



UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

ALLISON DE SÁ BARRETO FERREIRA

SISTEMA DE CONTROLE EM UM
TRANSPORTADOR AÉREO TIPO *MASTER*

Marabá

2019

ALLISON DE SÁ BARRETO FERREIRA

**SISTEMA DE CONTROLE EM UM
TRANSPORTADOR AÉREO TIPO *MASTER***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado junto à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Henrique Cerqueira Costa Basquerotto

Marabá

2019

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Ferreira, Allison de Sá.

Sistema de controle em um Transportador aéreo tipo Master./
Allison de Sá Ferreira; orientador Prof. Dr. Cláudio Henrique Cerqueira
Costa Basquerotto. –2019.

48 f.:il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade
Federal do Sul e Sudeste do Pará, Faculdade de Engenharia Mecânica,
Marabá, 2019.

1. Sistema de controle on-of. 2. Curtume. 3. Transportador
aéreo. I. Basquerotto, Cláudio Henrique Cerqueira Costa, *orient.* II.
Título.

CDD 23. ed.: 629.895



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO SUL E SUDESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E ENGENHARIAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Ata de Defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica de Allison de Sá Barreto Ferreira.

Aos três dias do mês de julho de 2019, reuniu-se a banca examinadora do trabalho apresentado como Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica de ALLISON DE SÁ BARRETO FERREIRA, intitulada: SISTEMA DE CONTROLE ON-OFF EM TRANSPORTADOR AÉREO TIPO MASTER. Compuseram a banca examinadora os professores Dr. Cláudio Henrique Cerqueira Costa Basquerotto (Orientador), Dr. José Elisandro de Andrade e Franco Jefferds dos Santos Silva. Após a exposição oral, o candidato foi arguido pelos componentes da banca que reuniram-se reservadamente, e decidiram, APROVAR, com o conceito ECX à monografia. Para constar, redigi a presente Ata, que aprovada por todos os presentes, vai assinada por mim, Coordenador do Curso de professor Dr. José Elisandro de Andrade, e pelos demais membros da banca.

Dr. Cláudio Henrique Cerqueira Costa Basquerotto
(Orientador)

Dr. José Elisandro de Andrade
(Avaliador 1)

Dr. Franco Jefferds dos Santos Silva
(Avaliador 2)

*Dedico este trabalho a minha família
Arlindo Alves,
Maria Edna e
João Dionísio.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelas bênçãos em minha vida. Aos meus pais e irmão, Arlindo Alves Ferreira, Maria Edna de Sá Barreto Ferreira e João Dionisio de Sá Barreto Ferreira, por me educarem e apoiarem em todos os momentos para que pudesse seguir meus objetivos. A Rafaela Dutra Boaventura, por me apoiar e acreditar em mim. A todos os meus amigos, seja no campo acadêmico, profissional ou social. Principalmente Vinícius dos Santos Gonçalves. Aos colegas e professores da Unifesspa, que me ajudaram com conhecimento e apoio. Em especial ao meu orientador Cláudio Basquerotto, pelas horas de dedicação neste trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta todos os passos necessários para o desenvolvimento de um sistema de controle *on-off*. Tal sistema foi aplicado no transportador aéreo de couros tipo *master* do curtume JBS em Marabá para identificação dos rolamentos faltantes nos elos do transportador que provocam falhas e paradas de processo. Por meio de ferramentas como gráfico de Pareto e *FMEA*, o problema na unidade foi analisado. Conclui-se que a falta de rolamento na corrente do transportador aéreo é a principal causa potencial de falha no mecanismo. Em seguida, modelou-se o sistema de transporte e o apresentou como um diagrama de bloco. Para implementação do sistema na unidade, foi necessária a escolha dos componentes utilizados, a análise de posição dos rolamentos e a construção da lógica de programação do microcontrolador. Optou-se pela utilização dos sensores de contato tipo *micro switch* e pelo microcontrolador Arduino Uno visando, principalmente, o baixo custo do projeto. Os resultados obtidos confirmaram o funcionamento do sistema de controle *on-off*, que pôde identificar o rolamento faltante e enviar um sinal de aviso indicando a necessidade de troca do mesmo para evitar grandes paradas de processo e perda de produção.

Palavras-chave: Sistema de controle *on-off*. Curtume. Transportador aéreo. Arduino uno. Sensor de contato *micro switch*.

ABSTRACT

This work presents all steps necessary for the development of a on-off control system. The system has been applied to JBS tannery overhead conveyor in Marabá for identification of the missing bearings at the conveyor links that cause failures and process shutdowns. Through tools such as Pareto graph and FMEA, the problem in the company was analyzed. It is concluded that the lack of bearing in the air conveyor chain is the main potential cause of failure in the mechanism. Then, the conveyor system was modeled and presented as a block diagram. To implement the system in the company, it was necessary to choose the components used, the positional analysis of the bearings and the construction of the microcontroller programming logic. It was decided to use the micro switch contact sensors and the Arduino Uno microcontroller aiming the low cost of the project. The results confirmed the operation of the control system, which could identify the missing bearing and send a warning signal indicating the need to change it to avoid large process stops and loss of production.

Keywords: On-off control system. Tannery. Overhead Conveyor. Arduino uno. Micro switch contact sensors.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma de produção de couros <i>wet blue</i>	11
Figura 2 – Transportador aéreo de couros da unidade de Marabá.	12
Figura 3 – Diagrama simplificado de um sistema de malha aberta.	15
Figura 4 – Diagrama simplificado de um sistema de malha fechada.	16
Figura 5 – Diagrama de bloco de um sistema de controle <i>on-off</i> com intervalo diferencial.	19
Figura 6 – Representação da resposta de um sistema de controle proporcional. . .	20
Figura 7 – Representação da resposta de um sistema de controle proporcional-integral.	21
Figura 8 – Representação da resposta de um sistema de controle proporcional-derivativo.	23
Figura 9 – Representação da resposta de um sistema de controle proporcional-integral-derivativo.	24
Figura 10 – Microcontrolador Arduino Uno.	26
Figura 11 – Sensor micro switch tipo KW11-3Z-5-3T.	27
Figura 12 – Análise de Pareto das principais paradas de máquinas da unidade. . . .	28
Figura 13 – Diagrama de Corpo Livre de um conjunto de elo do sistema de transporte aéreo.	31
Figura 14 – Conjunto motor-redutor de acionamento do transportador aéreo	33
Figura 15 – Diagrama de bloco do sistema de controle <i>on-off</i>	34
Figura 16 – Material utilizado para instalação do sistema na planta.	36
Figura 17 – Corrente do transportador aéreo tipo <i>master</i>	37
Figura 18 – Posição dos sensores no trilho do transportador aéreo <i>master</i>	37
Figura 19 – Diagrama de controle geral.	38
Figura 20 – Circuito do sistema de controle <i>on-off</i>	40
Figura 21 – Teste do sistema de controle <i>on-off</i> na planta.	40
Figura 22 – Sistema de controle <i>on-off</i> na planta.	41
Figura 23 – Identificação de rolamentos presentes no elo do transportador aéreo pelo sistema de controle.	42
Figura 24 – Resposta do sistema de controle para rolamentos presentes.	42
Figura 25 – Retirada do rolamento traseiro do elo menor para teste.	43
Figura 26 – Identificação do rolamento faltante no elo do transportador aéreo pelo sistema de controle.	43
Figura 27 – Resposta do sistema de controle para o rolamento faltante.	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – <i>FMEA</i> da corrente do transportador aéreo.	29
Tabela 2 – Tabela dos componentes analisados e escolhidos.	35

Sumário

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivos	12
1.2	Organização do trabalho	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA EM CONTROLE DE SISTEMAS MECÂNICOS	14
2.1	Sistemas de controle	14
2.2	Função transferência	16
2.3	Tipos de controladores	18
2.4	Microcontroladores	25
2.5	Sensores	26
3	ANÁLISE E MODELO DO SISTEMA	28
3.1	Coleta e análise de dados	28
3.2	Modelagem do sistema	30
3.3	Descrição do projeto da planta	35
3.4	Lógica de programação	36
4	MODELO PRÁTICO, EXPERIMENTOS E RESULTADOS .	39
4.1	Modelo prático	39
4.2	Experimentos e resultados	41
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	45
5.1	Trabalhos futuros	45
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

Setores importantes na economia brasileira têm sofrido mudanças nos últimos anos, com destaque no setor de produção de couro e na automação industrial. O setor de couros sofreu variações competitivas notórias, e o Brasil ocupa importante papel de produtor no cenário mundial desde a década de 1990. Segundo o relatório de acompanhamento setorial da indústria de couro, em 2016 o Brasil se tornou o quarto maior produtor e exportador do mundo, com uma produção de 153 milhões de metros quadrados de couros bovinos (CUNHA, 2011).

Do mesmo modo, quanto à evolução da automação nas indústrias de curtume, houve um grande salto durante o mesmo período, principalmente devido ao aumento da produção ocorrente (SANTOS et al., 2002). Inovações e tecnologias também foram fundamentais para o avanço da automação industrial, especialmente após o surgimento dos microcontroladores, que possibilitaram substituir milhares de equipamentos eletrônicos por um único *chip* com capacidade de analisar e interpretar dados que diminuíram consideravelmente o tamanho dos circuitos eletrônicos, facilitaram a programação do controle e otimizaram a manutenção dos sistemas de controles (GUPTA, 2010).

Hoje, sistemas de controles são facilmente encontrados em todos os níveis de processo de uma indústria produtora de couro: desde a etapa do pré-descarne da pele *in natura* bovina, feito por máquinas chamadas descarnadeiras, que são automatizadas com diversos sistemas de segurança para proteção dos operadores, até o processo de enxugamento do couro *wet blue*¹, onde há equipamentos com diversos rolos com velocidades controladas por inversores de frequência. De acordo com Pacheco (2005), as etapas do processo de transformação podem ser divididas, de maneira geral, em três: ribeira, curtimento e acabamento. A Figura 1 mostra o fluxograma de produção de couros *wet blue*.

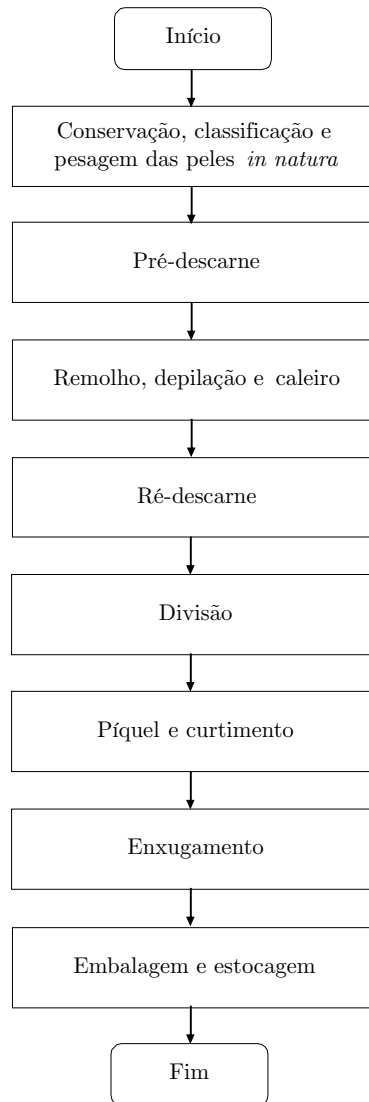
Em todas as etapas é imprescindível que o couro seja transportado de maneira rápida, segura e limpa, para que sua integridade e qualidade sejam garantidas. Isto é feito através de sistemas de transportadores aéreos, como mostrado na Figura 2. Os sistemas transportadores movimentam o couro entre as etapas do processo, evitando acúmulos e aumentando a fluidez. Segundo o manual de instruções do transportador aéreo Master TAM-400 (2011), sua estrutura é dividida em quatro partes: área de transporte baixa; área de transporte alta; sistema de acionamento elétrico e estrutura de sustentação.

A área de transporte baixa é a região onde ocorre o carregamento de couros pelos operadores. A área de transporte alta é onde há o transporte entre setores do processo de

¹ Nome do produto resultado do curtimento ao cromo do couro *in natura* bovino, sua coloração no final do processo é azul.

fato e onde é instalado o conjunto de acionamento moto-redutor e as engrenagens de tração. Por fim, a estrutura de sustentação é composta de colunas metálicas, mãos francesas, cabos e esticadores em toda a extensão do sistema transportador aéreo de couro.

Figura 1 – Fluxograma de produção de couros *wet blue*.



Fonte: Elaboração própria do autor.

Devido a importância do sistema de transporte aéreo para o processo de fabricação de couros, interagindo com rapidez e praticidade cada etapa, sua manutenção preventiva é de suma importância para que quebras sejam evitadas e, conseqüentemente, paradas do processo e perdas de matéria prima.

O sistema aéreo tipo *master* é formado por correntes, rolamentos, pinos e travas. As análises feitas no Capítulo 3 mostram que a falta de um dos rolamento do sistema é um dos principais motivos que acarretam a quebra da corrente e o desgaste prematuro do trilho, causando, por conseguinte, grandes paradas no processo. Observou-se também que parada de processo devido à quebras dos transportes aéreos é uma das principais dentro

da indústria de produção de couro. Em 2018, problemas nos transportadores de couros foram a quarta principal causa de paradas de máquinas no processo de fabricação, cerca de 10% de todas as paradas ocorridas na unidade de Marabá.

Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo a implementação de um sistema de controle *on-off* de baixo custo que visa a identificação de rolamentos faltantes nos elos dos transportadores aéreos tipo *master* na unidade de curtume da JBS S.A. em Marabá. O sistema, formado por um microcontrolador e sensores, trabalhará de maneira preventiva contra as grandes paradas no processo causadas por falta de rolamentos no sistema de transportador aéreos.

Figura 2 – Transportador aéreo de couros da unidade de Marabá.



Fonte: Elaboração própria do autor.

1.1 Objetivos

Aplicar um sistema de controle *on-off* de baixo custo, para identificação de rolamentos faltantes em transportadores de couros aéreos tipo *master*. O sistema, por meio dos sinais de entrada enviados pelos sensores ao microcontrolador, analisará a corrente do transportador aéreo e enviará um sinal “positivo” caso o rolamento esteja presente ou um sinal “negativo” caso o rolamento esteja faltando. De modo que o rolamento faltante seja identificado e sua substituição possa ser realizada para evitar quebras e paradas do processo.

1.2 Organização do trabalho

O trabalho está organizado em 5 capítulos:

- **O Capítulo 1 - Introdução:** Apresentação da motivação, contribuições e objetivos do presente trabalho.
- **O Capítulo 2 - Fundamentação teórica em controle de sistemas mecânicos:** Descrição do embasamento teórico utilizado neste trabalho, apresentando toda a teoria em controle de sistemas mecânicos necessária para a compreensão do trabalho. É dividido em seções que abordam uma breve introdução sobre sistemas de controle e suas principais características; a função transferência; microcontroladores e sensores.
- **O Capítulo 3 - Análise e modelo do sistema:** Ilustra as análises de dados realizadas no problema em questão e a modelagem matemática do sistema de controle. É dividido em quatro seções que apresentam a análise e coleta de dados realizadas; a modelagem do sistema mecânico transportador aéreo de couros; a descrição do projeto na planta e a lógica de programação utilizada no microcontrolador.
- **O Capítulo 4 - Modelo prático, experimentos e resultados:** Apresenta a implementação do sistema na planta e os resultados obtidos do presente trabalho.
- **O Capítulo 5 - Considerações finais:** Este capítulo apresenta as conclusões finais sobre o presente trabalho com propostas para desenvolvimento de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA EM CONTROLE DE SISTEMAS MECÂNICOS

A meta desse capítulo é fornecer ao leitor uma introdução sobre a teoria de controle, motivando seu uso na indústria de fabricação de couros. Primeiramente é apresentados uma breve introdução sobre sistemas de controle e seus tipos. Posteriormente é mostrados a função transferência e também uma introdução a cerca de microcontroladores e sensores.

2.1 Sistemas de controle

Um sistema de controle consiste em subsistemas e processos construídos com o objetivo de se obter uma saída desejada com um desempenho desejado, dada uma entrada especificada (NISE, 2012). De acordo com Ogunnaike (1994), um sistema de controle visa, principalmente:

- Monitorar as variáveis de saída do processo por medição;
- Tomar decisões racionais em relação a que ação corretiva é necessária com base nas informações sobre o estado atual e o desejado do processo;
- Implementar efetivamente essas decisões no processo.

Um sistema pode ser caracterizado como linear ou não linear. Segundo Oppenheim e Willsky (1983), os sistemas de controle lineares de tempo contínuo são aqueles que atendem ao princípio da superposição e que, analiticamente, se traduz do seguinte modo:

$$x(t) = \sum_k a_k x_k(t) = a_1 x_1(t) + a_2 x_2(t) + a_3 x_3(t) + \dots \quad (1)$$

$$y(t) = \sum_k a_k y_k(t) = a_1 y_1(t) + a_2 y_2(t) + a_3 y_3(t) + \dots \quad (2)$$

sendo $x_k(t)$, $k = 1, 2, 3, \dots$, um conjunto de entradas para o sistema de controle linear de tempo contínuo com saídas correspondentes $y_k(t)$, $k = 1, 2, 3, \dots$, e a e b constantes complexas quaisquer.

Observando a Equação 1 e 2, se uma entrada de um sistema consiste de uma soma ponderada de diversos sinais, a saída será a superposição — ou seja, a soma ponderada — das respostas do sistema a cada um desses sinais. Segundo Bullo e Lewis (2005), a

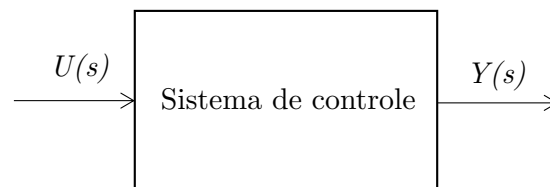
resposta produzida pelo sistema diante de uma determinada entrada não é afetada pela presença simultânea de outras entradas. Assim, a resposta de várias entradas pode ser encontrada tratando cada uma separadamente e somando os resultados, conforme mostrado na Equação 1 e 2.

Já os sistemas de controle não lineares são aqueles que não atendem ao princípio da superposição. A dinâmica de tais sistemas é mais complexa do que a dos lineares (SLOTINE; LI et al., 1991).

2.1.1 Sistema de malha aberta

Há duas principais configurações dos sistemas de controle: sistema de malha aberta e sistema de malha fechada. De acordo com Nise (2012), um sistema de controle de malha aberta é aquele onde o sinal de saída não exerce nenhuma ação de controle no sistema em si, não há compensação para quaisquer perturbações externa que interfiram no sistema. O sistema não realiza correções para as perturbações ocorrentes, a única variável que interfere no mesmo é o sinal de entrada. A Figura 3 mostra um diagrama simplificado de um sistema de controle de malha aberta.

Figura 3 – Diagrama simplificado de um sistema de malha aberta.



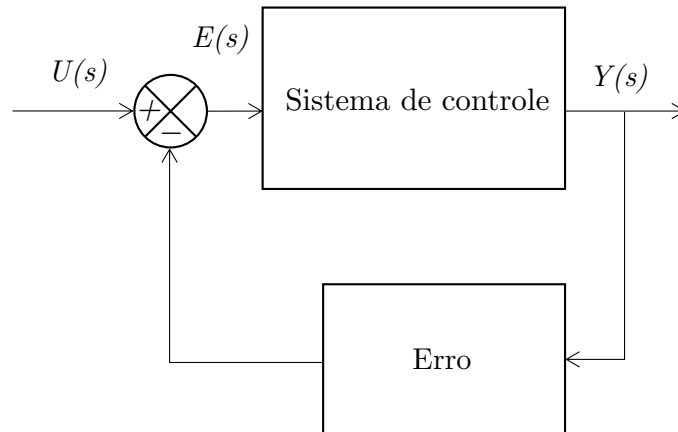
Fonte: Elaboração própria do autor.

sendo $U(s)$ o sinal de entrada e $Y(s)$ o sinal de saída do sistema.

2.1.2 Sistema de malha fechada

Um sistema de controle de malha fechada, por outro lado, realiza compensações devido às perturbações externas (FRANKLIN et al., 1994). O sinal de saída é comparado com o de entrada e caso haja alguma diferença o sistema envia um sinal de atuação e aciona a planta para realizar a correção e reduzir o erro ao máximo possível. Caso não haja diferença, o sistema não envia sinal de atuação, pois a resposta obtida foi a respostas desejada. A Figura 4 mostra um diagrama simplificado de um sistema de malha fechada.

Figura 4 – Diagrama simplificado de um sistema de malha fechada.



Fonte: Elaboração própria do autor.

senso $E(s)$ o erro gerado depois da análise feita pelo sistema de controle. Observa-se que tal erro interage diretamente com o sinal de entrada para que a compensação necessária seja realizada e os erros futuros diminuídos.

A vantagem dos sistemas em malha fechada é que eles apresentam uma exatidão maior que os sistemas em malha aberta. A resposta e os erros em regime permanente podem ser controlados com maior flexibilidade e, portanto, eles são mais resistentes às perturbações externas. Por outro lado, os sistemas em malha fechada são mais caros e complexos que os sistemas em malha aberta.

2.2 Função transferência

A função de transferência é normalmente utilizada para caracterizar a relação de entrada e de saída de um sistemas que pode ser descrito por equações diferenciais lineares invariantes no tempo. No entanto, para definir a função transferência é necessário, primeiramente, definir a transformada de Laplace.

A transformada de Laplace é um método operacional utilizado para solução de equações diferenciais lineares. É possível, através da mesma, converter funções comuns e operações como diferenciação e integração em funções e operações algébricas de uma variável complexa s no plano complexo (OGATA, 1970).

Assim, se for encontrada a solução para tal equação algébrica em s a solução da equação transformada pode ser simplesmente encontrada através da tabela das transformadas de Laplace (WIDDER, 2015). Portanto, a transformada de Laplace é de grande utilidade para simplificar a resolução de equações diferenciais por deixar as manipulações matemáticas mais simples (NEWBOLD; BRACEWELL, 1986).

De acordo com Schiff (2013), a transformada de Laplace da função $f(t)$ é dada por:

$$\mathcal{L}[f(t)] = F(s) = \int_0^{\infty} e^{-st} dt[f(t)] = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad (3)$$

sendo a função $F(s)$ a transformada de Laplace da função $f(t)$. Observe que $F(0)$ é simplesmente a área total sob a curva $f(t)$ para $t = 0$ até o infinito, enquanto $F(s)$ para s maior que 0 é uma integral “ponderada” de $f(t)$, já que multiplicador e^{-st} é uma função exponencial decrescente igual a 1 em $t = 0$. Assim, à medida que o valor de s aumenta, $F(s)$ representa a área sob $f(t)$ ponderada cada vez mais em direção à região inicial próxima de $t = 0$. Sabendo o valor de $F(s)$ para todos os s é suficiente para especificar completamente $f(t)$ e, inversamente, saber $f(t)$ para todo t é suficiente para determinar $F(s)$. Portanto, é possível uma análise direta entre as funções no domínio t e as funções correspondentes no domínio s .

A função de transferência, segundo Nagrath (2006), busca representar a equação diferencial de um sistema linear invariante no tempo com a relação entre a transformada de Laplace da saída e a transformada de Laplace da entrada. Utilizando como base uma equação diferencial generalizada de ordem n , linear e invariante no tempo:

$$\begin{aligned} & a_0 \frac{d^n c(t)}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} c(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dc(t)}{dt} + a_n c(t) \\ = & b_0 \frac{d^m r(t)}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} r(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_{m-1} \frac{dr(t)}{dt} + b_m r(t) \end{aligned} \quad (4)$$

sendo $c(t)$ a variável de saída, $r(t)$ a variável de entrada e $a_n(t)$, $n = 1, 2, 3, \dots$, e $b_n(t)$, $n = 1, 2, 3, \dots$, os coeficientes constantes da equação diferencial.

A Equação diferencial 4 representa uma completa descrição de um sistema entre a entrada $r(t)$ e a saída $c(t)$. Um vez que a entrada e as condições iniciais do sistema são especificadas, a resposta da saída pode ser obtida facilmente. No entanto, de acordo com Kuo (1987), apesar de essencial e com diversas rotinas disponíveis em computadores digitais para solução de equações diferenciais de vários níveis como esta, tal método é de pouca praticidade.

Uma maneira conveniente de representar um sistema linear é através da função transferência (KANI et al., 2010). Para se obter a função transferência de um sistema linear é necessário primeiramente obter a transformada de Laplace de ambos os lados da equação em questão. Assim, considerando as condições iniciais da Equação 4 nulas e aplicando a transformada de Laplace, tem-se:

$$\begin{aligned} & (a_0 s^n + a_1 s^{n-1} + \dots + a_{n-1} s + a_n) C(s) \\ = & (b_0 s^m + b_1 s^{m-1} + \dots + b_{m-1} s + b_m) R(s) \end{aligned} \quad (5)$$

A função transferência do sistema é definida como a razão de $C(s)$ por $R(t)$:

$$G(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_0s^m + b_1s^{m-1} + \dots + b_{m-1}s + b_m}{a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n} \quad (6)$$

sendo $G(s)$ a função transferência definida apenas para sistemas lineares invariante no tempo que, de acordo com Goodwin et al. (2001), é o modelo matemático que oferece uma descrição completa das características dinâmicas de um sistema, independentemente de sua descrição física.

2.3 Tipos de controladores

Um controlador, de modo geral, através de determinadas funções matemática, interpreta o sinal de entrada recebido do sensor e compara com o valor de referência inserido no início da programação. Conforme o erro obtido, um sinal de controle é gerado e enviado para os atuadores que agirão para reduzir esse erro ao máximo possível (SHINSKEY, 1994). Segundo Ogata (2009), controladores podem ser classificados de acordo com seu tipo de ação realizada:

- Controladores *on-off*;
- Controladores proporcional;
- Controladores proporcional-integral;
- Controladores proporcional-derivativo;
- Controladores proporcional-integral-derivativo.

2.3.1 Controle *on-off*

O sistema de controle *on-off* é umas das formas de controle mais baratas e mais usadas atualmente. É baseado na comparação do sinal de entrada, fornecido pelo sensores, e no sinais de referência, inseridos durante a programação do microcontrolador no *setpoint*. Quando o valor do sinal de entrada é diferente do valor desejado o sistema de controle atua para que o erro seja consertado.

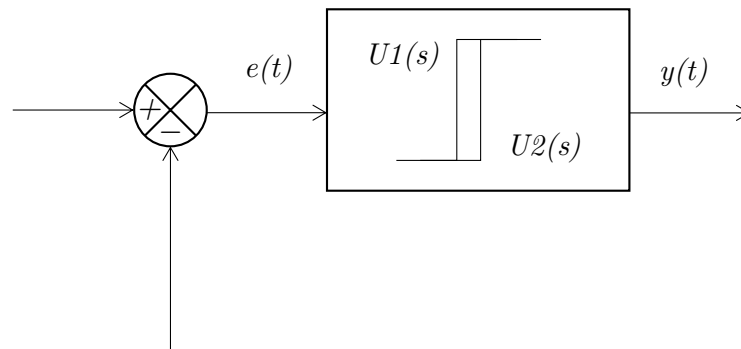
No controle *on-off*, o sinal de saída $u(t)$ permanece em um valor máximo ou mínimo, dependendo se o sinal de erro atuante for negativo ou positivo (ASTRÖM; MURRAY, 2010):

$$u(t) = \begin{cases} U_1, & \text{Para } e(t) > 0 \\ U_2, & \text{Para } e(t) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

sendo $e(t)$ a diferença entre o sinal de entrada e o sinal de saída do sistema linear com tempo contínuo.

Sistemas de controle *on-off* com apenas um valor referência apresentam grandes oscilações nos sinais de respostas. Para que tal frequência de atuação diminua é importante que haja um intervalo de valores desejados ao invés de apenas um, este intervalo é denominado intervalo diferencial (CAON, 1999). A Figura 5 mostra um diagrama de bloco de um sistema de controle *on-off* com intervalo diferencial.

Figura 5 – Diagrama de bloco de um sistema de controle *on-off* com intervalo diferencial.



Fonte: Elaboração própria do autor.

sendo $U1(s)$ e $U2(s)$ o intervalo diferencial de valores desejados do sistema no plano complexo s .

2.3.2 Controle proporcional

No controlador proporcional a resposta do sistema é proporcional ao sinal da sua entrada, se a entrada for grande a saída também será e *vice versa*. De acordo com Ogata (2009), a função transferência do controlador proporcional pode ser escrita como:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (8)$$

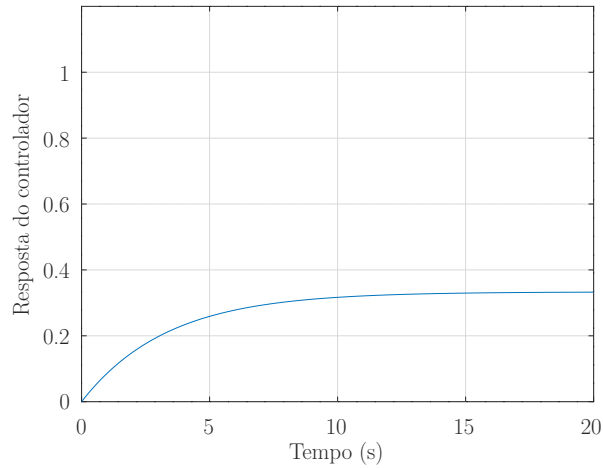
senso K_p o ganho proporcional.

As oscilações provocadas por um sistema de controle *on-off* são bastantes reduzidas quando utilizado um sistema proporcional. No entanto, tal sistema permite erros em regime permanente, principalmente devido sinais de saídas não gerados quando os sinais de entradas são muito pequenos (VISIOLI, 2006). Assim, o sistema permanece com um erro constante próximo ao valor desejado. A Figura 6 apresenta a resposta de um controlador proporcional a um degrau unitário para dois valores de K_p , 0,5 e 2, respectivamente.

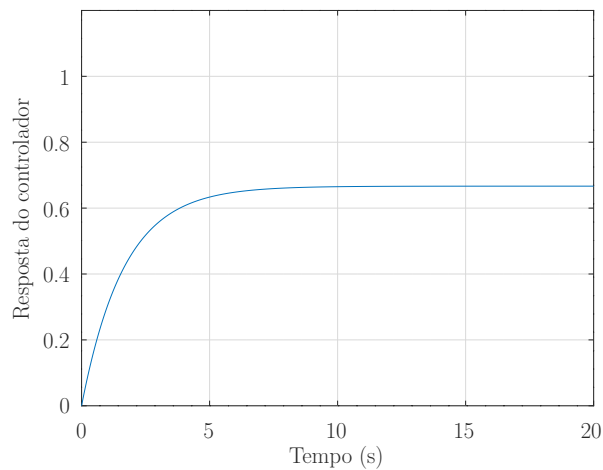
O valor de resposta desejado do controlador proporcional para o problema abaixo é 1. Ambas respostas são inferiores à tal valor. Por outro lado, mesmo com distúrbios e erros em regime permanente, percebe-se que quanto maior o valor do K_p menor os efeitos

dos distúrbios e maior a sensibilidade de resposta do sistema à variação de parâmetro do sinal de entrada da planta.

Figura 6 – Representação da resposta de um sistema de controle proporcional.



(a) Controlador proporcional com $K_p = 0.5$.



(b) Controlador proporcional com $K_p = 2$.

Fonte: Elaboração própria do autor.

2.3.3 Controle proporcional-integral

Para solucionar o problema de erro no regime permanente existe a combinação da ação proporcional com o efeito de integração, quando ambos são combinados o controlador é chamado de proporcional-integral. O efeito integral soma os valores de entrada, mesmo pequenos, até que o valor de saída seja capaz de acionar o atuador, assim, eliminando o problema em regime permanente do controlador proporcional. Tal controlador é amplamente utilizado quando é necessário valores de saída precisos (VILANOVA; VISIOLI, 2012).

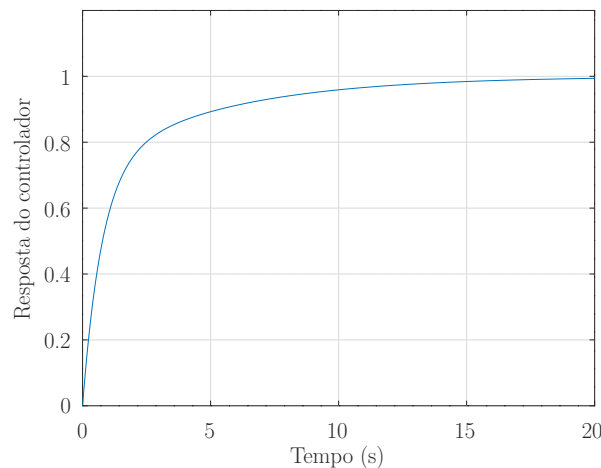
De acordo com Ogata (2009), pode-se definir a função transferência de um controlador proporcional-integral como:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (9)$$

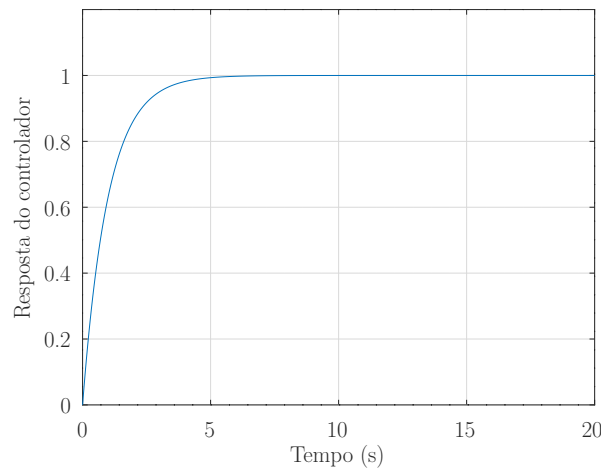
sendo K_i o ganho integrativo.

A Figura 7 apresenta a resposta de um controlador proporcional-integral a um degrau unitário com K_p igual a 2 para dois valores de K_i , 0,5 e 1, respectivamente. É possível observar que, diferente da Figura 6, o valor de saída produzido tende a convergir ao valor ideal de acordo com o passar do tempo e com o aumento de K_i . Tal controlador garante resultados precisos mas necessita de considerado tempo para ação de integração eliminar o erro em regime permanente.

Figura 7 – Representação da resposta de um sistema de controle proporcional-integral.



(a) Controlador proporcional-integral com $K_i = 0.5$.



(b) Controlador proporcional-integral com $K_i = 1$.

Fonte: Elaboração própria do autor.

2.3.4 Controle proporcional-derivativo

Para aumentar a rapidez de resposta ao erro do sistema existe a combinação da ação proporcional com o efeito derivativo, quando ambos são combinados o controlador é chamado de proporcional-derivativo.

De acordo com Ogata (2009), a ação de controle de um controlador proporcional-derivativo é definida pela seguinte função transferência:

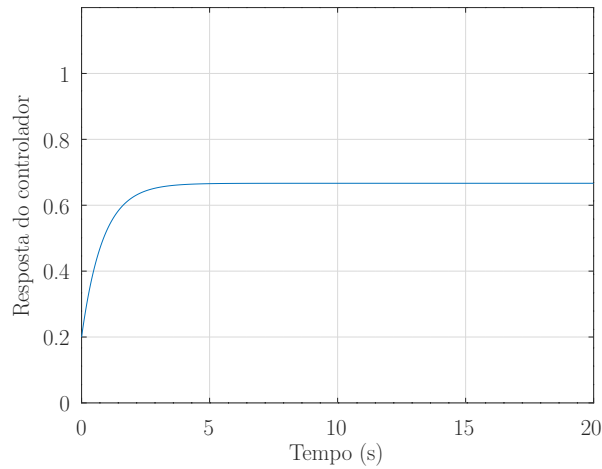
$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_d s \quad (10)$$

sendo K_d o compensador derivativo.

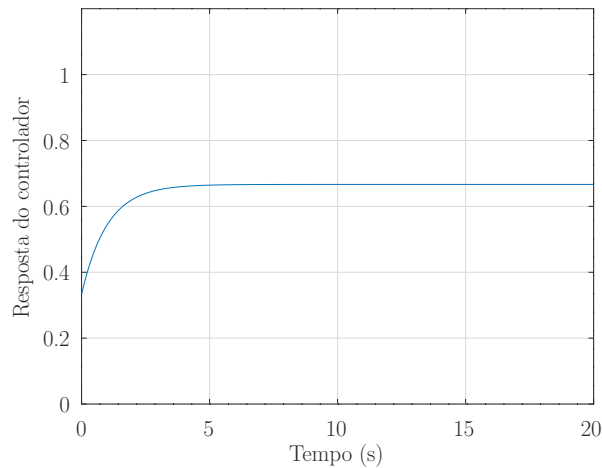
O efeito derivativo é, como mostrado na Equação 10, diretamente proporcional ao erro do sistema, o que permite uma ação rápida diante variações. Assim, é amplamente adequado para sistemas que precisem de respostas rápidas aos erros da planta. A Figura 8 apresenta a resposta de um controlador proporcional-derivativo a um degrau unitário com K_p igual a 2 para dois valores de K_d , 0,5 e 1, respectivamente.

É possível observar que o valor de saída produzido por um controlador proporcional-derivativo age rapidamente no tempo $t = 0$, elevando a resposta do sistema de 0,2 a aproximadamente 0,35. No entanto, novamente, o controlador não age sobre o erro em regime permanente. Além disso, devido sua sensibilidade, pode provocar transições bruscas nos sinais de resposta do sistema.

Figura 8 – Representação da resposta de um sistema de controle proporcional-derivativo.



(a) Controlador proporcional-derivativo com $K_d = 0.5$.



(b) Controlador proporcional-derivativo com $K_d = 1$.

Fonte: Elaboração própria do autor.

2.3.5 Controle proporcional-integral-derivativo

Portanto, o controlador proporcional-integral-derivativo é uma combinação das ações anteriores que visa combater tanto o problema em regime permanente como, também, a demora da resposta ao erro do sistema (O'DWYER, 2006).

Segundo Xue, Chen e Atherton (2002) essa ação de controle combinada tem as vantagens individuais de cada uma das três ações citadas anteriormente e sua função transferência é dada por:

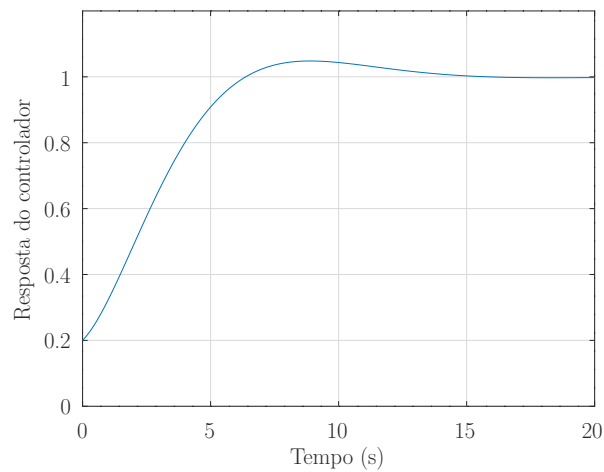
$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{K_p s^2 + K_p s + K_i}{s} \quad (11)$$

A Figura 9 apresenta a resposta de um controlador proporcional-integral-derivativo

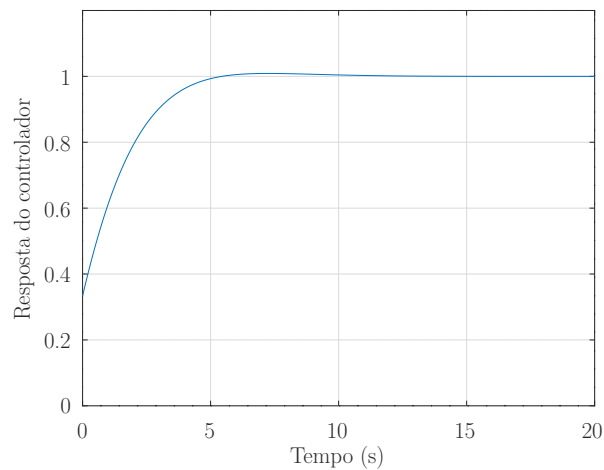
a um degrau unitário para K_p igual a 0,5 e 2; K_i igual 0,5 e 1 e K_d igual 0,5 e 1, respectivamente. Observa-se que as respostas do controlador proporcional-integral-derivativo são semelhantes com as do controlador-derivativo, obtendo respostas rápidas em $t = 0$. Além disso, o problema em regime permanente foi reduzido a zero em ambos os casos.

Tal controlador é o mais robusto e, portanto, mais caro. É utilizado para projetos que necessitam de grande precisão e sistemas com respostas transitórias e em regime permanente insatisfatórias (ARAÚJO, 2007).

Figura 9 – Representação da resposta de um sistema de controle proporcional-integral-derivativo.



(a) Controlador proporcional-integral-derivativo com $K_p = 0.5$, $K_d = 0.5$ e $K_i = 0.5$



(b) Controlador proporcional-integral-derivativo com $K_p = 2$, $K_d = 1$ e $K_i = 1$.

Fonte: Elaboração própria do autor.

2.4 Microcontroladores

O tomador de decisão e, portanto, “coração” do sistema de controle, é o controlador; é o elemento de *hardware* com capacidade “incorporada” para realizar a única tarefa que requer alguma forma de “inteligência” (OGUNNAIKE, 1994).

De modo geral, o microcontrolador é um pequeno computador em um único circuito integrado que contém um núcleo de processamento, memória de programa, memória de dados, portas de entrada e saída, *timers*, conversores analógico-digitais, entre outras características que permitem que o microcontrolador seja programável de acordo com a necessidade de cada projeto (MCROBERTS, 2015).

O núcleo de processamento consiste em um processador capaz de realizar operações lógicas com sinais digitais. É onde são feitos todos os cálculos e processamento de forma lógica. Assim, se for programado para fechar uma válvula de um determinado tanque através de atuadores quando o nível do mesmo chegasse a determinado ponto, os valores de níveis seriam enviados pelos sensores ao microcontrolador, onde seriam analisados e, caso necessário, um sinal de ação seria enviado para o atuador fechar a válvula.

Tais informações, dados de entradas e de saída, são armazenados em memórias do microcontrolador: memória de programa e memória de dados. A primeira armazena os comandos programados que ditam a função do controlador. No caso acima, seria comparar o nível do tanque com um valor pré-estabelecido e controlar a vazão da válvula. Já a memória de dados, armazena as informações enviadas pelos sensores durante seu funcionamento, os valores do nível do tanque, que são capturados pelos sensores ao decorrer do tempo com uma frequência determinada.

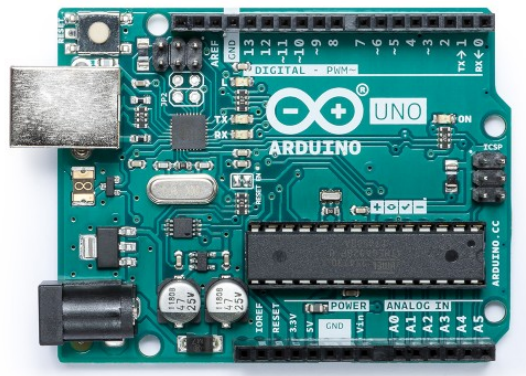
A comunicação com microcontrolador é feita pelas portas de entrada e saída que podem ser acessadas através dos pinos conectores da placa. As entradas e saídas são a interface do microcontrolados com os sinais e comandos exteriores. É necessária atenção para a escolha correta do sensor a ser utilizados no sistema de controle pois o modo de se comunicar com o microcontrolado é de suma importância para o sucesso de qualquer projeto. Para as portas de entrada, que geralmente podem receber tanto sinal digital como analógico, há faixas determinadas de tensão ou corrente permitidas de modo que seja garantido o bom funcionamento do mesmo, sem danos ao circuito. Para as portas de saída, os sinais digitais podem ser enviado por tensão ou corrente, que permite apenas ligar pequenos componentes diretamente. Assim, para usar estes sinais no controle de circuitos com maiores consumo é necessário a utilização de circuitos intermediários como, por exemplo, relés.

Um dos microcontroladores de baixo custo mais utilizados é o Arduino Uno, seu *hardware* consiste em uma pequena placa de circuito impresso com um microprocessador que inclui memória, entrada e saída analógica e discreta e um conector USB. Segundo

seu *datasheet*, Microchip (2018), o microprocessador, ATmega328P, oferece 14 pinos de entrada e saída discretos, onde seis fornecem entradas analógicas, com um conversor analógico-digital de 10 *bits*, inclui 2 KB de memória RAM que podem ser lidos e gravados e 32 KB de memória *flash* para armazenamento de programas e um KB de EEPROM que pode ser usado para armazenar dados quando a placa não está ligada. Além disso, quando combinando com uma CPU RISC de 8 *bits* auto-programável em um *chip* monolítico, o ATmega328PB é um poderoso microcontrolador que fornece uma solução altamente flexível e econômica para muitas aplicações de controle industriais.

O Arduino Uno é suportado por um conjunto completo de ferramentas de desenvolvimento de programas e sistemas, incluindo seu próprio Ambiente de Desenvolvimento Integrado, Arduino *IDE*, que utiliza uma linguagem de programação muito semelhante a *C* (BADAMASI, 2014). Diante tais características, o Arduino Uno foi escolhido para o projeto de controle do sistema *on-off* de identificação de rolamentos faltantes transportador aéreo. Além do mais, se trata de uma plataforma de prototipagem eletrônica livre e de baixo custo, o que permite que o projeto seja produzido com baixos investimentos.

Figura 10 – Microcontrolador Arduino Uno.



Fonte: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>.

2.5 Sensores

A primeira tarefa de um sistema de controle, enviar uma informação sobre o estado das variáveis de saída do processo, é feita por sensores. Na maioria das aplicações de controle de processo, os sensores são necessários para medições de pressão, temperatura, nível de líquido, fluxo e composição (OGUNNAIKE, 1994)

Em um indústria, o sensor assume um papel fundamental, substituindo o tradicional monitoramento humano e uma intervenção manual o que pode incorrer em falhas durante o processo produtivo. O sensor, ou elemento de medição, é um dispositivo que converte a variável de saída em outra variável conveniente, como deslocamento, pressão, tensão

etc., que pode ser utilizada para comparar a saída ao sinal de entrada de referência (THOMAZINI, 2007).

De modo geral, os sensores podem ser classificados em dois tipos: sem contato e com contato. Quando não há necessidade de contato físico para que o sensor seja acionado é denominado como sensor sem contato. Quando o sensor precisa tocar determinado produto ou elemento de máquina para ser acionado é denominado sensor de contato. Ainda, os sensores de contato podem ser classificados como analógicos ou digitais. Os sensores analógicos fornecem um sinal de saída que pode ser tensão, corrente, resistência, entre outros grandezas físicas. Já um sensor digital fornecem um simples sinal lógico de saída (zero ou um) podendo apenas assumir dois estados: ligado ou desligado.

Para o desenvolvimento do projeto, utilizou-se um sensor analógico de contato tipo *micro switch* com o objetivo de identificação dos rolamentos faltante na corrente do transportador aéreo. O sensor é um comutador elétrico capaz de ser atuado por uma força física pequena que através da ação mecânica fecha os seus contatos elétricos (Normalmente Aberto) e um sinal elétrico é enviado para o microcontrolador. O sensor *micro switch* é bastante utilizado na indústria devido ao seu pequeno custo. A Figura 11 mostra o sensor *micro switch* tipo KW11-3Z-5-3T utilizado no projeto. É um sensor de contato projetado para uma ampla gama de aplicações, possui um haste de 17 mm, adequada para o contato dos rolamentos do transportador aéreo e uma corrente máxima de saída de 5 A, o que é compatível com a do microcontrolador utilizado.

Figura 11 – Sensor micro switch tipo KW11-3Z-5-3T.



Fonte: http://www.gangyuantech.com/t85-125-6a-125v-3pin-lever-micro-switch_p165.html.

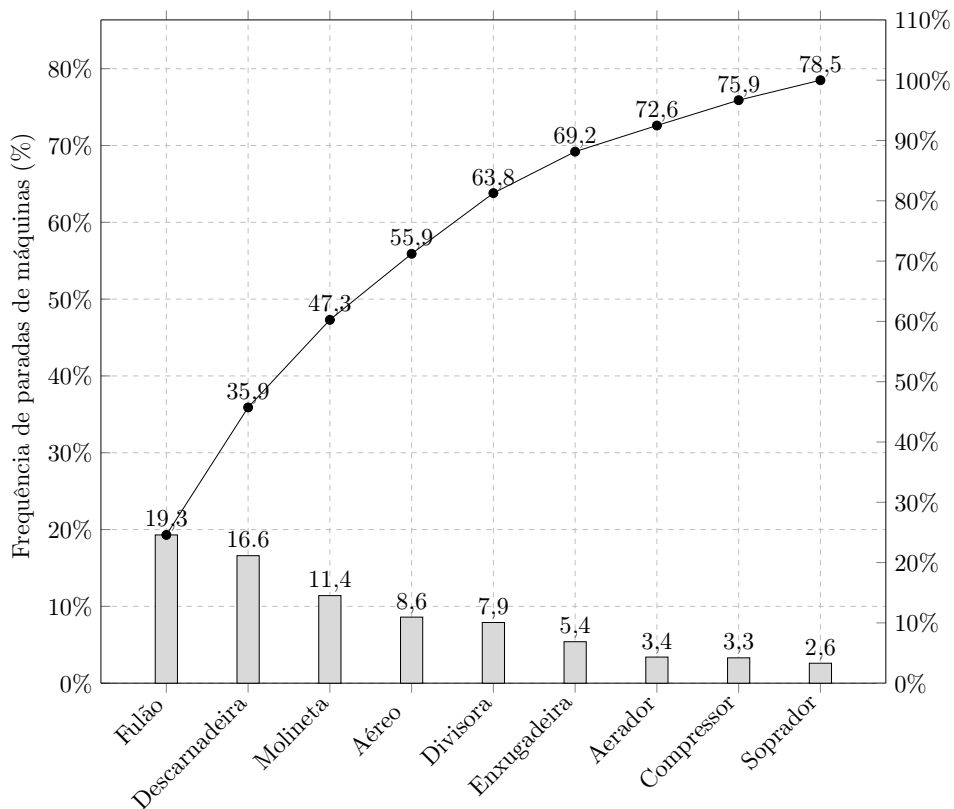
3 ANÁLISE E MODELO DO SISTEMA

Este capítulo apresenta o desenvolvimento do projeto do sistema de controle real utilizado neste trabalho. Na seção 3.1 são apresentados os resultados obtidos a partir da coleta de dados feita na unidade. Em seguida, na seção 3.2, é realizada a modelagem matemática do sistema e apresentada através da equação de transferência e diagrama de bloco. Na seção 3.3 é descrito o projeto na planta. E, por fim, é apresentada a lógica da programação do microcontrolador e detalhado através do diagrama geral do controle na seção 3.4.

3.1 Coleta e análise de dados

Utilizado-se todo o histórico de paradas de máquinas do ano de 2018 para identificação e classificação das principais paradas de processo da unidade. Paradas causadas por problemas nos transportadores aéreos de couros foram responsáveis por 8,38% de todas as paradas do ano de 2018, como mostrado na Figura 12.

Figura 12 – Análise de Pareto das principais paradas de máquinas da unidade.



Fonte: Elaboração própria do autor.

Através de pesquisas exploratórias, análise de dados e *brainstorms* realizados com os

mantenedores e líderes de cada turno, o problema de falta de rolamentos no transportador aéreo tipo *master* foi classificado como mais frequente e severo, sendo o principal modo de falha responsável pelas quebras no transportadores aéreos, como mostrado na Tabela 1.

De acordo com Mikulak, McDermott e Beauregard (2008), para se avaliar o risco que cada componente fornece à máquina, e conseqüentemente ao processo, é necessário realizar um *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)* que, em tradução livre, significa Análise do Modo e Efeito de Falha. Posto isso, desenvolveu-se o *FMEA* no transportador aéreo de couros da unidade, onde se identificou os componentes que mais falham, seus efeitos e causas potenciais.

Tabela 1 – *FMEA* da corrente do transportador aéreo.

Função do componente	Modo de falha potencial	Efeito potencial da falha	Causa potencial da falha	S ¹	O ²	D ³	NPR ⁴
Transportar couros entre setores	Fratura e quebra do eixo	Quebra da corrente e parada do sistema transportador aéreo	Falta do rolamento	10	9	7	630
				9	4	6	216
			Falta de manutenção preventiva	8	2	4	64
	Fratura e quebra da corrente do aéreo	Parada do sistema transportador aéreo	Falta do rolamento	10	9	6	540
			Quebra do contra-pino	7	3	6	126
			Bucha desgastada	7	3	6	126
			Falta de lubrificação no sistema	10	4	3	120
			Falta do rolamento	10	2	2	40
	Quebra da engrenagem de acionamento		Falta de lubrificação no sistema	10	4	3	120
			Falta do rolamento	10	2	2	40
	Queima do motor de acionamento		Falta de lubrificação no sistema	10	4	3	120
			Mal uso operacional	6	6	2	72
Defeito no pressostato de acionamento		Vida útil do componente	4	4	2	32	
		Aumento da tensão na rede	10	1	2	20	
Defeito no inversor de frequência							

Fonte: Elaboração própria do autor.

Segundo o Número de Prioridade de Risco (NPR) identificado no *FMEA*, rolamento faltante na corrente do transportador aéreo é a principal causa potencial de falha. Pode provocar diferentes tipos de modos de falhas, entre eles: fratura e quebra do eixo; desgaste e quebra do trilho e fratura e quebra da corrente do aéreo. Isso devido, principalmente, ao grande aumento da tensão axial que a falta do rolamentos provoca, fazendo com que toda

¹ Severidade

² Ocorrência

³ Detectabilidade

⁴ Número de Prioridade de Risco

a estrutura do sistema transportador trabalhe sob maior tensão que o projetado. Além disso, a exposição do pino, sem o rolamento, provoca frequentemente a quebra da corrente quando se prende no trilho do transportador aéreo.

No ano de 2018, problemas nos transportadores aéreos da unidade foram o quarto maior responsáveis por todas as paradas de máquinas. Devido isto, um sistema de controle *on-off* de baixo custo que visa identificar os rolamentos faltantes para evitar tais paradas foi proposto.

3.2 Modelagem do sistema

O objetivo geral do controle é usar a resposta obtida pelo sensor para causar a variável de saída de um processo de acompanhamento de uma variável de referência desejada com precisão, independentemente do caminho da variável de referência e independentemente de quaisquer perturbações externas ou quaisquer alterações na dinâmica do processo. Para alcançar esse objetivo uma das primeiras etapas que deve ser realizada é a descrição matemática do processo a ser controlado (OGATA, 2009).

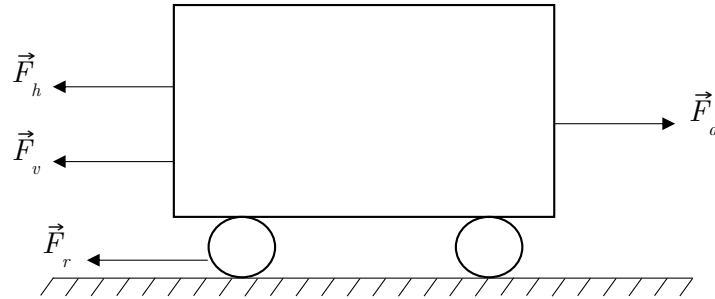
A descrição matemática significa modelar o sistema a ser controlado com equações diferenciais que descrevem a dinâmica do sistema com precisão. O sistema mecânico requer apenas uma equação diferencial, chamada de equação de movimento, para descrevê-lo. Inicialmente é desenhado um Diagrama de Corpo Livre (DCL), colocando sobre o corpo todas as forças que agem sobre ele, tanto no sentido do movimento quanto no sentido oposto. Para a construção do DCL, apresentado na Figura 13, é adotado um sentido positivo para direita, sentido do movimento. Em seguida, é utilizado a segunda lei de Newton, Equação 12, para construção da equação diferencial de movimento do sistema.

$$\sum_{n=i} \vec{F}_x = m_i \ddot{x} \quad (12)$$

sendo \vec{F}_x as forças vetoriais que agem no sentido longitudinal do elo do transportador mostradas na Figura 13 [N], m_i a massa do elo [kg] e \ddot{x} a aceleração do mesmo [m/s^2].

As seguintes forças apresentadas no DCL foram analisadas para a descrição matemática do movimento do sistema. \vec{F}_a é a força devido o esforço de tração provocado pelo conjunto motor-redutor do transportador aéreo, \vec{F}_v é a força devido à resistência das curvas verticais, \vec{F}_h é a força devido à resistência das curvas horizontais e \vec{F}_r é a força de resistência ao rolamento. A força de resistência do ar não foi considerada devido o trilho do aéreo ser parcialmente vedado, o que permite pouca passagem de ar, e, também, devido a baixa velocidade de funcionamento do sistema.

Figura 13 – Diagrama de Corpo Livre de um conjunto de elo do sistema de transporte aéreo.



Fonte: Elaboração própria do autor.

Para a obtenção de um modelo matemático relativamente simplificado torna-se necessário admitir certas condições iniciais nulas e ignorar propriedades físicas inerentes ao sistema como, por exemplo, certas não linearidades. Neste trabalho, o princípio de causalidade se aplica ao sistema de controle. Isso significa que a saída atual do sistema depende da entrada anterior, mas não depende da entrada futura. Outras hipóteses simplificadoras são consideradas:

- 1) As correntes e elos em cada parte do aéreo são rígidas;
- 2) Cada parte do aéreo é atribuído apenas um grau de liberdade (longitudinal);
- 3) As forças transientes devido às folgas dos elos são negligenciadas;
- 4) Todos os pontos da corrente do transportador aéreo têm a mesma aceleração;
- 5) O momento de inércia das rodas são desprezíveis;
- 6) Pressupõe-se que os elos dos transportadores aéreos permaneçam elásticos, embora poderia deformar permanentemente.

3.2.1 Resistência do rolamento

Em pequenas velocidades a resistência do rolamento é a principal força de resistência de um veículo (GILLESPIE, 1992). A Força \vec{F}_r é o resultado de um conjunto de ações que resistem ao movimento do veículo. A função que representa a resistência dos rolamentos do sistema transportador está diretamente ligada ao coeficiente de resistência do rolamento e ao peso do veículo, como mostrado na Equação 13. Além disso, o coeficiente de resistência do rolamento está diretamente ligado com a velocidade do sistema, como mostrado na Equação 14.

$$\vec{F}_r = R_{xf} + R_{xr} = f_r \vec{W} \quad (13)$$

sendo \vec{F}_r a resistência do rolamento [N], R_{xf} a resistência aos rolamentos dianteiros [N], R_{xr} a resistência ao rolamento traseiro [N], f_r o coeficiente de resistência ao rolamento e \vec{W} o peso do veículo [N].

De acordo com Gillespie (1992), o coeficiente de resistência ao rolamento, f_r , expressa os efeitos de complicadas e interdependentes propriedades físicas entre, neste caso, o rolamento e a superfície de contato do trilho. Tal coeficiente está diretamente ligado à características dos materiais do rolamento e da superfície de contato; dimensões físicas e características externas como temperatura de trabalho. No entanto, em pequenas velocidades, como no caso dos transportadores aéreos, o coeficiente de resistência ao rolamento é diretamente proporcional à velocidade, como mostrado na Equação 14.

$$f_r = 0,01 \left(1 + \frac{0,45\vec{V}}{100} \right) \quad (14)$$

sendo \vec{V} a velocidade do sistema em m/s. Pode-se notar que, a principal força de resistência do movimento do sistema de transporte aéreo é uma função dependente da velocidade do sistema.

3.2.2 Resistência às curvas verticais

A força \vec{F}_v é devido a inclinação do trilho verticalmente. A força de inclinação pode resistir ou auxiliar o movimento da corrente do sistema de transporte aéreo, dependendo do seu sinal. Para um trilho que se encontra com inclinação positiva (subindo), a resistência a inclinação vertical, de acordo com Garg (2012), é dada pela Equação 15:

$$\vec{F}_v = -\vec{W}\vec{g} \quad (15)$$

senso \vec{F}_v a força de resistência devido à inclinação vertical [N], \vec{g} a aceleração da gravidade [m/s^2] e \vec{W} o peso do veículo [N].

De acordo com a segunda consideração simplificadora, apenas a parte retilínea longitudinal do sistema será considerada para a modelagem, onde o sistema de controle será aplicado no transportador aéreo, portanto não haverá força de resistência de inclinação. Desse modo, a força \vec{F}_v não será utilizada na equação de movimento do modelo.

3.2.3 Resistência às curvas horizontais

A força \vec{F}_h é a resistência do transportador aéreo durante curvas horizontais. Isto ocorre por causa das forças laterais que atuam no rolamento durante o movimento e, de acordo com Garg (2012), pode ser descrito pela Equação 16.

$$\vec{F}_h = -0,0004\vec{W}D \quad (16)$$

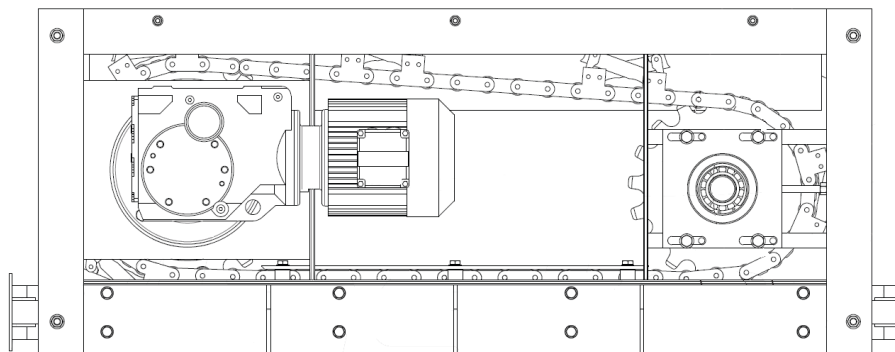
\vec{F}_h é a força de resistência devido à curva horizontal [N], D é o grau de inclinação da curva e \vec{W} é o peso do veículo em análise [N].

No entanto, também de acordo com a segunda consideração simplificadora, a força \vec{F}_h não será aplicada no modelo matemático. Outra característica importante do sistema é que a corrente do transportador aéreo é composto de peças com grande facilidade de articulação o que reduz bastante as forças de resistências às curvas horizontais, mesmo em um cenário de curvas acentuadas.

3.2.4 Força de acionamento

A força \vec{F}_a é provocada pelo conjunto de engrenagens acionado por um conjunto motor-reductor com capacidade de deslocar a corrente do transportador aéreo com 9,7 a 29,45 m/s, isto significa aproximadamente 4 a 12 couros/minuto, respectivamente. O conjunto motor-reductor do sistema de transporte da unidade é mostrado na Figura 14. O inversor de frequência que controla o transportador aéreo trabalha com uma potência instalada de 1,5 kW provocando uma velocidade média de 0,202 m/s, o que equivale a cinco couros produzidos por minuto.

Figura 14 – Conjunto motor-reductor de acionamento do transportador aéreo



Fonte: Master TAM-400 (2011)

A força de tração produzida pelo conjunto moto-reductor pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\vec{F}_a = \frac{P}{\vec{V}} \quad (17)$$

sendo \vec{F}_a a força de acionamento do conjunto motor-reductor [N], P a potencia do sistema [kW] e \vec{V} sua velocidade [m/s].

3.2.5 Equação do movimento

Segundo o DCL mostrado na Figura 13, sabendo que a entrada do sistema é a força \vec{F}_a , a saída é a posição $x(t)$ de um dos elos da corrente do sistema transportador e considerando a condição inicial que o sistema esteja em repouso, ou seja, $t = 0$, logo, $x(0) = \ddot{x}(0) = \dot{x}(0)$ e $\vec{F}_a = 0$, a Equação 12 pode ser escrita como a equação de movimento do sistema:

$$m_i \ddot{x}(t) = \vec{F}_a(t) - \vec{F}_r(t) = \vec{F}_a(t) - b\dot{x}(t) \quad (18)$$

sendo m_i a massa do elo i do sistema [kg], b_i a variável de resistência do rolamento do elo i e $\dot{x}(t)$ a velocidade do mesmo. A Equação 18 é uma equação diferencial de segunda ordem. Equações similares são desenvolvidas para todos os veículos no transportador aéreo. Assim, as equações de movimento para todo o sistema podem ser escritas como um função dependente diretamente da velocidade e da aceleração do sistema:

$$[M]\ddot{x} = \vec{F}(\dot{x}, \ddot{x}) \quad (19)$$

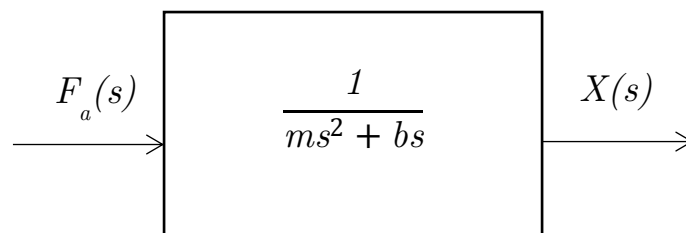
Portanto, aplicando a transformada de Laplace, Equação 3, e dividindo a entrada de interesse pela saída de interesse, tem-se o sistema modelado como uma função transferência:

$$\frac{X(S)}{F_a(S)} = \frac{1}{ms^2 + bs} \quad (20)$$

sendo $X(S)$ a transformada de Laplace da saída e $F_a(S)$ a transformada de Laplace da entrada.

Com a função transferência é possível representar o sistema de controle através de um diagrama de bloco com $F_a(S)$ na entrada do sistema e $X(S)$ na saída.

Figura 15 – Diagrama de bloco do sistema de controle *on-off*.









Fonte: Elaboração própria do autor.

3.3 Descrição do projeto da planta

Para interligar todos os setores da unidade industrial de produção de couro de marabá são necessários cinco sistema de transportadores aéreos, totalizando aproximadamente 221,9 metros de transportadores aéreos e cerca de 3640 rolamentos. O sistema de controle será testado, *a priori*, apenas nos rolamentos laterais do primeiro transportador da planta, onde é carregado os couros *in natura*, no pré-descarne. Tal abordagem cobrirá cerca de 15% de todos os rolamentos da planta e foi escolhida por se tratar da região de mais fácil acesso para a análise e montagem do sistema e onde ocorre maior índice de paradas. Vale frisar que, nesta etapa do processo, antes dos couros passarem pelos fulões de curtimento, a matéria-prima ainda se encontra putrescível, ou seja, caso ocorra uma grande parada pode haver perda da mesma.

O primeiro passo para a implementação do sistema de controle *on-ff* foi o estudo das opções de microcontroladores e sensores disponíveis no mercado que são adequados para o projeto proposto na planta. A Tabela 2 mostra as opções analisadas e os componentes escolhidos.

Tabela 2 – Tabela dos componentes analisados e escolhidos.

ITENS	01	02	03
COMPONENTES			
CONTROLADOR	 Arduino Uno	 CLP Weg Clw-02 12hr-d 3rd	 CLP Siemens 6ed1052-1cc01-0ba8
SENSOR	 Sensor Infravermelho E18-D80NK	 Sensor Ultrasonico HC-SR04	 Micro switch KW11-3Z-5-3T

Fonte: Elaboração própria do autor.

Devido ao baixo custo e à facilidade para programação e instalação o microcontrolador Arduino Uno foi escolhido para o projeto da planta. Além disso, suas características de *hardware* são adequadas para o teste do sistema no transportador do pré-descarne. Mesmo sendo necessário um microcontrolador para cada transportador aéreo da planta, devido seu menor número de entradas e saídas quando comparado ao outros, ainda sairia com menor custo que os demais.

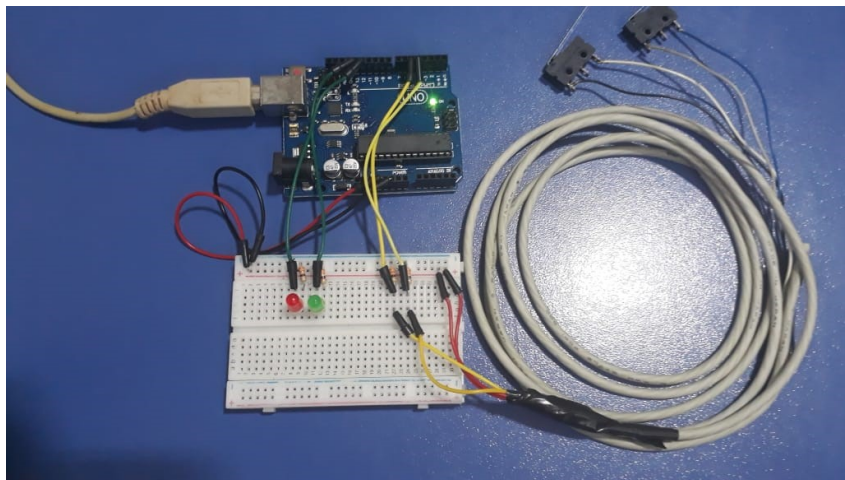
Por outro lado, sensores digitais sem contato como sensores infravermelho e sonoro foram testados, mas a interferência metálica do trilho do aéreo e a baixa precisão dos mesmos foram característicos para a escolha de um sensor de contato tipo *micro switch*

que consegue, com precisão, efetuar a análise e contagem dos rolamentos do transportador aéreo passantes em determinado posição.

Para a instalação dos sensores e equipamentos eletrônicos na planta foram utilizados os determinados materiais:

- Um microcontrolador Arduino Uno;
- Um *protoboard* de 400 ponto;
- Dois leds de 5 V;
- Quatro resistores de 300 *ohms*;
- Cabos elétricos;
- Dois *micro switch* KW11-3Z-5-3T;
- Um computador para sistema supervisório e fonte de energia.

Figura 16 – Material utilizado para instalação do sistema na planta.



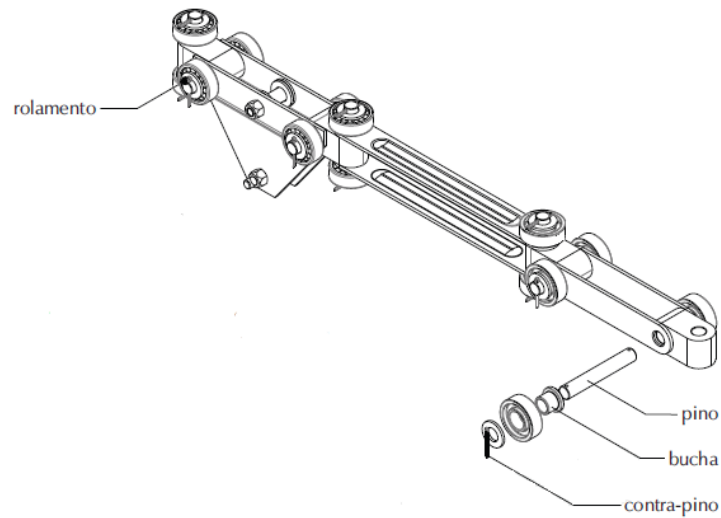
Fonte: Elaboração própria do autor.

3.4 Lógica de programação

Para o desenvolvimento da lógica de programação do microcontrolador Arduino Uno, foi necessário realizar a análise de posição do mesmo. O aéreo master é formado por sequências de dois elos de diferentes tamanhos, um de 200 mm e o outro de 300 mm, buchas, pinos, contra pinos e rolamentos, como mostrado na Figura 17.

Assim, os sensores de contato *micro switch* precisam ser posicionados de tal modo que a contagem do número de rolamentos seja possível, o que permite a construção da

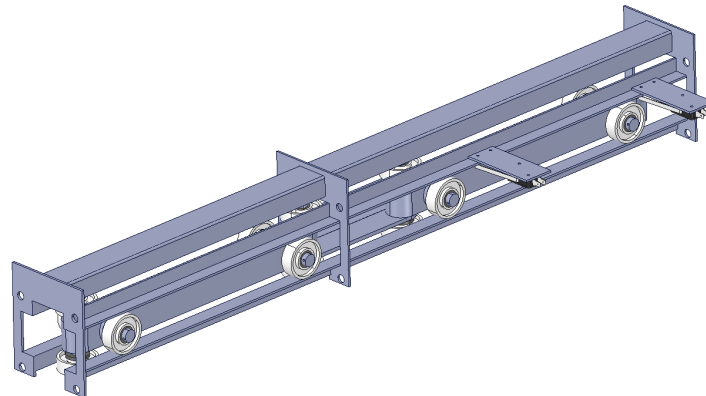
Figura 17 – Corrente do transportador aéreo tipo *master*.



Fonte: Master TAM-400 (2011)

lógica de programação com base na quantidade e sequência dos rolamentos passantes. Para alcançar determinado objetivo foram necessários dois sensores posicionados no mesmo lado do transportado com 250 mm de distância de um para o outro, de modo que cada rolamento tocaria individualmente em cada sensor, o que permite precisão na análise. A Figura 18 mostra a posição que os sensores foram posicionados.

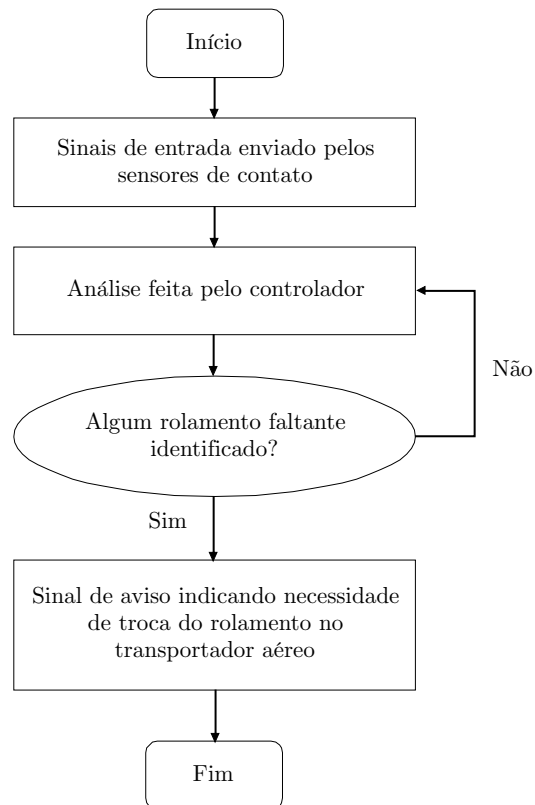
Figura 18 – Posição dos sensores no trilho do transportador aéreo *master*.



Fonte: Elaboração própria do autor no *software* SpaceClaim.

Com base no escopo do projeto e na posição pré-determinada dos sensores de contato, iniciou-se a programação no ambiente de desenvolvimento Arduino IDE. O *software* utiliza uma linguagem de programação de alto nível bastante semelhante à C, além de realizar a compilação do código fonte e fazer a embarcação do mesmo no Arduino Uno. O diagrama de controle geral do sistema pode ser visto na Figura 19.

Figura 19 – Diagrama de controle geral.



Fonte: Elaboração própria do autor.

4 MODELO PRÁTICO, EXPERIMENTOS E RESULTADOS

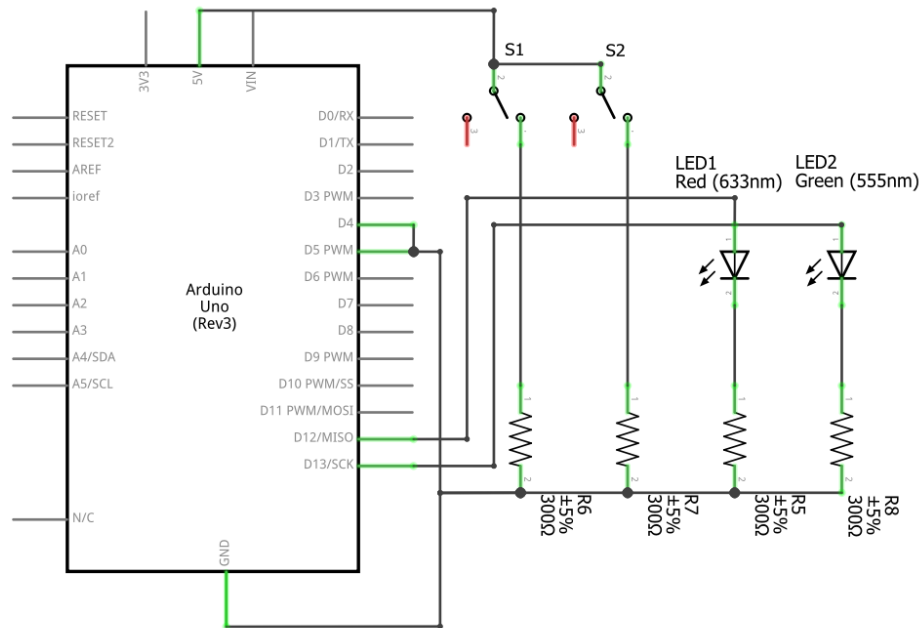
4.1 Modelo prático

Após o desenvolvimento do código principal do sistema de controle *on-off* foi desenvolvido a construção do diagrama elétrico e simulações computacionais do mesmo utilizando o *software* aberto *Fritzing*. A Figura 20 ilustra o circuito elétrico utilizado, contendo as ligações dos sensores, Arduino Uno e os *leds*. Para alimentação e supervisão do circuito, foi utilizado a entrada USB do computador com alimentação de 5 V, tal tensão é convertida automaticamente de analógica para digital pelo próprio Arduino. Os sensores foram ligados ao Arduino Uno juntamente com resistores *pull-down* para reduzir a corrente e evitar o problema de “pino flutuante”, garantindo que o estado de entrada fique em nível lógico baixo quando nenhum sensor for acionado.

Dessa maneira, o código visa obter a quantidade real de rolamentos passantes nos sensores de contato e comparar com o valor desejado gerando o erro que indica o rolamento faltante. O microcontrolador analisa o sinal recebido do sensor e retorna um valor de tensão 0 ou 5 V. Caso o transportador aéreo estivesse funcionando normalmente, com todos os rolamentos, o microcontrolador enviaria um sinal para o *led* verde. Caso contrário, se houvesse erro, ou seja, rolamento faltante, o sistema enviaria um sinal de retorno para o *led* vermelho e sinalizaria que o sistema de transporte aéreo está com defeito e deve ser parado para efetuar a troca do rolamento faltante

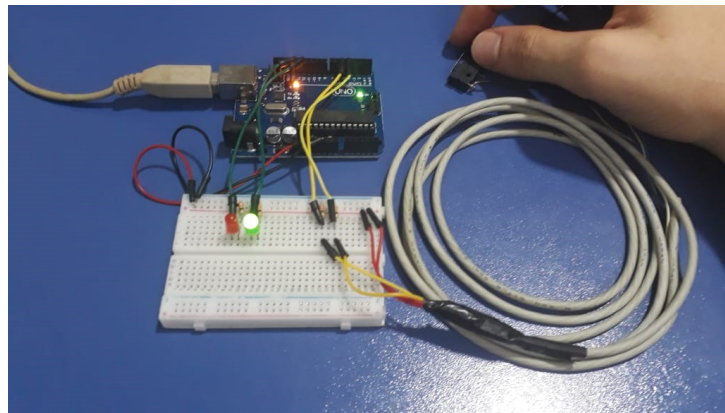
A Figura 21 mostra testes realizados no sistema de controle *on-off* antes da instalação na planta. A Figura 21 representa que o rolamento está presente no elo da corrente do transportador e o sistema está com funcionamento adequado. A Figura 21 representa um rolamento faltante no sistema e indica que o transportador aéreo deve ser parado urgentemente para que a troca do mesmo seja efetuada.

Figura 20 – Circuito do sistema de controle *on-off*.

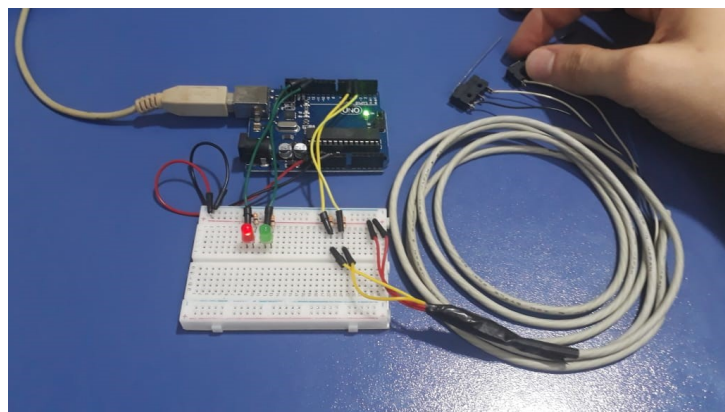


Fonte: Elaboração própria do autor.

Figura 21 – Teste do sistema de controle *on-off* na planta.



(a) Rolamento presente no elo do transportador aéreo.



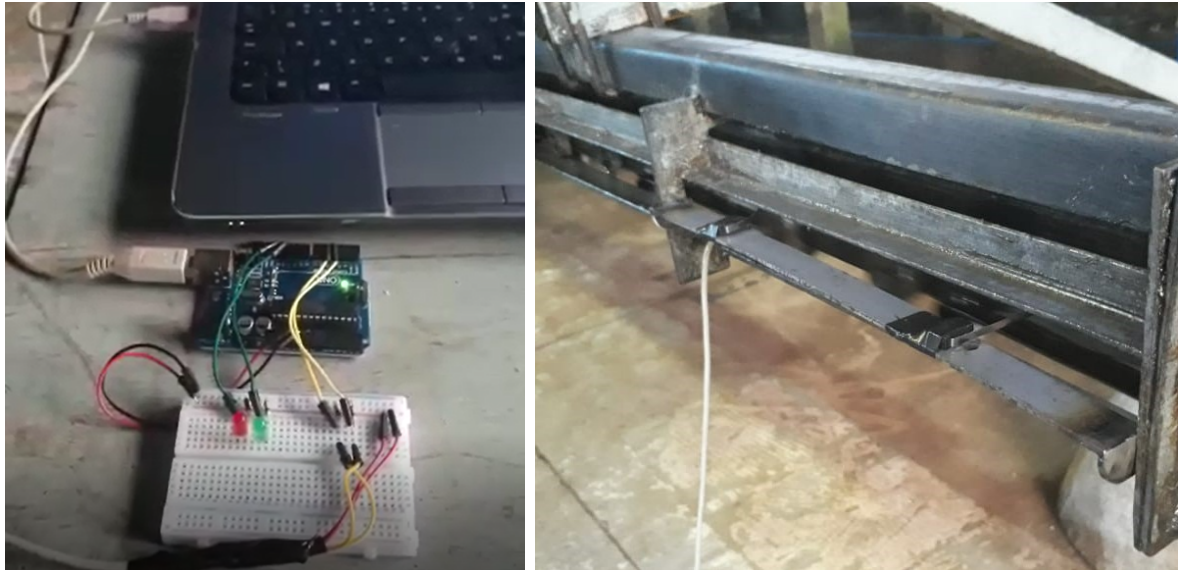
(b) Rolamento faltante no elo do transportador aéreo.

Fonte: Elaboração própria do autor.

4.2 Experimentos e resultados

Após a montagem experimental descrita anteriormente, o sistema então foi instalado na planta. Os sensores de contato foram posicionados de acordo com a análise de posição feita e os dados obtidos foram analisados. A Figura 22 mostra o sistema de controle instalado na planta para análise dos rolamentos.

Figura 22 – Sistema de controle *on-off* na planta.

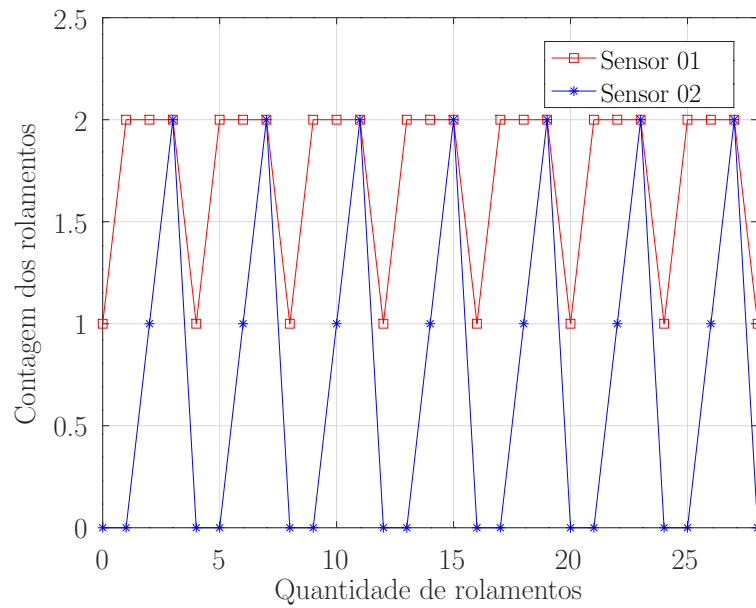


Fonte: Elaboração própria do autor.

O primeiro experimento se iniciou com a partida do transportador aéreo do pré-descarne, que foi ligado para testes. Foram analisados os primeiros elos do transportador aéreo através da contagem de seus respectivos rolamentos pelos dois sensores de contato do sistema de controle *on-off*.

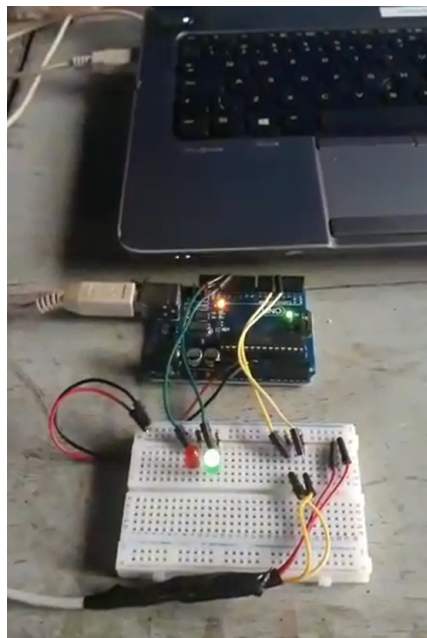
A Figura 23 representa o funcionamento do sistema de controle *on-off* sem nenhuma identificação de rolamentos faltantes nos elos da corrente do transportador aéreo. O eixo das abscissas mostra a quantidade de rolamentos analisados na corrente do transportador aéreo, já o eixo das coordenadas mostra a contagem dos rolamentos realizada por elo do sistema, sendo no máximo dois rolamentos. Para cada rolamento identificado pelo sensor de contato foi enviado um sinal para o microcontrolador que respondia acendendo o *led* verde, como mostrado na Figura 24.

Figura 23 – Identificação de rolamentos presentes no elo do transportador aéreo pelo sistema de controle.



Fonte: Elaboração própria do autor.

Figura 24 – Resposta do sistema de controle para rolamentos presentes.



Fonte: Elaboração própria do autor.

Para testes do sistema de controle, foi retirado o rolamentos traseiro do elo menor da corrente do transportador, para simular a quebra de um rolamentos, Figura 25.

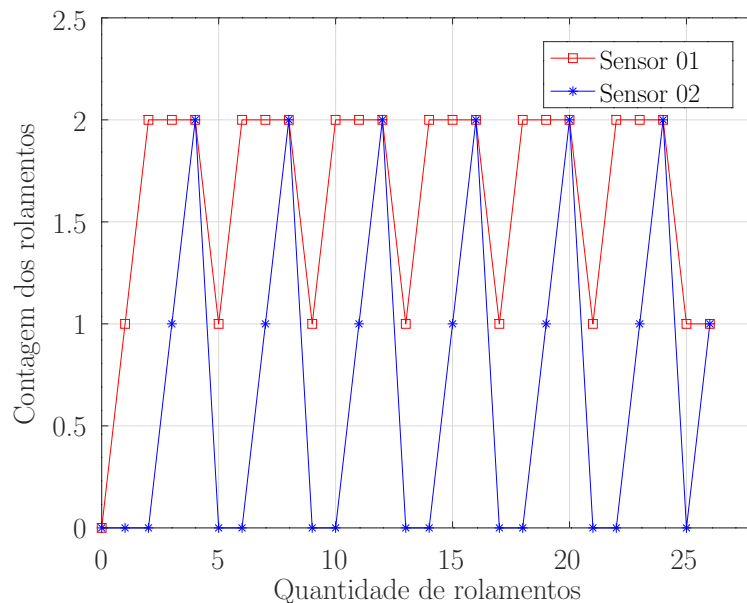
Figura 25 – Retirada do rolamento traseiro do elo menor para teste.



Fonte: Elaboração própria do autor.

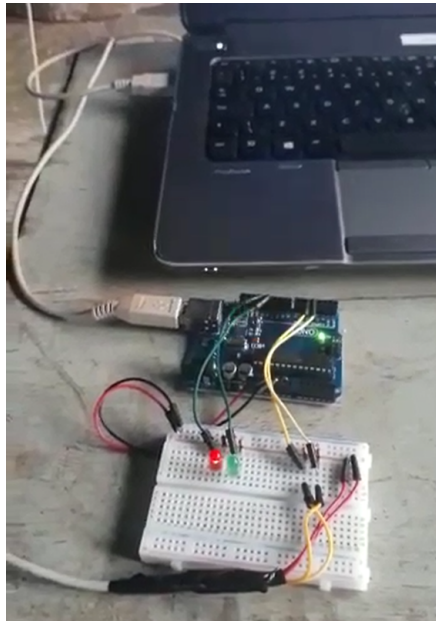
O resultado pode ser visto na Figura 26, onde o sensor de contato 01 identifica que há um rolamento faltante. Observe que a sequência de contagem pelo sensor 01 (linha vermelha) é interrompida, o sensor 02 é acionado antes do segundo rolamento do elo passar pelo sensor 01, o que identifica que o rolamento 26 do sistema está faltando na corrente do transportador. Em seguida, o microcontrolador aciona o *led* vermelho indicando que o sistema deve ser parado pra manutenção, Figura 27. O sistema de controle foi projetado para que a análise dos rolamentos no transportador aéreo parasse assim que um rolamento faltante fosse encontrado.

Figura 26 – Identificação do rolamento faltante no elo do transportador aéreo pelo sistema de controle.



Fonte: Elaboração própria do autor.

Figura 27 – Resposta do sistema de controle para o rolamento faltante.



Fonte: Elaboração própria do autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho apresentou todas as partes necessárias para o projeto do sistema de controle de *on-off* de identificação, utilizado no sistema de transporte aéreo de couros. A modelagem e a identificação do sistema foram feitas para que outros possam usar este trabalho como base, seja para um projeto mais complexo, para didática em sala de aula ou para análise estrutural do sistema transportador de couro.

Os resultados obtidos confirmam o funcionamento do sistema de controle *on-off* de baixo custo, através de sensores *micro switch* e do microcontrolador Arduino Uno, na identificação de rolamentos faltantes na corrente do transportador aéreo, uma vez que houve a resposta corretamente do sistema para ambas as situações encontradas: Elo com rolamento e sem rolamento. Mostrando que é possível agir preventivamente contra os problemas no transportador aéreo tipo *master* e diminuir paradas de processos causadas por tal problema.

Entretanto, esse sistema possui algumas limitações. A quantidade de saídas do microcontrolador não é suficiente para o controle de todos os transportadores aéreos da planta, sendo necessário, para completa implementação na unidade, pelo menos cinco sistemas de controle igual ao apresentado neste trabalho. Outra questão, é a fragilidade dos sensores *micro switch* utilizados que apresentaram pequenas deformações nas hastes de metal depois de poucos ciclos de funcionamento do sistema de controle. Portanto, indicando uma pequena vida útil do material que necessitaria, em um curto período de tempo, ser trocado.

5.1 Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, o sinal de saída do microcontrolador poderia ser ligado em uma torre de sinalização vertical a acesso dos operadores que ficariam responsáveis por desligar o transportador aéreo assim que fosse sinalizado ou poderia ser diretamente ligado no inversor de frequência de controle do sistema de transporte aéreo para que, no momento que fosse identificado um rolamento faltante, parasse automaticamente. A utilização de outros controladores e outros sensores de contato poderiam tornar o sistema de controle mais robusto, já que o Arduino Uno é uma plataforma de prototipagem e o sensor de contato *micro switch* apresentou baixa vida útil para atividade

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, F. M. U. Apostila de sistema de controle. **Departamento de Engenharia de Computação e Automação, Natal, RN**, Rio Grande do Norte, 2007.
- ASTRÖM, K. J.; MURRAY, R. M. **Feedback systems: an introduction for scientists and engineers**. New Jersey: Princeton university press, 2010. 25 p.
- BADAMASI, Y. A. The working principle of an arduino. In: IEEE. **2014 11th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO)**. [S.l.], 2014. p. 1-4.
- BULLO, F.; LEWIS, A. D. **Geometric control of mechanical systems: modeling, analysis, and design for simple mechanical control systems**. Houston: Springer New York, 2005.
- CAON, J. R. J. **Automação de um sistema rotatório para secagem do rejeito de maracujá**. 5 p. Dissertação (Mestrado) — São Carlos, 1999.
- CUNHA, A. **Relatório de Acompanhamento Setorial: Indústria de Couro**. 1. ed. São Paulo: Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial - ABDI, 2011. 44 p.
- FRANKLIN, G. F. et al. **Feedback control of dynamic systems**. Princeton: Princeton University Press, 1994. v. 3.
- GARG, V. **Dynamics of railway vehicle systems**. 2. ed. Orlando, Florida: Elsevier, 2012.
- GILLESPIE, T. D. **Fundamentals of vehicle dynamics**. 2. ed. Warrendale: Society of Automotive Engineers, Inc, 1992.
- GOODWIN, G. C. et al. **Control system design**. New Jersey: Prentice Hall New Jersey, 2001. v. 240.
- GUPTA, G. S. **Embedded microcontroller interfacing: designing integrated projects**. Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2010. v. 65.
- KANI, A. N. et al. **Signals & Systems**. New Delhi, India: Tata McGraw-Hill Education, 2010.
- KUO, B. C. **Automatic control systems**. New York: Prentice Hall PTR, 1987.
- MASTER TAM-400. **Manual instruções Transportador Aéreo TAM-400**. Rio Grande do Sul, 2011. 55 p.
- MCROBERTS, M. **Arduino Básico-2ª edição: Tudo sobre o popular microcontrolador Arduino**. São Paulo: Novatec Editora, 2015.
- MICROCHIP, T. I. Data sheet atmega328pb. **DS40001906C**, 2018.
- MIKULAK, R. J.; MCDERMOTT, R.; BEAUREGARD, M. **The basics of FMEA**. Broken Sound Parkway: Productivity Press, 2008.

- NAGRATH, I. **Control systems engineering**. 4. ed. New Delhi: New Age International, 2006.
- NEWBOLD, R.; BRACEWELL. **The Fourier transform and its applications**. New York: McGraw-Hill, 1986. v. 31999.
- NISE, N. S. **Control Systems Engineering**. 6. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2012. 1005 p.
- O'DWYER, A. **Handbook of PI and PID controller tuning rules**. London: World Scientific, 2006.
- OGATA, K. **Modern Control Engineering**. 1. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 1970. 1013 p.
- OGATA, K. **Modern Control Engineering**. 5. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2009.
- OGUNNAIKE, B. A. **Process Dynamics, Modeling, and Control**. 1. ed. New York: Oxford University Press, 1994. 15 p.
- OPPENHEIM, A. V.; WILLSKY, A. S. **Signals and Systems**. 2. ed. Englewood Cliffs, N.J: Prentice Hall Upper Saddle River, NJ, 1983. 564 p.
- PACHECO, J. W. F. **Curtumes**. 1. ed. São Paulo: Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - CETESB, 2005. 77 p.
- SANTOS, A. M. M. M. et al. **Panorama do setor de couro no Brasil**. 1. ed. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social, 2002. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/bibliotecadigital>>.
- SCHIFF, J. L. **The Laplace transform: theory and applications**. 2. ed. Auckland: Springer Science & Business Media, 2013.
- SHINSKEY, F. G. **Feedback controllers for the process industries**. Massachusetts: McGraw-Hill Professional, 1994.
- SLOTINE, J.-J. E.; LI, W. et al. **Applied nonlinear control**. [S.l.]: Prentice hall Englewood Cliffs, NJ, 1991. v. 199.
- THOMAZINI, D. Sensores industriais. **Sensores Industriais Fundamentos e Aplicações**, 2007.
- VILANOVA, R.; VISIOLI, A. **PID control in the third millennium**. 2. ed. New York: Springer, 2012.
- VISIOLI, A. **Practical PID control**. 1. ed. Brescia: Springer Science & Business Media, 2006.
- WIDDER, D. V. **Laplace transform (PMS-6)**. Princeton: Princeton university press, 2015.
- XUE, D.; CHEN, Y.; ATHERTON, D. P. Linear feedback control. **Analysis and design with Matlab**, p. 244, 2002.