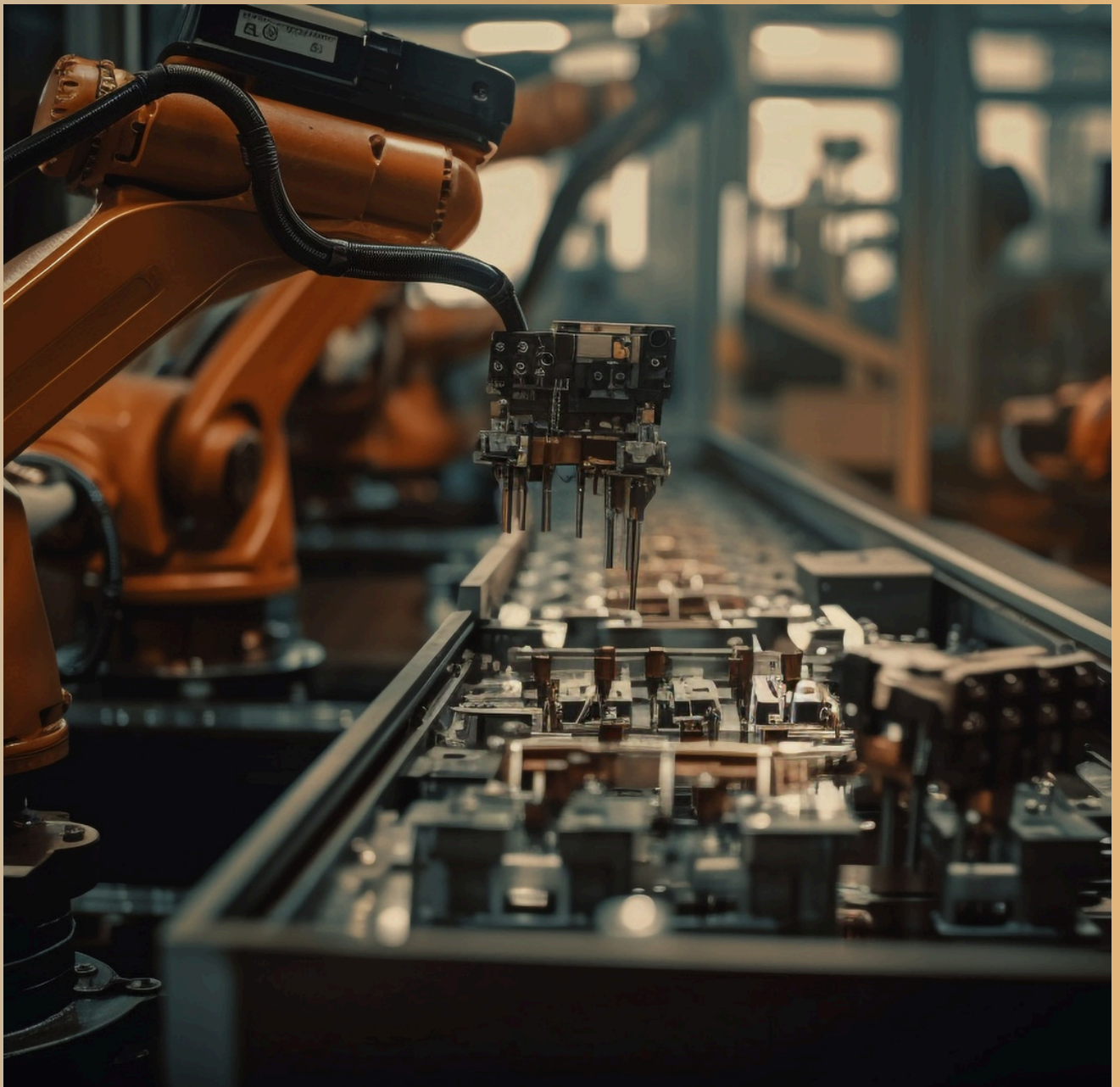


VOLUME 3

2024

E-TEC

Revista de Tecnologia e Ciência



WWW.UNISENAIPR.COM.BR

 UniSENAI PR

— Edição V3 - Ano 2024

— Corpo Editorial

Editor Chefe

Prof. Dr. Vicente de Lima Gongora

— Comitê Executivo

Profa. Esp. Adriana Giseli Leite Carvalho

Prof. Esp. Antônio Carlos Rodrigues

Profa. Dra. Camila Fogaça de Oliveira

Prof. Me. Fabio Rodrigo Milanez

Prof. Dr. Renato Kazuo Miyamoto

Prof. Dr. Rodolfo Alexandre Hildebrandt

Prof. Esp. Wesley Candido da Silva

Editora: Centro Universitário UniSenai Londrina

ISSN: 2358-5528

Direitos reservados

Centro Universitário UniSenai Londrina

Rua Belém, 844 - Londrina / PR (43) 3294-5100

Partes desta publicação poderão ser reproduzidas, sem a autorização prévia ou escrita deste Editor, desde que citada a fonte. Este periódico publica nomes individuais, comerciais, marcas registradas e produtos pertencentes a diversas companhias. O Editor utiliza-se destes nomes somente para fins editoriais e em benefício dos proprietários dos nomes e marcas, sem intenção de atingir seus direitos. Observa-se ainda que os dados contidos nos artigos são de responsabilidade dos próprios autores.



Editorial

**Edição TCCs - Indústria, Automática e
Modelagem de Sistemas**

Prezados leitores e pesquisadores,
É com grande satisfação que apresentamos a terceira edição de 2024 da ETEC Revista de Conhecimento Científico e Tecnológico, uma publicação comprometida com a difusão do conhecimento e o estímulo à inovação em diversas áreas da ciência e da tecnologia. Nesta edição, reunimos artigos de elevada relevância, provenientes de Trabalhos de Conclusão de Curso (TCCs), que refletem o potencial acadêmico e a aplicabilidade das pesquisas desenvolvidas no meio técnico-científico.

Os trabalhos selecionados para esta edição contemplam três grandes áreas do conhecimento: Indústria, Automática e Modelagem de Sistemas. Acreditamos que esta edição reforça o nosso compromisso com a excelência acadêmica, e serve como um espaço de valorização e reconhecimento do potencial dos pesquisadores e estudantes que se dedicam à ciência aplicada.

Boa leitura!

Atenciosamente,
Vicente Gongora [Editor-Chefe]

Mundo Senai proporciona uma imersão completa nas oportunidades de educação profissional e tecnológica oferecidas pelo SENAI



O Mundo SENAI, realizado entre 07 e 09 de agosto é um evento realizado pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI), que tem como objetivo apresentar as oportunidades de educação profissional e tecnológica oferecidas pela instituição.



— *Introdução*

Seja um aluno UniSenai PR

Excelência em engenharias:
Com uma visão voltada para o futuro da indústria, formamos profissionais capacitados a impulsionar o desenvolvimento e a gerar soluções inovadoras para o setor industrial.

Cursos ofertados:

- Engenharia Mecânica
- Engenharia Elétrica
- Engenharia de Software
- Tecnologia em Automação Industrial



— *Fique por dentro*

Estudantes realizam visitas técnicas para alinhamento sobre as demandas da Jornada de Aprendizagem

Para fortalecer o alinhamento entre a pesquisa acadêmica e as necessidades do setor produtivo, foram realizadas visitas técnicas a indústrias parceiras, como a Relva Verde, Nishi Motores Elétricos, Elevadores Atlas, Temperlândia e Axial. Essas visitas permitiram um contato direto com os desafios enfrentados pelas empresas e possibilitaram a identificação de demandas reais que podem ser exploradas na Jornada de Aprendizagem. A iniciativa visa proporcionar aos estudantes uma experiência imersiva e aplicada, fomentando soluções para os problemas identificados nas empresas visitadas.



Saiba Mais:



[HTTPS://UNISENAI.COM.BR/DIFERENCIAIS/JORNADAS-DE-APRENDIZAGEM](https://unisenai.br/diferenciais/jornadas-de-aprendizagem)

— Sumário

Capítulo I

Modelagem Biomecânica da Articulação Talocrural por Meio de Ferramentas Computacionais Pg. 08

Capítulo II

Implementação de Redundância com CLPs para Sistemas de Controle Industrial Pg. 39

Capítulo III

Desenvolvimento da Automação de uma Autoclave Vertical utilizando Controle PI em Cascata Pg. 60

Capítulo IV

Monitoramento Inteligente da Repetição de Padrões em Processos de Laminação de Embalagens Flexíveis com Leitura em Alta Frequência Pg. 88



Capítulo I – Modelagem Biomecânica da Articulação Talocrural por Meio de Ferramentas Computacionais

Luis Gustavo Ferrareto Espontão ¹

Wesley Candido da Silva ²

Renato Kazuo Miyamoto ³

RESUMO

A Neuropatia Periférica (NP) se trata de qualquer doença que ocasione disfunção dos nervos do sistema nervoso periférico. Segundo Fortaleza (2011), indivíduos com NP apresentam alteração no sistema de controle postural, devido ao comprometimento motor, especialmente na articulação talocrural. A combinação dessa alteração pode levar estes indivíduos a um maior risco de quedas e prejuízos funcionais. O estudo realizado neste artigo consiste no desenvolvimento de metodologias de estimação de modelos que sejam capazes de simular a estrutura de controle postural de um ser humano. Dessa forma o primeiro passo consiste em estimar uma função de transferência, que represente uma resposta em forma de simulação computacional, em sequência será realizado uma amostragem de dados, utilizando o modelo do sistema biomecânico (COELHO, 2015), para a montagem de uma planta eletromecânica, onde será realizado a coleta de dados, resultando em dois modelos que expressam de forma satisfatória o comportamento biomecânico.

Palavras-chave: Modelagem, Pêndulo, biomecânica, LabVIEW, Matlab.

Biomechanical Modeling of the Talocrural Joint Using Computational Tools

ABSTRACT

Peripheral Neuropathy (PN) is any disease that causes dysfunction of the nerves of the peripheral nervous system. According to Fortaleza (2011), individuals with NP present alterations in the postural control system due to motor impairment, especially in the talocrural joint. The combination of this alteration can lead these individuals to a higher risk of falls and functional impairments. The study carried out in this paper consists in developing methodologies for estimating models that are able to simulate the postural control structure of a human being. Thus, the first step consists of estimating a transfer function that represents a response in the form of computer simulation, then a data sampling will be performed, using the model of the biomechanical system (COELHO, 2005), for the assembly of an electromechanical plant, where data collection will be performed, resulting in two models that satisfactorily express the biomechanical behavior.

Keywords: Modeling, Pendulum, Biomechanics, LabVIEW, Matlab.

¹ Engenheiro Eletricista. UniSenaiPR - Campus Londrina. luis.espontao@sistemafiep.org.br

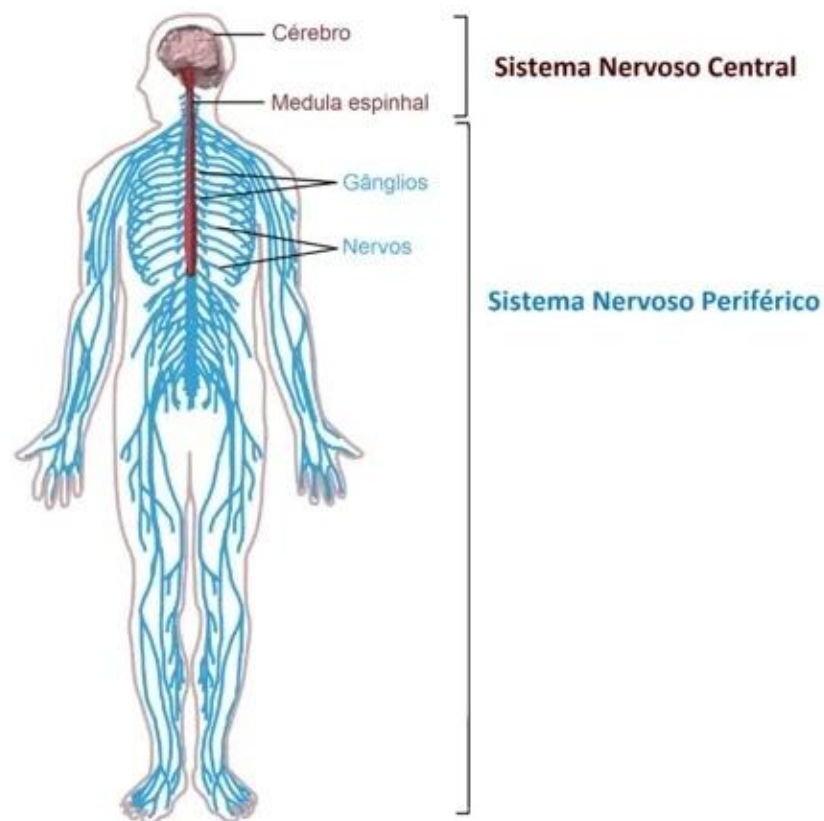
² Especialista. UniSenaiPR - Campus Londrina, wesley.candido@sistemafiep.org.br

³ Doutor em Engenharia Elétrica. UniSenaiPR - Campus Londrina, renato.miyamoto@sistemafiep.org.br

1 INTRODUÇÃO

A Neuropatia periférica (NP) se trata de qualquer doença que ocasione disfunção dos nervos do sistema nervoso periférico (Figura 1), podendo se manifestar de maneira aguda ou crônica. Embora possa afetar homens e mulheres de todas as faixas etárias, estudos apontam que a NP ocorra mais frequentemente em indivíduos com idade superior a 40 anos. Nesse cenário, estima-se que aproximadamente 5% da população sofra de alguma neuropatia periférica, dentre os quais cerca de 30% sejam indivíduos com mais de 70 anos (RUSSEL, 2017).

Figura 1 - Representação do Sistema Nervoso Periférico



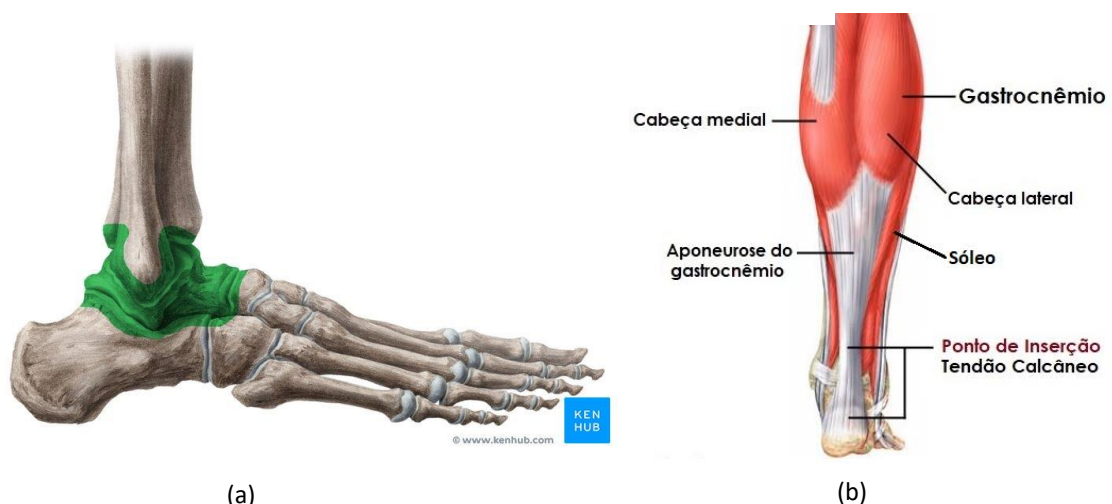
Fonte: Adaptado de CROCHOT (2006)

Também se pode relacionar alguns casos de neuropatia periférica (NP) a Diabetes *Mellitus* (DM). Uma das complicações mais comuns ocasionadas pela DM é a neuropatia periférica diabética (NDP). Dados apontam que aproximadamente 50% das pessoas com DM podem desenvolver essa complicação dentro de 10 a 15 anos de diagnóstico, esse fato pode resultar em efeitos prejudiciais nas habilidades físicas e motoras dos membros superiores e inferiores (FORTALEZA, 2011).

Os efeitos prejudiciais a síndromes relacionadas a NP, podem causar um déficit a manutenção do equilíbrio de nosso corpo em atividades estáticas e dinâmicas, para isso nossos sistemas sensoriais e motores devem estar integrados para serem processados pelo Sistema Nervoso Central (SNC) (DUARTE, 2010). A NP é uma condição irreversível, portanto a única forma eficaz de tratamento é realizada por meio de acompanhamento periódico profissionais da saúde e hábitos preventivos.

Segundo Fortaleza (2011), indivíduos com NP ou NDP apresentam alteração no sistema de controle postural, devido ao comprometimento motor, especialmente na articulação talocrural, conforme ilustra a Figura 2 (a). A anatomia do tornozelo é composta pelo agrupamento muscular formado pelo músculo gastrocnêmico, juntamente com o sóleo, responsáveis pela inserção comum ao tendão calcâneo (Aquiles) no osso calcâneo de acordo com a Figura 2 (b) (PALASTANGA, 2000).

Figura 2 - Anatomia Tornozelo, para (a) Articulação Talocrural e (b) Agrupamento Muscular.



Fonte: (a) CARMO; CARMO (2022), (b) DOOLEY (2015).

Em conjunto, a articulação talocrural e o agrupamento muscular são responsáveis pelos movimentos de dorsiflexão e flexão plantar, para a manutenção do controle postural, e bem como a alteração do sistema somatossensorial. A combinação dessa alteração pode levar estes indivíduos a um maior risco de quedas e prejuízos funcionais, como lesões, restrição prolongada no leito, fraturas e até mesmo a morte, implicando diretamente na qualidade de vida do paciente e segurança no tratamento.

A manutenção do equilíbrio do corpo humano ocorre pela atividade de vários sistemas complexos em conjunto para a atuação de variáveis do sistema. Neste caso, destaca-se a atuação na área da Biomecânica, que realiza estudos em uma abordagem dos conhecimentos da mecânica aplicados ao comportamento biológico dos seres vivos.

Por meio de estudos realizados na literatura chegou-se a duas grandezas relacionadas ao controle de postura: o centro de massa do corpo (*COP - Center of Pressure*) e o centro de pressão (*COM – Center of Mass*) (AMADIO et al., 1999). Para compreender os mecanismos de controle postural, é analisado a trajetória do centro de massa do corpo humano (*COP - Center of Pressure*), associada ao movimento do centro de pressão. Essa relação está associada ao resultado de interação das forças de reação do solo com apoio do corpo humano ao chão, a fim de estudar o controle do corpo em relação a base de apoio e equilíbrio (MOCHIZUKI, 2003).

Uma das formas de auxiliar o paciente com quadros de déficits de controles motores e até mesmo a completa falta, é por meio do uso de estratégias de estimulação elétrica funcional (*FES - Functional Electrical Stimulation*). A referida estratégia utiliza neuromodulação não invasiva, em que pacientes com déficit de locomoção ou lesão medular, podem ter seus músculos ativados. Essas contrações artificiais podem contribuir para o trofismo neuromuscular, vasomotor, entre outros.

Ainda, pode ocorrer uma possível melhoria na autoestima do paciente e ganhos na sua qualidade de vida (BRONIERA JUNIOR, 2021). Segundo BRONIERA JUNIOR (2021), ressalta-se que devido a variações fisiológicas como a fadiga muscular e a adaptação do motoneurônio, o uso da FES, pode ser limitado devido ao decaimento da força muscular em função de sua aplicação, constante ou de saturação da ação de controle em aplicações de malha fechada.

Objetivando a região do complexo muscular responsável pela dorsiflexão ou flexão dorsal e flexão plantar, ilustrado pela Figura 3, que compõem a biomecânica relacionado a articulação talocrural, onde é o principal ponto de comprometimento do controle postural em casos de neuropatia periférica. O desenvolvimento do estudo será efetuado a partir da sintetização da literatura relacionado ao tema, obtendo um modelo de referência para comparação com a metodologia experimental realizada,

entre etapas de prototipação da planta, análise dos dados e modelagem através de softwares matemáticos.

Figura 3 - Movimentos do tornozelo



Fonte: KENDALL et al. (2007).

O foco do estudo a ser realizado neste artigo consiste no desenvolvimento de metodologias de estimação de modelos que sejam capazes simular a estrutura de controle postural de um ser humano através de atuadores elétricos e mecânicos, para isso, um protótipo que emula a postura humana ereta será implementada fisicamente. Neste protótipo, uma máquina de corrente contínua (CC) será utilizada para emular os movimentos do tornozelo. A curva de reação da planta será utilizada para a estimativa do modelo matemático, que será comparado ao modelo proposto para identificar a viabilidade e confiabilidade de tais estratégias.

A Seção 2 aborda os fundamentos e aspectos relacionados aos estudos da literatura para aprofundamento da metodologia desenvolvida no artigo.

1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

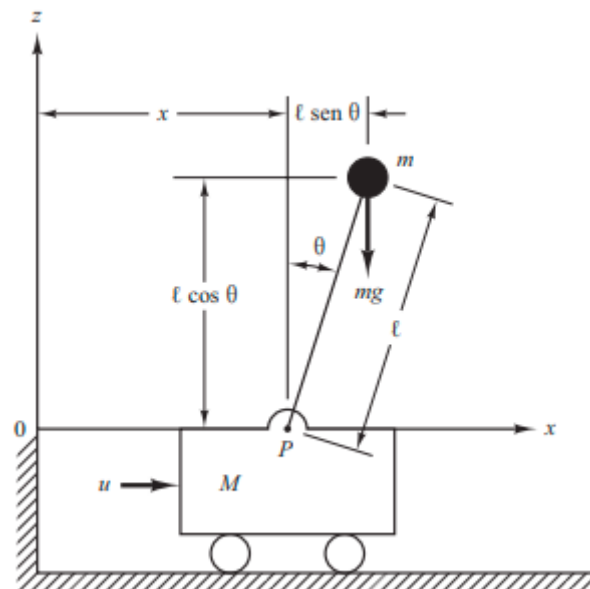
Segundo Maya (2014), um sistema é definido como um conjunto de elementos que criam um determinado comportamento, pensando em sistemas físicos, ou seja, quando esses elementos são reais podemos imaginar sistemas elétricos, mecânicos, térmicos, entre outros. Neste contexto, algumas pesquisas tratam da aproximação do

modelo biomecânico da postura ereta, considerando o plano sagital e a articulação talocrural como uma dobradiça, ao modelo matemático do pêndulo invertido.

2.1 PÊNDULO INVERTIDO

Segundo Ogata (2010), o pêndulo invertido é um sistema instável, pois pode cair a qualquer momento, em qualquer direção, sendo necessária uma aplicação de uma força adequada de controle. Considerando um problema bidimensional, onde o movimento do pêndulo fica restrito apenas ao plano lateral, conforme ilustrado pela Figura 4.

Figura 4 - Pêndulo Invertido



Fonte: Adaptado de OGATA (2010).

Considerando o sistema da Figura 4, tem-se a massa do sistema está concentrada no topo da haste, o centro de gravidade é dado pelo centro da esfera no topo do pêndulo. Assim o momento de inércia sobre o centro de gravidade é pequeno, podendo ser desprezado. Desse modo é possível aproximar um modelo matemático (OGATA, 2010). Podemos expressar matematicamente:

$$(M + m) \times \ddot{x} + m \times l \times \ddot{\theta} = u \quad (1)$$

$$m \times l^2 \times \ddot{\theta} + m \times l \times \ddot{x} = m \times g \times l \times \theta \quad (2)$$

Onde:

- $\Theta(s)$ = ângulo do pêndulo em rad;
- $U(s)$ = força aplicada em N;
- M = massa do carrinho em em Kg;
- m = massa do pêndulo em Kg;
- l = comprimento da haste em m;
- g = gravidade em m/s^2 .

Rearranjando as equações (1) e (2), obtendo duas equações através da eliminação de \ddot{x} da equação (1) e $\ddot{\theta}$ da equação (2), obtemos a seguinte função de transferência para o sistema:

$$\frac{\Theta(s)}{-U(s)} = \frac{1}{M \times l \times s^2 - (M + m) \times g} \quad (3)$$

A partir deste modelo apresentado por Ogata (2010), foram realizados estudos por pesquisadores da biomecânica, com o objetivo de sintetizar o comportamento complexo do sistema musculoesquelético, como o estudo de Coelho (2005).

2.2 APROXIMAÇÃO BIOMECÂNICA SIMPLES DA POSTURA ERETA

O sistema biomecânico do ser humano, composto pelos músculos e esqueleto é um mecanismo articulado ativo extremamente complexo com cerca de 244 graus de liberdade e cerca de 650 geradores individuais de força (músculos) (Coelho, 2005). Segundo Coelho (2005), a modelagem precisa da dinâmica deste sistema ultrapassa a capacidade atual da ciência e tecnologia. Desta forma, apesar da extrema complexidade, a característica principal de um sistema musculoesquelético durante a postura ereta quieta pode ser aproximada a um modelo físico matemático de um pêndulo invertido com segmentos rígidos articulados por juntas.

Os músculos de cada componente podem ser agrupados como atuadores de torque em cada área. A maioria dos estudos utiliza o pêndulo invertido simples como modelagem para o equilíbrio postural em postura ereta quieta, sendo vantajoso pois

pode-se associar o movimento do *COP* (*Center of Pressure*) com o movimento do *COM* (*Center of Mass*) (CAVALHEIRO, 2010).

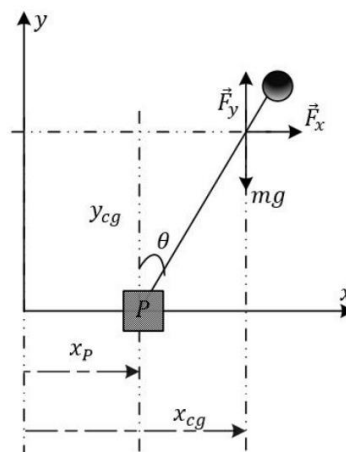
Dessa forma pode-se descrever um modelo de um pêndulo simples para representar a dinâmica do sistema no plano lateral, com o objetivo de identificar os conceitos básicos da modelagem. Para isso, considera-se dois segmentos rígidos: os pés e o restante de corpo. Os pés se encontram fixos ao chão e o resto do corpo comporta-se como um segmento rígido articulado no pé por uma articulação tipo dobradiça (COELHO, 2005).

Seguindo as considerações estipuladas por Coelho (2010), pode-se aproximar este modelo a um pêndulo controlado por uma máquina de corrente contínua (CC), que realiza o torque na articulação tipo dobradiça, movimentando a haste, simulando o controle postural de forma mecânica.

2.3 MODELAGEM PÊNDULO CONTROLADO POR MÁQUINA CC

A modelagem de um sistema de pêndulo invertido controlado por uma máquina de corrente contínua pode ser representada, conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Modelo Pêndulo Invertido



Fonte: PEREIRA, 2019.

Na Figura 5, o vetor \vec{F}_y representa a força no plano vertical, \vec{F}_x força no plano horizontal, C_g correspondendo ao centro de gravidade do pêndulo, P refere-se ao eixo de torque da máquina, θ é o ângulo da articulação do pêndulo, X_p e Y_p é a referência

do ponto P em relação aos limites da planta, X_{cg} e Y_{cg} são a referência do centro de gravidade do pêndulo devendo ser associada sempre aos mesmos limites de X_p e Y_p , M é a massa do sistema (carro, motor e haste) e m se trata da massa da haste (PEREIRA, 2019). Ao modelar este sistema considera-se a altura do ponto P desprezível, dessa forma pode-se considerar a altura do centro de gravidade por meio da equação (6).

$$Y_{cg} = l \times \cos \theta \quad (6)$$

A aceleração de Y_{cg} pode ser expressa pela equação (7).

$$\ddot{Y}_{cg} = (-l \times \ddot{\theta} \times \sin \theta) - (l \times \dot{\theta}^2 \times \cos \theta) \quad (7)$$

Para o plano horizontal deve-se considerar a distância X_p logo obtém-se a equação (8).

$$X_{cg} = X_p \times l \times \sin \theta \quad (8)$$

Analogamente a equação (7), a aceleração deste ponto é representada pela equação (9).

$$\ddot{X}_{cg} = \ddot{X}_p + (l \times \ddot{\theta} \times \cos \theta) - (l \times \dot{\theta}^2 \times \sin \theta) \quad (9)$$

Tem-se o somatório das forças na horizontal e vertical, representados pelas equações (10) e (11), respectivamente.

$$\vec{F}_x = M \times \ddot{x}_p + (M \times l \times \ddot{\theta} \times \cos \theta) - (M \times l \times \dot{\theta} \times \sin \theta) \quad (10)$$

$$\vec{F}_y = m \times l \times (-\ddot{\theta} \times \sin \theta - \dot{\theta}^2 \times \cos \theta) + m \times g \quad (11)$$

A obtenção do modelo físico da planta é dada pela conversão do momento angular. Ao calcular os momentos de inércia considerando o sentido anti-horário positivo, tem-se as forças que geram o momento (RESNICK, 2003).

$$\sum \overrightarrow{M}_{cg} = \overrightarrow{F}_y \times l \times \text{sen}\theta - \overrightarrow{F}_x \times l \times \text{cos}\theta \quad (12)$$

Através da conservação de energia, o momento também pode ser expresso pela equação (13).

$$\sum \overrightarrow{M}_{cg} = I \times \ddot{\theta} + b_r \times \dot{\theta} \quad (13)$$

Onde b_r é o do coeficiente de amortecimento viscoso e I é o momento de inércia rotacional da barra. Adicionalmente, o termo $I \times \ddot{\theta}$ corresponde ao módulo do torque aplicado a haste.

Analisando a equação (13), conclui-se que $b_r \times \dot{\theta}$ tende a variar próximo de 0, entretanto ao aplicar uma perturbação no sistema, este valor se altera rapidamente (PEREIRA, 2019). Ao igualar as equações (12) e (13), e substituindo as forças pelas equações (10) e (11), obtém-se as expressões evidenciadas abaixo.

$$\begin{aligned} & I \times \ddot{\theta} + b_r \times \dot{\theta} \quad (14) \\ & = [m \times l \times (-\ddot{\theta} \times \text{sen}\theta - \dot{\theta}^2 \times \text{cos}\theta) + m \times g] \times l \\ & \quad \times \text{sen}\theta \\ & \quad - [M \times \ddot{x}_p + (M \times l \times \ddot{\theta} \times \text{cos}\theta) \\ & \quad - (M \times l \times \dot{\theta} \times \text{sen}\theta)] \times l \times \text{cos}\theta \end{aligned}$$

Organizando, tem-se:

$$\begin{aligned} & (I + m \times l^2 \times \text{sen}^2\theta + M \times l^2 \times \text{cos}^2\theta) \times \ddot{\theta} \quad (15) \\ & + (b_r + m \times l^2 \times \text{cos}\theta \times \text{sen}\theta) \times \dot{\theta} - m \times g \times l \times \text{sen}\theta \\ & = -M \times l \times \ddot{x}_p \times \text{cos}\theta \end{aligned}$$

Na condição de equilíbrio, o ângulo θ se aproxima de 0, portanto pode-se considerar que:

$$\text{sen}\theta = 0 \text{ e } \text{cos}\theta = 1 \quad (16)$$

Pode-se obter a equação do pêndulo invertido pela conservação do momento angular, expressa pela equação (17).

$$(I + m \times l^2 \times \theta^2 + M \times l^2) \times \ddot{\theta} + (b_r + m \times l^2 \times \theta - M \times l^2 \times \theta) \times \dot{\theta} - m \times g \times l \times \theta = -M \times l \times \ddot{x}_p \quad (17)$$

Através da transformada de Laplace, obtém-se a função de transferência do pêndulo.

$$\frac{\theta(s)}{X_p(s)} = \frac{-M \times l \times s^2}{a \times s^2 + b \times s - m \times g \times l} \quad (18)$$

Onde:

$$a = I + m \times l^2 \times \theta^2 + M \times l^2 \quad (19)$$

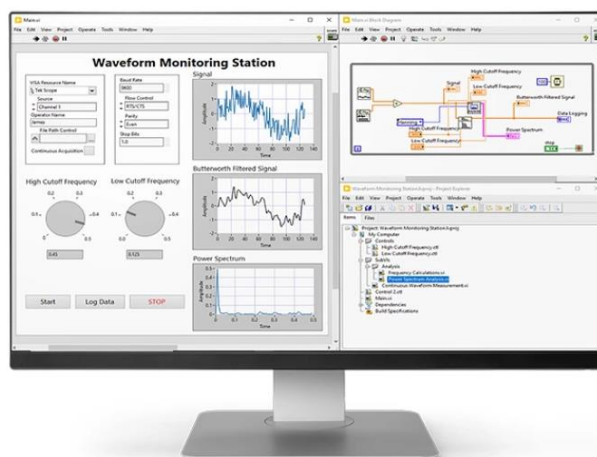
$$b = b_r + m \times l^2 \times \theta - M \times l^2 \times \theta$$

Este modelo será o utilizado como referência para comparação com o modelo estimado com a metodologia desenvolvida, logo, a planta física deve possuir uma interface de coleta de dados.

2.4 LabVIEW®

O LabVIEW® é uma ferramenta de desenvolvimento, originária da National Instruments (NI), com visão de simplificar a integração de hardware para aplicações de engenharia, como ferramentas de aquisição de dados, testes e controle. Por ser uma linguagem de programação gráfica de alto nível, se torna uma ferramenta muito atrativa para desenvolvimento de sistemas de controle e aquisição. A ferramenta possibilita o desenvolvimento de interfaces, que possibilitam a análise de dados de forma gráfica e a criação controles para interoperabilidade do sistema (NI, 2022). A Figura 6 ilustra um exemplo de interface desenvolvida no LabVIEW®.

Figura 6 - Interface LabVIEW



Fonte: NI (2022).

Para interfaces de controles, a NI desenvolveu sistemas embarcados, como o CompactRIO (cRIO), que são integrados a linguagem de programação LabVIEW®, onde é possível inserir rotinas de controle e aquisição de dados, através do sistema operacional instalado no embarcado, utilizando a metodologia Real Time, garantindo a vantagem de precisão e confiabilidade na aplicação desenvolvida, pensando em aplicações industriais (NI, 2022). A Figura 7 ilustra o hardware cRIO, com seus módulos de expansão.

Figura 7 - CompactRIO



Fonte: NI (2022).

A NI desenvolveu também uma plataforma embarcada voltada para estudantes desenvolverem interfaces de controle e aquisição para auxiliar nos estudos e montagem de testes em laboratório. O myRIO é um dispositivo embarcado com o foco de projetos acadêmicos, possuindo um microcontrolador FPGA Xilinx e um processador dual-core ARM Cortex-A9, e com acesso a entradas e saídas digitais,

sendo uma ferramenta poderosa para estudos de modelagem e controle, robóticas e mecatrônica (NI, 2022), ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - myRIO



Fonte: NI, 2022.

O tamanho compacto do NI myRIO, combinado com o poder e flexibilidade do FPGA integrado, o torna a controladora ideal para aplicações embarcadas de robótica. O myRIO será o controlador da planta, juntamente com o sensor MPU6050 que realizará a coleta dos dados de aceleração e giroscópio, que serão tratados em tempo real para obter-se o posicionamento angular da planta.

2.5 SENSOR GIROSCÓPIO E ACELERÔMETRO

Para determinar o posicionamento de um determinado objeto, é utilizado sistemas de MotionTracking onde é possível identificar movimentos através do uso de sensores como giroscópio e acelerômetros, responsáveis por medir ângulos de aceleração e aceleração do corpo causada por vibração ou movimentos.

No mercado existem inúmeros equipamentos capazes de realizar a medição destas grandezas, entretanto, são de difícil acesso devido ao alto custo. O MPU-6050 desenvolvido e fabricado pela InvenSense, é um sensor voltado para aplicações para smartphones, tablets e sensoriamento (TDK IVENSENSE, [s.d]).

Por possuir características de baixo consumo, baixo custo e alta performance, é um ótimo candidato para projetos de pesquisa. O sensor possui um giroscópio de 3 eixos e um acelerômetro de 3 eixos no mesmo encapsulamento, em conjunto com um DMP (Digital Motion Processor), que realiza o processamento dos 6 eixos com o

algoritmo MotionFusion. Dessa forma reduz o processamento do microcontrolador principal, já entregando os dados pré-processados para o sistema, através de comunicação I²C (TDK ISENSE, [s.d]).

Logo, será implementado um sistema simulado, utilizando os fundamentos apresentados no subtópico 2.3, e uma planta que simula as características utilizando o controlador myRIO e o sensor MPU6050, obtendo a resposta de ambos e comparando-os, conforme descrito pela seção 3.

3 METODOLOGIA

O estudo será realizado através da obtenção da expressão que define o comportamento da planta proposta. Dessa forma, o primeiro passo consiste em estimar uma função de transferência, que represente uma resposta em forma de simulação computacional.

Na segunda etapa será realizado uma amostragem de dados, utilizando o modelo do sistema biomecânico como referência, para a montagem de uma planta eletromecânica, onde será realizado a coleta de dados, que serão utilizados para estimar as funções que definem o comportamento do sistema, para serem comparados.

3.1 COLETA DE DADOS SIMULADOS

Segundo a modelagem do sistema realizada pelo Pereira (2019), apresenta um modelo de um pêndulo invertido acionado por uma máquina CC, característica que se assemelha com a proposta da pesquisa atual, e será utilizada como meio de comparação de estado da arte com os resultados obtidos de forma experimental. O modelo utilizado, será o modelo reducionista, resultado da simplificação do modelo da equação (16), conforme equação (27).

$$\frac{\theta(s)}{X_p(s)} = \frac{-\frac{3}{2l} \times s^2}{s^2 + \frac{3 \times B_r}{2 \times m \times l^2} \times s - \frac{3g}{2l}} \quad (27)$$

Os parâmetros utilizados no modelo reducionista são:

- $m = 0,5 \text{ Kg}$
- $l = 0,1 \text{ m}$

- $B_r = 0,25 \text{ N/(m/s)}$
- $g = 9,83 \text{ m/s}^2$

Através da abordagem proposta por Montenegro (2021), considera-se uma aproximação do modelo da máquina CC utilizada, ilustrada pela Figura 9. A referida máquina possui uma caixa de redução, e opera com níveis de tensão entre 3 e 6 V (Volts).

Figura 9 - Máquina CC



Fonte: ROBOCORE, 2022.

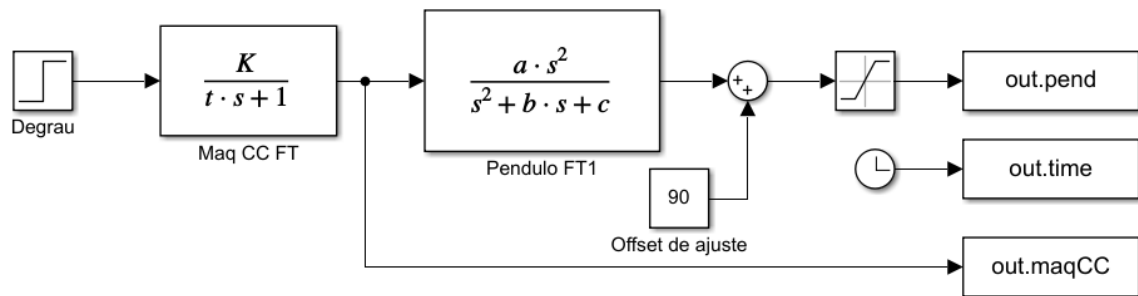
Para o modelo matemático da máquina CC, considera-se constante de tempo elétrica $\frac{L_a}{R_a}$, sendo L_a a indutância de armadura do motor, e R_a a resistência de armadura. Neste caso, para a máquina utilizada, a constante de tempo elétrica se torna nula, devido à baixa indutância da máquina.

Pela abordagem de Montenegro (2021), é possível expressar o sistema da máquina CC, através de uma função de transferência de primeira ordem, resultado na equação (28).

$$\frac{W(s)}{V(s)} = \frac{K}{s \times \tau + 1} \quad (28)$$

A equação (28), apresenta a relação entre o deslocamento angular pela tensão aplicada no modelo matemático. O parâmetro K foi estabelecido com o valor de 540, sendo o ganho da máquina, e τ , constante de tempo, estipulado como 0,0018. Na sequência as equações 27 e 28 foram inseridas no ambiente de simulação Simulink® para obter-se a resposta do sistema a um degrau, ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Modelos Simulink



Fonte: Do autor

No modelo da Figura 10 foi inserida a equação matemática que representa o comportamento dinâmico da máquina CC, conforme equação (28), em série com o modelo matemático do pêndulo, equação (27). Ainda, foi inserido um valor de *offset*, para se adequar as gradezas utilizadas como medidas, sendo a posição de repouso 90°, e um saturador para simular os limites físicos da planta. No modelo da Figura 10 foi inserido a resposta do modelo da máquina CC conectada ao modelo do pêndulo, gerando uma curva de resposta utilizada como referência para o modelo do sistema proposto neste trabalho.

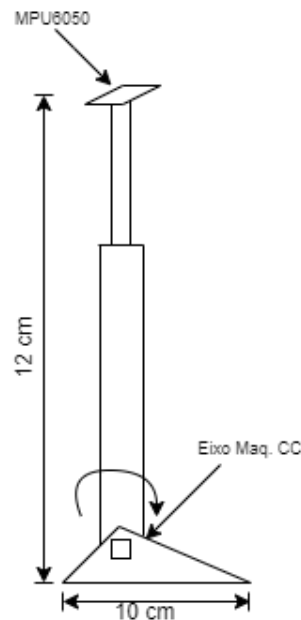
3.2 COLETA DE DADOS EXPERIMENTAL

Para a coleta de dados em bancada, foi montado uma planta eletromecânica, seguindo os modelos da postura ereta quieta, conforme apresentado por COELHO (2005), é possível representar, utilizando a articulação talocrural (Figura 2) como referência para ponto de atuação de torque, simulando um movimento de dorsiflexão e flexão plantar.

Dessa forma descreve-se um modelo de um pêndulo simples para representar a dinâmica do sistema no plano lateral, com o objetivo de identificar os conceitos básicos da modelagem. Ainda se considera dois segmentos rígidos, sendo os pés e o restante de corpo, em que os pés se encontram fixos ao chão e o resto do corpo comporta-se como um segmento rígido articulado no pé por uma articulação tipo dobradiça (COELHO, 2005).

A Figura 11, ilustra o croqui da planta, contendo um segmento rígido articulado, referindo-se a haste do pêndulo, e uma base triangular simulando o formato de um pé, contendo uma articulação de dobradiça.

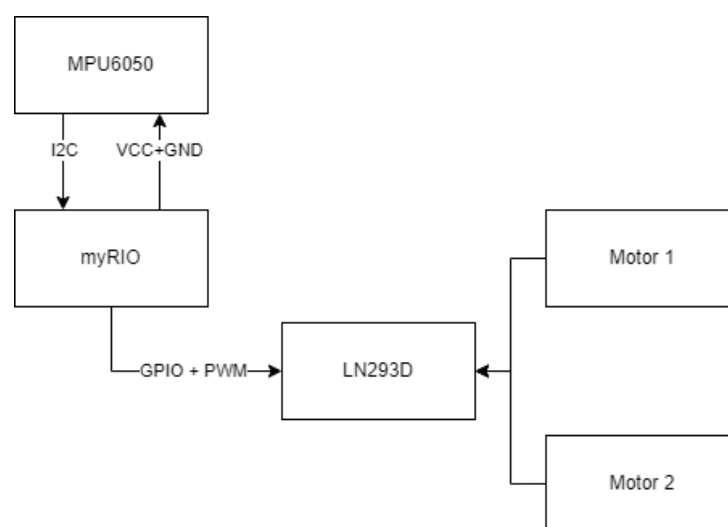
Figura 11 - Croqui Planta Eletromecânica



Fonte: Do autor.

Em seguida foi modelado um desenho em 3D, para ser impresso em material 3D, e montando em uma bancada de ensaio. Na bancada foi montada a topologia de sensoriamento e acionamento dos motores, conforme ilustrado pela Figura 12.

Figura 12 - Fluxograma do sistema

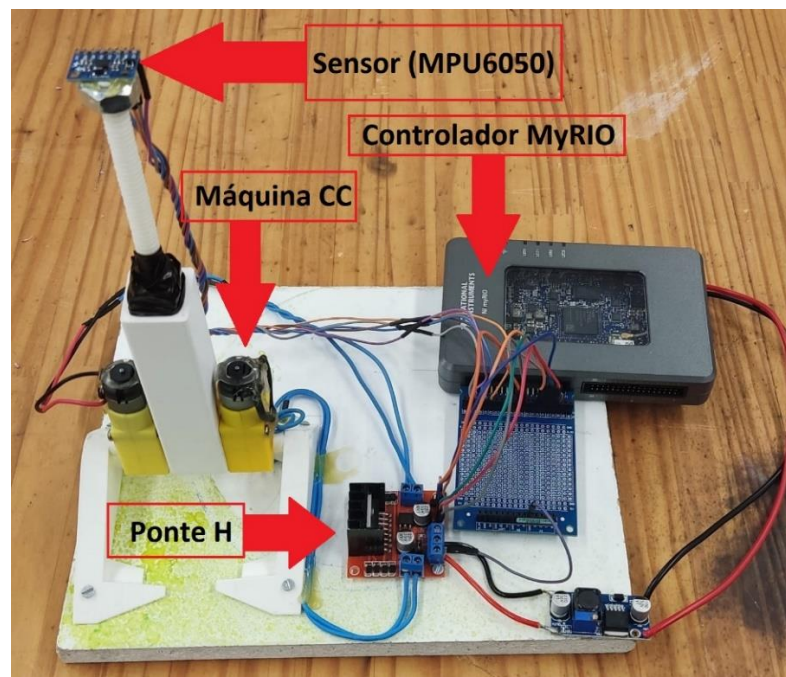


Fonte: Do autor.

A Figura 12, temos o controlador FPGA myRIO, atuando como microcontrolador principal do sistema por possuir uma alta taxa de clock (no caso de 10kHz), é possível atingir um maior nível de amostragem, comparado a outros microcontroladores convencionais. Através do protocolo de comunicação i2c, o microcontrolador irá obter os dados do sensor MPU6050, e também irá enviar os comandos de acionamento e velocidade para a ponte H LN293D que realizará o controle de potência dos motores.

O microcontrolador está programado com uma rotina em LabView®, recebendo informações do sensor MPU6050, e enviando os sinais de comando e PWM para a ponte H LN293D para controlar o sentido de rotação e velocidade dos motores. A Figura 13 ilustra a montagem da planta que será utilizada para os ensaios. Dessa forma realizou-se ensaios experimentais no sistema, de forma a inserir um degrau ao acionamento dos motores, para que eles movam a haste do pêndulo, e o controlador realize a leitura do posicionamento angular do sistema no domínio do tempo.

Figura 13 - Montagem da bancada



Fonte: Do autor.

A seguir, os aspectos relacionados a análise de dados do sensor MPU6050 utilizado neste trabalho, será discutida.

3.2.1 Análise dos dados do sensor

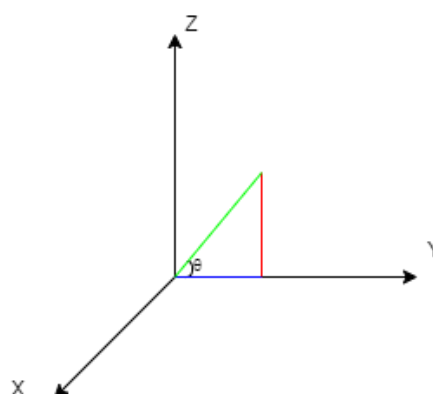
O sensor MPU6050, realiza a leitura de aceleração em três eixos e a leitura da velocidade angular em três eixos, porém neste caso deseja-se realizar a leitura da posição angular em relação ao tempo, ou seja, deve-se tratar estes dados para se obter a variável desejada. Com esse objetivo deve-se realizar a estimação de um IMU (Unidade de Medida Inercial, do inglês, *Inertial Measurement Unit*), para tal é necessário implementar metodologias de cálculo na rotina do controlador para a estimação de tal variável.

Os valores obtidos do giroscópio podem apresentar uma acurácia reduzida, dessa forma, tem-se a necessidade de corrigi-los utilizando os dados do acelerômetro, e fundindo os dois dados em apenas um, a partir de um filtro complementar, definindo as componentes angulares do sistema utilizando fórmulas trigonométricas (KADAM, 2020). Pode-se determinar o ângulo do eixo X, que será o eixo a ser analisado no trabalho, a partir da equação (29):

$$\tan^{-1} \theta_x = \frac{AccelZ}{AccelY} \quad (29)$$

A figura 14, ilustra de maneira gráfica a aplicação da equação (29), dentro do triângulo retângulo entre os eixos, Z e Y.

Figura 14 - Cálculo de ângulo



Fonte: Do Autor.

Dessa forma pode-se determinar o posicionamento angular do pêndulo, considerando que ele estaria entre o plano Z e Y, e o X fosse o plano de momento. Para o filtro complementar, aplica-se uma simples equação que realiza a fusão dos sinais do giroscópio e do acelerômetro, para remover a flutuação do sinal, ocasionada por ruídos no acelerômetro. De acordo com a equação (30) (KADAM, 2020).

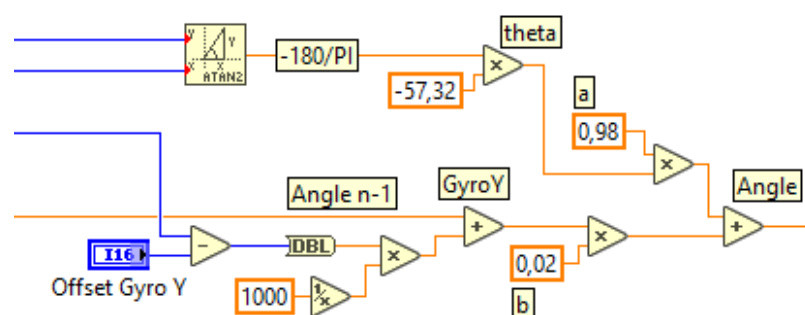
$$Angle_n = (((GyroY - OffsetGyroY) + Angle_{n-1}) \times \alpha) + ((\theta_x) \times \beta) \quad (30)$$

Onde:

- $Angle_N$ = Valor de angulo obtido pelo filtro complementar na posição n.
- $GyroY$ = Medição atual de giroscópio no eixo Y.
- $OffsetGyroY$ = Valor de compensação do Gyro Y.
- θ_x = Ângulo obtido pelo acelerômetro.
- α = multiplicador porcentual da primeira parte.
- β = multiplicador portecental da segunda parte.

Sendo que $0 < \alpha$ e $\beta < 1$. A equação (30) pode ser implementada em software, conforme ilustra a Figura 15.

Figura 15 - Cálculos de Ângulo LabVIEW



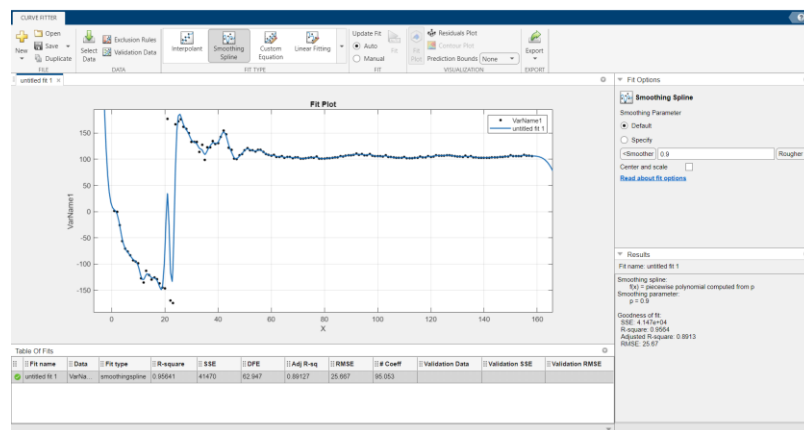
Fonte: Do autor.

Logo, os resultados obtidos destes cálculos serão utilizados para a modelagem da resposta do sistema em relação ao posicionamento angular da haste pelo tempo.

3.3 Estimação dos sistemas

A partir da aquisição da resposta ao degrau do sistema, e com o auxílio de ferramentas computacionais do Matlab® os sinais foram submetidos no *System Identification Toolbox*, e o *Curve Fitting Toolbox*, para a estimação do sistema. A primeira etapa, consiste em tratar a curva obtida no *Curve Fitting Toolbox* (Figura 16) realizando a pré-filtragem do sinal para ser possível analisar a linearidade da curva.

Figura 16 - Curve Fitting Toolbox



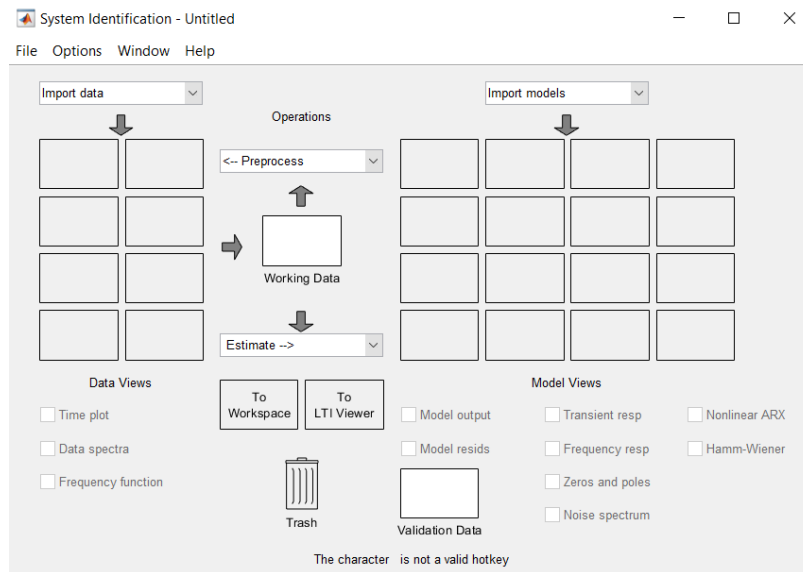
Fonte: Do autor.

Na sequência, utilizou-se a ferramenta matemática *SmoothingSpline* que realiza a suavização das curvas a partir de iterações matemáticas, conforme a equação (31). A referida equação é inserida em forma de função no *software*, ilustrado na Figura 16 (MATHWORKS, 2022).

$$p \sum_i w_i (y_i - s \times (x_i))^2 + (1 - p) \int \left(\frac{d^2s}{dx^2} \right)^2 dx \quad (31)$$

Em segundo momento os dados filtrados serão inseridos na ferramenta de identificação de modelos lineares, referente a Figura 17. Na referida ferramenta são inseridos os parâmetros: i) sinal de entrada do sistema (referente ao degrau) e ii) o sinal de resposta ao degrau (sendo o ângulo medido pelo sensor). A partir dessas informações a ferramenta retorna um modelo de saída na forma de função de transferência.

Figura 17 - System Identification Toolbox



Fonte: Do autor.

Neste sistema será realizado vários testes de estimação dos modelos, utilizando algoritmos de estimação de curvas através de resposta a impulsos de um modelo *FIR* (*Finite Response Impulse*), onde ele obtém os parâmetros para a equação inserida na ferramenta.

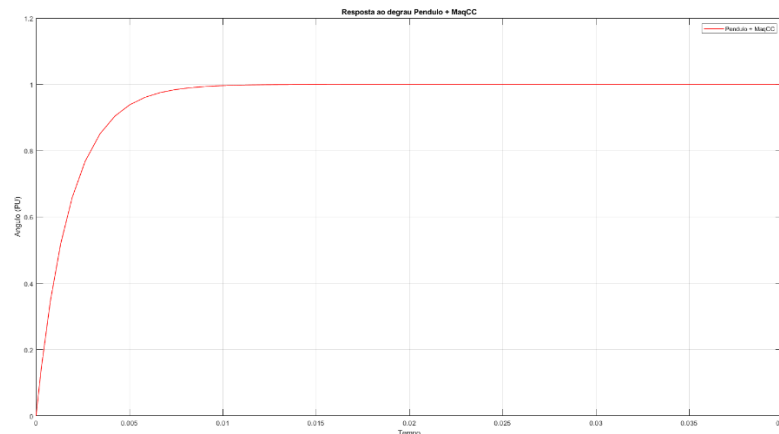
Com os modelos obtidos, sendo pelo menos dois modelos aproximados pela metodologia prática e o modelo simulado anteriormente (Figura 10), realiza-se a implementação em ambiente Simulink® para validação e comparação dos resultados das aproximações dos sistemas. Com os resultados obtidos, será calculado o índice de erros entre as curvas, com o objetivo de indicar a melhor aproximação ao modelo.

A próxima seção aborda os resultados obtidos, através dos ensaios em ambiente simulado e na planta física, e a estimação das equações utilizando as ferramentas apresentadas.

3 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O primeiro ensaio realizado, através de simulação computacional, conforme apresentado no subtópico 3.1, resulta na curva ilustrada pela Figura 18.

Figura 18 - Resposta Modelo Simulado



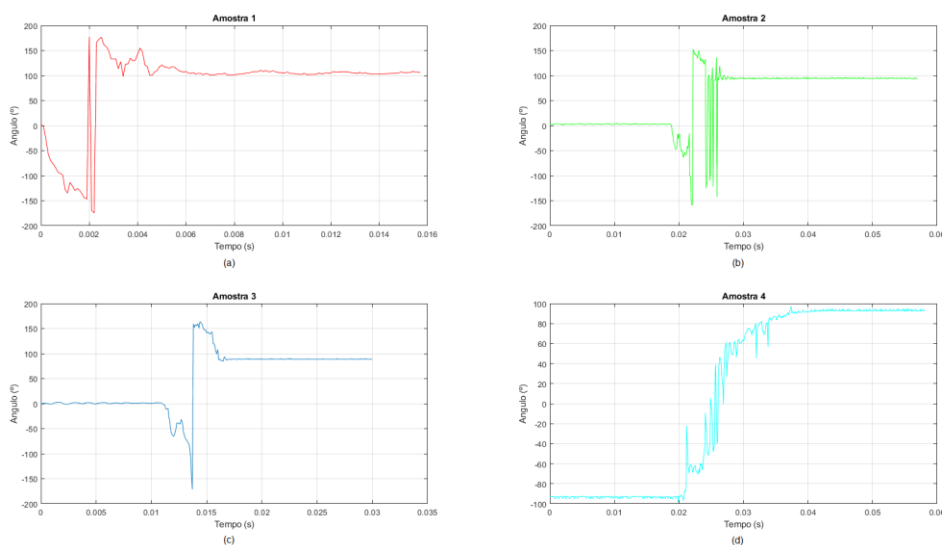
Fonte: Do autor.

Assim é obtido a curva de resposta para ser utilizada como referência para a modelagem da planta física. Seguindo a metodologia apresentada, foram realizados ensaios experimentais em bancada, coletando a resposta do sistema a um degrau. Onde foi realizado duas estratégias de ensaio, sendo elas:

- Inserir o degrau com o pêndulo em posição de repouso (0°);
- Inserir o degrau com o pêndulo em posição de saturação negativa (-90°).

Dessa forma pode-se analisar o comportamento em diferentes situações possíveis, indentificando a resposta do repouso e da saturação, como segue ilustrado pela Figura 19, em que pode-se indentificar os sinais obtidos em cada amostra, em diferentes estratégias.

Figura 19 – Sinal Amostrado em repouso (a), Sinal Amostrado em saturação (b), Sinal Amostrado em repouso (c), Sinal Amostrado em saturação (d).



Fonte: Do autor.

Nas Figuras 19 (b) e 19 (c), é ilustrado o sinal na condição de repouso para a saturação, e nas Figuras 19 (a) e (d) ilustra a condição de saturação negativa para positiva, constituindo todo o alcance da planta.

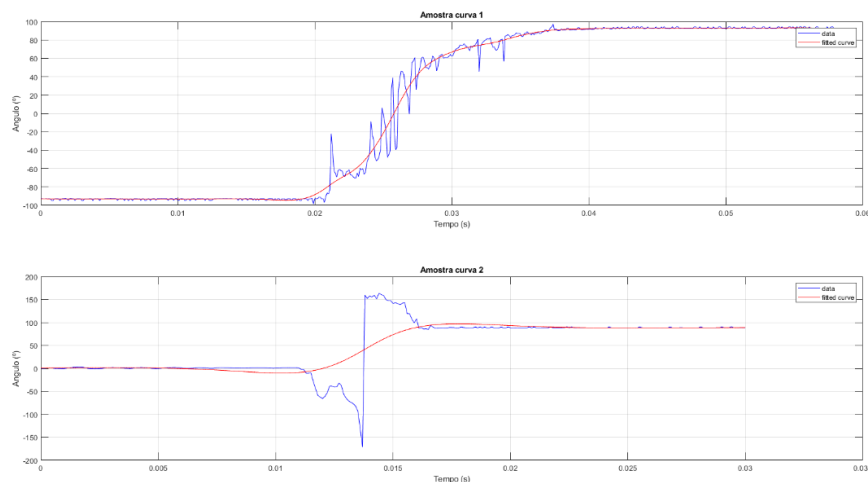
Conforme as curvas geradas pelos ensaios, observa-se um comportamento veloz do sistema, cerca de 20 ms (milissegundos) para atingir a estabilização. As curvas ilustradas pela Figura 19 (c) e (d), expressam o comportamento do pêndulo. Nota-se que a curva (c) parte do ângulo de repouso, passando por uma aceleração e ruídos acarretados por vibrações da estrutura mecânica, e depois estabiliza na saturação por conta da limitação mecânica da planta.

Na curva (d), observa-se o comportamento do pêndulo partindo da posição de saturação (-90°) ou seja, o pêndulo está na posição horizontal perpendicular ao plano direito, e quando recebe o degrau ele inverte sua posição para o plano da esquerda. Logo, essas foram as curvas selecionadas para a metodologia de estimação de modelos utilizando as ferramentas apresentadas.

3.4 Análise das amostras e estimação dos sistemas

Os dados das curvas foram inseridos na ferramenta *Curve Fitting Toolbox*, ilustrada pela Figura 16. Onde foi aplicado a função de suavização, conforme a equação (31). O resultado obtido é ilustrado pela Figura 20.

Figura 20 - Curvas Suavizadas



Fonte: Do autor.

Na figura, se observa a curva das amostras suavizada, removendo os ruídos provenientes da vibração mecânica da planta. Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, logo estes dados foram extraídos para serem inseridos na ferramenta de modelagem. O estimador resultou nas equações 32 e 33, que expressão a função de transferência do sistema.

$$\frac{\theta}{V} = \frac{Kp}{1 + (2 \times Zeta \times Tw \times s) + (Tw \times s)^2} \quad (32)$$

Onde:

- $Kp = 368.57$
- $Tw = 0.0030967$
- $Zeta = 0.91282$

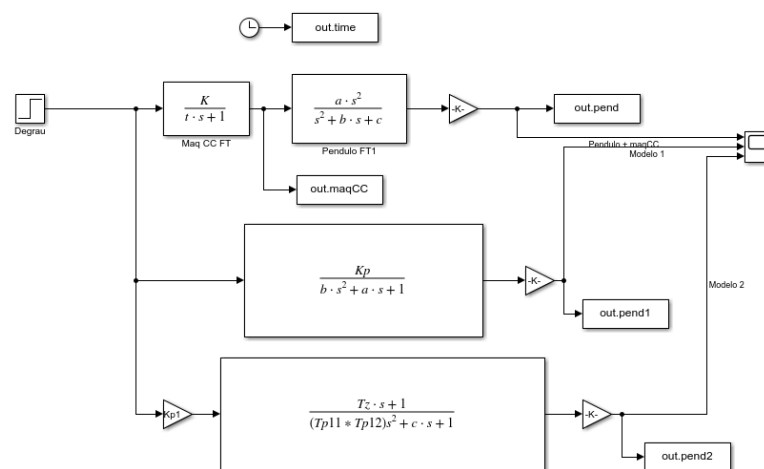
$$\frac{\theta}{V} = \frac{Kp \times (1 + Tz \times s)}{(1 + Tp1 \times s) \times (1 + Tp2 \times s)} \quad (33)$$

Onde:

- $Kp = 222$
- $Tp1 = 0.0011103$
- $Tp2 = 0.0011086$
- $Tz = 7.559e^{-5}$

Os modelos foram inseridos no ambiente de simulação Simulink® em conjunto com o modelo simulado anteriormente para comparação das respostas, ilustrado pela Figura 21.

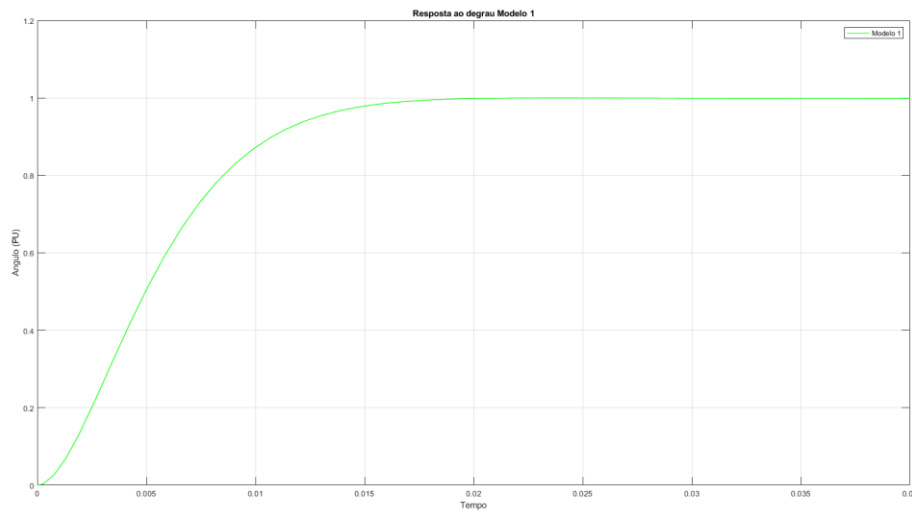
Figura 21 - Simulações Simulink®



Fonte: Do autor.

A partir das simulações do modelo apresentado na Figura 21, foram obtidas as respostas de cada modelo, para o cálculo do Erro Quadrático Médio e do Erro Médio Absoluto através dos scripts. A Figura 22, ilustra a resposta do Modelo 1, referente a equação 31. Para análise dos modelos, a escala dos gráficos está em **pu** (por unidade), variando entre 0 e 1, onde fisicamente seria 0° a 90°.

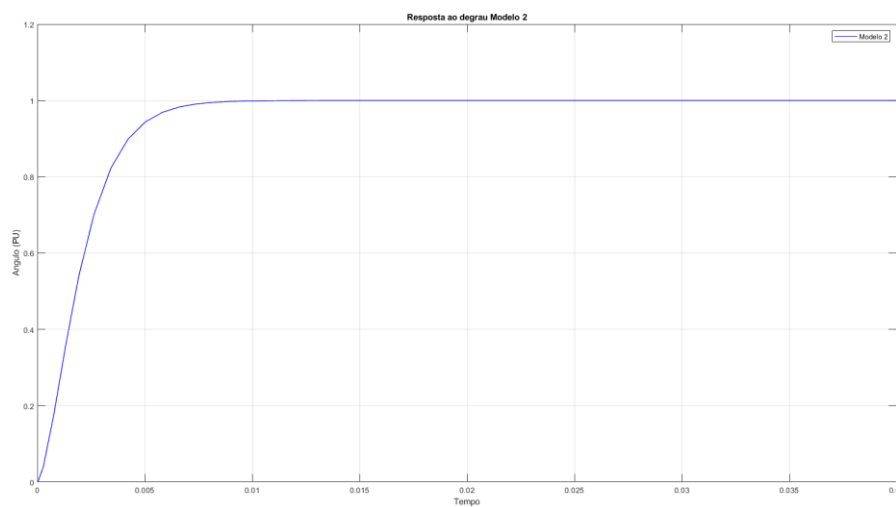
Figura 22 - Resposta ao degrau Modelo 1



Fonte: Do autor.

A Figura 23, ilustra a resposta do Modelo 2, referente a equação 30, em escala PU (por unidade).

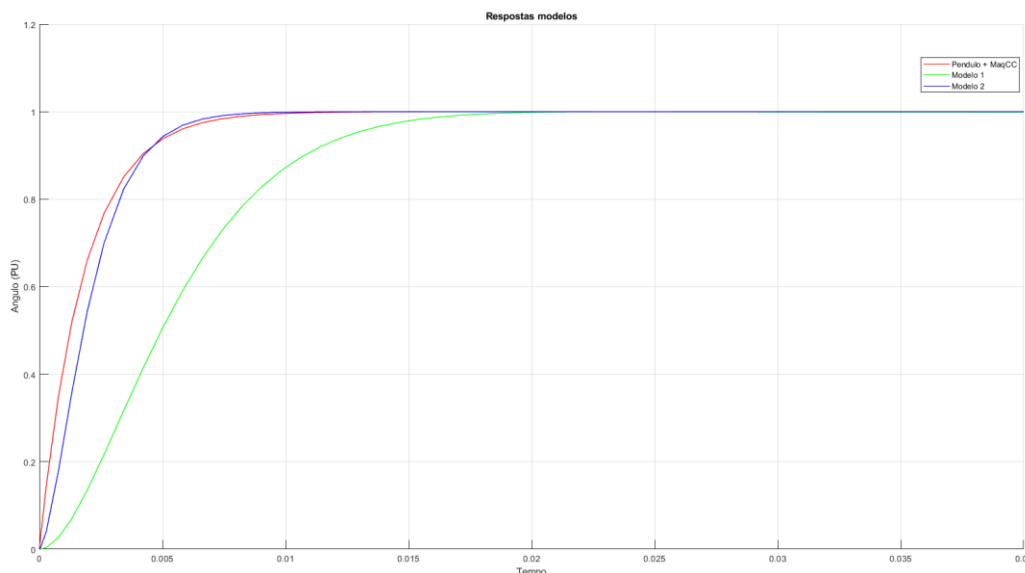
Figura 23 - Resposta ao degrau Modelo 2



Fonte: Do autor.

Por fim, a Figura 24, ilustra a sobreposição das curvas obtidas, que serão utilizadas para calcular os erros.

Figura 24 - Modelos sobrepostos



Fonte: Do autor.

Analisando a Figura 24, pode-se identificar que o Modelo 2 se destaca, pois, sua aproximação ao modelo de referência é melhor. Demonstrando que a estratégia de amostragem do sinal, considerando todo o alcance da planta, resultou em uma resposta mais precisa do sistema. A Figura 25 ilustra o erro em porcentagem em função do tempo, em referência a curva obtida em simulação, onde vemos que o erro para o Modelo 1 é significativamente maior durante o transitório da planta.

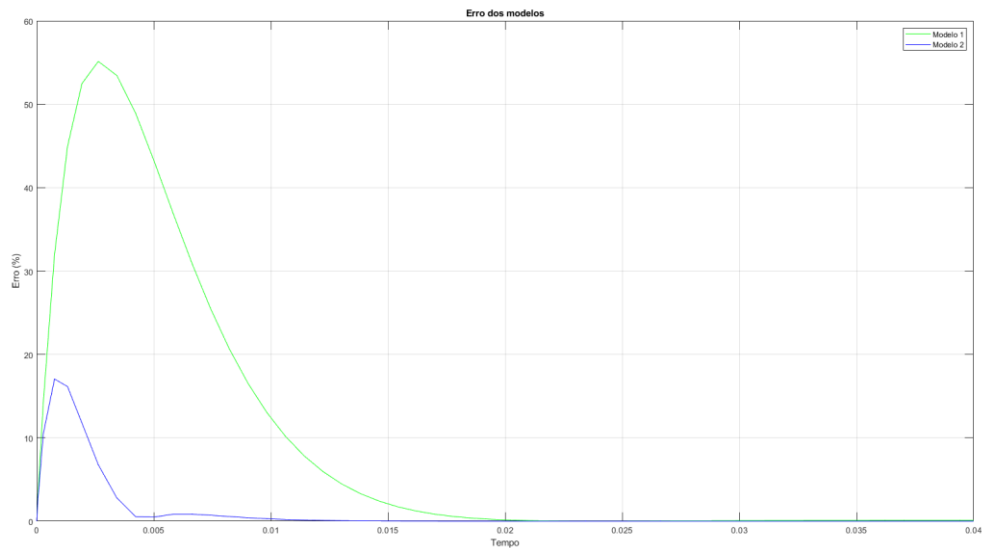
O Erro Quadrático Médio (EQM) e o Erro Médio Absoluto (EMA) entre as curvas, com referência no modelo simulado, resultam em um indicador numérico de uma média entre os erros, quanto mais próximo de zero, menor a taxa de erro. Os valores obtidos são indicados pelo Quadro 1.

Quadro 1 - Erros EQM e EMA3

	Modelo 1	Modelo 2
EQM	0,1884	0,0389
EMA	0,0933	0,0129

Fonte: Do autor.

Figura 25 - Curva de Erro



Fonte: Do autor.

Analisando os resultados obtidos, pode-se identificar o resultado satisfatório da metodologia apresentada, conforme os dados obtidos dos modelos, e a os erros baixos em relação ao modelo de referência, principalmente ao resultado do modelo 2, que possuiu a resposta mais próxima.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados obtidos através da pesquisa e desenvolvimento deste trabalho, é notório a contribuição na área de pesquisa em modelagem e controle, voltada ao segmento da biomedicina e biomecânica. Esse fato pode contribuir com soluções para qualidade de vida de pessoas, e auxiliar aos demais profissionais da saúde em garantir o bem-estar de pacientes, em específico para pacientes que sofram com doenças neuropáticas.

Neste trabalho a principal abordagem foi a metodologia de estimação de modelos, voltados para estratégias do tornozelo. Para tal foi realizado a comparação de modelos matemáticos da literatura com uma planta física. Os resultados mostraram-se satisfatórios, o modelo matemático apresentou um erro quadrático médio de 0,0389. Essa pesquisa abre possibilidades de continuidade para o estudo na área. No estado atual da arte, ainda se tem muito a contribuir para desenvolvimento

de tecnologias e aplicações de conceitos já dominados em outros setores, que podem ser muito úteis para outros.

Em suma, este trabalho abre portas para continuidade de estudos para controle de estimulações FES, aplicadas para equilíbrio funcional. A próxima etapa dessa pesquisa se trata da busca e implementação de sistemas de controle viáveis para aplicações biomédicas.

No contexto do estudo atual, as condições foram voltadas para, principalmente o estudo do estado da arte da biomecânica e como abordar a arte da engenharia para agregar conhecimento em ambas as áreas. Assim busca-se desenvolver soluções que agregam principalmente para a comunidade científica, com o foco em trazer acessibilidade e qualidade de vida para cidadãos que possuem alguma patologia que possam comprometer a atividade motora, o que acaba afastando de suas atividades profissionais e até mesmo do dia a dia.

REFERÊNCIAS

AMADIO, A. C.; COSTA, P. H. L.; SACCO, I. C. N.; SERRÃO, J. C.; ARAUJO, R. C., MOCHIZUKI, L.; DUARTE, M. Introdução à análise do movimento humano: descrição e aplicação dos métodos de medição. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, v. 3, n. 2, p. 41 – 54, 1999. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/6404550/mod_resource/content/1/artigo1_aula1.pdf. Acesso em: 21 out. 2022.

ARDUINO. **Arduino UNO R3**. 2022. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>. Acesso em: 21 out. 2022.

BRONIERA JUNIOR, P. B. **Interface cérebro computador aliada à estimulação elétrica funcional e detecção de fadiga neuromuscular por MMG aplicada ao controle muscular isométrico em pessoas com lesão medular completa**. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2021. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/204222>. Acesso em: 21 out. 2022.

CARMO, R. L.; CARMO, L. L. Articulação talocrural. **Kenhub**, 2022. Disponível em: <https://www.kenhub.com/pt/library/anatomia/articulacao-do-tornozelo>. Acesso: 21 out. 2022.

CAVALHEIRO, G. L. **Análise da postura ereta quieta em diferentes faixas etárias utilizando o discriminante linear**. 2010. Tese (Doutorado em Ciências) –

Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14271>. Acesso em: 21 out. 2022.

COELHO, D. B. Modelo de ativação neural do controle postural humano durante postura ereta. **Engevista**, São Paulo, v. 7, n. 1, p. 83-90, abr. 2005. Disponível em: <https://periodicos.uff.br/engevista/article/view/8784>. Acesso em: 21 out. 2022.

CROCHOT, W. **Nervous system diagram**. 30 dez. 2006. 1 ilustração. Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nervous_system_diagram_\(dumb\).png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Nervous_system_diagram_(dumb).png). Acesso em: 21 out. 2022.

DOOLEY, K. Anatomy angel: gastrocnemius. **Dr. Dooley Noted**, 2015. Disponível em: <https://drdooleynoted.com/2015/06/23/anatomy-angel-gastrocnemius/>. Acesso em: 21 out. 2022.

DUARTE M.; FREITAS S. M. S. F. Revisão sobre posturografia baseada em plataforma de força para avaliação do equilíbrio. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, São Carlos, v. 14, n. 3, p. 183-192, maio/jun. 2010. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbfis/a/hFQTppgw4q3jGBCDKV9fdCH/?lang=pt>. Acesso em: 21 out. 2022.

FORTALEZA, A. C. S. **Controle postural e equilíbrio funcional em indivíduos com neuropatia diabética periférica**. 2011. Dissertação (Mestrado em Fisioterapia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2011. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/87316/fortaleza_acs_me_prud.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 21 out. 2022.

HAUPT, A. G.; DACHI, E. **Eletrônica digital**. São Paulo: Blucher, 2018.

KADAM, S. R., PAWAR, S. N. **Development of cost-effective motion capture system based on arduino**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTING METHODOLOGIES AND COMMUNICATION, 4., 2020, Erode.

KENDALL, F. P.; MCCREARY, E.K.; PROVANCE, G. P.; RODGERS M. M.; ROMANI, W. A. **Músculos: provas e funções**. Barueri, São Paulo: Manole, 2007.

MATHWORKS. **Smoothing splines**. 2022. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/curvefit/smoothing-splines.html>. Acesso em: 21 out. 2022.

MOCHIZUKI, L.; AMADIO, A. C. Aspectos biomecânicos da postura ereta: a relação entre o centro de massa e o centro de pressão. **Revista Portuguesa de Ciências do Desporto**, São Paulo, v. 3, n. 3, p. 77-83, 2003. Disponível em: https://rpcd.fade.up.pt/arquivo/artigos_soltos/vol.3_nr.3/Mochizuki.pdf. Acesso em: 21 out. 2022.

MONTENEGRO, L. P. **Controle digital de velocidade de um motor CC de baixa potência utilizando arduino**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/62150>. Acesso em: 21 out. 2022.

NI. **What is LabVIEW?** [s.d]. Disponível em: <https://www.ni.com/pt-br/shop/labview.html#pinned-nav-section2>. Acesso em: 21 out. 2022.

NI. **What is myRIO?** [s.d]. Disponível em: <https://www.ni.com/pt-br/shop/engineering-education/portable-student-devices/myrio-student-embedded-device/what-is-myrio.html>. Acesso em: 21 out. 2022.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. Tradução Heloísa Coimbra de Souza; Revisão técnica Eduardo Aoun Tannuri. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010

PALASTANGA, N.; FIELD, D.; SOAMES, R. **Anatomia e movimento humano: estrutura e função**. 3ª ed. São Paulo: Manole, 2000.

PEREIRA, R. L.; ARAUJO, R. B. Controle i+pd clássico e adaptativo via síntese direta de um pêndulo invertido com 1 grau de liberdade para utilização prática. 2019. **SBA – Sociedade Brasileira de Automatica**, Campinas. Disponível em: https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/cba/article/view/15

ROBOCORE. **MOTOR DC 3-6V com caixa de redução e eixo duplo**. 2022. Disponível em: <https://www.robocore.net/motor-motoredutor/motor-dc-3-6v-com-caixa-de-reducao-e-eixo-duplo>. Acesso em: 21 out. 2022.

RUSSELL J. A. General approach to peripheral nerve disorders. **Continuum (Minneapolis)**: lifelong learning in neurology, v. 23, n. 5., p. 1241-1262, out. 2017.

TDK INVENSENSE. **Mpu-6050 six-axis (gyro + accelerometer) mems motiontracking™ devices**. [s.d]. Disponível em: <https://invensense.tdk.com/products/motion-tracking/6-axis/mpu-6050/>. Acesso em: 21 out. 2022.

Capítulo II – Implementação de Redundância com CLPs para Sistemas de Controle Industrial

Danilo Faveri Massi ⁴

Wesley Candido Silva ⁵

Leonardo Yuji Ishizaki ⁶

RESUMO

Este artigo apresenta um projeto de redundância com Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) para aplicações industriais, visando aumentar a confiabilidade e disponibilidade do processo. O estudo desenvolve um sistema redundante aplicado a um protótipo didático de uma esteira separadora de materiais, utilizando referências bibliográficas da área de automação e controle. A implementação prática, com equipamentos industriais em uma aplicação diferenciada, demonstrou que a redundância é uma solução eficaz e confiável para processos industriais.

Palavras-chave: Redundância; Controladores Lógicos Programáveis; Confiabilidade Industrial

Implementation of Redundancy with PLCs for Industrial Control Systems

ABSTRACT

This article presents a redundancy project using Programmable Logic Controllers (PLCs) for industrial applications, aiming to increase process reliability and availability. The study develops a redundant system applied to a didactic prototype of a material sorting conveyor, utilizing bibliographic references from the field of automation and control. The practical implementation, using industrial equipment in a different application, demonstrated that redundancy is an effective and reliable solution for industrial processes.

Keywords: Redundancy; Programmable Logic Controllers; Industrial Reliability.

⁴ Engenheiro Eletricista. UniSenaiPR - Campus Londrina.

⁵ Especialista. UniSenaiPR - Campus Londrina, wesley.candido@sistemafiep.org.br

⁶ Mestre em Engenharia Elétrica. yuji096@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

A indústria vem evoluindo junto à sociedade tanto que estamos no processo da quarta revolução industrial também conhecido como indústria 4.0 a primeira vez que se tem registro sobre o termo indústria 4.0 segundo Kagermann et al., (2013) O termo Indústria 4.0 foi apresentado publicamente na Feira de Hannover na Alemanha em 2011. Depois, a palavra mencionada foi discutida até agora, e ainda haverá novidades.

A indústria 4.0 tem alguns pilares como, por exemplo, análise de dados, inteligência artificial, *machine learning*, *internet of Things*(IoT), *cloud computing*. Todas elas juntas têm o objetivo de agilizar o nível e a qualidade da produção e buscando, gerenciamento e confiabilidade no processo.

Diante de tantas tecnologias, a forma de analisar dados também precisou ser adaptada de forma que segundo TOTVS, (2021) A análise de abundantes dados coletados de sensores no chão de fábrica garante visibilidade em tempo real dos ativos de manufatura. Assim, a empresa tem total controle sobre o que acontece e como os processos são conduzidos na fábrica. O resultado é uma maior produtividade na indústria. Sendo assim a utilização destes dados melhora o processo de produção, aumenta a quantidade produzida e também com mais informações e sensores os itens produzidos têm maior qualidade garantido que erros e defeitos, desperdícios sejam diminuídos exponencialmente.

Em um cenário de indústria altamente tecnologia também se faz necessário gerenciamento, tanto como gerenciar processo de qualidade, produção e manutenção. Segundo TOTVS (2021) para minimizar desperdício de insumos, ocorrência de erros e principalmente de tempo são necessárias linhas de produção mais elaboradas e comunicação ativa e gerenciamento a todo momento.

No mesmo cenário onde se é necessário gerenciamento de tudo tem que se haver confiabilidade no processo e na segurança, onde tudo que está conectado à rede tem vulnerabilidade em qualquer peça pode se haver ataques ao sistema. Para a empresa se antecipar a problemas tem que haver confiabilidade no sistema e nas máquinas operacionais, sendo assim o primeiro passo e tornar a máquina confiável ao nível operacional para assim após conectá-la a uma rede e obter os dados.

O uso de redes industriais e protocolos de comunicação são pilares da indústria 4.0 trazendo comunicação e garantia de confiabilidade. O presente trabalho visa tratar redundância dos controladores lógicos programáveis como prioridade para termos um hardware de confiabilidade no presente processo que será simulado através de um protótipo, assim podendo visualizar que não haverá interrupções no processo, tornando o controle confiável e gerando um banco de dados para visualizar a produção, máquina ligada e desligada, e se houver erro em um dos controladores.

1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1. Automação e a Pirâmide da Automação

De acordo com SHERIDAN (1992), automação é o controle automático de operações ou sistemas realizados por dispositivo elétrico, eletrônico ou mecânico em que há substituição dos órgãos humano de visão, decisão ou esforço na operação.

Para MORAES (2010) A automação industrial exige a realização de muitas funções. A Figura 1 representa a chamada Pirâmide de Automação, com os diferentes níveis de automação encontrados em uma planta industrial.

Figura 1 – Pirâmide da Automação

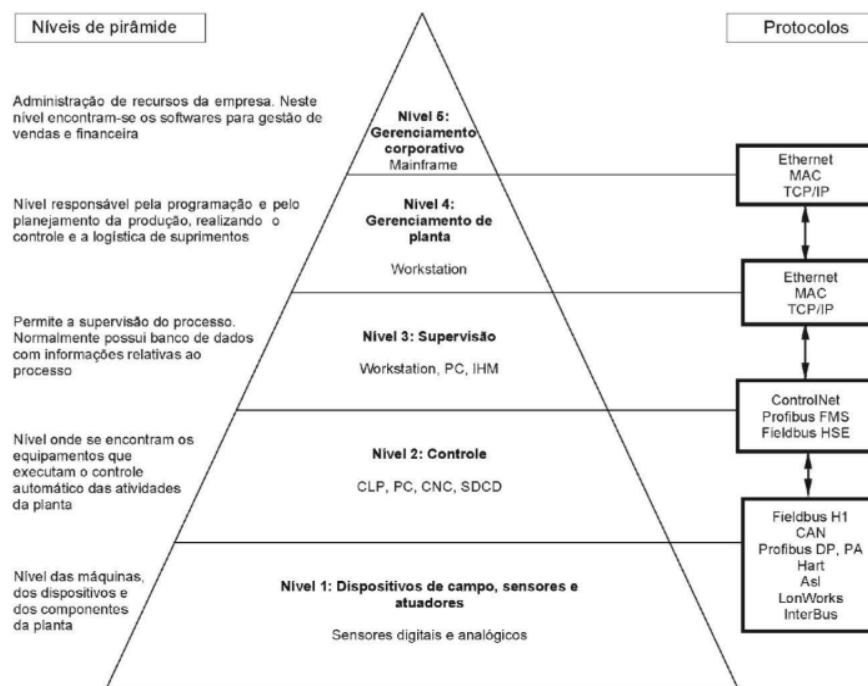


FIGURA 1.8 Pirâmide de automação.

Fonte: MORAES (2010)

Na base da pirâmide está frequentemente envolvido o Controlador Programável, atuando via inversores, conversores ou sistemas de partida suave sobre máquinas e motores e outros processos produtivos. No topo da pirâmide, a característica marcante é a informatização ligada ao setor corporativo da empresa.

A pirâmide tem seus níveis que representam dos dispositivos de campo até o gerenciamento da empresa segundo SANTOS (2021), o primeiro nível é composto por dispositivos de campo, ou seja, atuadores, sensores, transmissores e alguns outros componentes. Já o segundo nível tem equipamentos que realizam controle dos atuadores da planta, por exemplo, CLPs, SDCDs e relés. No terceiro nível são destinados à supervisão do processo executados por uma célula trabalhando na planta como um IHM, PC, workstation, dando suporte a um banco de dados com informações do processo.

Com o terceiro nível em execução, o quarto nível tem responsabilidade pela parte de programar e planejar a produção, auxilia no controle do processo quanto na logística de suprimentos, sendo aplicado o termo de gerenciamento da planta. Sendo executados todos os níveis a para completar com o quinto nível e responsável pela administração dos recursos empresariais para contemplar estas atividades são utilizados alguns softwares para gestão, venda, gestão financeira, BI (*business intelligence*) tudo para auxiliar na tomada de decisões para não afetar negativamente a empresa e o resto da pirâmide.

Para ajuda na tomada de decisões e planejamento da produção existem 2 sistemas, o ERP e o MÊS que segundo NARCISO (2021), o ERP e o MES são sistemas complementares porém diferentes em suas funções. O ERP (*Enterprise Resource Planning*) não consegue coletar dados diretamente da máquina, ele depende de algum outro sistema ou ser alimentado manualmente, metas são organizadas para uma análise mensal, anual e semanal, os KPIs mais importantes são Faturamento, Custos e Lucros além de atender ainda diversas áreas na empresa como financeiro, vendas, compras, RH e manufatura, e essa é uma das suas mais importantes funções, entender como toda a empresa está funcionando, permitindo tomadas de decisões gerenciais globais. Já o MES (*Manufacturing Execution System*), é um sistema mais especializado, voltando o olhar para a produção, seus KPIs mais importantes são coleta, tratamento e disponibilidade de dados de manufatura. É a

ferramenta apropriada para ajudar o gestor da produção a buscar competitividade para sua operação fabril analisando OEE, Produção e Qualidade é um cronômetro mais barato e mais apropriado para medir as coisas que acontecem na fábrica, num ritmo muito mais acelerado.

1.2. Controladores Programáveis

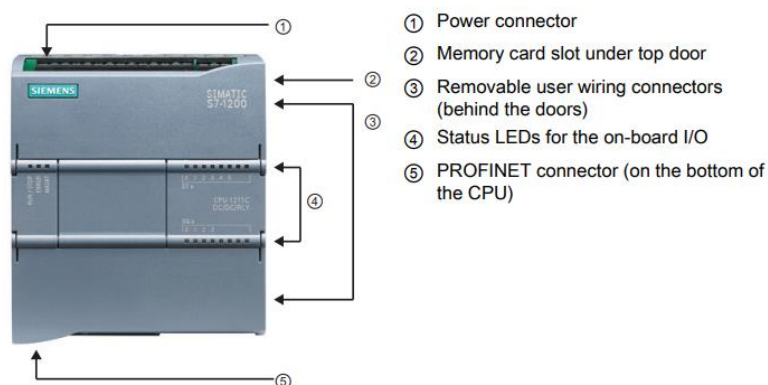
Um controlador pode ter alguns nomes variados, porém e o mesmo equipamento segundo FRANCHI (2008) Devido ao intuito inicial de substituírem os painéis de relés no controle discreto, foram chamados de PLC (*Programmable Logic Controllers*) traduzido para o português como CLP (Controladores Lógicos Programáveis). Porém, atualmente, os controladores são bem mais complexos, pois as plantas industriais normalmente precisam manipular não somente funções lógicas binárias, como, por exemplo, tipo E, OU, mas também controlar malhas analógicas, motivo pelo qual podem ser chamados atualmente apenas de PC (*Programmable Controllers*) ou CP (Controladores Programáveis), já que não são limitados a operações com condições lógicas. No entanto, o nome CLP fixou-se como sinônimo de produto.

A definição de CLP segundo FRANCHI (2008) controlador lógico programável pode ser visto como, um equipamento eletrônico de processamento que possui uma interface amigável com o usuário cuja função é executar controle de vários tipos e níveis de complexidade. Sendo assim pode se fazer uma programação no mesmo e executar algumas atividades em sua planta.

O CLP S71200 segundo SIEMENS (2012), é um controlador modular ilustrado na figura 2, onde o mesmo se encontra com entradas e saídas digitais e uma porta Ethernet integrada pode também ser adicionado mais módulos como o de entradas e saídas analógicas porta serial entre outros essa seria de controladores é um investimento garantido para várias aplicações além de ser seguro e confiável podendo ser expandido e atender uma série de demandas tecnológicas na indústria. Estes controladores atendem a norma IEC 61508 até a SIL 3 e ISO 13849-1 até a PL onde contém vários requisitos para poder estar no mercado e ser seguro e de alta confiabilidade, além disso o desenvolvimento dos seus programas ser no TIA Portal

que oferece diversas opções de comando operações e bloqueios para os programas relacionados à segurança.

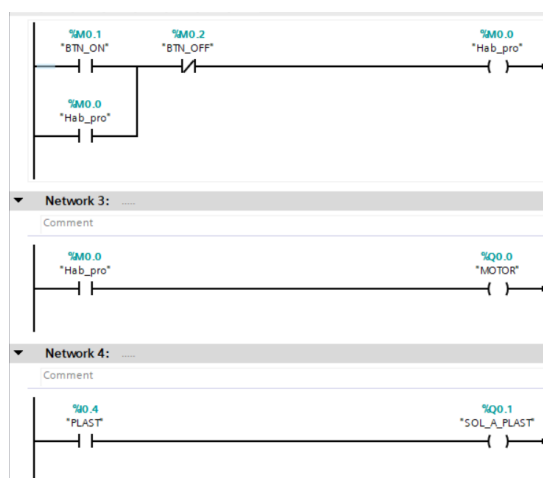
Figura 2 – Ilustração CLP



Fonte: SIEMENS (2012)

A programação ladder segundo FRANCHI, CLAITON MORO (2008) É uma linguagem gráfica baseada na lógica de relés e contatos elétricos para a realização de circuitos de comandos de acionamentos. Por ser a primeira linguagem utilizada pelos fabricantes, é a mais difundida e encontrada em quase todos os CLPs da atual geração. Esta linguagem também conta com alguns componentes e símbolos utilizados para programar e acionar saídas segundo FRANCHI, CLAITON MORO (2008) Bobinas e contatos são símbolos utilizados nessa linguagem. Os símbolos de contatos programados em uma linha representam as condições que serão avaliadas conforme a lógica. Como resultado determinam o controle de uma saída, sendo normalmente representado pelo símbolo de uma bobina como ilustrado na figura 3.

Figura 3 – Programação Ladder



Fonte: Do Autor (2022)

1.3. STL (Standard Template Library)

STL traduzindo para o português Biblioteca de Modelos Padrão que segundo EUGENIO (2009) STL é um conjunto de tipos abstratos de dados e funções projetados para manipularem diferentes tipos de dados transparentemente. As operações sobre os dados são realizadas por métodos que também aceitam tipos de dados genéricos. Como o próprio nome diz, STL recorre a templates, já definidos, para implementação de diversos algoritmos que manipulam dados eficientemente, como, por exemplo, vetores, dinâmicos, listas, pilhas, etc. No STL também foi adicionado um tipo *String*, que facilita as operações de manipulação de caracteres quando comparado a biblioteca *string.h* da linguagem C., além disso, também existem funções de busca, ordenação, dentre outros.

1.4. Redundância em CLPs

Pode se definir redundância segundo KOREN; KRISHNA (2010) A redundância de hardware é fornecida pela incorporação de hardware extra no design para detectar ou substituir os efeitos de um componente com falha.

A redundância no caso de CLPs pode ser tratada de forma estático ou dinâmico segundo KOREN; KRISHNA (2010) hardware estático tem o objetivo principal o mascaramento imediato de uma falha. Outra forma diferente de redundância de hardware é a redundância dinâmica, na qual os componentes sobressalentes são ativados após a falha de um componente atualmente ativo.

Para garantir o funcionamento de um processo como, por exemplo, óleo e gás, açúcar e etanol, usinas hidrelétricas, e agroindústria. Segundo ALTUS (2021), há vários motivos para utilizar sistemas de arquitetura redundante, como robustez, disponibilidade e segurança formam o tripé que sustenta a base deste tipo de metodologia. A mais utilizada na indústria é a *hot stand-by*, técnica em que um ou mais módulos ficando em espera enquanto o equipamento principal está operacional. Neste tipo de arquitetura, os módulos em espera funcionam em sincronia com o equipamento ativo e, caso uma falha seja detectada, o mesmo está pronto para se tornar operacional imediatamente.

1.5. Redes Industriais

As redes industriais vieram para ajudar no tráfego de informações e ligações no CLP segundo MORAES (2019) as vantagens trazidas por essas ferramentas tornam os sistemas de redes industriais muito atraentes, possuindo grande confiabilidade e modularidade, facilidade de compreensão e redução de custos em comparação aos sistemas centralizados anteriormente utilizados, com CLP.

Porém uma das maiores vantagens, segundo CASSIOLATO [s.d.] é fazer com os dados trafeguem desde o chão de fábrica, em máquinas, equipamentos, etc., que possa chegar até o nível de informação gerencial da empresa.

Redes industriais tem protocolos de comunicação como, por exemplo, profibus, que segundo CASSIOLATO [s.d.] O PROFIBUS é um padrão de rede de campo aberto e independente de fornecedores, onde a interface entre eles permite uma ampla aplicação em processos, manufatura e automação predial. Esse padrão é garantido segundo as normas EN 50170 e EN 50254. Desde janeiro de 2000, o PROFIBUS foi firmemente estabelecido com a IEC 61158

Também há o profinet que segundo CASSIOLATO [s.d.] O PROFINET é um conceito de automação compreensível que emergiu como resultado da tendência na tecnologia de automação para máquinas reusáveis e modulares em plantas com inteligência distribuída. Suas particularidades atendem postos-chaves das demandas da tecnologia de automação já a comunicação consistente entre os diversos níveis de gerenciamento desde o campo até os níveis corporativos usando Ethernet. Uma abundância de fabricantes em um protocolo e sistema aberto; utiliza padrões IT; integração em sistemas PROFIBUS sem mudanças dos mesmos.

1.6. SCC e SCD

O SCC (Sistemas de Controle Centralizado) é centralizado em apenas um processador, segundo MAHALIK, LEE, (2003) todo o processamento ocorre num processador (controlador) central onde todos os sensores e atuadores devem estar conectados. Este tipo de sistema requer um ponto de comunicação entre o processador central e cada sensor/atuador. Para sistemas grandes, o número de sensores/atuadores pode ser superior a mil, tornando árdua a instalação e a

manutenção desses sistemas, já que todos os pontos devem ser conectados a um único processador ou ponto de processamento.

Já os SCD (Sistemas de Controle Distribuído) são descentralizados cada sensor ou atuador tem seu processamento de acordo com MAHALIK, LEE (2003) cada sensor ou atuador possui um microprocessador responsável por todo o processamento local, isto é, cada sensor ou atuador é uma unidade básica de processamento ou nó do sistema. Os controladores nesses sistemas são encapsulados nos sensores e atuadores (nós). A funcionalidade do sistema é resultado do trabalho em conjunto dos nós que são unidades de processamento autônomas. Com esse método, divide-se uma tarefa grande em pequenas tarefas, cada uma residindo em um nó. O sistema de controle fica distribuído entre os vários nós que cooperam entre si, tornando remota a possibilidade de falha total, já que a falha em um nó não paralisa o funcionamento dos demais.

1.7. Node-RED

O Node-RED é uma plataforma baseada em Javascript que segundo FERENCZ, DOMOKOS (2019) é um ambiente de programação virtual baseado em processos que cria “fluxos de dados” do sensor para a nuvem conectando hardware e softwares. É adequado para escrever processos de dados, facilitando assim em processamento.

Também tem aplicações de processamento que segundo FERENCZ, DOMOKOS (2019) Ele pode ser usado para compilar facilmente a lógica de processamento de dados e transferir os dados processados para sistemas de nível superior (servidor SQL, sistema, coletor central de dados, serviço baseado em nuvem) em minutos ou exibi-lo imediatamente. Em vez de programar uma página da Web exibindo dados de sensores diferentes, o Node-RED fornece uma interface do Dashboard que permite criar uma interface sem a necessidade de conhecimentos especiais de HTML, CSS.

1.8. Linguagem Fluxo (Node-RED)

A ferramenta Node-RED tem sua linguagem de fluxo e programação segundo REIS (2021) Por meio de nodes (ou fluxos) é possível a execução de eventos HTTP,

TCP (Protocolo de Controle de Transmissão), *websocket* (tecnologia de Comunicação Bidirecional), MQTT (Transporte de telemetria de enfileiramento de mensagens, utilizado para troca de mensagens entre sensores) e outros. Sua edição é baseada no navegador, sem que haja restrições para se facilitar as conexões. O principal destaque desta aplicação se baseia no fato desenvolvimento ser possível em qualquer sistema operacional.

Os nodes são fluxos e cada um tem seu propósito de acordo com CELESTRINI (2022) No Node-RED, programas são fluxos compostos por uma coleção de nós conectados para trocar mensagens. Cada nó tem um propósito bem definido tecnicamente, um fluxo consiste em uma lista de objetos Javascript que descrevem os nós e suas configurações.

1.9. Disponibilidade de dados em nuvem







A disponibilidade dos dados e de suma importância, pois são dados que precisam ser acessados a qualquer momento segundo FWC (2019) Para se ter alta disponibilidade incorporada a ideia de acesso a serviços, ferramentas e dados a qualquer hora e em qualquer lugar, e é a base da empresa moderna. A disponibilidade também está relacionada à confiabilidade: um serviço que funciona 24 horas, 7 dias por semana, mas sempre instável, não é considerado bom. Para alcançar uma alta disponibilidade real na nuvem, não apenas seu serviço deve estar sempre ativo, mas também deve estar 99,2% disponível. Vale a pena notar que nem todos os serviços em nuvem precisam estar disponíveis o tempo todo. À medida que os serviços se tornam mais críticos, a disponibilidade do sistema se torna mais importante.

A confiabilidade está totalmente ligada a disponibilidade que há um recurso muito valioso segundo FWC (2019) O projeto para se ter alta disponibilidade em nuvem tem objetivo de proteger o recurso mais precioso: o tempo. Cada segundo do tempo de inatividade do seu sistema custa dinheiro para você e seus clientes. Como resultado, os administradores de sistema gastam mais custos de solução de problemas a cada segundo. As principais razões para o tempo de inatividade do sistema de TI da empresa estão relacionadas a incidentes de segurança e desastres naturais.

2.1. CLPs e programa

Para atuação em redundância será utilizado dois CLPs S71200 (siemens) programados devidamente conforme a utilização da esteira didática. Cada CLP haverá o mesmo programa compilado internamente com algumas diferenças de configuração e será utilizado módulos profibus sendo assim cada módulo tem sua configuração específica. O programa compilado foi utilizado uma estratégia de utilizar tags iguais como, por exemplo, a saída para ligar o motor da esteira for Q0.0 no CLP máster será no slave da mesma forma e assim segue conseqüentemente em todas entradas espelhando as tags entre os CLPs na figura 5 temos todas as tags utilizadas no programa onde compor com a inicial %Q são saídas digitais, e %I são entradas digitais.

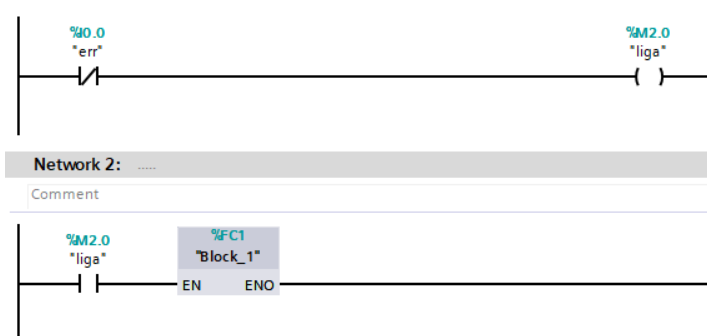
Figura 5 – Lista de tags

	Sensor Polimero	Default tag table	Bool	%I0.4
	Sensor Metal	Default tag table	Bool	%I0.5
	Motor Esteira	Default tag table	Bool	%Q0.0
	Solenóide Polimero	Default tag table	Bool	%Q0.1
	Solenóide Metal	Default tag table	Bool	%Q0.2
	Sinal	Default tag table	Bool	%Q0.3

Fonte: Do Autor (2022)

No programa do CLP slave há uma diferença é utilizado bloco um OB (*Organization Block*) Main que é executado de forma cíclica, e também um FC (*Function*) Block_1 que precisa ser chamado dentro do OB Main. Como ilustrado na figura 6 que temos um contato para ativar a FC Block_1.

Figura 6 – Contato do FC Block_1



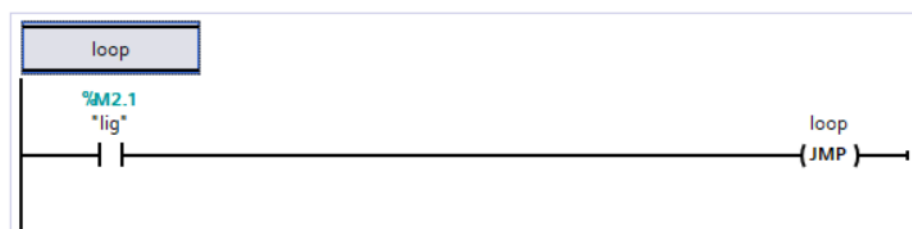
Fonte: Do Autor (2022)

O contato "err" é o sinal de erro vindo do máster dizendo que o mesmo está com problemas e está inativo e pedindo para ativar o bloco FC Block_1 contendo o mesmo programa que já estava em operação assim assumindo o comando e dando

sequência no trabalho e operação dando confiabilidade no sistema, pois o programa estava parado esperando o erro se caso estivesse rodando em paralelo poderia causar algum conflito de sinal ou algum *delay* sendo assim foi optado por deixar o programa em espera.

Para simular o erro foi forçado com uma estratégia de programação dentro do CLP master utilizando uma estratégia de *cycle time* com um limite de 6 segundos para resposta se ultrapassar o CLP entra em erro e fica em estado de *stop*. Para esta configuração foi utilizado um OB *cyclic interrupt* que executado de forma cíclica, porem gera interrupção por tempo e fase pode também chamar FC que no caso chama o bloco FC Block_1 contendo dentro uma bobina JMP que interromper a execução linear do programa e retoma em outra rede porem é retomada na mesma assim causando o erro igual mostrado na figura 7.

Figura 7 – Loop para erro

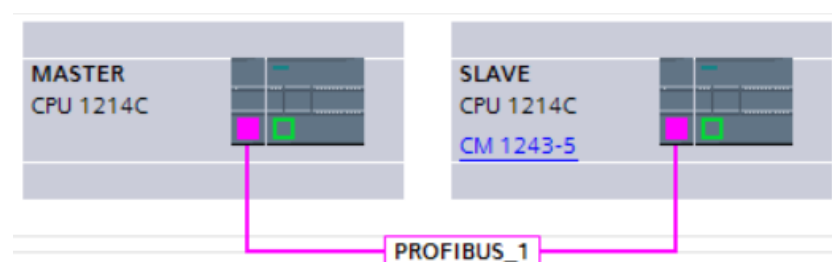


Fonte: Do Autor (2022)

2.2. Comunicação profibus

A comunicação entre os CLPs será utilizado um protocolo de comunicação seguro e confiável entre os CLPs onde consiga suprir a demanda e faça o papel de transportar informações, este protocolo a ser utilizado é o profibus que é muito utilizado em equipamentos similares e iguais aos que serão utilizados nesta aplicação conforme na figura 8 onde representa a comunicação profibus.

Figura 8 – comunicação entre CLPs



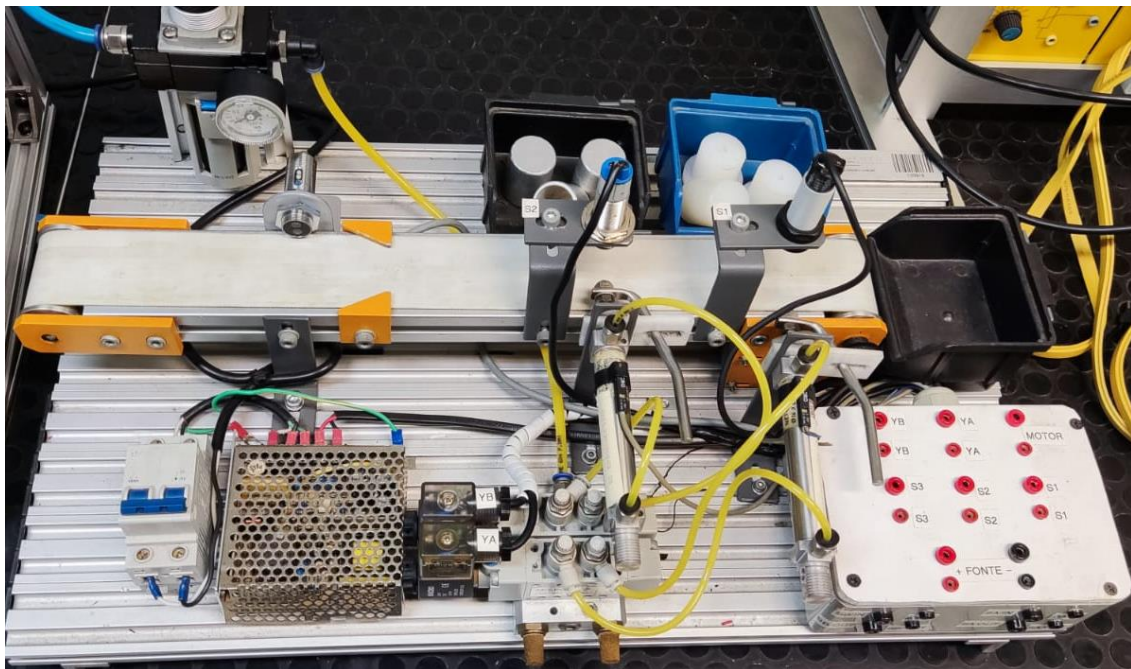
Fonte: Do Autor (2022)

Os módulos conversam entre si quando ocorre o erro no CLP máster o modulo entra em erro assim entrando em erro o modulo slave porem o CLP slave não para de funcionar só fica mostrando erro que é do próprio modulo profibus.

2.3. Esteira Didática

Para aplicar estas ferramentas será utilizado a esteira didática festo do Senai Londrina com a finalidade de separar materiais metálicos e não metálicos que estão sendo encaminhados por meio de uma esteira e poderão ser visualizados pelo sensor capacitivo e indutivo que farão o reconhecimento do material e apontando para qual atuador deve ser acionado para destinar corretamente o material para outra finalidade na figura 9 é apresentado a imagem da esteira.

Figura 9 – Esteira Separadora



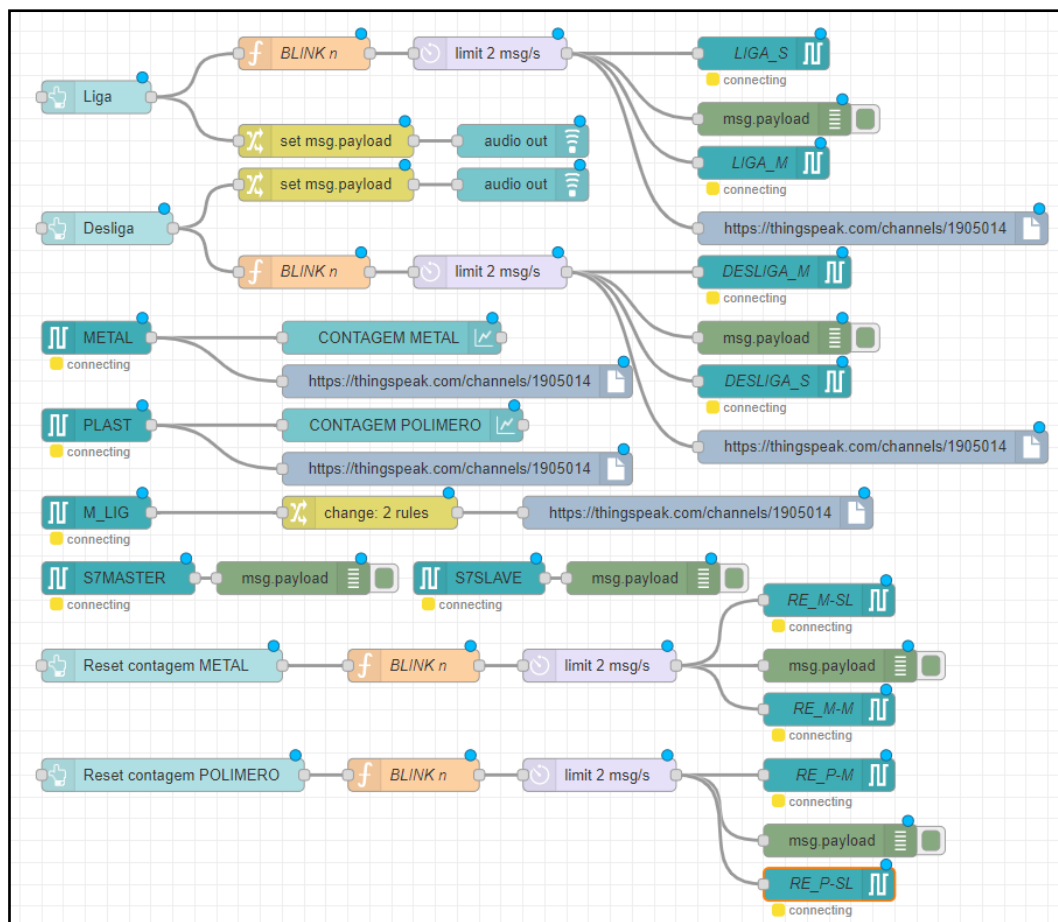
Fonte: Do Autor (2022)

Na esteira temos os bornes onde será conectado os terminais de entrada e saída dos CLPs. Para poder reconhecer os materiais os sensores terão de ser ligados nas entradas digitais dos CLPs, o sensor S1 capacitivo para os poliméricos e o sensor S2 indutivo para os metálicos, já para fazer a separação será ligado aos terminais de saída dos CLPs a solenoide YA para os poliméricos e YB para os metálicos e o MOTOR para ligar a esteira. Lembrando que o negativo da fonte da esteira tem que estar equalizado com as fontes dos CLPs.

2.4. Node-RED

Para este projeto foi utilizado a linguagem de blocos que o software online oferece para solucionar o caso de acionamento do processo e verificação da quantidade de material separado pela esteira e também ter a aplicação de coleta e envio de dados para nuvem. Para este processo foi feita a programação que pode ser identificada na figura 10.

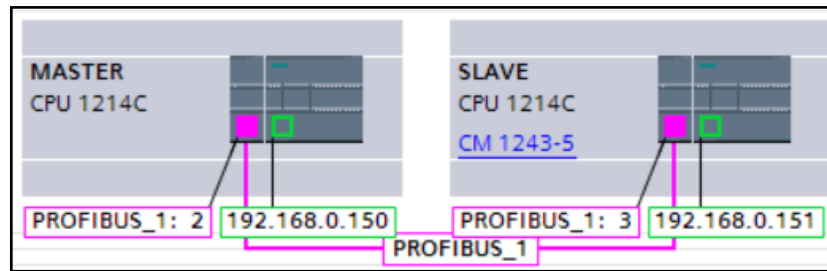
Figura 10 – Programação Blocos Node-RED



Fonte: Do Autor (2022)

Para comunicação entre os CLPs e o computador onde o software está instalado foi utilizado um switch para interligar as comunicações, sendo cada CLP tendo um IP para o Node-red poder encontrar os dados dos CLPs. Na figura 11 temos em verde cada IP dos CLPs.

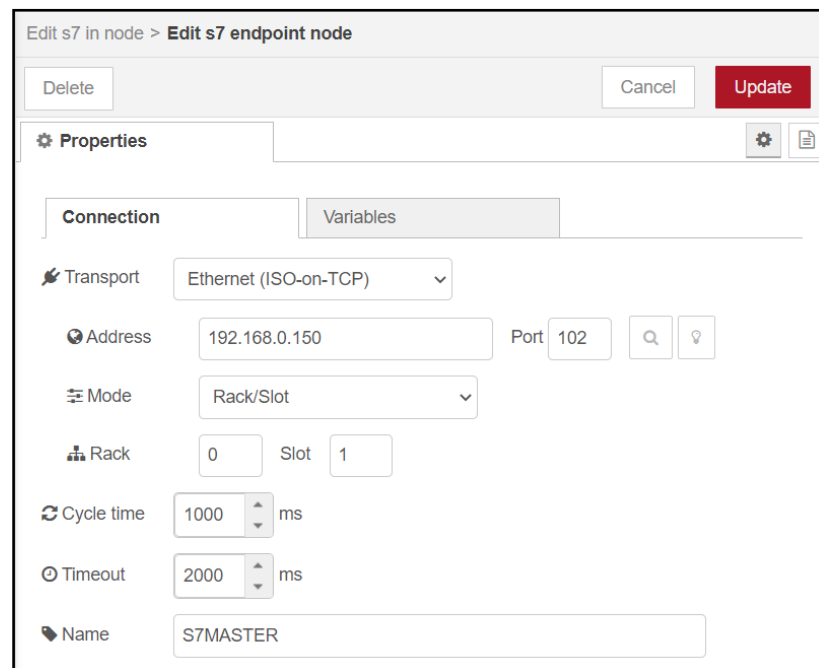
Figura 11 – IP dos CLPs



Fonte: Do Autor (2022)

Foi utilizado uma biblioteca ou chamado pelo software de *manage palette* onde foi feito a instalação da *node-red-contrib-s7* onde é feito a integração entre o CLP S71200 e o Node-RED onde tem que ser preenchido os dados conforme na figura 12.

Figura 12 – configurações Node-RED



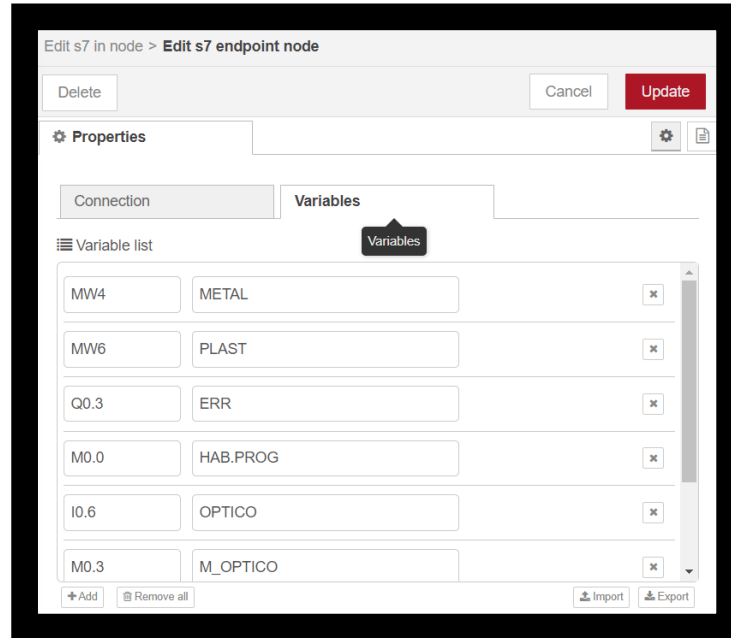
Fonte: Do Autor (2022)

Para poder verificar as variáveis e poder converter em ações como a de ligar e desligar o processo e mandar os dados para o aplicativo da nuvem tem que ser listado as variáveis que são as mesmas usadas no programa do CLP. O preenchimento tem que ser conforme a figura 13.

Para poder fazer acionamento do processo foi utilizado um *manage palette* chamado *node-red-dashboard* onde foi criado dois botões apenas para ligar e desligar

o processo podendo ligar e desligar o processo tanto enquanto está operando normalmente em master ou quando está em erro e o slave operando

Figura 13 – configurações Node-RED



Fonte: Do Autor (2022)

No dashboard também foi colocado para verificar a produção na tela um gráfico por hora trabalhada conforme a figura 14 do dashboard montado.

Figura 14-configuraçõesNode-RED



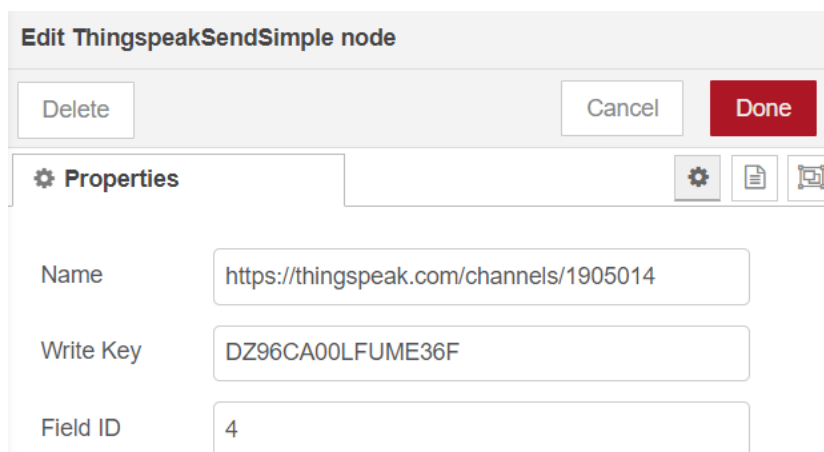
Fonte: Do Autor (2022)

Para o caso do banco de dados e registrar os dados foi utilizado um *manage palette* chamado *node-red-contrib-thingspeak* que comunica com a plataforma online do site ThingSpeak formando um banco de dados.

2.5. Dados em nuvem

Os dados em nuvem são registrados em forma de gráfico pela plataforma online do ThingSpeak que fornece uma integração com o Node-RED. Para a configuração tem que ser preenchida os dados conforme fornecidos pelo provedor da plataforma do banco de dados para registro dentro mesmo em seu canal conforme na figura 15.

Figura 15 – configurações Node-RED



Fonte: Do Autor (2022)

O banco de dados registrado pelo ThingSpeak é de forma online e registra em nuvem para acesso de dispositivo remotos só necessitam do link fornecido e a permissão do autor dentro tornando público ou no caso privado para acesso teria que ter uma conta no site e permitido acesso cadastrando e-mail para acesso ao banco.

3. Resultados

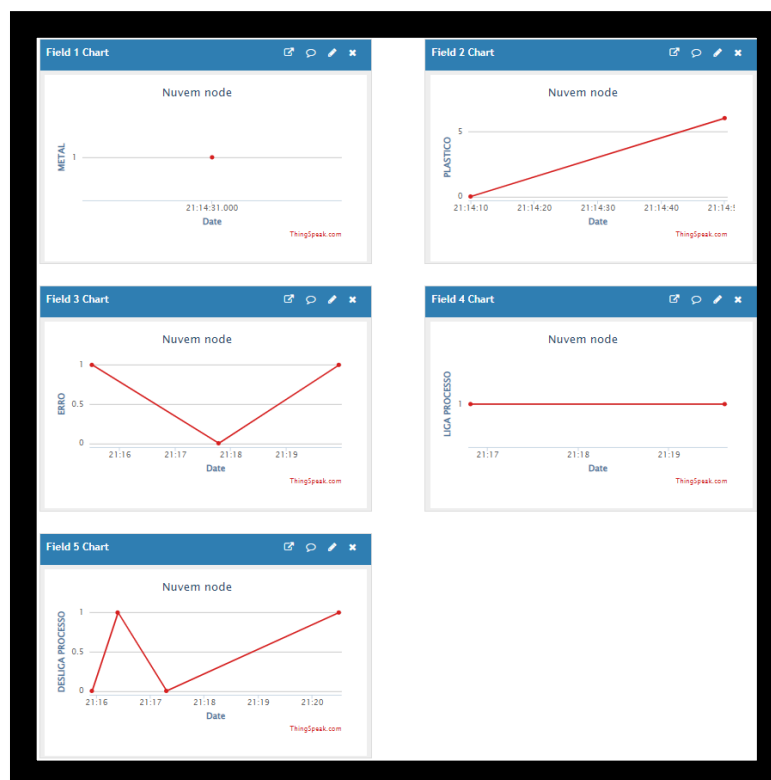
Os controladores lógicos programáveis (CLP) da Siemens foram devidamente aplicados e apresentaram resultados satisfatórios na redundância e na aplicação do Node-RED onde com a simulação do erro feito através do *cycle time* foi um sucesso, também foram feitos testes desenergizando o CLP master e retirando o cabo de comunicação Profibus onde ocorreram erros porém para não acabar danificando o CLP a alternativa mais amistosa aplicada foi dando erro de *cycle time*, pois é apenas

um erro de programação que não traria nenhum dano ao CLP e nem a comunicação com o Node-RED e nuvem de dados.

O Node-RED foi um sucesso conseguindo controlar a função de ligar, desligar o processo tanto em master quanto em slave, assim sendo aplicado como uma forma de supervisor, também registrando a separação de materiais metálicos e poliméricos e zerando a contagem, além disso, fazendo a ponte entre controlador e nuvem.

Para os resultados do banco de dados em nuvem foi feito os registros porem os registros não conseguiram ser registrados em tempo real obtendo um delay entre a mensagem enviada do controlador e o registrado pelo Thingspeak, pois há uma latência de rede onde não foi utilizado uma banda 5G, pois é uma tecnologia nova que está surgindo e também o Thingspeak é um software gratuito e o que é oferecido gratuitamente por ele não é uma tecnologia de ponta assim o banco de dados obteve registros porem com atraso e alguns se perderam e não foram registrados. Os registros obtidos através de alguns minutos estão registrados na figura 16.

Figura 16 – Registros do Thingspeak



Fonte: Do Autor (2022)

4. Conclusão

Quando foi obtida a ideia do estudo sobre redundância a ideia inicial que obtida foi inteiramente um sucesso e cumprindo toda a expectativa porém infelizmente o registro de dados em nuvem não foi um sucesso absoluto, pois obteve alguns problemas com latência de rede e também por ser uma plataforma gratuita não foi obtido uma experiência das melhores porém o objetivo foi cumprido obteve registros de alguns dados e se for substituído o servidor para dados em nuvem e colocado uma rede de dados 5G pode haver um registro de dados em tempo real de melhor qualidade assim concluo que a pesquisa e testes que foram aplicados e demonstraram que a utilização e aplicação de redundância foram satisfatórias e confiáveis e podem ser aplicados em processos industriais apenas feitos alterações para obter dados mais preciso e mais rápidos por parte do banco de dados.

REFERÊNCIAS

- KAGERMANN, H et al. *Recommendations for implementing the strategic initiative industrie*. 2013.
- Indústria 4.0: o que é, impactos, benefícios e tecnologias. TOTVS, 2021. Disponível em: <https://www.totvs.com/blog/gestao-industrial/industria-4-0/>. Acesso em: 14 mai.2022.
- SHERIDAN, Thomas B. *Telerobotics, automation, and human supervisory control. Primeira*. [S.l.: s.n.], 1992.
- MORAES, Cícero Couto de; CASTRUCCI, Plínio de Lauro. *Engenharia de Automação Industrial*. 2ª ed. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 2010.
- FRANCHI, CLAITON MORO, Claiton Moro Franchi, Valter Luís Arlindo de Camargo. *Controladores Lógicos Programáveis - Sistemas Discretos*. 1. ed. - São Paulo: Érica, 2008.
- KOREN, I.; KRISHNA, C. M. *Fault-tolerant systems*. [S.l.]: Morgan Kaufmann, 2010.
- CASSIOLATO, César. *Redes Industriais*. Smar technology company [s.d]. Disponível em: <https://www.smar.com/pt/artigo-tecnico/redes-industriais>. Acesso em: 20 mai.2022.

FERENCZ, DOMOKOS, Katalin Ferencz, József Domokos. *Using Node-RED platform in an industrial environment* - Jubileumi Kandó Konferencia 2019.

MORAES, Alexandre Fernandes de. *Redes industriais para automação industrial : AS-I, profibus e profinet* / Alexandre Baratella Luigli e Max Mauro Dias Santos - 1. ed. - São Paulo: Érica, 2019.

REIS, Elias da Cunha Lima. *Automação residencial com a utilização de raspberry pi*. Orientador: Me. Gustavo Siqueira Vinhal. 2021. 43 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia da Computação) - Pontifícia Universidade Católica de Goiás, [S.l.], 2021. Disponível em: <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/3070>. Acesso em: 22 mai. 2022.

CELESTRINI, Jordano R. *Desenvolvimento de aplicações integrando serviços web, fontes de dados e dispositivos IoT com o uso do Node-RED*. [S. l.], [2022]. Disponível em: <http://inf.ufes.br/~zegonc/material/Redes%20de%20Sensores%20sem%20Fio/Minicurso%20Node-RED.pdf>. Acesso em: 22 mai. 2022.

MAHALIK, N. G. P. CC; LEE, S. K. *Design and development of system level software tool for DCS simulation*. *Advances in Engineering Software*, v. 34, p.451-465, 2003.

EUGENIO, George Eugenio. *Introdução a Programação Orientada à Objetos na Linguagem C* - Universidade Federal de Santa Maria, 2009.

Alta disponibilidade em nuvem: o que as empresas de sucesso não contam para você! FWC 2019. Disponível em: <https://www.fwc.com.br/blog/cloud/alta-disponibilidade-em-nuvem-o-que-as-empresas-de-sucesso-nao-contam-para-voce/>. Acesso em: 28 mai.2022.

SANTOS, Guilherme. *A pirâmide da Automação Industrial*. *Automação Industrial*, 2021. Disponível em: <https://www.automacaoindustrial.info/a-piramide-da-automacao-industrial/>. Acesso em: 27 ago. 2022.

NARCISO, Paulo Filho. *Qual a diferença entre MES e o ERP?* 2021. Disponível em: <https://www.livemes.com/qual-a-diferenca-entre-mes-e-o-erp/>. Acesso em: 28 ago. 2022.

SIEMENS. *S7-1200 Programmable controller System Manual*. Siemens AG Industry Sector Postfach 48 48 90026 NÜRNBERG GERMANY: Siemens AG, 2012, total de páginas 699.

Capítulo III – Desenvolvimento da Automação de uma Autoclave Vertical utilizando Controle PI em Cascata

Nilton Acosta Filho⁷

Wesley Candido da Silva⁸

Victor Emanuel Correia De La Rosa⁹

RESUMO

Este trabalho aborda a automação de uma autoclave vertical de 50 litros, com o objetivo de aumentar a precisão e a segurança no processo de esterilização na indústria farmacêutica. Foram realizadas modificações que incluíram a instalação de sensores e um controlador lógico programável (CLP) da Siemens para permitir o controle automático da temperatura e pressão, aplicando um controle PI em cascata. A metodologia incluiu o monitoramento em tempo real das variáveis de processo e uma análise comparativa das condições térmicas antes e após a automação. Os resultados mostraram que o controle PI eliminou o overshoot de temperatura no início do ciclo e manteve a temperatura próxima ao set point, promovendo maior estabilidade. A automação também proporcionou uma redução de cerca de 80% no consumo de água e eliminou a necessidade de intervenções manuais, aumentando a segurança operacional.

Palavras-chave: Autoclave. Automação. Esterilização. Controle em Cascata. Indústria Farmacêutica.

Development of the Automation of a Vertical Autoclave Using Cascade PI Control ABSTRACT

This study addresses the automation of a 50-liter vertical autoclave to enhance the precision and safety of the sterilization process in the pharmaceutical industry. Modifications included the installation of sensors and a programmable logic controller (PLC) by Siemens, enabling automatic control of temperature and pressure using a cascade PI control system. The methodology involved real-time monitoring of process variables and a comparative analysis of thermal conditions before and after automation. Results showed that the PI control eliminated temperature overshoot at the beginning of the cycle and maintained stability close to the set point. Automation also achieved an 80% reduction in water consumption and eliminated the need for manual adjustments, thus increasing operational safety.

Key words: Autoclave. Automation. Sterilization. Cascade Control. Pharmaceutical Industry.

⁷ Engenheiro Eletricista. UniSenaiPR - Campus Londrina.

⁸ Especialista. UniSenaiPR - Campus Londrina, wesley.candido@sistemafiep.org.br

⁹ Especialista. UniSenaiPR - Campus Londrina.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, com o avanço da tecnologia e a automatização de processos, torna-se cada vez mais necessário elevar a qualidade da produção e operação de equipamentos dentro da indústria, o que se reflete diretamente no resultado do produto final. Normas e regulamentações são desenvolvidas para garantir a produção padronizada e de qualidade desses resultados, especialmente em indústrias farmacêuticas.

Segundo Panta et al. (2019), um dos processos críticos na produção de medicamentos, materiais de laboratório e hospitalares ou cirúrgicos é a esterilização, que, quando realizada corretamente, assegura que o material autoclavado esteja livre de contaminantes e resíduos, além de estéril para ser utilizado nas próximas etapas do processo produtivo ou na reutilização destes materiais. Quando esse processo é feito manualmente, as chances de variações no resultado final aumentam.

A autoclave, equipamento responsável pela esterilização e descontaminação de materiais e produtos por meio da exposição a altas temperaturas e pressões durante um tempo determinado, quando automatizada, garante a padronização da qualidade do produto. Isso porque os processos de esterilização são executados sempre com os mesmos parâmetros, gerando resultados consistentes, independentemente do número de ciclos realizados, desde que as manutenções periódicas sejam realizadas corretamente e os componentes estejam em bom funcionamento. Para isso, é necessário um sistema de controle eficiente que atenda às necessidades do equipamento e do processo (SILVA et al., 2023).

No desenvolvimento do projeto de melhoria, será utilizada uma autoclave vertical da marca Phoenix Luferco, fabricada em 2012, sem dispositivos eletrônicos de controle. Sem modificar a estrutura do equipamento, já que ele é considerado um vaso de pressão, será incorporado nas conexões disponíveis na tampa um sensor de temperatura, um transmissor de pressão e uma válvula solenoide para o expurgo do excedente de pressão e a eliminação do ar frio, que se torna uma barreira para a penetração do vapor nos materiais a serem autoclavados.

O principal parâmetro observado em um ciclo de esterilização é a temperatura. O controle dessa variável será realizado por meio de um sistema de PI em cascata, que faz a leitura da temperatura e pressão, variando proporcionalmente a potência da

resistência localizada no fundo do equipamento, responsável por gerar o vapor na câmara interna. Quanto mais estável e homogênea for a temperatura durante o processo, menor o risco de uma esterilização ineficiente.

Devido ao equipamento operar em altas temperaturas (acima de 121°C) e alta pressão (cerca de 1,2 bar), a operação também se torna arriscada, devendo ser realizada por operadores capacitados e atentos às variações desses parâmetros durante o ciclo de esterilização. Quando o equipamento desse tipo é operado manualmente, qualquer descuido ou falta de atenção pode resultar em acidentes, causando danos irreversíveis ao equipamento e, principalmente, riscos à vida do operador. A automatização do controle de temperatura e pressão, além da depressurização automática ao término do ciclo, reduz os riscos de acidentes.

Contudo, a automação de um equipamento não dispensa a necessidade de manter os dispositivos de segurança instalados, assim como a realização da manutenção periódica desses componentes e calibração dos instrumentos.

1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.1 Evolução da Automação Industrial

A automação industrial evoluiu significativamente ao longo das últimas décadas, revolucionando os processos produtivos. Desde as primeiras aplicações de máquinas mecânicas no século XVIII, durante a Revolução Industrial, até os modernos sistemas computacionais e robóticos, a automação tem desempenhado um papel importante na melhoria da produtividade e da qualidade dos produtos. No início, os sistemas eram simples, baseados em sistemas mecânicos que executavam tarefas repetitivas. Com o tempo, a integração de sensores, controladores lógicos programáveis (CLPs) e sistemas de controle avançados elevou o nível de precisão e repetibilidade dos processos industriais (GROOVER, 2011).

A automação impacta diretamente na qualidade dos processos produtivos, permite maior controle sobre variáveis críticas do processo, reduzindo a variabilidade e, conseqüentemente, o número de defeitos. Além disso, ela aumenta a eficiência operacional, ao automatizar tarefas complexas e repetitivas, liberando os trabalhadores para atividades mais específicas. Com isso, é possível otimizar a

produtividade e garantir a consistência nos resultados. A capacidade de monitorar e ajustar os parâmetros em tempo real minimiza erros e torna os processos mais robustos (OGATA, 2010).

Groover (2011) destaca que a automação permite um controle mais preciso sobre os parâmetros de produção, como temperatura, pressão, e composição química, fatores críticos especialmente na indústria farmacêutica, onde a precisão é vital para garantir a segurança e a eficácia dos produtos. Além disso, a automação contribui para a eficiência operacional ao otimizar o uso de recursos e reduzir desperdícios, onde um desvio pode resultar em grandes perdas financeiras e riscos à saúde pública.

Portanto, a automação industrial não só melhora a eficiência e a produtividade, mas também desempenha um papel crucial na garantia da qualidade e na segurança dos produtos, especialmente em setores críticos como o químico e o farmacêutico, onde a precisão e a confiabilidade são fundamentais (GROOVER, 2011).

1.2 Importância das Normas e Regulamentações nos Processos Industriais na Indústria Farmacêutica

As normas estabelecem padrões que garantem a padronização dos processos, contribuindo para a eficiência operacional e a minimização de riscos (ISO, 2015). Uma das principais regulamentações aplicáveis à indústria farmacêutica é a *Good Manufacturing Practices* (GMP), que define os requisitos para garantir que os produtos sejam consistentemente produzidos e controlados de acordo com os padrões de qualidade apropriados para seu uso pretendido e conforme exigido pela autorização de comercialização (FDA, 2023). Além disso, normas como a ISO 9001:2015 e a ISO 13485:2016 fornecem diretrizes para sistemas de gestão da qualidade, que são necessários para manter a integridade dos processos industriais, assegurando que todos os aspectos da produção estejam sob controle rigoroso (ISO, 2015; ISO, 2016).

No contexto específico da indústria farmacêutica, a ANVISA no Brasil e a FDA nos Estados Unidos desempenham papéis fundamentais na regulamentação e no controle da qualidade dos processos produtivos. A RDC 17/2010 da ANVISA, por exemplo, estabelece as boas práticas de fabricação de medicamentos, exigindo que

todas as etapas da produção sejam monitoradas e documentadas para garantir a rastreabilidade e a conformidade com os padrões estabelecidos (ANVISA, 2010).

A automação de processos, como no caso da esterilização por autoclaves, é um exemplo de como a tecnologia pode ser utilizada para garantir a conformidade com as normas regulamentares. As autoclaves, que são equipamentos críticos na esterilização de materiais e produtos na indústria farmacêutica, devem operar sob parâmetros controlados de temperatura e pressão para assegurar a eliminação de contaminantes e a esterilidade dos produtos (ISO, 2006). De acordo com a ISO 17665-2: (2009), para calor úmido, é adotada como menor temperatura de esterilização permitida a de 121°C, com um limite de variação de até +3°C da faixa de esterilização estabelecida no equipamento (set point). A adoção de sistemas de controle automatizados, como o controle PID, permite uma maior precisão e consistência nos processos, reduzindo a probabilidade de falhas humanas e garantindo que os ciclos de esterilização sejam executados de acordo com as especificações normativas (Groover, 2011).

1.3 Funcionamento e Importância das Autoclaves no Processo de Esterilização

As autoclaves são equipamentos essenciais no processo de esterilização, especialmente em indústrias que exigem alto padrão de assepsia, como a farmacêutica e a de dispositivos médicos. O processo de esterilização é crítico para garantir a segurança dos produtos, eliminando microrganismos patogênicos, incluindo esporos bacterianos que são altamente resistentes aos métodos convencionais de desinfecção. A operação de uma autoclave baseia-se no uso de vapor saturado sob alta pressão para alcançar a destruição total de todos os microrganismos presentes nos materiais a serem esterilizados (NOGAROTO; VESSONI; GUIMARÃES, 2010).

1.3.1 Princípios de Funcionamento das Autoclaves

O funcionamento de uma autoclave envolve diversas etapas controladas para assegurar a eficácia da esterilização. O processo começa com a fase de pré-aquecimento, nesta etapa o ar presente na câmara é removido para garantir que o vapor preencha completamente o espaço. Essa etapa é fundamental para evitar

bolsas de ar, que podem comprometer a uniformidade da esterilização (LIMA, 2016). Em seguida, o vapor é introduzido na câmara, elevando a temperatura e a pressão internas até atingir os valores desejados, geralmente entre 121°C e 134°C, com pressões que variam de 1 a 2 bar (PHOENIX INDÚSTRIA, 2009). A manutenção dessas condições por um período específico permite a penetração do vapor em todos os materiais, garantindo a destruição dos microrganismos.

Após o tempo de exposição necessário, inicia-se a fase de exaustão, na qual a pressão é gradualmente aliviada e o vapor é removido, permitindo que os materiais esterilizados possam ser manipulados com segurança. A precisão no controle de cada uma dessas etapas é essencial para assegurar que a esterilização seja completa e eficaz, particularmente em ambientes onde a esterilidade é crucial para a segurança do produto final (NIEHEUS, 2001).

O controle rigoroso da temperatura e da pressão é um dos fatores mais críticos na eficácia do processo de esterilização. Variações ou falhas no controle desses parâmetros pode resultar em uma esterilização incompleta, permitindo a sobrevivência de microrganismos, o que pode comprometer a segurança dos produtos e, em última análise, a saúde dos consumidores. Na indústria farmacêutica, a conformidade com padrões rigorosos de esterilização é mandatória para garantir que os produtos estejam livres de contaminantes que possam afetar sua eficácia ou segurança (NBR 11816, 2003).

Conforme Nogaroto, Vessoni e Guimarães (2010), a eficácia da esterilização é diretamente proporcional à capacidade da autoclave de manter os parâmetros de temperatura e pressão dentro dos padrões estabelecidos durante todo o ciclo de esterilização. Desvios nesses parâmetros podem comprometer a eficácia do processo, resultando em produtos que não atendem aos requisitos de esterilidade necessários.

1.3.2 Diferenças entre Autoclaves Manuais e Automáticas

A evolução tecnológica na fabricação de autoclaves permitiu o desenvolvimento de equipamentos com diferentes níveis de automação, desde modelos manuais até os totalmente automáticos. As autoclaves manuais exigem que o operador ajuste e controle manualmente as condições de operação, o que pode

aumentar o risco de erros humanos e variabilidade nos resultados (PHOENIX INDÚSTRIA, 2009). Em contraste, as autoclaves automáticas são equipadas com sistemas eletrônicos de controle que monitoram e ajustam automaticamente os parâmetros de operação, garantindo que o processo de esterilização seja realizado de maneira consistente e conforme as especificações estabelecidas. Além disso, os sistemas automáticos podem incluir recursos adicionais, como registros digitais dos ciclos de esterilização, facilitando a rastreabilidade e a conformidade com as regulamentações de boas práticas de fabricação (NBR 11816, 2003).

A comparação entre sistemas manuais e automatizados revela uma diferença substancial em termos de precisão e repetibilidade. Autoclaves manuais, como observado no estudo de Nieheus (2004), dependem do operador para monitorar o ciclo de esterilização, ajustar a pressão e a temperatura, e determinar a duração do processo. Isso gera variações nos resultados e aumenta o risco de falhas. Por outro lado, autoclaves automatizadas, garantem a manutenção exata das condições de esterilização, resultando em ciclos consistentes e seguros.

1.4 Controle de Processos Industriais e PID (Proporcional, Integral, Derivativo)

O controle dos processos industriais é fundamental para garantir a estabilidade e eficiência de sistemas automatizados. Um dos métodos mais utilizados para esse controle é o sistema PID (Proporcional, Integral e Derivativo), que ajusta automaticamente variáveis importantes como temperatura, pressão e vazão em tempo real. O controle PID trabalha com três componentes: o proporcional, que reage à diferença entre o valor medido e o valor desejado; o integral, que corrige erros acumulados ao longo do tempo; e o derivativo, que antecipa mudanças futuras com base na taxa de variação do erro (McMILLAN, 2012). Este controle flexível permite uma resposta rápida e precisa, sendo amplamente utilizado em indústrias como a farmacêutica e a de manufatura.

O controle PID é uma estratégia robusta e eficiente na automação de processos industriais. Ele é amplamente aplicado em sistemas de controle de malha fechada, onde é necessário manter uma variável controlada, como temperatura ou pressão, dentro de parâmetros específicos. Por exemplo, em processos de

aquecimento ou refrigeração, o PID ajusta continuamente o fluxo de calor ou frio para garantir que a temperatura atinja e permaneça no setpoint desejado. Essa aplicação garante não só a estabilidade do sistema, mas também sua eficiência, minimizando desvios e melhorando o desempenho geral do processo (CORTÉS-GUTIÉRREZ et al., 2021).

1.4.1 Como o PID em Cascata é Utilizado para Controle de Variáveis

O controle PID em cascata é uma técnica avançada onde dois ou mais controladores são utilizados para gerenciar variáveis interdependentes. Em um sistema de controle em cascata, um controlador primário regula a variável principal, enquanto um controlador secundário ajusta uma variável auxiliar que influencia a primeira. Esse arranjo permite um controle mais refinado e preciso de sistemas complexos, como os utilizados em processos de esterilização ou controle de temperatura de materiais sensíveis. A Siemens exemplifica essa abordagem em sistemas onde o PID é configurado para ajustar diferentes variáveis simultaneamente, como temperatura e pressão, em cenários de controle de aquecimento (SIEMENS, 2019). A vantagem do controle em cascata é que ele melhora a resposta do sistema a interferências externas, garantindo que as variáveis críticas permaneçam estáveis mesmo em condições dinâmicas (CORTÉS-GUTIÉRREZ et al., 2021).

O PID também reduz o desgaste de componentes mecânicos, como válvulas e bombas, ao evitar ajustes bruscos, resultando em maior durabilidade do equipamento e redução dos custos de manutenção (McMILLAN, 2012).

1.5 Impacto da Automação no Desempenho e Segurança de Equipamentos

A automação de processos industriais tem mostrado resultados significativos na melhoria do desempenho e na segurança operacional. A automação elimina a necessidade de operadores monitorarem continuamente variáveis críticas, reduzindo assim os riscos de erro humano, que podem comprometer a eficácia da esterilização e até gerar acidentes. No estudo de Marzagão (2014), foi demonstrado que a automação do processo de esterilização de autoclaves verticais não apenas aprimora a precisão no controle de variáveis, mas também aumenta a segurança do operador, eliminando a necessidade de intervenções manuais frequentes.

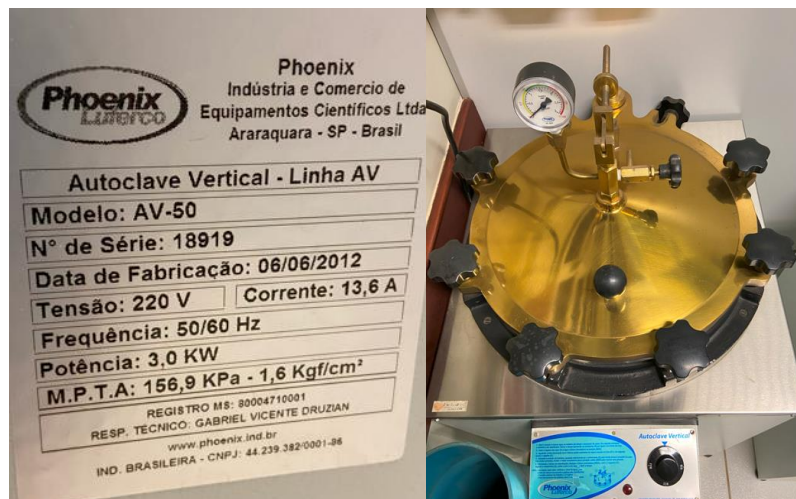
Diversos estudos de caso demonstram os benefícios da automação em autoclaves e outros equipamentos de pressão. No trabalho de Lima (2016), foi aplicada a metodologia de FMEA (Análise de Modos de Falha e Efeitos) para identificar falhas comuns em autoclaves manuais. A análise concluiu que a automação desses equipamentos pode mitigar ou até eliminar falhas decorrentes de erros operacionais e de manutenção, aumentando a confiabilidade e a vida útil dos equipamentos. Além disso, a automação melhora a eficiência geral do processo, garantindo a conformidade com padrões de segurança e qualidade.

2. METODOLOGIA

2.1 Equipamento utilizado

O equipamento utilizado para este estudo encontra-se no laboratório de química da instituição de ensino. Todos os testes e estudos foram conduzidos com o modelo AV-50, de 50 litros, fabricado em 2012 pela Phoenix Lufenco, conforme especificações apresentadas na figura 01.

Figura 01 – Autoclave AV-50 Phoenix Lufenco

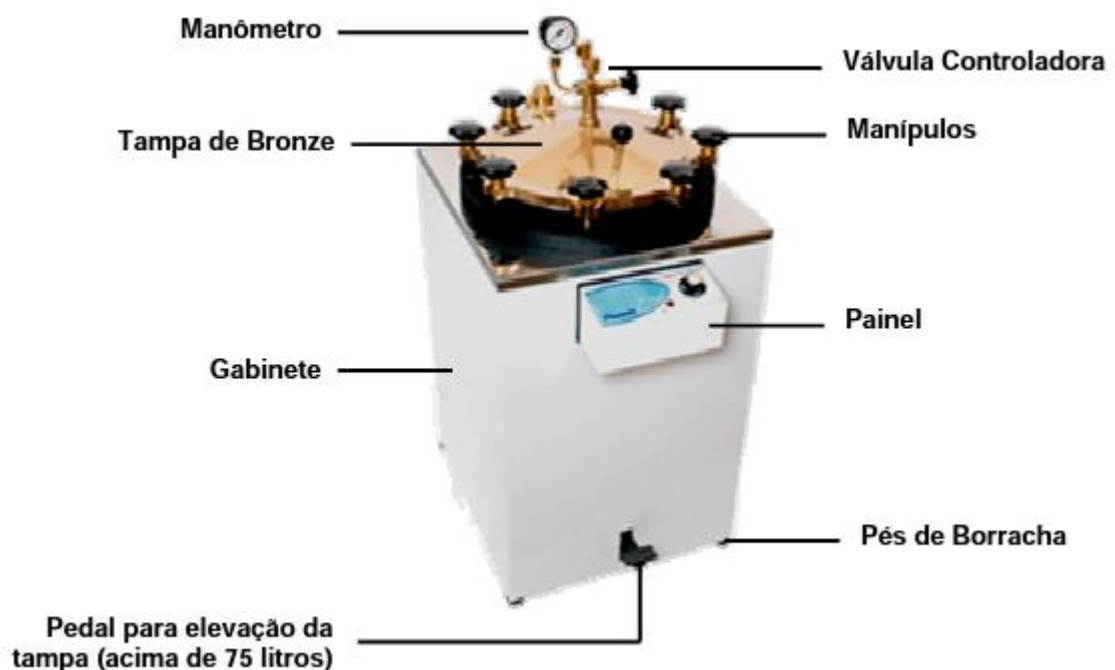


Fonte: do autor

Esse modelo de autoclave possui poucos dispositivos de controle para sua operação, o que simplifica seu uso, mas também implica certos riscos operacionais. Devido à necessidade de controle manual de alguns parâmetros, é essencial que a operação seja realizada por um operador capacitado, capaz de monitorar e ajustar a pressão e a temperatura conforme necessário para garantir a segurança e a eficácia do processo de esterilização.

Na figura 02, estão ilustrados os principais componentes do equipamento, com destaque para os dispositivos de controle de pressão e temperatura. Entre eles, a "Válvula Controladora" ou "Válvula de Contrapeso" permite o ajuste manual para liberar o excesso de pressão de vapor, garantindo que a pressão interna do vaso permaneça dentro dos limites seguros. No "Painel", localiza-se a chave comutadora que controla o acionamento das resistências elétricas, posicionadas no fundo da câmara, responsáveis pela geração do vapor na autoclave.

Figura 02 – Identificação dos componentes da autoclave



Fonte: manual do usuário (Phoenix, 2009)

2.1.1 Válvula controladora

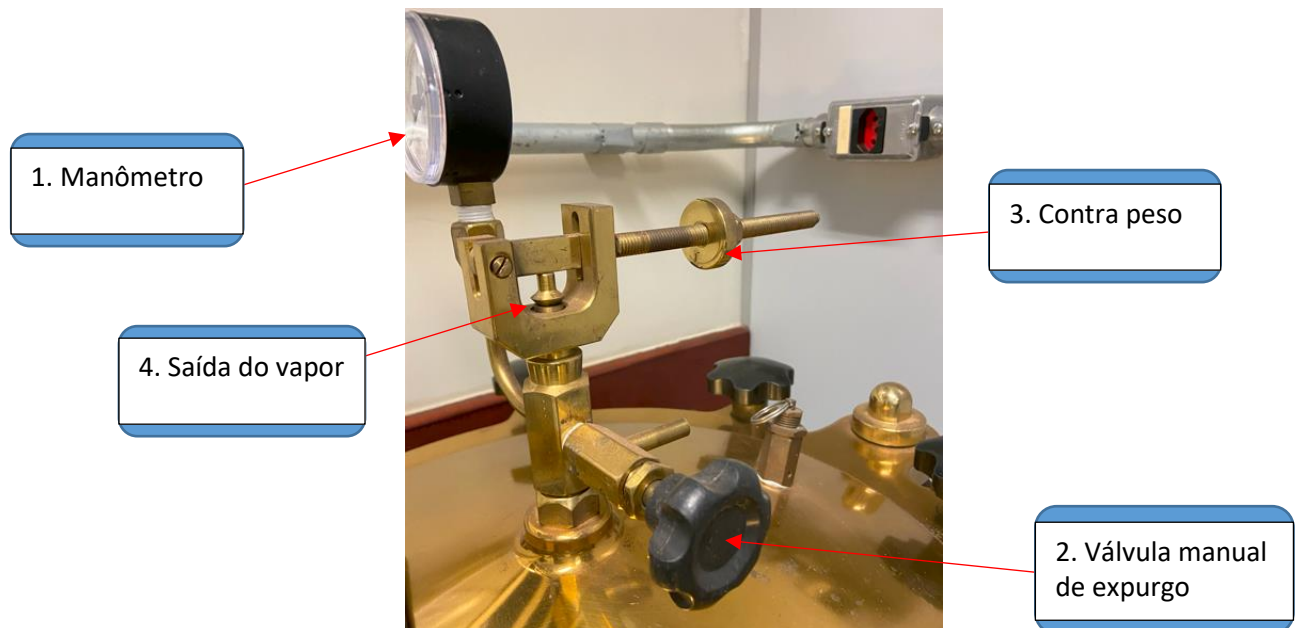
A válvula de alívio com contrapeso, representada na figura 03, é utilizada neste modelo de autoclave para ajustar manualmente a pressão interna do equipamento. Esse ajuste é realizado através da manipulação do contrapeso (3): ao girar o contrapeso para a frente, em direção ao corpo da válvula, o vapor é liberado em uma pressão menor, o que reduz a pressão dentro da câmara. Por outro lado, ao girar o contrapeso para trás, em direção à ponta da rosca, a pressão interna aumenta devido ao maior peso exercido na válvula de saída do vapor (4). A pressão do vaso pode ser monitorada através do manômetro (1).

Durante o processo de esterilização, é comum observar um vazamento de vapor pela saída de vapor (4), especialmente quando a pressão está estabilizada. Esse vazamento é natural e necessário para a manutenção da pressão, porém exige cuidado ao manipular o contrapeso. Se a haste da válvula for inadvertidamente levantada, o vazamento de vapor aumentará, podendo causar queimaduras ao operador.

No final do ciclo de esterilização, ou quando for necessário liberar o vapor ou o ar acumulado, deve-se abrir a válvula manual de expurgo (2). Ao fazer isso, o ar e o vapor sairão pelo bico localizado no corpo da válvula. Normalmente, uma mangueira é conectada a esse bico para direcionar o vapor a uma área segura, afastada do operador, garantindo uma operação mais segura.

É importante observar que não é possível direcionar ou instalar tubulação para o vapor que sai diretamente pela saída de vapor (4), pois este ponto não possui conexão adaptável. Portanto, o operador deve tomar medidas adicionais de segurança ao lidar com o vapor liberado nessa saída, como o uso de EPIs.

Figura 03 – Válvula controladora



Fonte: do autor

2.1.2 Painel de operação

O painel do equipamento possui uma lâmpada indicadora que sinaliza quando a resistência está ligada e uma chave comutadora, conforme destacado na figura 04.

Essa chave oferece três opções de ajuste da temperatura: a posição "DESL" desliga as resistências; a posição "MED" ativa apenas uma resistência; e a posição "MAX" aciona ambas as resistências simultaneamente, permitindo um aquecimento mais rápido. As resistências podem ser visualizadas na figura 05.

Ao lado da chave comutadora, encontra-se uma instrução de operação do equipamento, que consiste nas seguintes etapas:

- Fechar a tampa do equipamento e verificar que o nível da água cobre totalmente as resistências;
- Girar a chave comutadora para a posição "MAX" para iniciar o aquecimento da água e a geração de vapor, com a válvula manual de expurgo aberta para permitir a liberação inicial de ar;
- Aguardar até que a pressão e a temperatura desejadas sejam atingidas, monitorando esses parâmetros por meio do manômetro;
- Ao atingir a pressão desejada, fechar a válvula manual de expurgo e ajustar a chave comutadora para a posição "MED", mantendo a pressão de trabalho com apenas uma resistência;
- No final do processo de esterilização, desligar as resistências, abrir a válvula manual de expurgo e aguardar até que a pressão caia a zero antes de abrir a tampa, minimizando o risco de queimaduras devido ao vapor residual.

Figura 04 – Painel

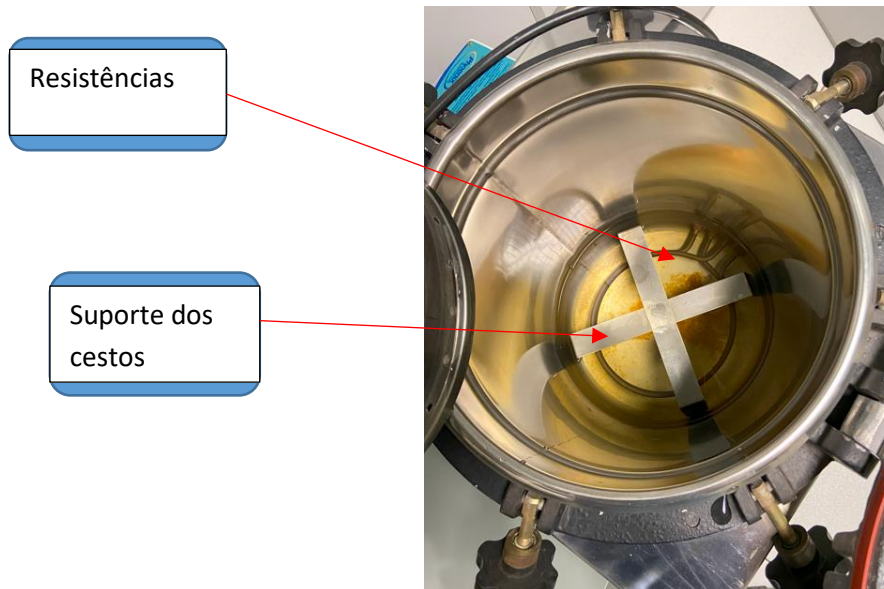


Fonte: do autor

Uma precaução importante a ser observada antes de cada operação é verificar o nível da água no fundo do equipamento. Sempre que a tampa estiver aberta, o nível

da água deve ser inspecionado para garantir que cobre adequadamente as resistências. Operar o equipamento com resistências descobertas pode resultar em sua queima, exigindo substituição. O nível de água ideal deve alcançar o suporte dos cestos, localizado no fundo do equipamento, para garantir o funcionamento seguro e eficiente do processo de esterilização.

Figura 05 – Interior da câmara da autoclave



Fonte: do autor

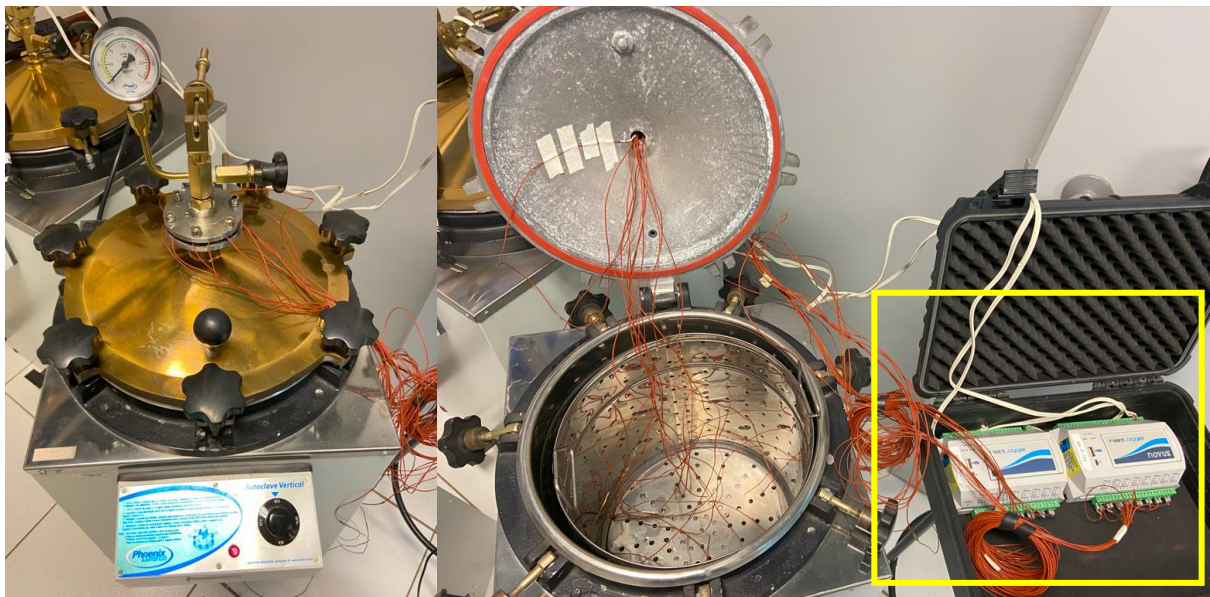
2.2 Aquisição primária de temperatura

2.2.1 Dispositivo utilizado e forma de montagem

Para avaliar o comportamento da temperatura no interior da autoclave e comparar as condições antes e depois da automação, foi necessário registrar as temperaturas em diferentes pontos da câmara durante o funcionamento com todos os componentes originais. Esse monitoramento possibilita uma análise detalhada da distribuição térmica e do tempo necessário para atingir a temperatura de set point em cada ponto da câmara.

Foram utilizados dois registradores de dados da marca Novus, modelo FieldLogger, conforme ilustrado na figura 06. Cada registrador possui 8 entradas para sensores de temperatura, permitindo uma coleta precisa e detalhada dos dados.

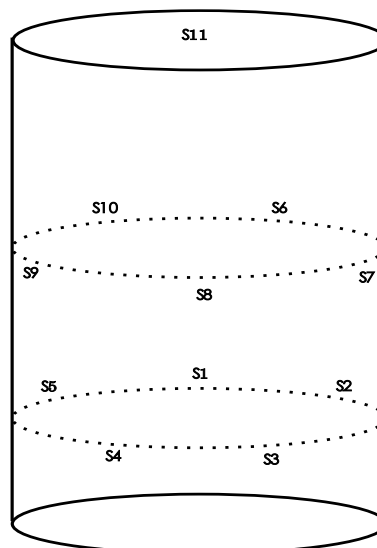
Figura 06 – Registradores FieldLogger e sensores distribuídos na câmara interna



Fonte: do autor

Para essa análise, foram instalados 11 sensores de temperatura estrategicamente distribuídos no interior da câmara, seguindo o mapeamento apresentado na figura 07, de modo a cobrir toda a área interna. Essa distribuição permite monitorar o comportamento térmico durante um ciclo completo de esterilização, garantindo que áreas críticas da câmara sejam devidamente observadas.

Figura 07 – Mapa de posicionamento dos sensores de temperatura

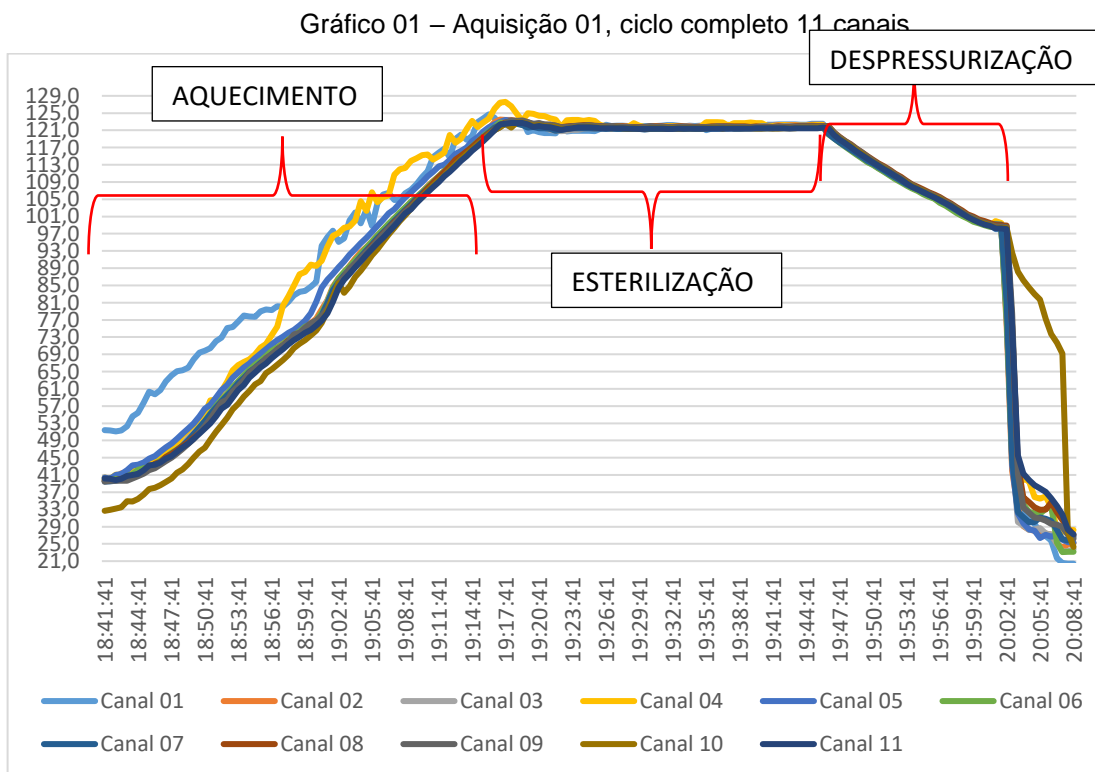


Fonte: do autor

O FieldLogger foi configurado para realizar registros de temperatura a cada 30 segundos nos 11 canais. Essa taxa de aquisição possibilita a criação de gráficos detalhados com a curva de temperatura individual para cada canal, permitindo uma análise completa do ciclo de aquecimento. Com esses dados, é possível observar o tempo que o equipamento leva para atingir a temperatura de set point em cada ponto da câmara, identificar as zonas com maior e menor aquecimento e, conseqüentemente, localizar possíveis pontos críticos que possam afetar a eficácia da esterilização.

2.2.2 Dados obtidos

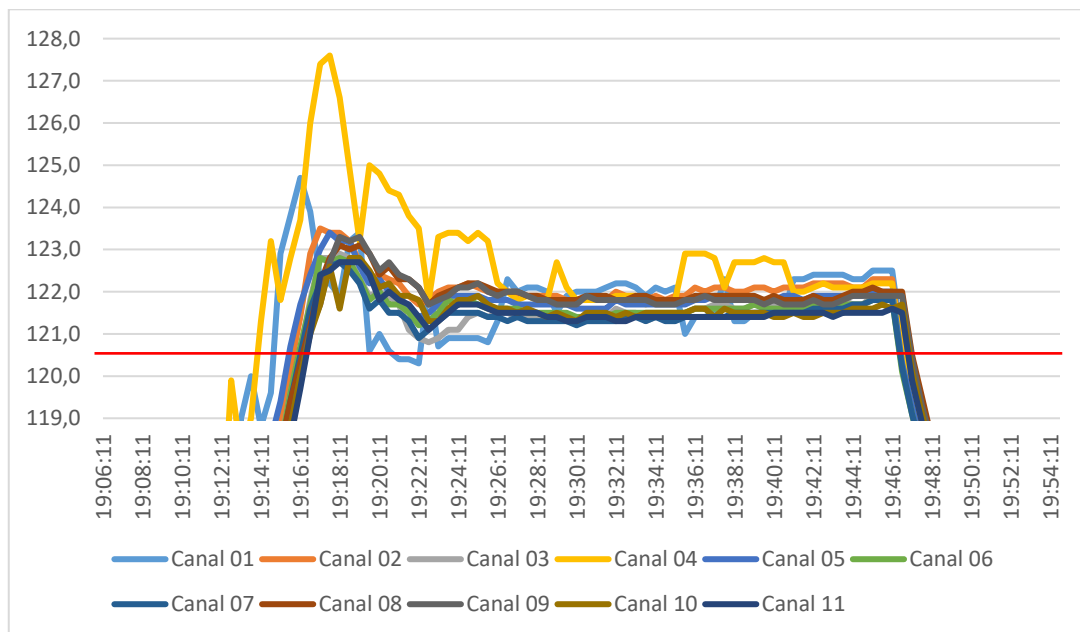
O gráfico 01 apresenta as curvas de temperatura obtidas nos 11 pontos monitorados no interior da autoclave. Observa-se oscilações em algumas posições, particularmente nas etapas de aquecimento e esterilização, como nos canais 01 e 04, cujos sensores estavam posicionados na parte inferior do equipamento. Essas variações indicam diferenças no comportamento térmico entre as regiões superiores e inferiores da câmara.



O ciclo de esterilização teve início com temperaturas próximas de 40°C. Esse ponto de partida prolongou a etapa de aquecimento, o que seria reduzido caso o ciclo fosse repetido em sequência, com a água já pré-aquecida, proporcionando uma menor variação inicial de temperatura e um tempo de ciclo mais curto.

No gráfico 02, com uma ampliação na etapa de esterilização, fica evidente a oscilação nas temperaturas registradas pelos canais 01 e 04. Esses pontos atingiram as temperaturas mais elevadas, excedendo o limite estabelecido pela norma ISO 17665-2:2023, que especifica que nenhuma área interna deve ultrapassar 3°C acima do set point de esterilização. Este desvio demonstra a dificuldade de manter uma distribuição térmica uniforme em condições de controle manual.

Gráfico 02 – Aquisição 01, zoom na etapa de esterilização



SP

Fonte: do autor

Outro aspecto importante observado durante a aquisição dos dados foi o *overshoot* no início da etapa de esterilização. Assim que a temperatura de set point, 121°C, foi atingida, todas as medições continuaram subindo até aproximadamente 123°C. Esse fenômeno ocorre devido ao controle manual do equipamento. Na operação da autoclave, ao atingir 121°C, o operador deve ajustar a chave comutadora para reduzir a potência das resistências e modificar o contrapeso da válvula de alívio para estabilizar a pressão proporcional à temperatura. No entanto, devido à inércia térmica e à demora na regulagem manual ideal da válvula de alívio, houve um atraso

no controle, resultando em um aumento temporário da temperatura, conforme ilustrado no gráfico.

Esse comportamento evidencia que, dependendo da experiência do operador, o processo pode variar significativamente, afetando a confiabilidade e a repetibilidade do ciclo de esterilização. A necessidade de ajustes manuais frequentes não apenas aumenta a variabilidade, mas também torna o processo dependente da habilidade do operador, o que limita a consistência e a padronização do procedimento.

Além disso, o consumo de água foi outro ponto relevante observado nesse ciclo. Devido ao modelo de válvula de alívio utilizado, uma quantidade significativa de vapor é expelida para a atmosfera para manter a pressão, resultando em um consumo elevado de água. Esse descarte contínuo aumenta a necessidade de monitoramento constante do nível da água e sobrecarrega o operador, que deve repor a água regularmente para garantir a continuidade do processo.

2.3 Substituição dos componentes

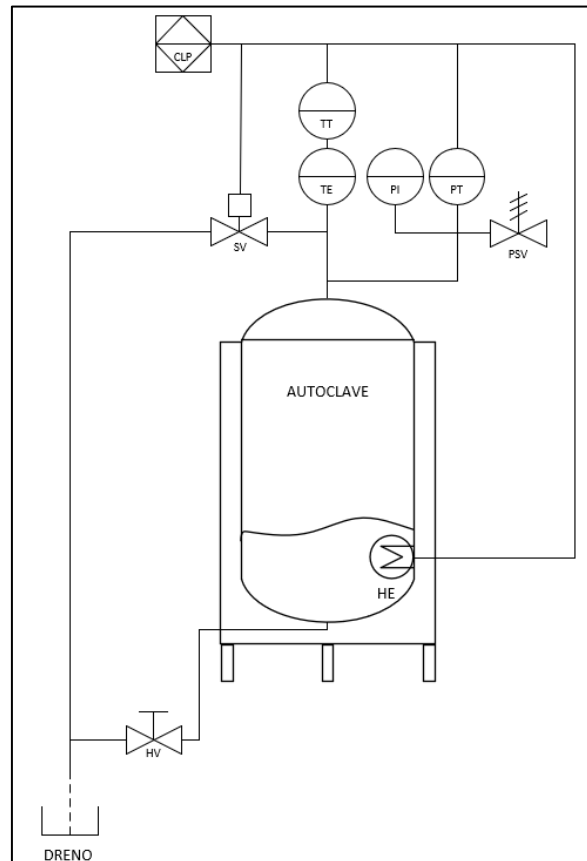
Conforme apresentado no item anterior, o equipamento original possui componentes manuais que exigiam o controle e a atenção constante do operador para o correto funcionamento, a fim de executar o ciclo completo de esterilização. Esse sistema dependia da intervenção direta do operador para ajustes de pressão, controle de temperatura e acionamento das resistências, o que poderia comprometer a consistência do processo e a segurança do operador.

Para implementar o funcionamento automatizado da autoclave, foram removidos a válvula de alívio com contrapeso e a chave comutadora das resistências. Em seu lugar, foi instalado um sensor de temperatura do tipo PT100, um transdutor de pressão para monitorar a pressão da câmara, uma válvula solenoide para expurgo da pressão e um CLP (Controlador Lógico Programável). O CLP é responsável por gerenciar os dados de temperatura e pressão, controlando automaticamente o acionamento das resistências e a válvula de expurgo, conforme o comportamento do ciclo de esterilização.

O diagrama P&ID (figura 08) ilustra os novos instrumentos instalados no equipamento. Vale destacar que nenhuma perfuração adicional ou intervenção estrutural foi realizada na autoclave, preservando sua integridade original. As

conexões dos novos instrumentos foram realizadas nos dois pontos roscáveis já existentes na tampa do equipamento, facilitando a instalação sem comprometer o sistema.

Figura 08 – Diagrama P&ID



Fonte: do autor

Os instrumentos e componentes adicionados são amplamente utilizados na indústria em diferentes aplicações, garantindo confiabilidade e resistência em condições severas. Com especificações adequadas ao ambiente de uso, esses dispositivos foram projetados para suportar o contato direto com o vapor gerado na autoclave, operando sob altas pressões e temperaturas conforme indicado na Tabela 01. Além dos novos componentes, mantiveram-se originais da máquina as resistências (HE) para aquecimento da água, a válvula manual (HV) para drenagem de fundo, o manômetro (PI) para indicação da pressão e a válvula de segurança (PSV), que assegura que a pressão interna do vaso não exceda o limite máximo de segurança.

Tabela 01 – Dados dos componentes

Tag	Descrição	Marca	Modelo	Input Range	Output Range	Sinal
SV	Válvula solenoide	Thermoval	14721	0 – 24 V	-	Discreto
TE	Sensor de temperatura	Prompt	PT100	0 a 150 °C	100 a 157 Ω	Analógico
TT	Transmissor de temperatura	Novus	Tx-Rail	100 a 157 Ω	0 a 10 V	Analógico
PT	Transdutor de pressão	Danfoss	MBS32	0 a 6 bar	0 a 10 V	Analógico

Fonte: do autor

As figuras 09 e 10 mostram o antes e o depois da substituição dos componentes, ilustrando as melhorias implementadas no sistema automatizado:

Figura 09 – Antes das substituições



Fonte: do autor

Figura 10 – Depois das substituições



Fonte: do autor

2.4 Programação CLP

Para o controle do processo, foi utilizado um CLP da Siemens montado em uma maleta didática, com bornes de conexão para as entradas e saídas físicas. Essa configuração permitiu uma montagem mais rápida e prática, eliminando a necessidade de um painel elétrico dedicado para a ligação dos componentes.

O programa foi desenvolvido na linguagem ladder no TIA Portal, permitindo a execução de um ciclo de esterilização completo de uma autoclave. Esse ciclo inclui uma chave de comando para ligar e desligar o processo, leituras normalizadas de temperatura (em °C) e pressão (em bar), comparadores para seleção do tempo de ciclo, definição do *set point* de temperatura, sistema de segurança contra sobretemperatura, controle da válvula de vapor fluente e um ponto de expurgo para drenagem ao final do processo. Todos esses valores e parâmetros são monitorados diretamente no software da Siemens, facilitando a supervisão do processo em tempo real e garantindo que os operadores tenham acesso a informações cruciais de forma clara e imediata.

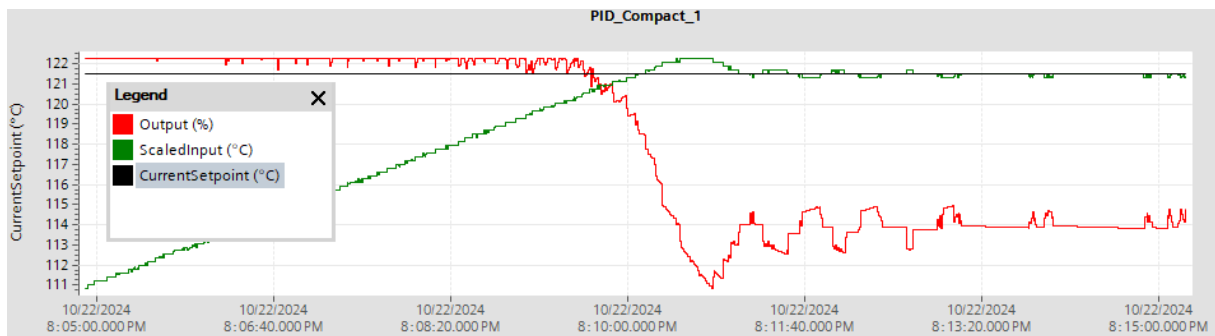
Para o controle da temperatura, foram empregados dois blocos PID em cascata. O PID mestre monitora a temperatura do processo conforme o set point definido, ajustando a saída de forma proporcional de acordo com a sintonia PI do bloco. Esse ajuste baseia-se na diferença entre o valor medido e o valor desejado, resultando em uma saída que é usada como set point para o PID escravo. Esse segundo bloco monitora a pressão do sistema, ajustando sua saída para manter o valor desejado de pressão e assegurar o controle eficaz do processo.

Devido ao fato de um dos blocos operar em uma faixa de temperatura de 0°C a 150°C e o outro em uma faixa de pressão de -1bar a 6 bar (absoluto), foi necessária uma normalização para compatibilizar os valores entre as variáveis. Para isso, foram utilizados os blocos NormX e ScaleX, que convertem o valor de 0 a 100% da saída de temperatura para um valor correspondente de 0 a 100% no range de pressão, garantindo que ambos os blocos trabalhem de forma sincronizada.

Com os valores devidamente ajustados e a sintonia PI dos blocos calibrada, cada bloco PID monitora sua variável (temperatura ou pressão) e comunica a necessidade de ajustes, antecipando ações de correção que garantem maior estabilidade no sistema. Esse controle em cascata permite que o sistema preveja

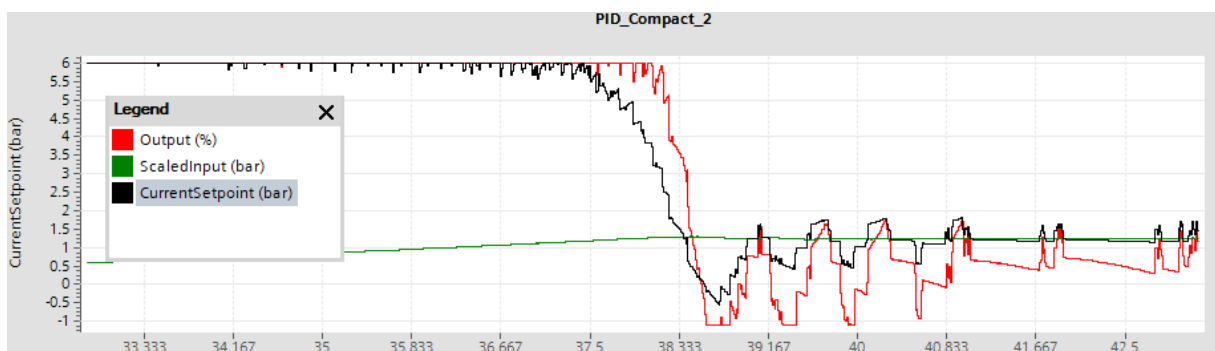
oscilações menores e ajuste a saída de forma a evitar desvios do set point, resultando em um controle mais estável, pois ambos os blocos PID monitoram as variáveis de temperatura e pressão em conjunto. O comportamento dos dois blocos PID, assim como a variação nos valores de set point e de saída, são apresentados nas figuras 11 e 12.

Figura 11 – Comportamento do bloco PID de temperatura



Fonte: do autor

Figura 12 – Comportamento do bloco PID de pressão

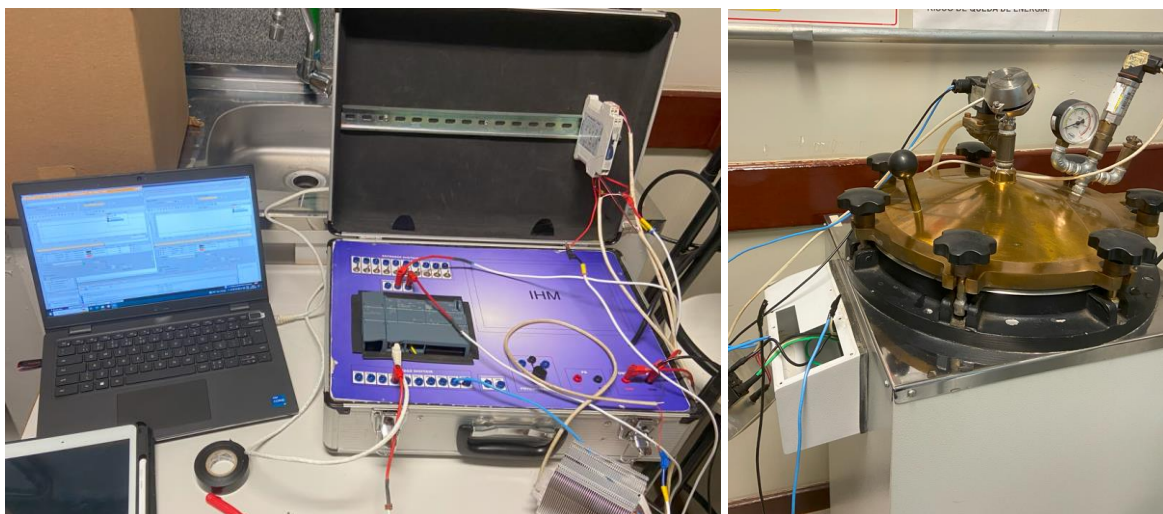


Fonte: do autor

Para o acionamento das resistências de aquecimento, que representam a saída do sistema, é utilizado um relé de estado sólido. Esse tipo de relé permite ligar e desligar rapidamente as resistências, mesmo sob correntes elevadas, evitando o desgaste mecânico que ocorreria se fossem utilizados contatores convencionais. A capacidade do relé de estado sólido para suportar acionamentos frequentes é essencial para esta aplicação, pois garante uma vida útil prolongada e eficiência operacional do sistema de aquecimento.

A figura 13 mostra como ficou a montagem destes componentes no CLP instalado na maleta didática.

Figura 13 – Montagem do CLP e componentes de controle



Fonte: do autor

2.5 Aquisição final de temperatura

Para validar os resultados do comportamento do controle PI, foi realizada uma nova coleta de temperatura utilizando 10 sensores distribuídos em diferentes posições no interior da câmara da autoclave. Durante o monitoramento, um dos sensores apresentou instabilidades e falhas na leitura ao longo do processo e, por esse motivo, foi desconsiderado na aquisição final dos dados.

Com o controle operando automaticamente pelo CLP, foi executado um ciclo de esterilização de 30 minutos, com temperatura estabilizada em 122°C. A coleta de dados foi realizada a cada 30 segundos, utilizando um aquisitor de dados da marca Fluke, o que permitiu um acompanhamento detalhado das variações de temperatura ao longo do ciclo.

A posição dos sensores foi mantida a mesma da aquisição primária, realizada antes das modificações no controle. O procedimento também foi replicado de forma idêntica, com os cabos dos sensores passados pela tampa da autoclave, através do mesmo ponto utilizado pelo sensor de temperatura, conforme ilustrado na figura 14. Esse cuidado foi essencial para garantir a consistência das medições e possibilitar uma comparação direta entre os ciclos pré e pós-automação, permitindo avaliar com precisão a eficácia do controle PI implementado.

Figura 14 – Aquisição da temperatura após alterações



Fonte: do autor

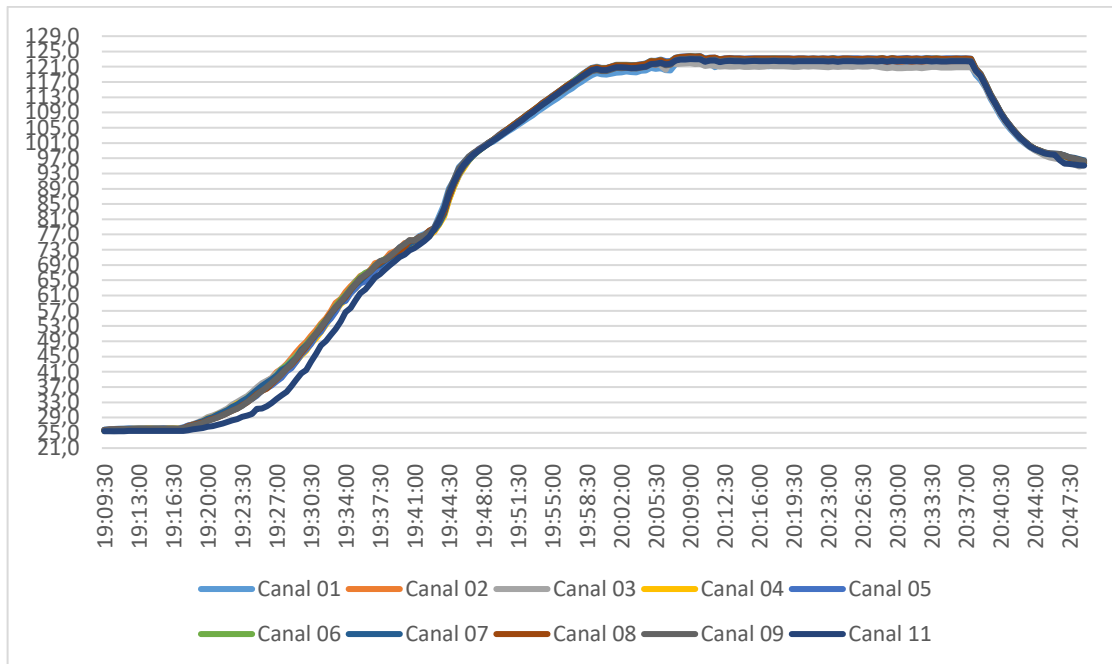
3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Após a aquisição das temperaturas do processo, realizadas após as modificações e a implementação do controle automático, foi possível observar o comportamento completo do equipamento em sua curva de aquecimento e estabilização das temperaturas.

O gráfico 3 representa essa curva durante o ciclo de esterilização. Nota-se que o comportamento térmico foi significativamente diferente em comparação ao primeiro estudo, uma vez que o controle PI eliminou o *overshoot* da temperatura no início da esterilização. Quando o sensor de controle se aproxima do *set point*, o controle PI ajusta a potência da resistência gradualmente, permitindo que o aquecimento finalize de forma suave até que a temperatura estabilize no valor selecionado.

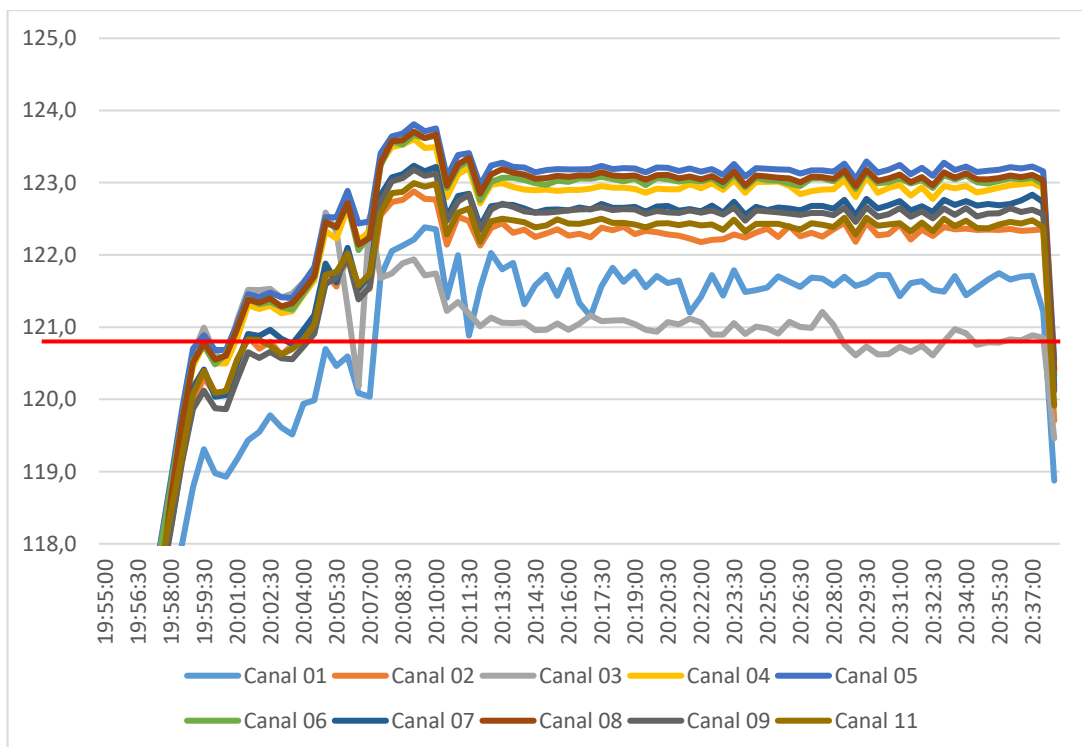
Apesar de o controle apresentar-se confiável e estável, a homogeneidade da temperatura não foi mantida conforme o esperado ao longo de todo o ciclo. Os sensores nos canais 01 e 03 registraram temperaturas abaixo do limite mínimo de 121°C, como demonstrado no gráfico 4, invalidando o ciclo de esterilização. Esses sensores estavam posicionados na parte inferior da câmara, próximos ao nível da água na autoclave, sugerindo uma menor uniformidade térmica nessa região.

Gráfico 03 – Aquisição 02, ciclo completo 10 canais



Fonte: do autor

Gráfico 04 – Aquisição 02, zoom na etapa de esterilização



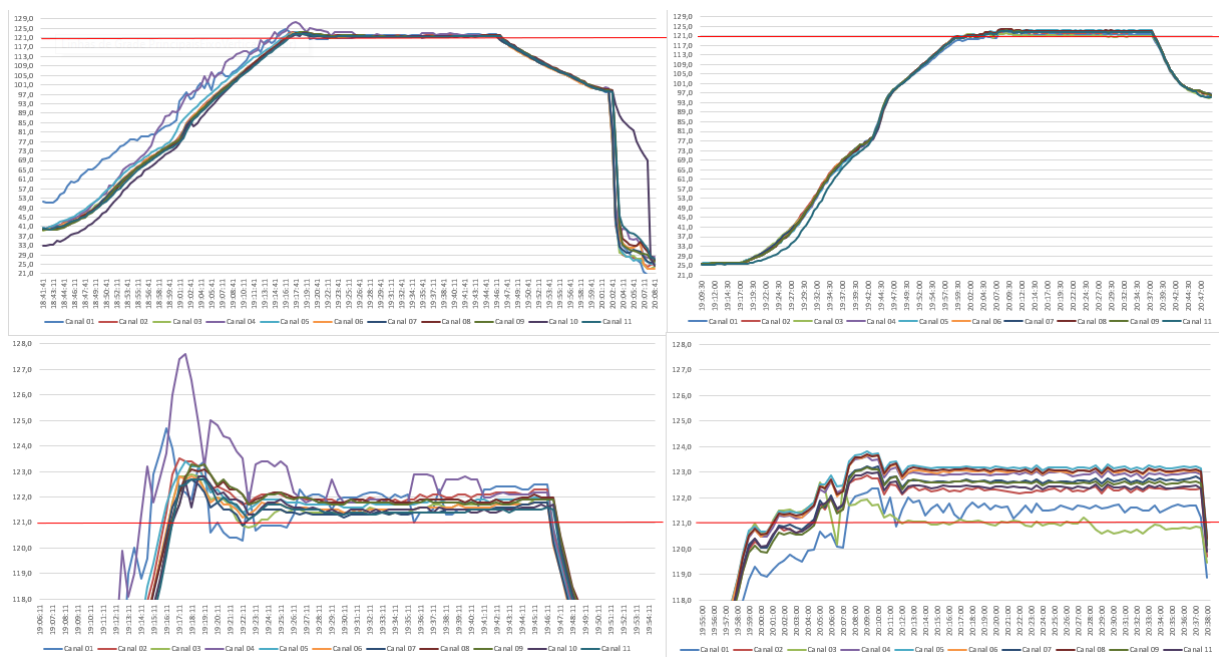
Fonte: do autor

Por outro lado, a segurança operacional do equipamento foi consideravelmente aprimorada, pois nenhuma intervenção manual foi necessária durante o ciclo. O sistema automatizado ajustou tanto a pressão interna da autoclave quanto o tempo de esterilização, e, ao final do ciclo, realizou a despressurização de forma automática, reduzindo o risco de erro humano e proporcionando maior segurança ao operador.

O consumo de água também foi otimizado com as modificações realizadas. Sem a válvula de contrapeso, o vapor gerado na autoclave foi totalmente utilizado e retido dentro do sistema, evitando perdas. Como resultado, o volume de água se manteve estável, em comparação ao ciclo anterior, quando havia um alto consumo devido à liberação constante de vapor. Estima-se uma redução de aproximadamente 80% no consumo de água, permitindo a realização de diversos ciclos consecutivos sem a necessidade de monitorar o nível da água.

O gráfico 5 apresenta uma comparação entre os dois ciclos: à esquerda, o ciclo realizado sem a automação, e à direita, o ciclo com a automação e o controle PI em cascata em operação. A linha vermelha indica a temperatura de referência de 121°C, destacando a melhoria na estabilidade térmica e no controle de temperatura alcançados com a implementação do sistema automatizado.

Gráfico 05 – Comparativo entre os dois ciclos (antes e depois da automação)



Fonte: do autor

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A automação da autoclave vertical com controle PI em cascata mostrou-se eficaz em alcançar os objetivos propostos, proporcionando maior precisão e segurança no processo de esterilização. Os principais resultados obtidos indicam que o sistema automatizado não só reduziu as oscilações indesejadas de temperatura, eliminando o overshoot no início do ciclo, como também garantiu um controle consistente dos parâmetros de esterilização. Além disso, a redução no consumo de água, de aproximadamente 80%, reforça os benefícios operacionais e econômicos da automação.

Embora a automação tenha melhorado a consistência do processo, alguns pontos apresentaram variações de temperatura abaixo do limite desejado, especialmente nas regiões inferiores da câmara. Esses dados indicam a necessidade de ajustes adicionais ou modificações no sistema de circulação de vapor para assegurar uma homogeneidade térmica ainda maior, como o caso da implementação de purgas de vapor.

Para estudos futuros, sugere-se explorar técnicas adicionais de controle, visando aperfeiçoar a distribuição de temperatura. Outro ponto de interesse seria a análise do impacto da automação em outros modelos de autoclave, especialmente em autoclaves de maior capacidade, onde o controle preciso de variáveis é ainda mais crítico para a eficácia do processo de esterilização.

REFERÊNCIAS

ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária). **RDC 17/2010 - Dispõe sobre as Boas Práticas de Fabricação de Medicamentos**. Brasília: ANVISA, 2010. Disponível em:

http://portal.anvisa.gov.br/documents/10181/2718376/RDC_17_2010_COMP.pdf/75fe0061-5fd8-486e-b2ae-014cde89e6fd. Acesso em: 19 set. 2024.

CORTÉS-GUTIÉRREZ, E. A.; ARRIETA, O.; VILANOVA, R.; SATO, T.; ROJAS, J. D. **Quantitative Analysis for the Performance Improvement in PID Control Systems with Cascade Control Structures**. 26th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), Vasteras, Sweden, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ETFA45728.2021.9613468>. Acesso em: 21 set. 2024.

FDA (*Food and Drug Administration*). **Code of Federal Regulations, Title 21 - Food and Drugs. Parts 210-211: Current Good Manufacturing Practice in Manufacturing, Processing, Packing, or Holding of Drugs**. Washington, D.C.: FDA, 2023. Disponível em: <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcfr/cfrsearch.cfm?cfrpart=211>. Acesso em: 19 set. 2024.

GROOVER, M. P. **Automação industrial e sistemas de manufatura**. 3. ed. São Paulo, SP: Pearson, 2011. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 17 set. 2024.

ISO (International Organization for Standardization). **ISO 9001:2015 - Quality management systems — Requirements**. Geneva: ISO, 2015. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/62085.html>. Acesso em: 19 set. 2024.

ISO (International Organization for Standardization). **ISO 13485:2016 - Medical devices — Quality management systems — Requirements for regulatory purposes**. Geneva: ISO, 2016. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/59752.html>. Acesso em: 19 set. 2024.

ISO (International Organization for Standardization). **ISO 17665-1:2006 - Sterilization of health care products — Moist heat — Part 1: Requirements for the development, validation, and routine control of a sterilization process for medical devices**. Geneva: ISO, 2006. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/43187.html>. Acesso em: 19 set. 2024.

ISO (International Organization for Standardization). **ISO 17665-2:2009 - Sterilization of health care products — Moist heat — Part 2: Guidance on the application of ISO 17665-1**. Geneva: ISO, 2009. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/43188.html>. Acesso em: 19 set. 2024.

LIMA, Bruno Rodrigues. **Análise de Falhas em Autoclaves, por meio de FMEA, no Processo de Higienização e Produção de Meios de Cultura, na área da Saúde**. 2016. Dissertação de Mestrado, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MARZAGÃO, Anderson R. **Estudo da Automação do Processo de Esterilização da Autoclave Vertical**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo.

McMILLAN, G.K. **Industrial Applications of PID Control**. In: VILANOVA, R., VISIOLI, A. (eds) *PID Control in the Third Millennium. Advances in Industrial Control*. Springer, London, 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2425-2_14. Acesso em: 21 set. 2024.

NBR 11816:2003. **Esterilização - Esterilizadores a vapor com vácuo, para produtos de saúde**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

NIEHEUS, Rosivete C. **Autoclaves Verticais: Uma proposta de sistema para garantia do processo de esterilização**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2004.

NOGAROTO, Sérgio Luiz; VESSONI, Thereza Christina; GUIMARÃES, Hélio Penna. **Desinfecção e esterilização**. 1. ed. São Paulo: Atheneu, 2010. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 21 set. 2024.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2010. E-book. Disponível em: <https://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 17 set. 2024.

PANTA, Gopal; RICHARDSON, Ann K.; SHAW, Ian C.; CHAMBERS, Stephen; COOPE, Patricia A. **Effectiveness of steam sterilization of reusable medical devices in primary and secondary care public hospitals in Nepal and factors associated with ineffective sterilization: A nation-wide cross-sectional study**, PLOS ONE, Nov. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0225595>. Acesso em: 17 nov. 2024.

PHOENIX INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE EQUIPAMENTOS CIENTÍFICOS LTDA. **Manual do Usuário: Autoclave Vertical AV**. Araraquara: Phoenix, 2009.

SIEMENS. **Single and Multi Loop Controller Structures (Cascade Control) with PID_Temp**. Siemens Industry Online Support, 2019. Disponível em: <https://support.industry.siemens.com/cs/ww/en/view/103526819>. Acesso em: 21 set. 2024.

SILVA, Marcus Vinicius de Melo da et al. **O impacto da qualificação na utilização de autoclaves nas atividades de ensaio para área da saúde**. In: JORNADA CIENTÍFICA DO INSTITUTO NACIONAL DE CONTROLE DE QUALIDADE EM SAÚDE, 10., 2023, Rio de Janeiro: Fiocruz/INCQS, 2023. 1 p.

Capítulo IV – Monitoramento Inteligente da Repetição de Padrões em Processos de Laminação de Embalagens Flexíveis com Leitura em Alta Frequência

Fabio Oswaldo de Souza Koyano Filho ¹⁰

Wesley Candido Silva ¹¹

Renato Kazuo Miyamoto ¹²

Rodolfo Alexandre Hildebrandt¹³

RESUMO

Este trabalho examina o processo de laminação em embalagens flexíveis, focando na implementação de um sistema que monitora fatores críticos que afetam a qualidade final do produto, especificamente as variações do passo de fotocélula. O estudo visa validar a implementação de um sistema eletrônico, demonstrando seus benefícios para a indústria de embalagens plásticas. A abordagem metodológica combina revisão de literatura, validação prática do sistema e análise dos resultados, considerando ganhos em produtividade e confiabilidade do processo. Os resultados indicam que a implementação desse sistema impacta diretamente o desempenho e a produtividade da linha da empresa parceira e permite uma nova metodologia, contribuindo para a redução de defeitos e otimização do desempenho em análises.

Palavras-chave: Processo de Laminação, Embalagens Flexíveis, Controle de Passo de Fotocélula, Produtividade, Capabilidade de Processo.

Intelligent Monitoring of Pattern Repetition in Flexible Packaging Lamination Processes Using High-Frequency Reading

ABSTRACT

This study examines the lamination process in flexible packaging, focusing on the implementation of a system that monitors critical factors affecting the final product quality, specifically variations in the photocell step. The research aims to validate the implementation of an electronic system, demonstrating its benefits for the plastic packaging industry. The methodological approach combines a literature review, practical system implementation, and result analysis, considering gains in productivity and process reliability. The results indicate that the system implementation directly impacts the performance and productivity of the partner company's production line and enables a new methodology, contributing to defect reduction and performance optimization in analysis processes.

Keywords: Lamination process. Flexible packaging. Photocell step control. Productivity. Process capability.

¹⁰ Engenheiro Eletricista. UniSenaiPR - Campus Londrina.

¹¹ Especialista. UniSenaiPR - Campus Londrina, wesley.candido@sistemafiep.org.br

¹² Doutor em Engenharia Elétrica. UniSenaiPR - Campus Londrina, renato.miyamoto@sistemafiep.org.br

¹³ Doutor em Eng. Mecânica. UniSenaiPR - Campus Londrina. rodolfo.hildebrandt@sistemafiep.org.br

1 INTRODUÇÃO

As embalagens desempenham um papel crucial em nossas vidas cotidianas, trazendo a simples função de proteção e armazenamento. Desde os primeiros vestígios da civilização humana, a necessidade de preservar alimentos e objetos valiosos evoluiu para o desenvolvimento de embalagens inovadoras, permitindo a comercialização eficiente de uma ampla gama de produtos.

Atualmente, as embalagens são verdadeiras vitrines, refletindo a identidade de marcas e produtos, influenciando nossas escolhas de consumo e impactando o cenário global de negócios. A organização global Two Sides realizou uma pesquisa em 2019 sobre como a embalagem influencia na decisão de compra dos brasileiros. O resultado mostrou que 64% dos consumidores se preocupam com a capacidade de proteção, 52% com as informações e 74% com a facilidade de abrir e fechá-la.

Segundo relatório divulgado pela Mordor Intelligence, as expectativas para a indústria de embalagens no país são notavelmente positivas. O setor está projetado para alcançar uma taxa de crescimento anual composta (CAGR) de 3,2% até o ano de 2026. Entretanto, uma pesquisa realizada pela Maxiquim com exclusividade para a ABIEF, as embalagens plásticas flexíveis presenciaram um acréscimo de 1,3% em seu volume de produção durante o ano de 2022, contudo o faturamento registrou uma queda de 8,5%. “Os números evidenciam a realidade de nossa indústria: temos produzido mais, com menor rentabilidade”, comenta o Presidente da ABIEF, empresário Rogério Mani.

O processo de fabricação de embalagens flexíveis é uma intersecção complexa entre tecnologia, engenharia e criatividade. Cada etapa desse processo, moldada pelas particularidades de diferentes concepções e tecnologias, é vital para a produção eficiente e a qualidade do produto final. Embora o processo seja cuidadosamente projetado para ser preciso e consistente, a natureza multifacetada da produção também traz consigo uma série de variáveis e desafios resultando em variações constantes de parâmetros de produção. Sendo estes, traduzidos em perdas e impactos financeiros consideráveis.

Atualmente, em um ambiente industrial altamente competitivo e automatizado, a precisão nos processos produtivos é um fator determinante para a qualidade final do produto. Em particular, na indústria de embalagens flexíveis, onde pequenas

variações no tamanho da embalagem podem gerar desperdícios ou falhas no produto final, a confiabilidade do processo de leitura e controle desse dimensional é essencial.

Há um consenso entre empresas de consultoria e autores como Hart e Bogan (1994) e Paladini (1995) de que o processo de implantação de sistemas de qualidade começa com o conhecimento preciso da realidade da empresa. Para isso, a confiabilidade dos dados gerados e monitorados é crucial para uma gestão eficaz. No contexto da indústria de embalagens, essa confiabilidade depende de sistemas que garantam a leitura precisa e o controle em alta frequência devido a velocidade em que é produzido os filmes flexíveis.

Nesse contexto, este trabalho visa abordar os desafios supracitados por meio da implementação de um sistema que possibilitará um monitoramento do dimensional da embalagens por meio da leitura da marcação de passo de foto célula durante o processo de laminação, destinado a otimizar o processo de produção e a confiabilidade desta característica fundamental para as fabricas de envase.

O passo de foto célula trata-se de uma marcação lateral na embalagem que tem como objetivo posicionar a separação das artes impressas, possibilitando o corte e envase do material nas indústrias de envase. Este projeto busca não somente identificar variações indesejadas, mas também contribuir para o desenvolvimento contínuo da indústria de embalagens, alinhando-se ao cenário previsto para o setor no cenário nacional.

O sistema de leitura de repetições em alta frequência proposto visa melhorar significativamente o controle e monitoramento da qualidade durante o processo produtivo. Com a utilização de dois sensores ópticos e a integração com um encoder incremental, o sistema permite a leitura contínua das marcações de fotocélula ao longo de toda a bobina produzida, eliminando a necessidade de medições manuais após a saída de cada bobina da máquina.

Além disso, o monitoramento em tempo real das marcações proporcionará maior confiabilidade ao processo produtivo, já que permitirá a identificação precoce de variações indesejadas. Esse sistema também traz a vantagem de garantir que toda a extensão da bobina, com usualmente mais de 9 km de comprimento, seja monitorada continuamente, ao contrário do método atual, em que apenas a camada final da bobina é medida. Assim, não apenas o processo será otimizado, mas também

será possível reduzir significativamente o desperdício de material e os custos operacionais, resultando em uma produção mais eficiente e precisa.

A estrutura deste trabalho será dividida em tópicos que abordarão, inicialmente, os conceitos e fundamentos teóricos sobre as embalagens e suas características em seguida, serão descritos os métodos e as etapas de implementação do sistema de leitura de repetições e por fim, serão apresentadas as análises dos resultados obtidos com a implementação, seguidas das conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

1. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Segundo Gorni (2003), o plástico, membro da família dos polímeros, é um dos materiais mais populares. Os polímeros, são compostos por macromoléculas formadas pela repetição de uma unidade básica conhecida como mero e podem ser classificados de várias maneiras, sendo a classificação com base em características mecânicas uma das mais importantes. Gorni divide os polímeros em termoplásticos, termorrígidos (termofixos) e elastômeros (borrachas). Quanto às propriedades mecânicas dos plásticos termoplásticos, o autor destaca que essas propriedades variam conforme o plástico e podem se manifestar como maleáveis, rígidas ou mesmo frágeis em temperatura ambiente.

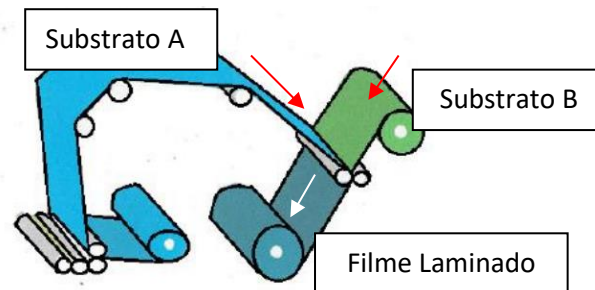
De acordo com Callister e Rethwisch (2013), um polímero pode se comportar como um vidro em temperaturas muito baixas, como uma borracha em temperaturas intermediárias (acima da temperatura vítrea) e como um líquido viscoso em temperaturas muito altas.

1.1. EMBALAGENS LAMINADAS

Conforme pontuado pelo Livro Embalagens Flexíveis (Instituto de Embalagens, 2016) a laminação, nos processos de fabricação de embalagens flexíveis, é um procedimento essencial que envolve a junção de diferentes materiais com base em uma série de informações técnicas criteriosas que o produto final deve proporcionar,

essas informações abrangem o tipo de produto a ser envasado, a vida útil desejada e a resistência química e térmica da estrutura laminada.

Figura 26 - Representação resumida de laminação

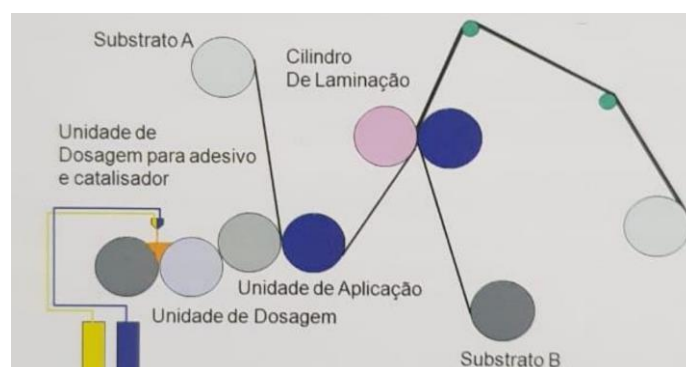


Fonte: Adaptado - Huanaco Choquehuanca, 2014.

Esse processo é uma estratégia valiosa para agregar valor às embalagens, aprimorar questões estéticas, reforçar as propriedades de barreira, proteger a impressão, facilitar o processo de envase, garantir resistência à delaminação, otimizar o processo de vedação, influenciar a apresentação no ponto de venda, atender a requisitos legais e reduzir custos (Silveira, 2015).

De acordo com Fabiana, os parâmetros de processo essenciais na laminação incluem tensões, pressões, a proporção de aplicação da mistura adesiva, gramatura e temperaturas. É crucial que os operadores estejam cientes da necessidade de ajustar esses parâmetros de acordo com a estrutura específica de laminação. A variação da temperatura no Nip Roll (Cilindro de Laminação) desempenha um papel relevante no que diz respeito à distribuição do adesivo, ao brilho do laminado, bem como à qualidade final da bobina. (Silveira, 2015).

Figura 27 - Processo de laminação simplificado



Fonte: Embalagens Flexíveis, 2009.

1.2. UTILIZAÇÃO DO PET EM EMBALAGENS FLEXÍVEIS

O poli(tereftalato de etileno) (PET), popularmente conhecido como poliéster, desempenha um papel significativo nas indústrias de embalagens (Rodrigues, 2018). Esse material é amplamente utilizado em embalagens rígidas, como garrafas e frascos, além de filmes biorientados, devido às suas notáveis propriedades. Entre elas, destacam-se a elevada resistência mecânica, o brilho e a transparência (Rodrigues, 2018).

A temperatura de transição vítrea (T_g) desse material é um fator importante a ser considerado. A T_g representa a temperatura na qual as moléculas de um polímero passam de um estado quase imóvel para um estado *borrachoso*, tornando-se mais facilmente deformáveis por cisalhamento (Manrich, 2005). De acordo com Robertson (1993), a T_g do PET é de 69°C.

O emprego do PET na indústria de embalagens é notavelmente comum, abrangendo uma ampla gama de aplicações. Conforme ressaltado por Dantas e Lima (2007), o PET usualmente é utilizado na produção de filmes biorientados destinados a embalagens flexíveis laminadas. Podendo atingir diversas características conforme a necessidade do cliente final.

O Livro Embalagens Flexíveis de Blucher (2009), destaca que a laminação compreende a união de um filme fino, transparente, de polipropileno (PP), poliéster, acetato ou nylon com a superfície de folha de impressão ou outro substrato.

1.3. VARIAÇÕES PRESENTES NO PROCESSO PRODUTIVO

Conforme observado por Sarantópoulos et al. (2002), na análise final de embalagens plásticas flexíveis, é notável que o aspecto visual das embalagens pode ser afetado por diversos fatores, incluindo a qualidade da formação após a fase de acabamento, que desempenha um papel essencial na sua performance tanto do ponto de vista químico quanto físico, abrangendo aspectos como resistência e aparência.

Durante o processo produtivo, é importante ressaltar que existe a possibilidade de ocorrer desvios em relação ao padrão de qualidade devido a potenciais defeitos, frequentemente associados à necessidade de ajustes precisos nas máquinas. Esses

problemas específicos podem surgir no decorrer do processo de fabricação das embalagens, muitas vezes como resultado de interrupções temporárias no fornecimento de material às máquinas ressalta o autor.

Figura 28 - Exemplos de defeitos ocasionados por variação de passo de fotocélula



Fonte: modenapak embalagem, 2016.

Também podemos relacionar os desvios de qualidade do produto final com os parâmetros de processos aplicados durante a produção, pois, os substratos utilizados na fabricação dessas embalagens flexíveis são extremamente sensíveis e dinâmicos. Ou seja, uma tensão e/ou temperatura excessiva nos substratos a serem laminados pode acarretar mínimas variações das estruturas de um polímero ocasionando pequenas alterações em dimensões do material e por sua vez trazendo variações no passo de fotocélula, resultando instabilidade para as máquinas de envase.

1.4. APLICAÇÃO DE SENSORIAMENTOS PARA CONTROLE DO PROCESSO

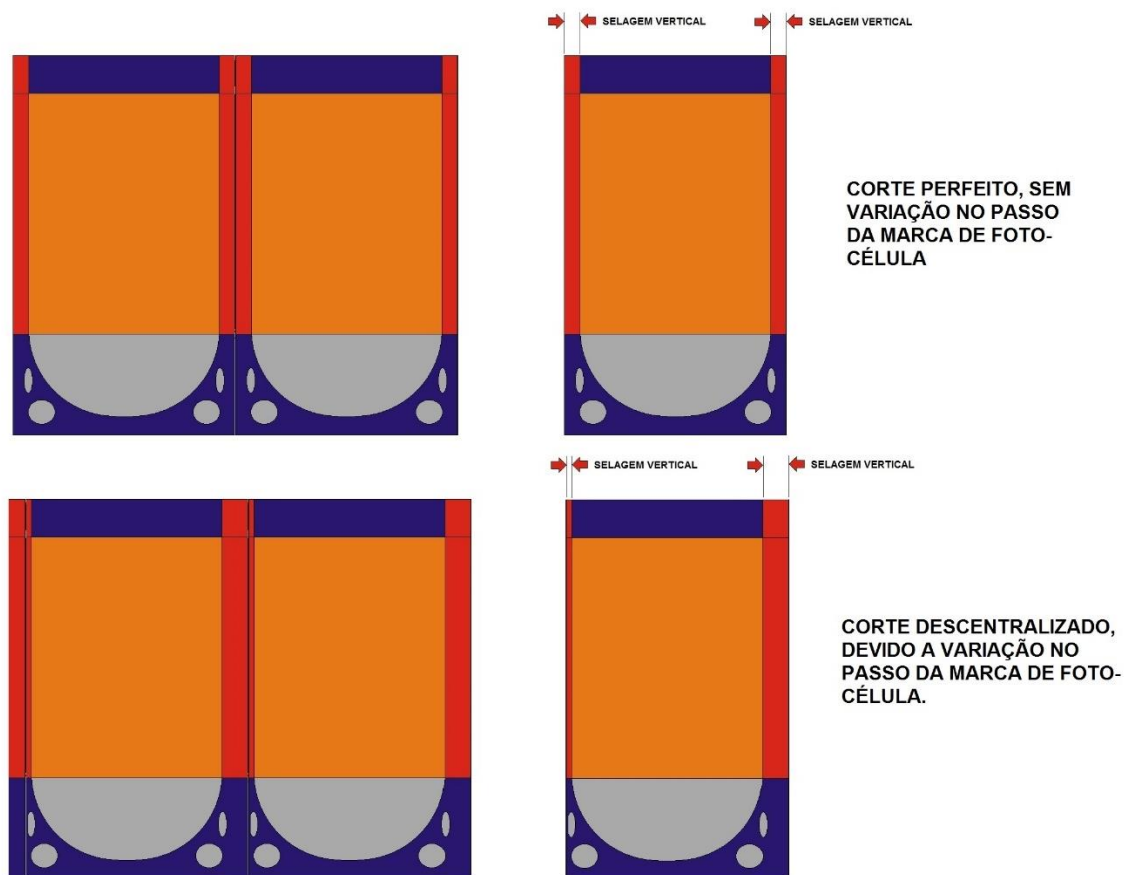
A aplicação de sensores para controle e monitoramento de processos se tornou cada vez mais necessário quando olhamos uma linha de produção industrial robusta. Analisando o cenário de produção de embalagens flexíveis, onde por sua vez, possuem uma série de parâmetros cruciais que devem ser controlados à risca para evitar grandes prejuízos.

Um pequeno desvio em algum desses parâmetros podem colocar em risco não só a qualidade da produção, como também, se não detectado, um transtorno com o cliente final gerando dificuldades no envase do produto. E se detectado possíveis atrasos com entrega do produto final ao cliente devido a necessidade de retrabalho. Depender do fator humano para controlar esses parâmetros coloca em risco a

robustez do processo, possibilitando assim variações de produções do mesmo produto e conseqüentemente variações que podem ocasionar desvios de qualidade.

A variação do passo de fotocélula está totalmente atrelada ao processo produtivo das fabricas de envases, sendo especificadas por eles a melhor configuração conforme as maquinas de formatação e envase. Quando o produto chega com o passo de fotocélula maior ou menor que o especificado, pode gerar alguns impactos como redução de velocidade de produção, descartes excessivos, necessidades de alteração configurações de máquinas bem como até perca de materiais envasados por vazamentos na embalagem.

Figura 29 - Corte descentralizado devido a variação de passo



Fonte: modenapak embalagem, 2016.

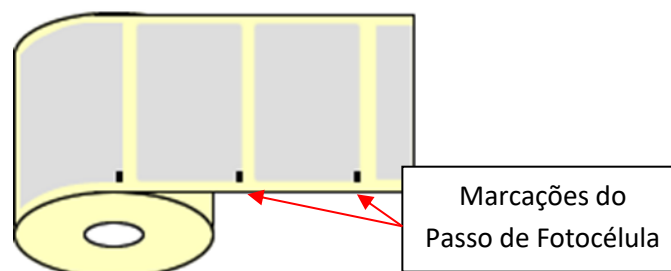
A produção de embalagens plásticas usualmente são realizadas com alta velocidade, tanto na impressão, quanto laminação e corte. Os dois processos que mais impactam a variação do passo de fotocélula é a impressão e laminação por possuírem dentro do seu processo produtivo, grandes estufas responsáveis por aquecimento do material, com o intuito do secamento da tinta e/ou adesivo composto

na embalagem. Essas estufas podem chegar até 90°C, ultrapassando a Tg do PET como visualizamos anteriormente.

1.4.1. Sensores Ópticos e Focélulas

Os sensores ópticos, em especial os sensores difusos que serão utilizados neste sistema, são responsáveis pela detecção precisa do passo de fotocélula. Um sensor óptico difuso detecta objetos ao emitir luz e receber o reflexo direto do próprio objeto, identificando sua presença pela intensidade da luz refletida. Quando um sensor óptico difuso detecta uma marca do passo de fotocélula, ele envia um sinal ao Controlador Lógico Programável (CLP), que, por meio de algoritmos específicos, mede o tempo entre essas detecções. Essa detecção permite verificar se o produto está sendo produzido dentro da variação mínima aceitável, minimizando a necessidade de ajustes manuais e reduzindo o risco de erros humanos.

Figura 30 - Passo de fotocélula em embalagem flexível



Fote: Do autor.

1.4.2. Encoders Incrementais

Os encoders incrementais complementam o controle da linha de produção, fornecendo leituras contínuas da velocidade da máquina, o que é crucial para ajustar o processo em tempo real. Esses dispositivos geram pulsos de acordo com a rotação, e para isto, é usualmente instalado nos próprios eixos a serem medidos como também podem ser utilizados roldanas encostados no eixo se movendo por atrito conforme a máquina se move. O CLP utiliza esses pulsos para calcular a velocidade exata, sincronizando-a com o sinal dos sensores ópticos. Isso possibilita a visualização instantânea caso o deslocamento esteja fora dos parâmetros, assegurando uma precisão ainda maior na produção.

1.4.3. CLPs (Controladores Lógicos Programáveis)

Os Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) surgiram nos anos 1960 como uma solução para substituir sistemas de controle baseados em relés e temporizadores, que demandavam manutenção complexa e eram propensos a erros em operações de larga escala. A indústria automotiva foi uma das primeiras a adotar essa tecnologia, que trouxe flexibilidade, facilidade de programação e confiabilidade para processos industriais. Desde então, os CLPs tornaram-se o coração de sistemas automatizados, sendo essenciais em linhas de produção onde a precisão e a consistência são fundamentais.

Na automação industrial, o CLP atua como a central de controle, processando e gerenciando sinais recebidos de sensores e dispositivos auxiliares. No sistema de monitoramento proposto, o CLP recebe leituras dos sensores ópticos e do encoder incremental, que indicam a presença de marcações e a velocidade da linha, respectivamente. Esses dados são processados em tempo real pelo CLP, que verifica se o intervalo entre as marcações (passo de fotocélula) está dentro dos padrões estabelecidos. Em caso de desvios, o CLP envia sinais para a interface homem-máquina (IHM) e emite alertas para o operador, possibilitando rápidas correções nos parâmetros definidos e que a qualidade do produto final seja preservada.

1.5. CONTROLE DO PROCESSO

A evolução dos métodos de controle de processos industriais permitiu avanços significativos em termos de qualidade e eficiência. Historicamente, o controle era realizado manualmente, com operadores registrando dados de produção em planilhas de papel, o que resultava em um alto potencial de erros e dificuldades na análise de grandes volumes de informações. Esse método de coleta de dados tornava a análise estatística demorada, dificultando a identificação de problemas e atrasando a implementação de ações corretivas para otimizar o processo produtivo.

Com o desenvolvimento do Controle Estatístico de Processos (SPC), surgiram indicadores como Cp, Cpk, Pp e Ppk, que oferecem uma maneira eficiente de medir a consistência e a capacidade dos processos. Cp e Cpk são utilizados para

avaliar a capacidade potencial e efetiva do processo, respectivamente. Enquanto C_p mede a amplitude do processo em relação aos limites de especificação, C_{pk} considera a localização da média do processo em relação ao limite mais próximo, sendo mais indicado para avaliar a conformidade de processos que estão sob controle estatístico (BOTHE, 1997; MONTGOMERY, 2015).

1.5.1. ÍNDICE C_p

O índice C_p , conhecido como índice de capacidade potencial do processo, mede o quão capaz é o processo de produzir dentro dos limites especificados, assumindo que ele esteja perfeitamente centrado no valor nominal. Esse índice é calculado pela seguinte equação:

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma}$$

Onde:

- LSE = Limite Superior de Especificação
- LIE = Limite Inferior de Especificação
- σ = Desvio-padrão do processo

Um valor de C_p maior que 1 indica que o processo tem uma variabilidade menor que o intervalo de especificação, sugerindo que é potencialmente capaz de atender aos requisitos. No entanto, esse índice não considera o posicionamento da média do processo em relação aos limites, sendo assim uma medida apenas da variabilidade.

1.5.2. ÍNDICE C_{pk}

Como o índice C_p não leva em conta o desalinhamento da média do processo em relação ao centro dos limites de especificação, Kane (1986) propôs o índice C_{pk} , que considera a localização da média em relação aos limites superior e inferior. O índice C_{pk} é dado pela equação:

$$C_{pk} = \min \left(\frac{LSE - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \right)$$

Onde:

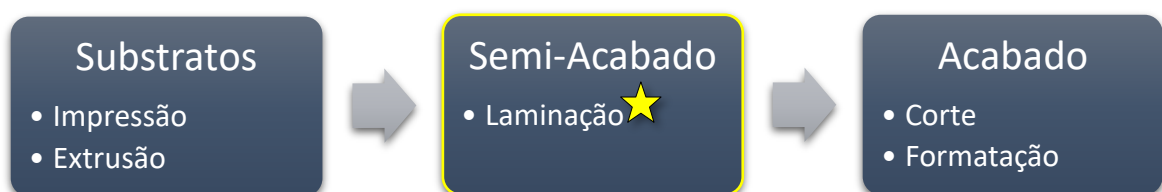
- μ = Média do processo
- LSE = Limite Superior de Especificação
- LIE = Limite Inferior de Especificação
- σ = Desvio-padrão do processo

Se C_p for igual a C_{pk} , o processo está centrado exatamente no valor nominal. No entanto, quando C_{pk} é menor que C_p , isso indica que o processo está descentrado, ou seja, a média do processo está deslocada em relação ao alvo nominal. Assim, a utilização conjunta dos índices C_p e C_{pk} fornece uma visão mais completa da capacidade do processo, considerando tanto a variabilidade quanto o alinhamento da média.

2. METODOLOGIA

A pesquisa se classifica como um projeto de desenvolvimento, direcionado à elaboração de uma solução prática em um contexto industrial. Essa pesquisa foi conduzida nas instalações de uma indústria parceira, uma renomada multinacional especializada na fabricação de embalagens flexíveis, que abrange processos de extrusão, impressão *flexográfica* e *rotográfica*, laminação, corte e formatação. O processo de laminação desempenha um papel crucial nessa indústria, sendo uma etapa vital para a conversão do produto final de embalagem plástica.

Figura 31 - Fluxo resumido para conversão de embalagem plástica



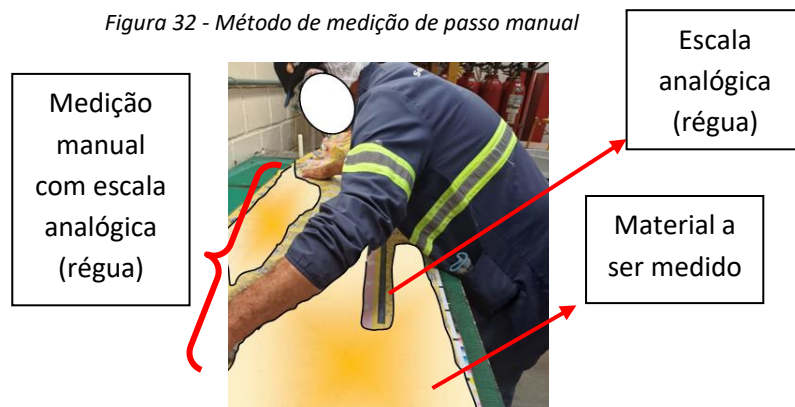
Fonte: Do autor.

A pesquisa se concentrou principalmente nas operações relacionadas à laminação, que é realizada em uma laminadora triplex, fase do processo onde os substratos são unificados com adesivos e condições térmicas. Além disso, a pesquisa incluiu medições realizadas no laboratório de qualidade, equipado com ferramentas de medição devidamente calibradas.

O impacto desse projeto é substancial. Ele visa a reduzir o trabalho manual, fornecendo uma ferramenta confiável para medição do passo de fotocélula, evitando

erros humanos. Também contribui para a melhoria da confiabilidade do processo, uma vez que realiza medições contínuas durante a produção, em oposição à amostragem.

Figura 32 - Método de medição de passo manual

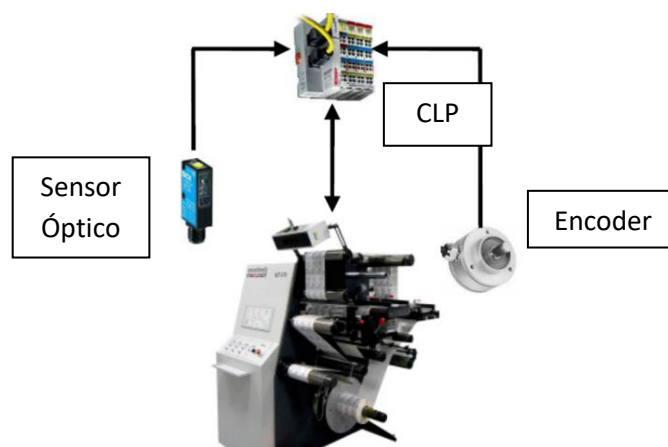


Fonte: Do autor (Indústria parceira)

A utilização do sistema proposto ajuda a evitar desvios de qualidade não identificados, que, de outra forma, poderiam atingir os clientes finais. Portanto, a implementação bem-sucedida desse projeto resultará em maior eficiência e economia de recursos na indústria parceira.

O sistema proposto é composto por sensores ópticos, um encoder incremental e uma interface gráfica amigável (IHM), cada um desempenhando um papel crucial na automação e no controle de qualidade do processo de laminação. Os sensores ópticos serão posicionados estrategicamente ao longo do processo de produção, de acordo com a distância entre as marcações de fotocélula nas embalagens flexíveis. Cada vez que uma marcação for detectada, o sensor enviará um sinal ao Controlador Lógico Programável (CLP), que será responsável pelo processamento dessas informações.

Figura 33 - Resumo da aplicação do projeto



Fonte: Do autor (Fornecedor parceiro).

Além disso, o encoder incremental terá a função de monitorar a velocidade da máquina, fornecendo dados essenciais para o cálculo preciso do passo de fotocélula. Esse passo representa a distância entre as marcações no material, e será previamente informado pelo operador no sistema. A partir disso, o CLP calculará o tempo ideal entre os sinais gerados pelos sensores ópticos, baseado na velocidade da máquina e no tamanho do passo inserido.

Com essas informações, o CLP poderá determinar, em tempo real, se a distância entre as marcações está dentro da variação mínima aceitável. Caso haja qualquer desvio em relação ao tempo esperado, o sistema alertará o operador através da interface gráfica (IHM), permitindo ajustes imediatos no processo, garantindo assim que a produção se mantenha dentro dos padrões de qualidade estabelecidos.

A metodologia foi desenvolvida para avaliar a eficácia do sistema implementado, que monitora o processo de laminação por meio de sensores e sistemas de controle automatizados. A seguir, detalho as etapas e ferramentas envolvidas na coleta e análise dos dados, além do processo de implementação do sistema na linha de produção.

2.1. COLETA DE DADOS

A coleta de dados foi realizada tanto de maneira manual quanto automática para garantir uma base comparativa. Atualmente, o processo de medição ocorre manualmente, com operadores utilizando escalas analógicas no início da produção e ao final de cada bobina, resultando em média de 10 a 20 medições por campanha de produção. Essas medições são registradas no sistema de controle de qualidade da indústria parceira, possibilitando análise de variação, mas apresentam limitações, pois somente o metro final denominado de “capa” da bobina é medida, o que pode ocultar variações que ocorreram ao longo da produção.

Para garantir a efetividade do sistema proposto, a coleta foi conduzida em duas linhas de produção completas, onde foram comparados os valores obtidos pela leitura manual com os resultados do sistema automatizado. Essa comparação, realizada por meio do resultado das capacidades realizadas no software Minitab.

2.1.1. Coleta de dados na metodologia antiga

Os valores de especificação de passo de fotocélula usualmente são medidos em um metro, pois com embalagens muito pequenas (como por exemplo sachês de ração molhada que possuem em média de 95mm de distância entre as marcações de passo de fotocélula) a leitura da variação individual é muito baixa, sendo assim, mais difícil ser detectada.

Para encontrar a especificação correta, é utilizada o seguinte cálculo:

$$\frac{1m}{PI} = RP$$
$$RP * PI = PM$$

Onde:

- 1m = 1 metro
- PI = Passo Individual
- RP = Repetições no Metro
- PM = Passo no Metro

$$1000mm / 95mm = 10,52^*$$

$$10 * 95mm = 950mm$$

**Arredondamos o resultado para baixo em nenhuma casa decimal.*

Se a especificação desse material do exemplo for de mais ou menos 1,8 mm de variação no metro, a especificação final seria de 948,2mm de limite inferior, 950mm de valor nominal e 951,8mm de limite superior.

Para o produto utilizado no estudo o valor do passo de fotocélula é de 979mm de limite inferior, 980mm de valor nominal e 981mm de limite superior. Sendo então uma variação de mais ou menos 1mm no metro.

2.1.2. Coleta de dados com o dispositivo eletrônico

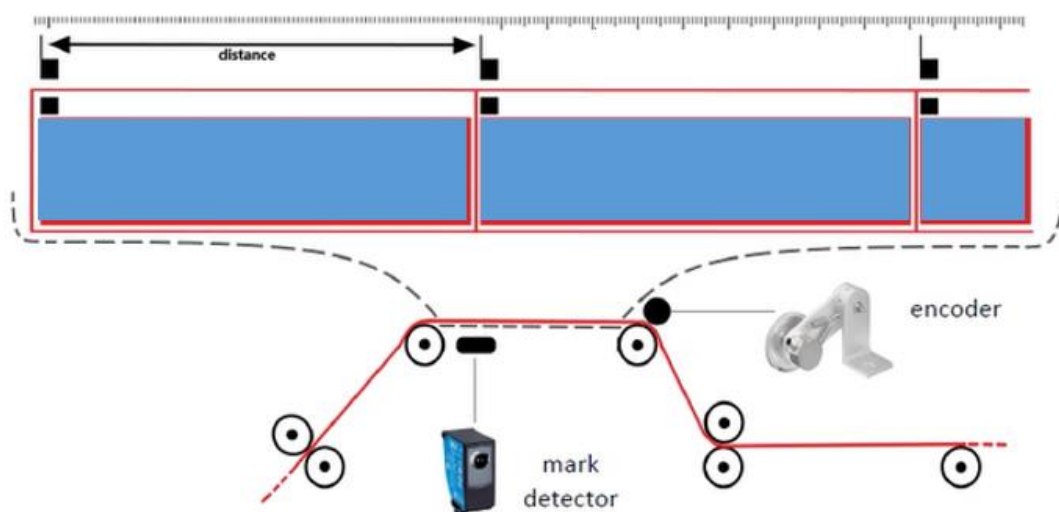
Em um processo industrial robusto como o de embalagens flexíveis, a frequência com que os sensores devem capturar os dados (como o passo de

fotocélula) é definida pela velocidade e a precisão do processo produtivo. Sensores ópticos e encoders incrementais, por exemplo, têm a capacidade de realizar leituras em milissegundos, capturando até mesmo as mínimas variações. Isso permite que, a cada ciclo, uma quantidade massiva de dados seja disponibilizada para os CLPs processarem.

Esses dados em alta frequência são então integrados ao CLP, que é programado para processá-los dentro de uma faixa predefinida de análise. Com isso, o CLP avalia continuamente se os parâmetros do processo estão dentro dos limites de especificação. Em situações em que um desvio é detectado, o CLP aciona alarmes, permitindo que ajustes sejam feitos pela equipe de operação.

A precisão trazida por essa combinação de sensores e CLPs beneficia diretamente o estudo da Capabilidade de Processo. Em vez de se basear em uma média de valores espaçados ou em medições pontuais, o uso de sensores de alta frequência e o processamento rápido pelo CLP possibilitam uma análise detalhada e contínua do processo.

Figura 34 - Exemplificação do funcionamento do sistema

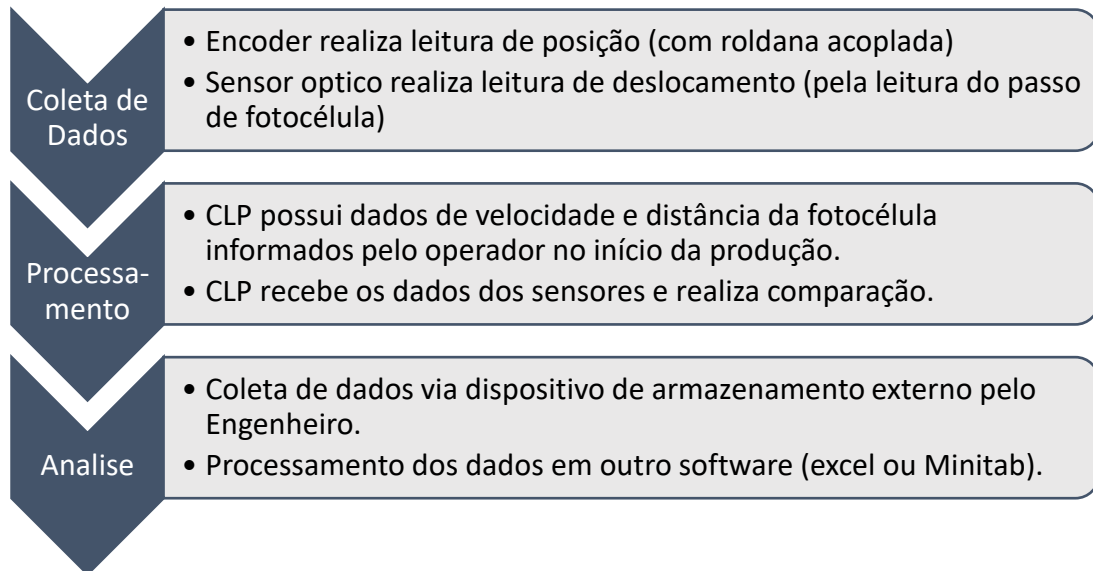


Fonte: Do autor. (Fornecedor Parceiro)

O equipamento de medição de passo, especialmente, permite monitorar a variação do passo de fotocélula, e, conseqüentemente, identificar até mesmo as menores discrepâncias em tempo real. Essa abordagem assegura um controle rigoroso da qualidade e, ao mesmo tempo, reduz desperdícios, pois qualquer ajuste

necessário pode ser realizado rapidamente, mantendo a capacidade do processo em níveis ideais.

Figura 35 - Fluxograma da coleta de dados

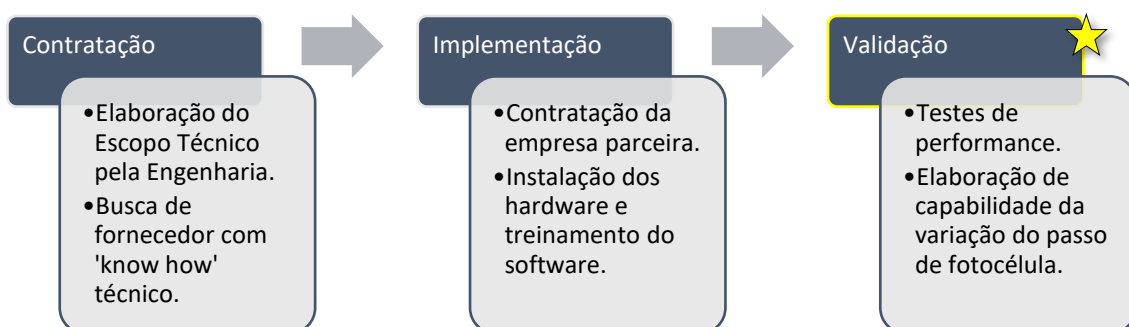


Fonte: Do autor

2.2. PROCESSO DE IMPLEMENTAÇÃO

O projeto começou em resposta a reclamações de clientes sobre variações no passo de fotocélula. Após buscas por soluções no mercado, optou-se por um fornecedor específico devido à robustez da empresa e à possibilidade de uma parceria de longo prazo. A etapa inicial foi verificar a efetividade do sistema proposto antes de considerá-lo uma solução padronizada para todas as máquinas da fábrica.

Figura 36 - Fluxo resumido da implementação



Fonte: Do autor

2.2.1. Instalação dos Sensores Ópticos e Encoder Incremental

Os sensores ópticos e o encoder incremental foram instalados próximos ao fim do processo de laminação, onde, todos os substratos já passaram por todos os estresses térmicos do processo. O encoder foi fixado em uma roldana para evitar interferências causadas por variações de tensão no material, enquanto o sensor óptico foi posicionado após a laminação do último substrato. Essa configuração garante que o sensor opere com estabilidade e que a leitura seja precisa, uma vez que o material já está completo e não passará por aquecimento adicional.

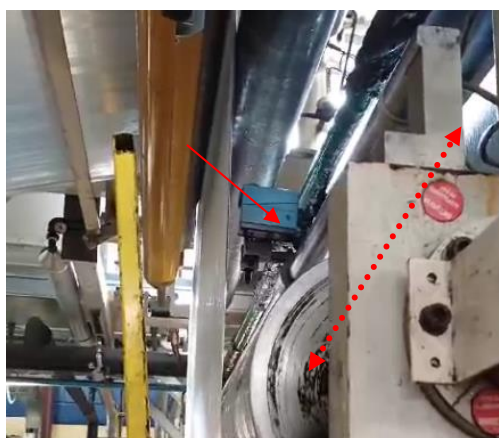
Figura 37 - Encoder instalado em máquina



Fonte: Do autor (Indústria parceira)

Para garantir flexibilidade, foi instalada uma barra ajustável ao longo da máquina, permitindo que o sensor óptico se ajuste à largura específica do material, mantendo a precisão da leitura.

Figura 38 - Sensor optico instalado em máquina



Fonte: Do autor (Indústria parceira)

2.2.2. Integração dos Dados com a Interface Gráfica (IHM)

Os dados de leitura dos sensores foram integrados a uma Interface Homem-Máquina (IHM), permitindo que a equipe operacional monitore as variações de passo em tempo real. A IHM exibe um gráfico com limites de especificação e pontos de segurança, alertando o operador caso o processo se aproxime dos limites superiores ou inferiores.

Figura 39 - IHM monitorando o passo de fotocélula



Fonte: Do autor (Industria parceira)

A torre de sinal possui três cores, sendo que, no caso de variação próxima ao limite de segurança, aciona o sinal amarelo. Se os limites forem ultrapassados, o sinal vermelho é ativado, indicando a necessidade de ação corretiva.

2.3. ANÁLISE ESTATÍSTICA DE CAPABILIDADE

Para validar a eficácia do novo sistema, foram coletados dados de duas campanhas de produção utilizando os mesmos parâmetros. Essas informações foram analisadas no software Minitab, possibilitando o cálculo da Capabilidade de Processo, representada pelos índices Cpk e Ppk. A comparação entre os métodos de medição manual e eletrônica revelou variações antes não identificáveis, mostrando a

superioridade do sistema automatizado em manter o processo dentro das especificações de qualidade e garantindo, assim, uma produção mais consistente e de menor variação ao longo das bobinas.

Essa metodologia, que integra sensores, CLPs e análise de dados estatísticos, garante um processo de produção mais confiável e capaz de atender às especificações dos clientes de forma eficiente, bem como, a utilização de substratos mais complexos para controle de passo de fotocélula, onde possuem uma tg ainda menor, como por exemplo o BOPP (Polipropileno Biorientado) e o PP MDO (Polipropileno Orientado na Direção da Máquina).

3. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Nesta subseção, são apresentados os dados coletados tanto pelo sistema eletrônico implementado quanto pelo método manual, possibilitando uma análise comparativa clara.

Os dados do sistema eletrônico são apresentados em gráficos, destacando a variação na posição das marcações de fotocélula ao longo do tempo, o que oferece um panorama detalhado e contínuo da estabilidade do processo. Esses dados são comparados aos dados manuais, coletados apenas no final de cada bobina (“capa”), revelando a limitação do método manual, onde possíveis variações ao longo do processo não são detectadas.

Posteriormente podemos visualizar a análise de capacidade dos dois processos afins de ter um panorama maior referente a variação do passo de fotocélula ao longo do processo de produção.

3.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com a análise dos dados antes e depois da implementação do sistema, observa-se um ganho significativo em precisão e confiabilidade.

No método tradicional, o operador necessita de aproximadamente 5 minutos para realizar cada medição. Em contrapartida, o sistema eletrônico permite o monitoramento contínuo, o que, além de liberar tempo para o operador, possibilita

maior controle do processo, reduzindo a necessidade de paradas inesperadas. Pois em medições manuais, pode-se encontrar um valor fora de especificação levando a perda de material já laminado até que o operador realize ajustes para correção dos parâmetros de processos.

Figura 40 - Tabelas comparativas entre os tempos de medições

Medição Manual		Medição Sistema Automático	
Tempo (Min)	Quando	Tempo (Min)	Quando
5	Medição início de produção	5	Medição início de produção
2	Medição por bobina	0	Medição por bobina
-	20 Bobinas por campanha	-	20 Bobinas por campanha
45	Minutos Totais	5	Minutos Totais

Fonte: Do autor.

Notavelmente é possível visualizar o tempo economizado da equipe operacional em realizar as medições comparadas com o sistema automático a medição manual. Esse cenário garante um ganho em produtividade bem como um ganho em qualidade pois o operador pode focar esforços em outros aspectos minimizando tempo investido com as medições.

A medição em tempo real de toda a extensão da bobina traz uma amostragem substancialmente maior em comparação à amostragem limitada pela capa, aumentando a representatividade dos dados coletados. Esse incremento contribui para identificar variações ao longo de todo o processo, aumentando a confiabilidade da produção e a qualidade do produto final.

Com a utilização do sistema automático, trouxe uma segurança maior para o time operacional em sequenciar mais testes em conjunto com a engenharia de processos, visando aumento de velocidade de máquina somados com ajustes em pressões e temperatura tendo como objetivo uma performance e produtividade ainda maior da produção. Pois com os dados em tempo real, é possível visualizar o impacto das alterações de processos refletidas no passo de fotocélula.

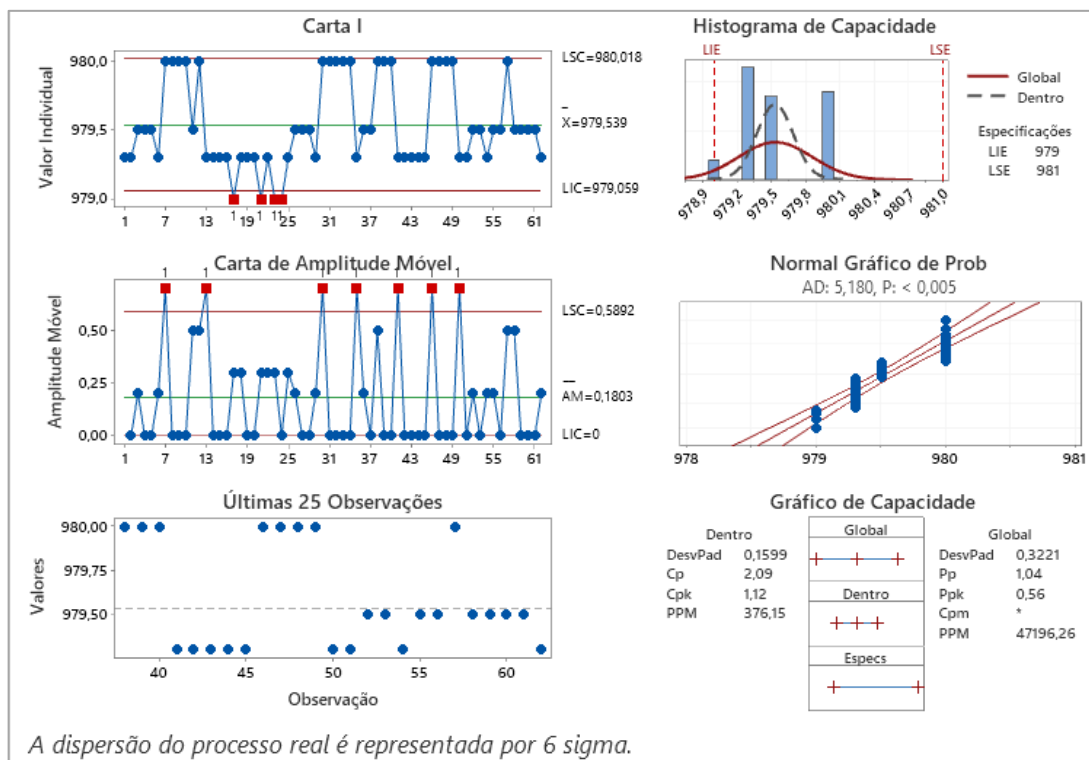
3.2. INTERPRETAÇÃO ESTATÍSTICA (CAPABILIDADE)

Para validar a efetividade do sistema, foi realizada uma análise estatística de capacidade (Cpk e Ppk), comparando as duas abordagens.

A análise estatística das medições manuais indicou que a representatividade dos dados era limitada, o que poderia gerar uma falsa percepção de instabilidade e/ou estabilidade do processo, já que considerava apenas a capa da bobina.

Analisando apenas a capa da bobina, são encontrados valores maiores ou menores que a medição anteriores, contudo, as variações de passo são gradativas, ou seja, vão aumentando ou diminuindo aos poucos e não repentina. Quando realizamos a análise de capacidade desses valores, a variação repentina de uma bobina para outra traduz uma instabilidade e conseqüentemente um valor de Cpk menor.

Figura 41 - Capacidade realizada com as medições manuais



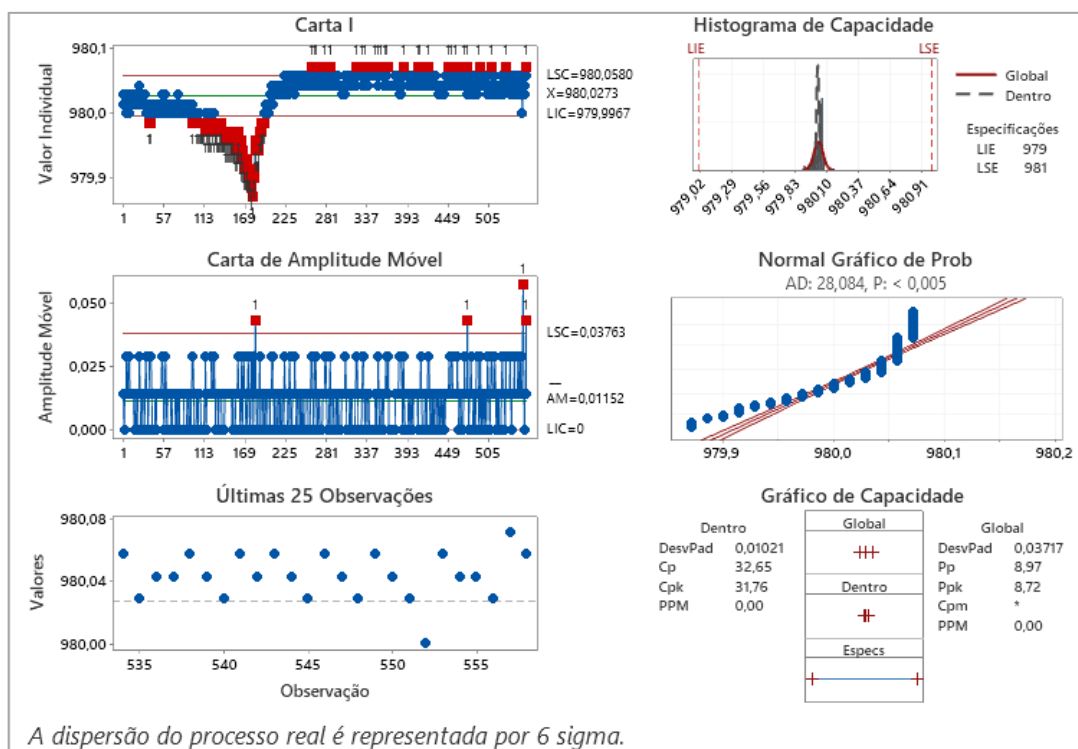
Fonte: Do autor.

A capacidade apresenta uma carta de controle com dados variando próximo a limite inferior e o valor nominal, conforme variação repentina citada anteriormente, fazendo com que a amplitude móvel contenha alguns pontos com variações acima de 0,5mm. E assim traz uma capacidade de Cpk de 1,12. Esse valor usualmente não é um valor satisfatório, como controle de processo da indústria parceira, uma capacidade aceitável é um valor de Cpk acima de 1,33.

Com o monitoramento contínuo e uma amostragem muito maior, os índices de capacidade refletiram de forma mais precisa o desempenho real do processo, mostrando um aumento na robustez e permitindo ajustes em tempo real conforme as tolerâncias do cliente.

O ajuste em tempo real dos parâmetros de processos facilita o controle do valor de passo de fotocélula, sendo que quando o valor começa a apresentar variações tendenciando aos limites inferior ou superior o operador pode realizar rapidamente uma alteração no controle de tensão e/ou temperatura afim de manter a estabilidade do valor medido.

Figura 42 - Capacidade realizada com o sistema eletrônico



Fonte: Do autor.

A capacidade traz uma carta de controle com dados variando entre a região do valor nominal da especificação, sendo 1mm acima ou abaixo do valor nominal. A amplitude móvel apresentou variações de no máximo 0,05mm. E assim traz uma capacidade de Cpk de 31,76. Esse valor traz uma representação de controle total do processo, traduzindo um processo totalmente estável.

Contudo, temos que observar que a taxa de amostragem foi realizada em mais de 500 medições em curto espaço de tempo (quando comparada com o

método de medição manual). Sendo assim, esse valor de Cpk não pode ser comparado diretamente com o valor de medição manual.

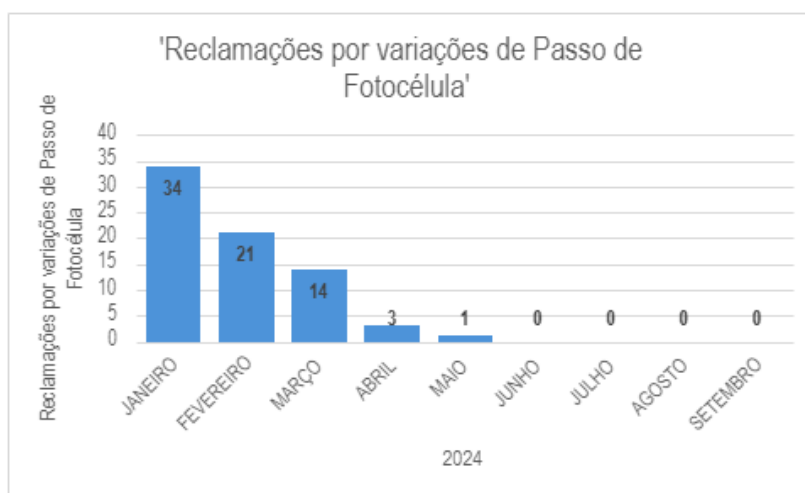
3.3. BENEFÍCIOS PARA O PROCESSO PRODUTIVO

A coleta automatizada permitiu otimizações nos parâmetros de produção, como ajustes de velocidade e tensionamento, de forma que o monitoramento em tempo real reduziu a possibilidade de desvios críticos.

O monitoramento contínuo possibilita ao operador observar, em tempo real, qualquer tendência de variação e realizar ajustes preventivos, reduzindo a chance de produzir bobinas fora das especificações.

Após a implementação do sistema automático no processo produtivo, foi alcançado uma estabilidade do processo significativa, no qual, foi refletida nas reclamações com o cliente da indústria parceira por variações do passo de fotocélula.

Figura 43 - Gráfico de reclamações do cliente da indústria parceira



Fonte: Do autor.

As reclamações referentes a variações de passo de fotocélula foram reduzidas a zero em poucos meses, devido ao cliente possuir lotes de fabricações antigas em seu estoque. Após a implementação do controle desse aspecto de qualidade também trouxe benefícios para outros produtos de outros clientes.

3.4. LIMITAÇÕES DO PROJETO

Apesar dos ganhos, o sistema trouxe algumas novas demandas operacionais. O operador precisa configurar uma receita inicial, informando as tolerâncias e a distância do passo antes do início de cada produção, o que adiciona uma responsabilidade ao processo. Caso a informação colocada pelo time operacional seja equivocada, trará uma leitura errônea e assim um prejuízo considerável.

Figura 44 - Ajuste inicial que operador deve colocar



Fonte: Do autor (Indústria parceira)

O sistema depende de uma manutenção rigorosa dos sensores ópticos e do encoder incremental como também um correto posicionamento, pois eventuais falhas ou atrasos na leitura podem comprometer a eficiência do controle em tempo real. Além disso, o ambiente de produção pode exigir ajustes periódicos no posicionamento dos sensores para manter a precisão na leitura das marcações.

4. CONCLUSÃO

4.1. VISÃO GERAL

Este trabalho teve como objetivo a implementação e análise de um sistema automatizado para monitoramento de variações de passo de fotocélula, visando reduzir os transtornos ocasionados por variações indesejadas no processo de

produção de embalagens. A partir de uma metodologia que comparou o método tradicional de amostragem manual com o sistema eletrônico de medição contínua, foi possível avaliar os ganhos em precisão, eficiência e confiabilidade. Os dados coletados pelo novo sistema mostraram-se capazes de oferecer uma visão detalhada e em tempo real de todo o processo de produção, atendendo ao objetivo principal de minimizar as variações de passo de fotocélula e, assim, evitar impactos negativos no produto final e nas relações com nossos clientes.

4.2. CONTRIBUIÇÕES DO PROJETO

O monitoramento *full time* permite detectar e ajustar desvios de maneira mais eficaz do que o método manual, onde o controle era realizado somente no fim da bobina. A maior frequência de dados coletados permitiu uma análise mais representativa do processo, o que resultou em um controle de qualidade mais robusto e confiável.

Com a automação do monitoramento, os operadores ganham tempo para outras atividades essenciais, ao mesmo tempo em que os riscos de erro humano são reduzidos. Além disso, o monitoramento contínuo diminuiu a necessidade de paradas para inspeções e possibilitou ajustes em tempo real, aumentando a eficiência do processo e a qualidade do produto final.

A coleta de dados em tempo real permite ajustes mais precisos nas variáveis de produção, como tensionamento e temperatura das estufas, com o objetivo de manter a estabilidade do passo de fotocélula e evitar outros problemas que podem aparecer no material.

4.3. TRABALHOS FUTUROS

Embora o projeto tenha alcançado seus objetivos iniciais, há oportunidades para evoluções e integrações adicionais que podem melhorar ainda mais o desempenho do sistema e o controle da produção.

A inclusão de uma interface que permita ao sistema de monitoramento atuar automaticamente nos acionamentos da máquina possibilitaria um processo de autocorreção. A cada variação identificada, o sistema poderia ajustar automaticamente as variáveis de produção, como tensionamento ou velocidade, sem a necessidade de intervenção manual, elevando o nível de automação e reduzindo possíveis desvios.

A integração de IA no sistema proporcionaria uma análise automática e contínua dos dados coletados, identificando padrões e realizando otimizações no processo com base em dados históricos. Com a IA, seria possível, por exemplo, prever tendências de variação de passo antes que elas se tornassem significativas, permitindo um controle preditivo e mais eficiente.

Essas melhorias futuras não apenas aumentariam a confiabilidade e a eficiência do processo, mas também trariam uma nova dimensão de inteligência ao sistema, facilitando ainda mais o trabalho dos operadores e garantindo um produto final de qualidade cada vez mais elevada. Assim, este projeto estabelece uma base sólida para a evolução contínua da indústria de embalagens, promovendo avanços significativos em automação, controle e qualidade.

REFERÊNCIAS

ANYADIKE, N. Laminação. In: HENRIQUE, R. (Trad.). Introduction to Flexible Packing. Vol. 1. São Paulo: Editora Blucher, 2009. p. 102.

BUENO, Jéssica Naihara Nunes. Implantação da Ferramenta Gage R&R em uma Indústria de Embalagens. Revista de Ciências Exatas e Tecnologia, v. 13, n. 13, p. 38, 2018.

DE LIMA, Luiz Roberto. Design de Embalagens Flexíveis para Impressão em Rotogravura. 2004.

DANTAS, R. L.; LIMA, C. A. P. Qualidade de Embalagens Flexíveis para Alimentos. In: 9º Congresso Brasileiro de Polímeros, 2007, Campina Grande, PB, Brasil.

GORNI, Antonio Augusto. Introdução aos plásticos. Revista Plástico Industrial, v. 10, n. 09, 2003.

HART, C.W.; BOGAN, C.E. O que é o prêmio Baldrige e o que representa para as empresas. São Paulo: Makroon Books, 1994.

Instituto de Embalagens. Processo de Laminação em Embalagens Flexíveis. In: Química Orgânica Industrial Milanese. Adesivos de poliuretano e laminação. 2016. p. 199.

MAZZUCCO, Marcos Marcelino. Estudo da Ocorrência de Canaletas no Processo de Laminação em uma Indústria de Embalagens Flexíveis. 2019.

MANRICH, S. Processamento de Termoplásticos: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e molde. 1. ed. São Paulo: Artiliber Editora, 2005.

MERCADO mundial de embalagens. ABRE, G1, p. 1, 22 fev. 2021. Disponível em: <https://www.abre.org.br/inovacao/mercado-mundial-de-embalagens-atingira-us-1-trilhao-em-2024/>. Acesso em: 1 ago. 2023.

ROBERTSON, G. L. Food Packaging: principles and practice. New York: Marcel Dekker, 1993.

RODRIGUES, Taynara Tatiane. Polímeros nas Indústrias de Embalagens.

SARANTÓPOULOS, et al. Embalagens Plásticas Flexíveis. CETEA/ITAL, 2002. 267 p.

SILVEIRA, Fabiana. AB Flexo – Associação Brasileira de Técnica de Flexografia. Laminação: agregando valor à embalagem, 2015. Disponível em: <https://abflexo.org.br/2015/02/06/logistica-tintas-2/>. Acesso em: 23 out. 2023.

AUMENTO no CAGR. Mordor Intelligence. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/packaging-industry-in-brazil>. Acesso em: 1 ago. 2023.

ALTA e queda na produção de embalagens. ABIEF. Disponível em: <https://www.abief.org.br/flex-tendencias/industria-brasileira-de-embalagens-plasticas-flexiveis-registra-alta-na-producao-e-queda-no-faturamento-em-2022-2/>. Acesso em: 1 ago. 2023.

INFLUÊNCIA da embalagem. Food Connection. Disponível em: <https://www.foodconnection.com.br/embalagens/embalagens-criativas-o-poder-para-agregar-valor-ao-produto>. Acesso em: 1 ago. 2023.

COMPORTAMENTO do polímetro. Repositório UFU. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/24082>. Acesso em: 1 ago. 2023.

CHOQUEHUANCA, Rosario Huanaco. Trabalho de conclusão de curso. Control De Calidad En Una Empresa De Embalages Flexibles. Facultad de ingeniería química e têxtil. Universidad nacional de Ingeniería. (Figura). Lima: UNI. 2014.

MODENAPAK EMBALAGEM. *Defeitos em Embalagens*. Disponível em: <https://modenapakembalagem.wordpress.com/page/3/>. Acesso em: 2 out. 2024.

BOTHE, D. R. *Measuring Process Capability: Techniques and Calculations for Quality and Manufacturing Engineers*. McGraw-Hill, 1997.

CLEMENTS, J. A. *Process Capability Calculations for Non-normal Distributions*. Quality Progress, 1989.

MONTGOMERY, D. C. *Introduction to Statistical Quality Control*. 7ª ed. Wiley, 2015.

SASSI, R. *Estatística Aplicada à Qualidade*. 2016.

OLIVEIRA, Josenildo Brito de; SOUTO, Ricardo Romualdo; MAIA, Rafaella Dias de Almeida; MEIRA, Julia Alexandre; LIMA, Victor Serrano Paulino. Análise da capacidade de um processo: um estudo de caso baseado nos indicadores Cp e Cpk. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO (ENEGEP), 31., 2011, Belo Horizonte. Anais [...]. Belo Horizonte: ABEPRO, 2011.

Kane, V. E. (1986). Process Capability Indices. *Journal of Quality Technology*, 18(1), 41-52.

E-TEC Revista de Tecnologia e Ciência

VOLUME 3

2024



WWW.UNISENAIPR.COM.BR

