na estufa foi escolhido de forma estratégica. Entre as duas salas existe um vão central. No topo deste espaço ficam localizados os três ventiladores que promovem a circulação do ar na estufa. As laterais das salas são feitas de chapas de aço perfuradas e assim o ar consegue circular pelo material ao ser movimentado no vão central.

O sensor fica posicionado no centro da estufa, assim foi confeccionado uma espécie de poço de aço inox para que o sensor ficasse fixado no fundo desta peça. Este poço nada mais é do que um cilindro oco em que é possível encaixar o sensor na tampa inferior e em seguida fixá-lo na estrutura da estufa. O objetivo é posicionar o PT-100 verticalmente próximo ao centro, uma vez que a sua haste mede apenas 300mm. A altura do poço construído é de 500mm. A estufa possui 2,2m de altura, o que significa que a ponta do sensor fica a 1,4m do piso das salas. Em termos da largura da sala, a posição também foi escolhida de modo a garantir a centralização.

3.5 Operação após a implementação da automação

Na operação atual, o responsável pelo sistema configura os principais parâmetros do controlador de temperatura. A parametrização deste dispositivo envolve basicamente configurar o tipo de sensor que fará a leitura de temperatura, quais entradas e saídas serão utilizadas e como serão utilizadas (se serão alarmes, saídas de controle, entradas de *start* da operação, etc), o tipo de controle e a temperatura de operação. Estes são os parâmetros principais a serem definidos no momento do *startup* da operação.

Aqui entende-se como *startup* a configuração pré-estabelecida para um determinado tipo de produto a ser processado na linha. Refere-se a toda a preparação para iniciar o processo com determinado tipo de produto. Normalmente a parametrização do controlador é feita neste primeiro momento e na maioria dos casos só se altera a temperatura de referência e a faixa de histerese no caso do trabalho atual.

As Tabelas 3, 4, 5, 6, 7 e 8 resumem a parametrização que foi feita no controlador. Ao longo dos ensaios realizados somente a temperatura de referência e a faixa de histerese foram alterados.

Tabela 3 – Conjunto de parâmetros de entrada

Configuração dos sinais de entrada			
Parâmetro	Descrição	Valor	Descrição
SEnS	Tipo do sinal de entrada	Pt1	RTD Pt 100 (-200°C a 850°C)
unit	Unidade de Temperatura	°C	
inE	Ação da saída de controle no caso de erro de medida	our	Quando é detectado um alarme de underrange ou overrange a saída de controle fornece a saída configurada no parâmetro "oPE"
oPE	Potência de saída no caso de erro de medida	0%	
diF1	Função da entrada digital 1	9	Ao fechar o contato da entrada digital a temporização é iniciada e ao abrir o contato a

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 4 – Conjunto de parâmetros de saída

Configuração dos sinais de saída			
Parâmetro	Descrição	Valor	Descrição
o1F	Função da saída 1 (<i>OUT1</i>)	H.reg	Saída de aquecimento
o1Ac	Ação da saída 1 (<i>OUT1</i>)	dir	Ação direta
o2F	Função da saída 2 (<i>OUT2</i>)	nonE	Desabilitada
o3F	Função da saída 3 (<i>OUT3</i>)	nonE	Desabilitada

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 5 – Conjunto de parâmetros de controle

Configurações de controle			
Parâmetro	Descrição	Valor	Descrição
cont	Tipo de controle	On.Fa*	Controle ON/OFF com histerese assimétrica
Hset	Histerese do controle ON/OFF	3**	
H.act	Atuador da saída de aquecimento	rELY	Relé ou contator
Od	Retardo na alimentação	00.03(hh.mm)	Define o tempo que o controlador permanece no modo <i>standby</i> quando é energizado

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 6 – Conjunto de parâmetros do *SET POINT*

Configurações do <i>SET POINT</i>			
Parâmetro	Descrição	Valor	Descrição
nSP	Número de <i>SET POINTs</i>	1	
SPLL	Limite mínimo do <i>SET POINT</i>	-20	
SPHL	Limite máximo do <i>SET POINT</i>	100	
SP1	Valor do <i>SET POINT</i> 1	Variável	Valor a ser definido nas operações e ensaios

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 7 – Conjunto de parâmetros do Temporizador

Configurações do temporizador			
Parâmetro	Descrição	Valor	Descrição
tr.F	Modo de Funcionamento do temporizador	i.d.d	Pulso com início com comando start
tr.U	Escala do temporizador	hh.nn	Horas e minutos
tr.t1	Valor do primeiro intervalo de tempo	05.00	Este valor pode ser alterado ao logo dos ensaios e operação (depende do material)
tr.t2	Valor do segundo intervalo de tempo	00.00	

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 8 – Conjunto de parâmetros de interface do usuário

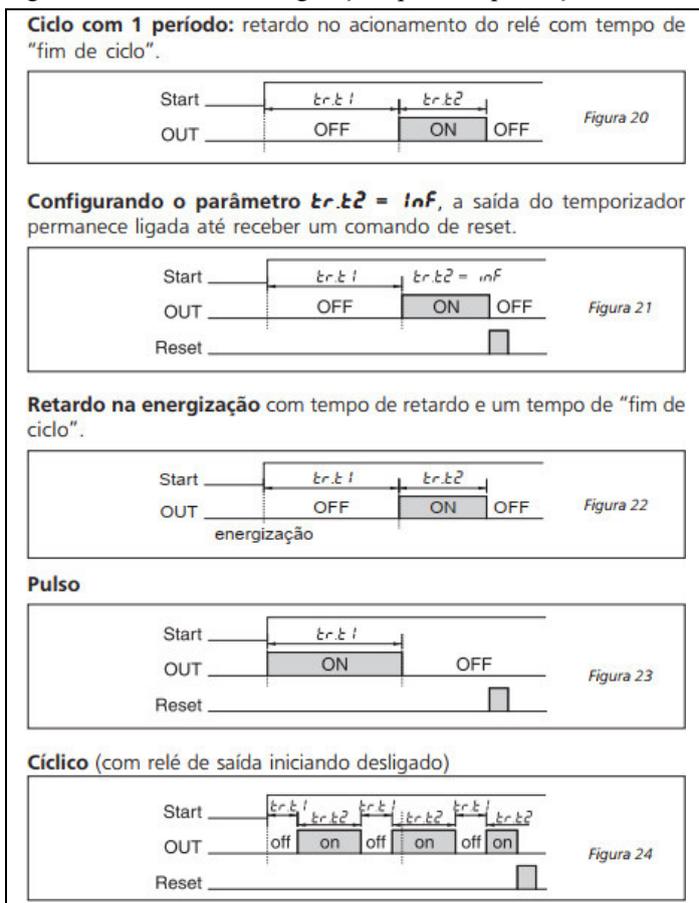
Configurações da interface do usuário			
Parâmetro	Descrição	Valor	Descrição
dSPu	Estado do instrumento na energização	St.by	Inicia em modo <i>standby</i>
oPr.E	Habilitação dos modos de operação	All	Todos os modos estão disponíveis para o parâmetro "oPEr"
oPEr	Seleção dos modos de operação	Auto	Este parâmetro é acessado para iniciar a operação

Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao longo dos ensaios a parametrização de controle foi sendo alterada para se observar o comportamento do sistema em diversas condições. Sendo assim, testou-se a configuração com histerese simétrica e a configuração com histerese assimétrica. A banda de histerese também foi alterada ao longo dos ensaios.

É importante falar um pouco sobre o temporizador. Outro requisito da operação que foi comentado é o tempo de estufagem. O controlador escolhido para o processo possui a capacidade de serem configurados até 3 temporizadores. Optou-se por configurar 1 para a operação. A tabela 7 ilustrou a configuração deste instrumento. Dentre os tipos de temporizador existentes no instrumento, optou-se por trabalhar com temporizador de pulso. A Figura 25 traz os tipos de temporização que o controlador possui:

Figura 25 – Possíveis configurações para temporização no controlador de temperatura.



Fonte: Adaptado do manual de instruções da família de controladores LWK48 do fabricante Coel.

Na opção configurada, após um pulso de *start* na botoeira configurada como sinal de entrada a temporização é iniciada e após passado o período programado no parâmetro “tr.t1” a saída configurada para o temporizador altera seu estado. Esta saída servirá para parar a operação quando o tempo for alcançado.

Na operação, dados os parâmetros de trabalho da estufa e os parâmetros exigidos pelo material a ser processado, o operador inicia o sistema alterando o controlador do estado de “*standby*” para “*auto*”. Estando o instrumento já pré-configurado pelo profissional de automação, estas são as únicas ações do operador. Feito isso deverá acompanhar o processo e atentar para os eventos, porém sem a necessidade de abrir ou fechar válvulas de várias estufas e ter uma operação imprecisa e suscetível a erros e desvios.

O controlador irá comparar a temperatura de referência com o valor medido pelo sensor de temperatura e acionar ou não a válvula. Quando a temperatura na sala estiver abaixo da temperatura de referência a válvula será acionada e o vapor irá percorrer

as serpentinas das salas. Isso promove o aumento da temperatura nas salas. Como o controle definido foi do tipo *ON/OFF* com histerese assimétrica, ao se alcançar a temperatura de referência a válvula será desligada. A temperatura ainda pode aumentar de 1°C a 2°C mesmo com a fonte desligada a depender das condições do ambiente, quantidade de material dentro da estufa e das condições do vapor. Com a válvula desligada a temperatura ainda irá cair até o valor de referência menos o valor de histerese configurado. Por exemplo, se a temperatura de referência estiver configurada para 75°C e o valor de histerese for configurado para 3°C, a temperatura do sistema deve cair até 72°C para então o controlador acionar a válvula novamente.

Este comportamento se repete ao longo do tempo de operação configurado. O capítulo de resultados trará o detalhamento dos ensaios operacionais do equipamento.

3.6 Conclusão

Este capítulo trouxe uma rápida descrição dos métodos de secagem de grãos utilizados na indústria, bem como das tecnologias utilizadas nesse procedimento. Além disso, foi descrito o processo de estufagem para o que recebeu a melhoria por meio de uma estratégia de automação. Os principais componentes envolvidos na solução foram descritos e mostrada a configuração do sistema.

4 RESULTADOS

4.1 Introdução

Foram realizados 4 ensaios de operação na estufa piloto para levantamento dos dados. Este capítulo traz o resultado e a análise de cada acompanhamento.

Objetivando-se ter uma base comparativa, optou-se por conduzir um ensaio de operação do equipamento em suas condições antes da intervenção da automação. O objetivo é capturar a operação usual da estufa e então avaliar os impactos operacional e econômico da implantação de uma solução de automação.

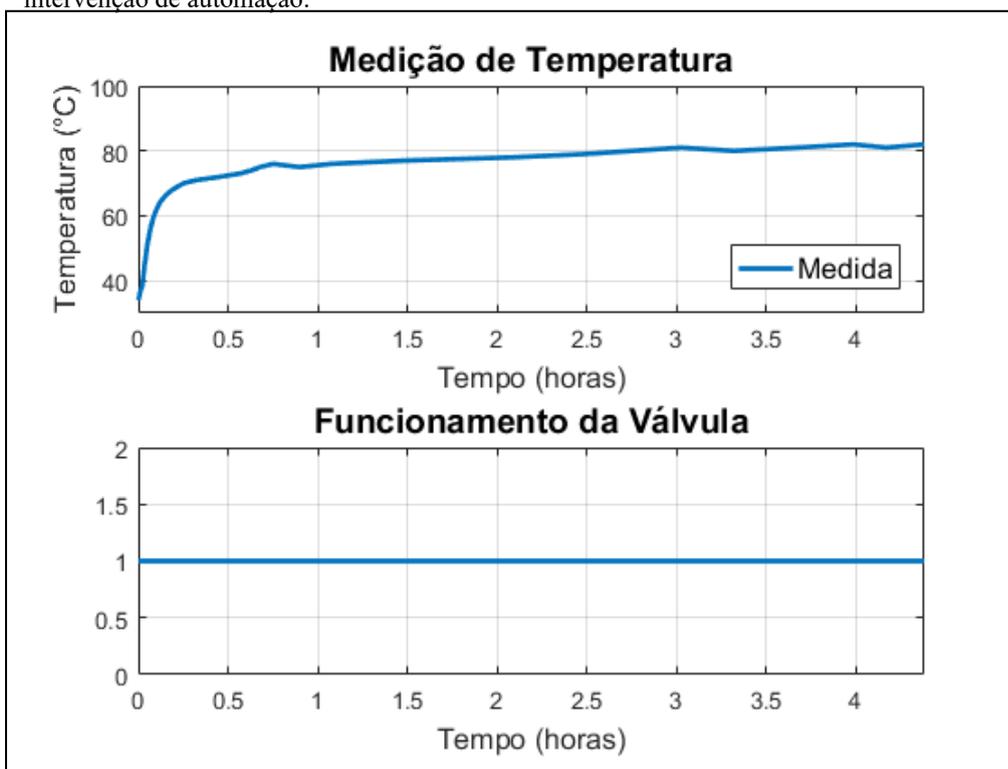
Para cada ensaio foram definidas condições específicas de trabalho (escolha da referência de temperatura, faixa de histerese, tempo de operação). Optou-se por fixar o tempo de operação em 4 horas. O período de trabalho das estufas é normalmente de 5 horas e, sendo assim, um período de análise de 4 horas captura a dinâmica do processo sem perda de fidelidade.

4.2 Ensaio 1

Como dito anteriormente, este ensaio foi conduzido para que a característica do sistema sem a intervenção da automação fosse capturada. Sendo assim, o equipamento foi observado durante o intervalo de tempo definido para os ensaios (4 horas) e sem nenhum tipo de controle sobre a abertura da válvula. A operação padrão do sistema até a proposta de melhoria era manual, ou seja, o operador abastece a estufa com o produto e abre as duas válvulas para liberar a passagem do vapor pelas serpentinas.

A Figura 26 traz o resultado deste primeiro ensaio.

Figura 26 – Acompanhamento da temperatura e funcionamento da válvula durante uma operação sem intervenção de automação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Analisando-se a temperatura, observa-se um momento inicial com rápido incremento. Esse período dura aproximadamente 15 minutos (quando o equipamento chega a 65°C) e é seguido por um período onde a temperatura permanece aumentando, porém a uma taxa menor. Este segundo momento perdura até aproximadamente 2 horas e meia de operação e a temperatura da estufa se aproxima de 80°C. Desse momento em diante a taxa de aumento da temperatura é muito baixa. Com 2 horas de operação o equipamento está a 78°C e no final da análise está com 82°C.

Pode-se notar que o processo passa 75% do tempo de operação com a temperatura de suas câmaras entre 78°C e 82°C. Em termos de operação, esta faixa de temperatura durante o intervalo de tempo observado resulta em perda de qualidade no produto final. A temperatura requerida para que não haja prejuízos para a operação está na faixa de 70°C a 75°C.

Outro ponto a ser observado é o funcionamento da válvula. Durante todo o período de trabalho a válvula permanece aberta. Do ponto de vista da vida útil do equipamento, pode-se dizer que o uso é bastante ineficiente. Tem-se um dispositivo

trabalhando em sua capacidade nominal (válvula totalmente aberta e durante todo o período de trabalho) quando isso não é necessário e resultando numa operação imprecisa e com prejuízos.

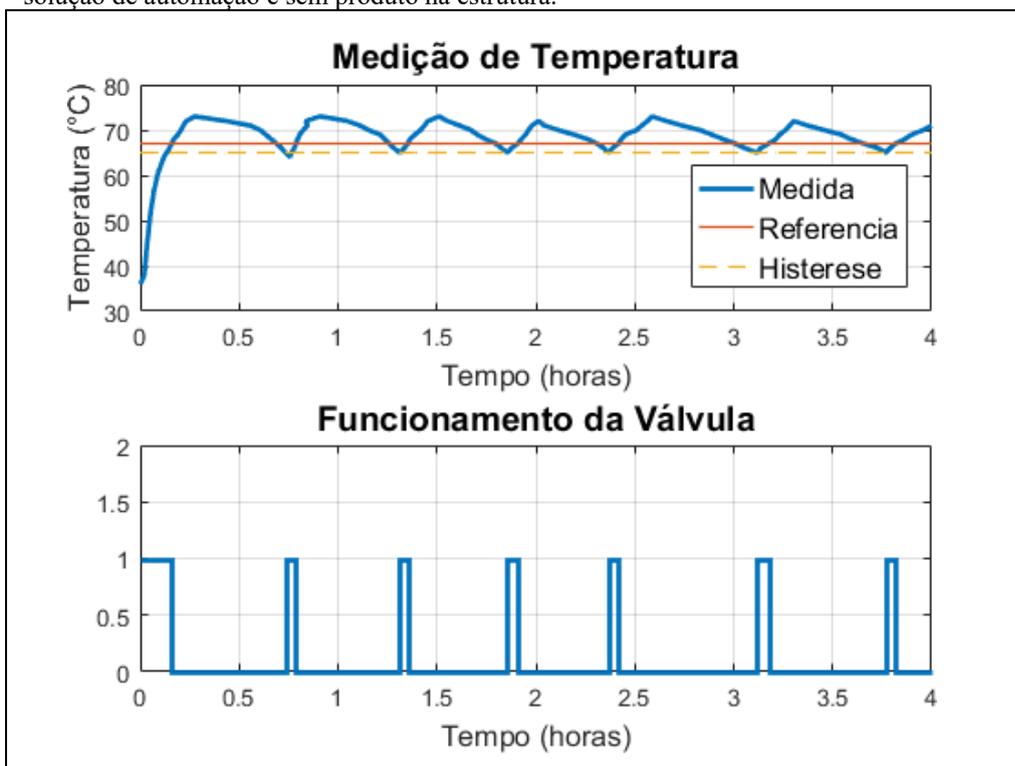
A operação atual da estufa, portanto, ocorre de forma imprecisa e ineficiente, tanto do ponto de vista da temperatura requerida no processo quanto na utilização dos equipamentos. Os testes a seguir mostrarão como a inserção de uma solução de automação simples trouxe melhorias para estes dois aspectos do processo.

4.3 Ensaio 2

O ensaio a seguir foi conduzido já com a presença de uma estratégia de automação (controlador/atuador). Para a realização deste ensaio optou-se por não carregar a estufa com produto e configurar uma temperatura de referência abaixo da faixa citada anteriormente (70°C a 75°). O objetivo foi analisar o comportamento do sistema em relação ao fator de utilização da válvula (tempo ligada/tempo desligada) e como a presença do produto no interior da estufa altera o controle de temperatura.

Trata-se de uma observação interessante, pois ilustra o controle de temperatura (ainda que com a necessidade de alguns ajustes) e a influência de não haver carga no processo. Isso poderá ser evidenciado quando forem observados os resultados dos ensaios 3 e 4 e estabelecida uma comparação. A Figura 27 ilustra os resultados do procedimento.

Figura 27 – Acompanhamento de temperatura e funcionamento da válvula durante uma operação com a solução de automação e sem produto na estrutura.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A temperatura de referência foi ajustada para 67°C e o controlador para um controle do tipo *ON/OFF* com histerese assimétrica. O valor da banda de histerese foi ajustado para 2°C , ou seja, após a temperatura ter sido alcançada pela primeira vez, o atuador (válvula) sempre ficará acionado no intervalo de 65°C a 67°C . O controlador deixa a temperatura cair até o valor de referência menos o valor da banda morta.

Neste ensaio já se observa um menor tempo de funcionamento da válvula durante a operação. O equipamento passa então a operar sob uma condição de menor utilização e, conseqüentemente, prolonga-se a sua vida útil. Isso se estende para a estufa e seus componentes como um todo, onde ocorre um menor consumo de vapor e uma menor solicitação térmica da estrutura.

Os dados contidos na Figura 27, no entanto, revelam que a temperatura ainda sobe bastante mesmo após o desligamento da válvula. O valor máximo da temperatura chega a 73°C , o que representa uma diferença de 6°C em relação ao valor de referência (65°C). Este comportamento se repete ao longo da operação, não sendo assim uma particularidade do primeiro ciclo de aquecimento. Do ponto de vista dos requisitos de operação do sistema isso seria um problema pela falta de precisão em torno do ponto de

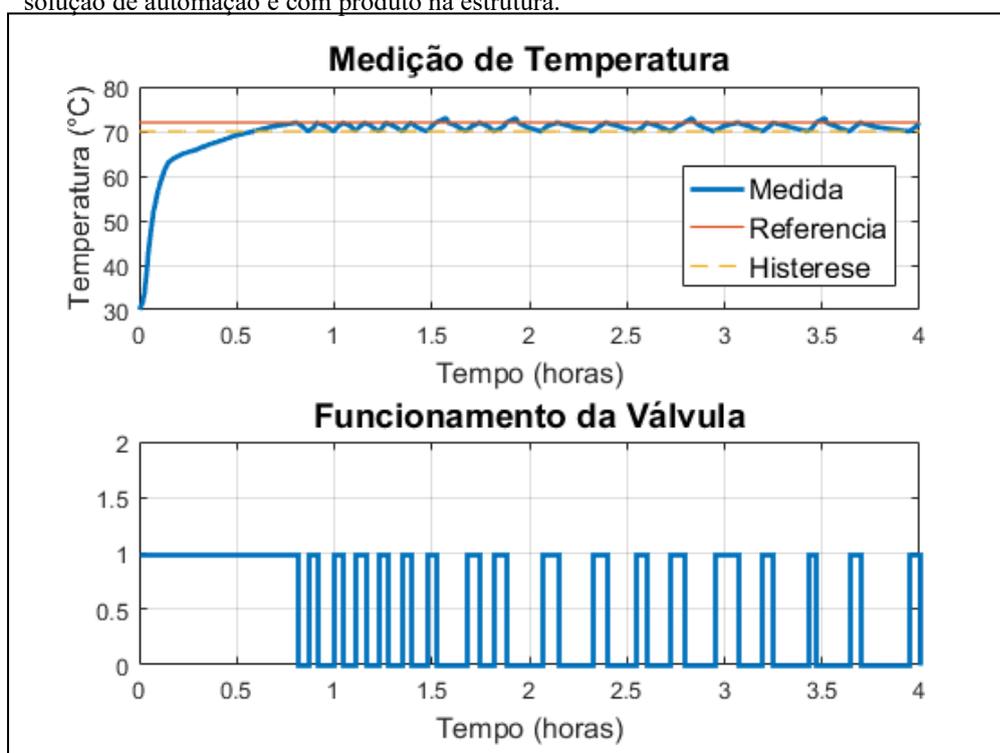
operação, o que levaria a se analisar uma nova estratégia de controle que não fosse o *ON/OFF*. No entanto vale lembrar que o teste foi realizado sem a presença de produto na estufa e será visto que este fator muda bastante o comportamento do sistema.

4.4 Ensaio 3

Para realização deste teste, o controlador foi configurado para um controle de tipo *ON/OFF* com histerese assimétrica. A temperatura de referência foi ajustada em 72°C e o valor da banda de histerese ajustado para 2°C . Isso indica que após o primeiro ciclo de aquecimento, o atuador fica ligado no intervalo de 70°C a 72°C . Além disso, foi inserida a quantidade usual de produto no interior da estufa, representando 100% da ocupação do espaço dos compartimentos. Isso caracteriza a operação nominal do sistema.

A Figura 28 ilustra os resultados obtidos no período de análise:

Figura 28 – Acompanhamento de temperatura e funcionamento da válvula durante uma operação com a solução de automação e com produto na estrutura.



Fonte: Elaborada pelo autor.

No gráfico superior da Figura 28 observa-se o comportamento da temperatura durante a operação. Durante o primeiro ciclo de aquecimento nota-se que a taxa de

aumento da temperatura encontra-se no padrão dos outros testes até aproximadamente 65°C. A partir deste ponto no experimento atual, o sistema apresenta uma taxa de variação da temperatura menor e após 48 minutos de operação a temperatura de referência é alcançada pela primeira vez. É neste ponto que a válvula fecha e a temperatura começa a cair até o valor ajustado pela banda de histerese. A 70°C a válvula é acionada novamente e a temperatura volta a subir.

Nota-se que a temperatura da estufa após este ciclo de aquecimento inicial permaneceu toda a operação dentro da faixa de 70°C a 72°C. Somente quatro vezes o sistema chegou a 73°C. Isso já mostra uma operação mais precisa em relação ao ensaio nº 2, onde a temperatura ultrapassou o valor de referência ainda em 6°C. É possível então ver a influência da presença de produto no equipamento justificando a realização do segundo experimento discutido anteriormente.

Do ponto de vista da operação da válvula, comparando-se com o resultado do ensaio nº 1 ilustrado na Figura 26, é possível notar que o requisito de temperatura da operação foi alcançado sem a válvula ficar todo o processo aberta. De maneira mais precisa, durante o intervalo de 4 horas de operação e com base nos dados utilizados para construção dos gráficos da Figura 28, a válvula passou 2 horas e 10 minutos desligada. Isso equivale a 54,31% do tempo de operação.

De fato, obteve-se maior precisão no processo, menor intervenção humana, economia no consumo de vapor e menor solicitação dos equipamentos. Além dos aspectos já citados, o parâmetro de qualidade da operação é atingido, uma vez que sem nenhum controle o processo é manual e bastante suscetível a falhas. Tratava-se de uma operação insegura, uma vez que o operador precisava se deslocar para a parte traseira das estufas para abrir ou fechar as válvulas. O acesso não teve o espaçamento projetado para movimentação constante de operadores. O processo também era pouco eficiente e carente de padronização da temperatura de operação das salas. Sem a correta definição dessa variável, problemas como aderência da película ao produto, cor e teor de umidade precisavam ser corrigidos nas etapas seguintes do processo produtivo.

Do ponto de vista econômico, o vapor utilizado no processo é produzido por meio de caldeiras. Utilizando-se menos vapor na operação das estufas observa-se menor consumo de combustível nas caldeiras e menor consumo de água. O custo da operação é reduzido visto que o impacto na redução do consumo de combustível das caldeiras é

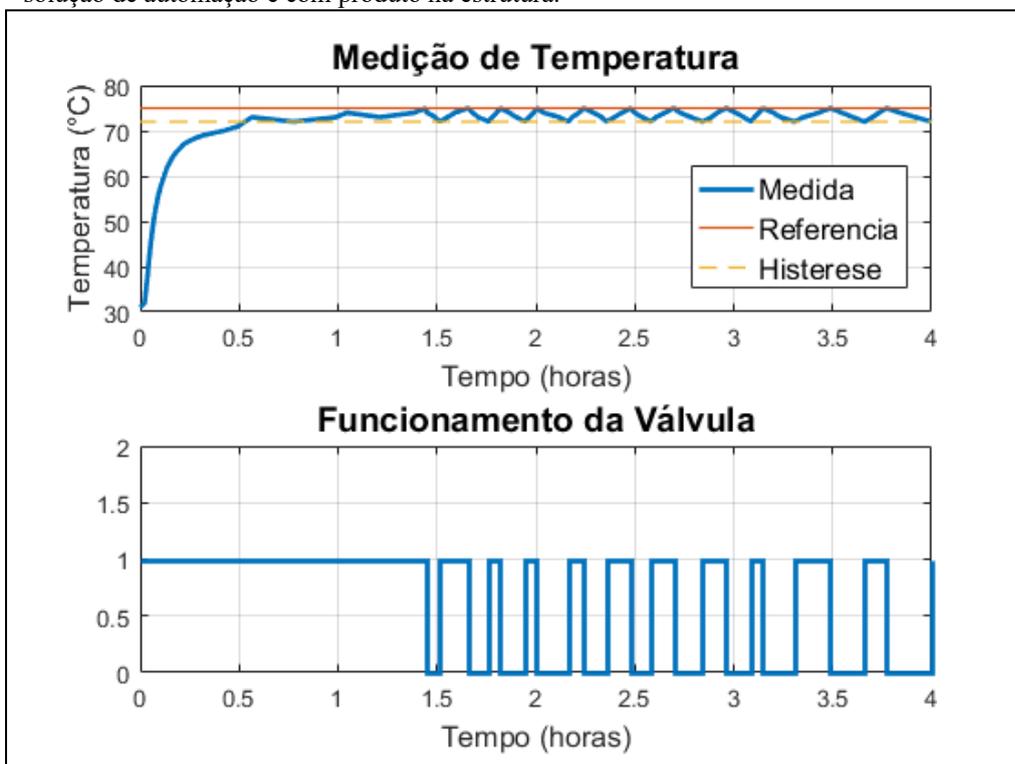
considerável. Ou seja, melhores resultados são obtidos e menos insumos consumidos na operação.

4.5 Ensaio 4

Para realização deste ensaio, o controlador foi configurado para um controle de tipo *ON/OFF* com histerese assimétrica. A temperatura de referência foi ajustada em 75°C e o valor da banda de histerese ajustado para 3°C . Isso indica que após o primeiro ciclo de aquecimento, o atuador fica ligado no intervalo de 72°C a 75°C . Ainda sobre as condições do experimento, novamente foi estabelecida a operação nominal do equipamento inserindo-se a quantidade padrão de produto no interior da estufa, garantindo então 100% de ocupação dos comportamentos.

A Figura 29 ilustra os resultados obtidos no período de análise:

Figura 29 – Acompanhamento de temperatura e funcionamento da válvula durante uma operação com a solução de automação e com produto na estrutura.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O comportamento do sistema durante esta operação é semelhante ao apresentado na Figura 28. A principal diferença se encontra no tempo para a temperatura de referência ser alcançada pela primeira vez. De fato, para uma temperatura de operação estabelecida em 75°C a estufa precisa de um maior período de aquecimento inicial.

O valor de referência é alcançado após 1 hora e 26 minutos de operação. Na configuração com a temperatura de referência em 72°C este patamar é alcançado pela primeira vez após 48 minutos de operação. É importante notar essa característica da estufa, onde a partir de certa temperatura o incremento de 1°C no interior da sala demanda um intervalo maior de aquecimento. A título de comparação, na operação atual o valor de 72°C é alcançado após 46 minutos, ilustrando um comportamento semelhante ao do ensaio nº 3.

De fato, outras variáveis tem impacto nos intervalos de aquecimento da estufa. A umidade relativa do ar e a temperatura ambiente durante a operação do sistema são exemplos de fatores que alteram o comportamento do equipamento e, conseqüentemente, os resultados observados.

Apesar de um intervalo de tempo maior durante o aquecimento inicial do sistema, observa-se novamente um menor esforço dos seus componentes. O comportamento da válvula segue o padrão do que foi apresentado na Figura 28. A partir de 2 horas de operação é possível ver que o intervalo de tempo que esse componente fica fechado começa a aumentar em relação ao tempo que fica aberto. Isso resulta em economia de vapor e menos solicitação do equipamento, fatos que já foram discutidos anteriormente.

O objetivo deste último ensaio era avaliar uma outra temperatura de referência que pode ser usada na operação das estufas. Os resultados foram satisfatórios e mostram que ainda há ganhos tanto do ponto de vista de consumo de vapor e outros insumos, quanto do ponto de vista da vida útil dos componentes do sistema. A temperatura mantém-se em uma faixa que atende os requisitos operacionais e de qualidade, não provocando danos ao produto e, devido a introdução de uma estratégia de automação, sem a necessidade de uma interferência imprecisa do operador.

4.6 Conclusão

Neste capítulo foram discutidos os ensaios realizados na estufa para validação da proposta. Os 4 ensaios conduzidos tiveram suas configurações e condições descritas. Além disso foram realizadas comparações do comportamento das situações observadas e verificados pontos importantes da operação com a solução de automação já em operação.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o detalhamento de uma solução de automação industrial para uma das estufas utilizada no processo de secagem de amêndoas de castanhas. Foi constatada a necessidade de melhoria em uma das etapas produtivas e daí o projeto foi desenvolvido em caráter piloto. Este trabalho abordou os diversos aspectos envolvidos no desenvolvimento de uma proposta de automação.

O capítulo 2 abordou tópicos importantes sobre automação industrial de modo a fornecer uma base teórica para os capítulos seguintes. Foi descrita a pirâmide de automação, estrutura que sintetiza os diversos níveis da automação de processos que pode acontecer em uma indústria. As camadas da pirâmide foram descritas e seus principais componentes exemplificados. Ainda neste capítulo foram abordados os conceitos de controle de processos, onde foi possível discutir assuntos como sistema em malha aberta e malha fechada e os principais tipos de controladores encontrados na indústria.

O capítulo 3 trouxe o detalhamento dos componentes do projeto. Inicialmente foi descrito o processo de secagem de grãos na indústria alimentícia e suas variações. As principais tecnologias usadas na operação foram exemplificadas para que fosse possível verificar onde o trabalho fora desenvolvido. Em seguida a operação que recebeu a intervenção foi descrita antes e depois da solução de automação. Os componentes das propostas foram detalhados e informada a configuração do sistema, bem como a parametrização e especificação dos componentes.

O capítulo 4 foi destinado a se discutir os resultados do projeto. Inicialmente foi registrada uma operação ainda sem a presença do sistema automatizado para que se pudesse estabelecer uma comparação entre as situações. Depois desta abordagem inicial foram detalhados os resultados dos ensaios com a presença do sistema de controle. Foram verificadas as melhorias trazidas pela proposta. Uma operação menos imprecisa e mais segura foi alcançada, bem como uma operação com a possibilidade de ajustes do parâmetro temperatura de operação mais confiável, já que esta definição passou a ser feita pela configuração de um dos parâmetros do controlador de temperatura.

Além da melhoria operacional do processo, o fator de utilização dos equipamentos foi melhorado, fato que contribui para o aumento da vida útil dos componentes do sistema.

Um fato importante sobre o trabalho é que a proposta, além da melhoria em si, serve para mostrar que é possível obter uma melhoria em processos industriais com alternativas de baixo custo. De fato, a automação industrial em algumas plantas já alcança patamares bem avançados. Naturalmente, os avanços na área fizeram com que estratégias e componentes da base da pirâmide de automação se tornassem mais acessíveis. Assim, várias indústrias estão adequando e melhorando a sua produção utilizando soluções de automação industrial acessíveis. Isso é a porta de entrada para uma melhoria que envolve maiores investimentos, uma vez que bons resultados já se tornam possíveis com soluções de certa forma simples.

Para trabalhos futuros, sugere-se a utilização dos resultados obtidos com os ensaios realizados na planta para sintonizar um controlador PI através do método de Ziegler-Nichols. As saídas do sistema indicam as bandas de amplitude e de frequência. Com a substituição da válvula utilizada atualmente por uma válvula do tipo proporcional e utilização deste método tabular, é possível utilizar um controlador que oferece melhor desempenho para o sistema.

Além disso, para este projeto piloto ser ampliado para contemplar todas as estufas do setor, deve-se ser incluído um planejamento operacional da caldeira, sendo uma estratégia envolvendo também automação ou não. O fato é que deve ser garantida a operação segura do sistema e isso envolve monitorar as condições de fornecimento do vapor. A proposta de automação aplicada na estufa piloto contempla o processo realizado na estrutura da estufa, mas não monitora parâmetros de segurança operacional. Sendo assim, deve-se analisar uma estratégia envolvendo um nível mais elevado de automação envolvendo mais instrumentação e controle do processo englobando caldeira e setor de estufagem

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410: instalações elétricas de baixa tensão**. Versão Corrigida 17.03.2020. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIATION OF FOOD INDUSTRIES, INC. **Specifications for cashew kernels, AFI nut & agricultural products section**. 2012.

CHAVES, CARLOS ROBERTO. **Curso de formação de operadores de refinaria: instrumentação básica**. Curitiba: PETROBRAS: UnicenP, 2002.

COEL. **Manual de instruções - UWK48, LWK48, K48 e K49**. São Paulo, 2012.

FILHO, JOÃO MAMEDE. **Instalações elétricas industriais**. 9. ed. LTC, 2017.

LIOHM. **Catálogo de produtos**, p. 14 - 19, 2019.

MGA. **Catálogo MGA**. 2014.

MGA. **Especificação técnica - válvula de esfera tripartida classe 300**. 2019.

NAKA. **Especificação técnica - termopares com proteção metálica**. São Paulo. 2020.

NAKA. **Especificação técnica - termoresistências**. São Paulo. 2020.

MORAES, CÍCERO COUTO DE; CASTRUCCI, PLÍNIO DE LAURO. **Engenharia de automação industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

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

PAIVA, F.F de A.; GARRUTI, D. dos S.; SILVA NETO, R.M. da. **Aproveitamento industrial do caju**. Fortaleza: Embrapa-CNPAT/SEBRAE/CE, 2000.

PETRUZELLA, FRANK D. **Controladores lógicos programáveis**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

ROGGIA, LEANDRO; FUENTES, RODRIGO CARDOZO. **Automação industrial**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, Colégio Técnico de Santa Maria, Rede e-Tec Brasil, 2016.

SIEMENS. **Componentes para instalações elétricas industriais, comerciais e prediais**. São Paulo: 2017.

SISTEMA NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. **Sistemas Lógicos programáveis**. Brasília: SENAI/DN, 2013.

WEG. **Automação: soluções para automação de sistemas**. Cód.: 50025424. Ver.: 03. Santa Catarina: 2016.

ZONTA, JOÃO BATISTA. Diferentes tipos de secagem: efeitos na qualidade fisiológica de sementes de pinhão manso. **Revista Brasileira de sementes**, vol.33, nº4 p:721 - 731, 2011.

