

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS
ENGENHARIA ELÉTRICA
WILTON JOÃO DA SILVA

APLICAÇÃO DE MALHA FECHADA EM UM SISTEMA DE FRENAGEM
INDUSTRIAL TÊXTIL

Varginha
2021

WILTON JOÃO DA SILVA

**APLICAÇÃO DE MALHA FECHADA EM UM SISTEMA DE FRENAGEM
INDUSTRIAL TÊXTIL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel sob orientação do Prof. Me. Eduardo Henrique Ferroni e coorientação do Prof. Me. Hugo Rodrigues Vieira.

Varginha

2021

WILTON JOÃO DA SILVA

**APLICAÇÃO DE MALHA FECHADA EM UM SISTEMA DE FRENAGEM
INDUSTRIAL TÊXTIL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela banca examinadora composta pelos membros:

Aprovado em / /

Prof. Me. Eduardo Henrique Ferroni

Prof.

Prof.

OBS.:

Dedico esse trabalho a Deus por me iluminar sempre, dando-me força nos momentos em que precisei. Aos meus familiares, que me apoiaram em todos os momentos desta longa etapa. Por fim, aos meus amigos, os velhos e os novos que conquistei ao longo desses 5 anos de estudos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por iluminar sempre o meu caminho, dando-me forças para nunca desistir dos meus objetivos.

À minha família por todo o apoio e compreensão ao longo dos últimos anos, principalmente à minha mãe Lidia e ao meu pai Antônio.

Ao meu orientador Prof. Me. Eduardo Henrique Ferroni e por sua orientação, dicas, sugestões e conversas ao longo do trabalho, foram de grande valia e conhecimento.

Aos meus professores, que puderam tornar esse sonho possível, em especial ao Prof. Me. Hugo Vieira e Prof. Esp. Roberto Mudesto, pois no momento em que eu me encontrava em estado de estafa, me auxiliaram para recuperar. Aos meus colegas, que ao longo do curso me ajudaram em momentos decisivos, momentos em que se necessitava apenas de um “vai dar certo e um aperto de mão” para afastar todo o cansaço do dia-a-dia. Obrigado por tudo meus amigos: Adilson, Alisson, Alexandre, Bianca, Euder, Iuri, Julia, Luana, Maurilio, Rafael, Rodolfo, Otávio, Welder. Obrigado pela amizade e pelo acolhimento, obrigado pela força, obrigado pelas risadas: ficarão para sempre guardados em um lugar especial no meu coração.

Ao grupo UNIS (Centro Universitário do Sul de Minas) pela estrutura e pelo apoio durante o curso.

A todos que de certa forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho: fica aqui o meu “muito obrigado”.

“O ser humano com uma vontade indomável é capaz de coisas incríveis.”

Brou Bruto Drews

RESUMO

Com o setor têxtil seguindo uma tendência cada vez mais competitiva, aumentou a busca das organizações por sistemas otimizados e confiáveis, para que padronizassem os processos, seguindo as normas de conformidade, tornando indispensável o uso de sistemas de controle automatizados. O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um sistema de frenagem de malha fechada por meio das técnicas do sistema de controle, para que o mesmo operasse conforme a exigência do processo reduzindo a pressão dos freios de acordo com que as bobinas de fios diminuam mantendo o seu tensionamento e sua implantação em uma máquina denominada Índigo DENIM com o intuito de melhoria no controle de frenagem e do processo de tingimento. Para atingir esse objetivo, inicialmente foi apresentada uma introdução com os principais conceitos do processo da máquina de Índigo DENIM, sobre os sistemas de controle com ênfase nos tipos de sistemas de controle existente, os controladores industriais, além de ferramentas e *softwares* utilizados para comprovação da eficiência do sistema desenvolvido através de sua modelagem matemática. Após a sua implantação, o sistema apresentou resultados satisfatórios no controle de frenagem em que atendeu aos requisitos do processo, aumentando a produtividade em 19,11% e uma redução de 2,31% na diferença de tonalidade.

Palavras-chave: Sistemas de controle. Sistema de malha fechada. Freio industrial têxtil.

ABSTRACT

With the textile sector following an increasingly competitive trend, increasing the search of organizations for optimized and reliable systems, so that they standardize processes, following compliance standards, making the use of automated control systems indispensable. The main objective of this work was to develop a closed-loop braking system through the control system techniques, so that it operated as required by the process according to the pressure of the brakes as the spools of thread decrease while maintaining its tensioning and its implantation in a machine called Índigo DENIM in order to improve the braking control and the dyeing process. To achieve this goal, initially an introduction was presented with the main concepts of the process of the DENIM Indigo machine , on control systems with emphasis on the types of existing control systems, industrial drivers, as well as tools and software used to prove the system developed through its mathematical modelling. After its implementation, the system presented satisfactory results in the braking control, which met the requirements of the process, increased productivity by 19.11% and a reduction of 2.31% in the difference in hue.

Keywords: *Control system. Closed-loop system. Industrial textile brake.*

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BAR- Unidade de Medida da Pressão Atmosférica

CA- Corrente Alternada

CC-Corrente Contínua

IHM- Interface Homem Máquina

mA- Unidade de Medida da Intensidade da Corrente Elétrica em Mili Ampères

NBR-Normas Brasileiras

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	18
Equação 2	19
Equação 3	19
Equação 4.....	22
Equação 5	23
Equação 6	24
Equação 7	25
Equação 8	51
Equação 9	51
Equação 10..	51
Equação 11	52
Equação 12	52
Equação 13	52
Equação 14	53
Equação 15	53
Equação 16	59
Equação 17	59

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Controle de malha aberta.....	17
Figura 2 - Controle de malha fechada.....	17
Figura 3 - Controle de malha fechada submetido a uma perturbação.....	18
Figura 4 - Parâmetros de um projeto.....	20
Figura 5 - Diagrama de bloco e funcionamento da ação On/Off.....	22
Figura 6 - Ação de controle proporcional.....	23
Figura 7 - Ação de controle integral.....	24
Figura 8 - Diagrama de bloco do controlador PID.....	26
Figura 9 - Sistema realimentado com PID.....	26
Figura 10 - Decaimento em malha fechada.....	27
Figura 11 - Sistema instável.....	28
Figura 12 - Ciclo de tingimento.....	31
Figura 13 - Esquemático de uma máquina de índigo denim.....	31
Figura 14 - Gaiola das bobinas.....	32
Figura 15 - Caixa de umectação.....	33
Figura 16 - Caixa de lavagem/limpeza.....	34
Figura 17 - Caixa de tingimento.....	35
Figura 18 - Zona de oxidação.....	36
Figura 19 - Acumulador.....	37
Figura 20 - Secadeira do Índigo.....	37
Figura 21 - Caixa de goma.....	38
Figura 22 - Campo seco.....	39
Figura 23 - Software IDE.....	41
Figura 24 - Arduino UNO.....	42
Figura 25 - Módulo Leitor Arduino SD.....	43
Figura 26 - Transdutor de pressão.....	44
Figura 27 - Esquema elétrico do sistema de aquisição de dados.....	49
Figura 28 - Sistema de aquisição de dados.....	50
Figura 29 - Diagrama de blocos do sistema de frenagem proposto.....	54
Figura 30 - Sistema Instável.....	54
Figura 31 - Definição do ganho crítico.....	55
Figura 32 - Período de Oscilação.....	55

Figura 33 - Esquema elétrico do sistema de frenagem em malha fechada.....	57
Figura 34 - Painel com controlador PID.....	57
Figura 35 - válvula proporcional	58
Figura 36 - Transdutor de Pressão	58
Figura 37 - Dados da pressão pneumática dos freios..	60
Figura 38 - Dados do sinal analógico.	61
Figura 39 - Gráfico da pressão pneumática dos freio.....	62
Figura 40 - Gráfico do sinal analógico convertido em BAR.....	62
Figura 41 - Resposta ao degrau unitário(Ziegler Nichols).....	63
Figura 42 - Rampa unitária(Ziegler Nichols)	64
Figura 43 - Resposta ao degrau unitário (Sintonia fina).....	65
Figura 44 - Resposta rampa unitária (Sintonia fina).....	65
Figura 45 - Dados da pressão pneumática dos freios	66
Figura 46 - Dados do sinal analógico	67
Figura 47 - Gráfico da pressão pneumática dos freios	67
Figura 48 - Gráfico do sinal analógico convertido em BAR.....	68
Figura 49 - Resposta transitória.....	68
Figura 50 - Offset	69

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Regras de Ziegler Nichols em malha fechada.....	28
Quadro 2 - Resumo das ações do controlador PID.....	28
Quadro 3 - Especificações fornecidas pela fabricante Arduino CC	42
Quadro 4 - Parâmetros do controlador pelo método de Ziegler Nichols.....	56
Quadro 5 - Parâmetros do controlador pelo método de sintonia fina.....	64
Quadro 6 - Dados da produção	69

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 SISTEMAS DE CONTROLE	16
2.1 Diagrama de Blocos	16
2.1.1 Sistemas de Malha Aberta	16
2.1.2 Sistemas de Malha Fechada.....	17
2.1.3 Sistemas de Malha Fechada Submetido a uma Perturbação.....	18
2.2 Função de transferência	19
2.2.1 Modelagem matemática.....	19
2.2.2 Principais características de um projeto	20
2.3 Controladores	21
2.3.1 Ação <i>ON/OFF</i>	21
2.3.2 Ação Proporcional	22
2.3.3 Ação integral.....	23
2.3.4 Ação derivativa.....	24
2.4 Sintonização de controladores.....	24
2.4.1 Método de ajuste de Ziegler Nichols	25
2.4.1.1 Regras de sintonia do PID de Ziegler-Nichols para sistemas contínuos	27
2.4.1.2 Sintonia PID pelo método em malha fechada	27
3 PROCESSO DE ÍNDIGO DENIM	30
3.1 Tingimento	30
3.1.1 Gaiola das bobinas urdidas	31
3.1.2 Caixa de umectação	32
3.1.3 Caixa de lavagem.....	33
3.1.4 Caixa de tingimento.....	34
3.1.5 Zona de oxidação.....	35
3.1.6 Acumulador	36
3.1.7 Secadeira do Índigo	37
3.1.8 Caixa de goma	38
3.1.9 Secadeira da engomadeira	38
3.1.10 Campo seco	39
4 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	40

4.1 Arduino.....	40
4.2 Arduino UNO.....	41
4.3 Módulo Leitor Arduino SD.....	42
4.4 Transdutor de pressão	43
5 PROBLEMA NO PROCESSO DE ÍNDIGO DENIM	45
5.1 Sistema de frenagem.....	46
5.2 Proposta de solução	46
6 METODOLOGIA.....	48
6.1 Primeira etapa.....	48
6.2 Segunda etapa	50
6.2.1 Controlador PID	51
6.2.2 Válvula Proporcional.....	51
6.2.3 Transdutor de Pressão.....	51
6.3 Terceira etapa	54
6.4 Quarta etapa	56
6.5 Quinta etapa.....	59
7 RESULTADOS	60
7.1 Primeira etapa.....	60
7.2 Segunda etapa	63
7.3 Terceira etapa	66
8 CONCLUSÃO.....	71
REFERÊNCIAS	72
APÊNDICE A	74

1 INTRODUÇÃO

O mercado têxtil se tornou competitivo, o que obrigou as empresas a realizarem melhorias em suas plantas industriais produtivas.

A área de otimização de processos, automação e controle foi um dos fundamentos que aumentou a produtividade das plantas e foram inúmeros os ganhos, tais como: melhoria no nível de segurança, já que o controle atua para que o sistema não haja com situações inesperadas, aumento da qualidade, redução da quantidade de reprocesso, o aumento da credibilidade, devido ser um sistema bem planejado e que atende aos requisitos do processo não operando em zonas indesejadas podendo causar uma manutenção forçada, o aumento do grau de segurança da planta, pois o controle pôde atuar para evitar um aumento brusco e perigoso do sistema, além do aumento de tempo disponível para o operador supervisionar a planta otimizando o processo, já que ele deixa de realizar o controle do sistema manualmente (CAMPOS; TEIXEIRA, 2006).

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema de frenagem de malha fechada, no qual o mesmo operou conforme a exigência do processo, reduzindo a pressão dos freios de acordo com que os fios das bobinas diminuam mantendo o seu tensionamento.

O controle da pressão pneumática de frenagem da gaiola de fios urdidos foi fundamental para aumentar a produtividade, melhorar a qualidade e padronização do produto.

De acordo com Ogata (2010), o uso de malha fechada com um coeficiente de amortecimento razoável, torna a resposta do sistema estável, mesmo para condições em que haja variações internas e externas, utilizando apenas componentes acessíveis e de baixa precisão. Para este sistema ser mais atrativo foi imprescindível conhecer um pouco das vantagens deste tipo de sistema.

Ogata (2010) explicou que o sistema de malha fechada possui: insensibilidade a perturbações externas (distúrbios externos), insensibilidade a variações em parâmetros do sistema e a possibilidade de utilização de componentes de baixa qualidade e baixo custo para obter sistemas com desempenho de alta qualidade.

Sales (2018) realizou a implantação de um sistema de malha fechada em uma planta industrial para realizar o controle de temperatura de água através de um trocador de calor obtendo resultados satisfatórios mesmo possuindo uma planta precária.

Já Perrenoud (2014) desenvolveu um projeto de implementação de um sistema de malha fechada para o controle da pressão interna de um reator em uma indústria química,

conseguindo uma melhoria no processo, mantendo estável a resposta do sistema no valor de *setpoint*.

Inicialmente, foi apresentado o estudo das ações de controle básico, tipos de controladores industriais, modelagens matemáticas e o método Ziegler Nichols utilizado para ajustar os parâmetros do controlador PID.

Posteriormente, realizou-se um estudo sobre o sistema de frenagem, em que determinou a sua modelagem matemática, ou seja, a função de transferência de cada componente e desenvolveu um diagrama de blocos de malha fechada, determinou os parâmetros do PID através do método de Ziegler Nichols e verificou sua eficiência pelo ambiente de programação *simulink-matlab*.

Por fim, aplicou o sistema proposto na planta, de modo que possibilitou a demonstração da melhoria do controle de frenagem através dos dados coletados do sistema de frenagem e do aumento de produtividade de acordo com os dados da empresa.

2 SISTEMAS DE CONTROLE

A função de um controlador é manter estável o processo no seu valor de *setpoint* através do tempo ou da frequência. As variáveis manipuladas devem agir sobre o processo escolhido, com o interesse de controlar o comportamento das variáveis do processo (ALBERTOS; ANTONIO, 2003).

Diversos equipamentos possuem sistemas de controle sendo aplicados em sua planta, que vão desde uma panela elétrica até a uma aeronave (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2019).

Um sistema de controle pode ser composto por diversos componentes. O diagrama de blocos é uma demonstração das funções desempenhadas por cada componente e do fluxo de sinais, em que as variáveis do sistema estão conectadas entre si por meio dos blocos.

2.1 Diagrama de Blocos

De acordo com Lathi (2012), para sistemas complexos e grandes, o mais adequado é representá-lo em diversos subsistemas/blocos interligados facilitando a análise do sistema, cada subsistema é um bloco que contém uma função de transferência $G(s)$ do componente que está sendo representado em que a relação é entre a saída $Y(s)$ pela entrada $X(s)$.

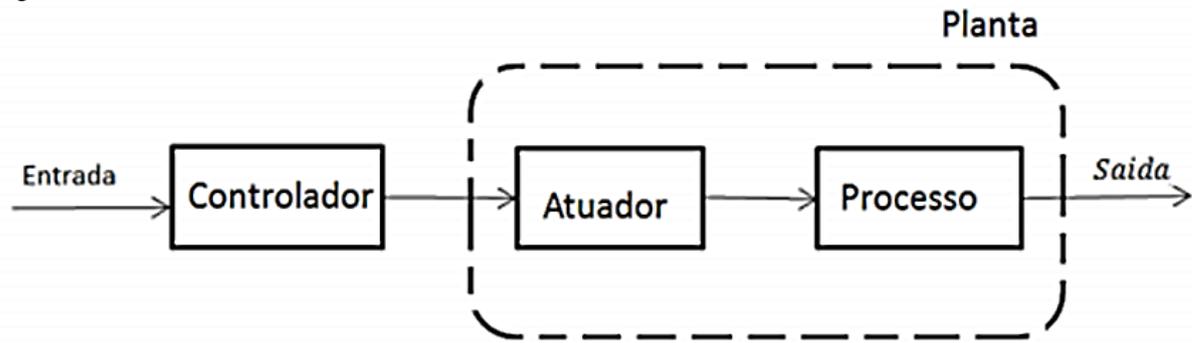
Deve ser levado em consideração que a principal fonte de energia de um diagrama de blocos não é explicitamente mostrada e, também, que para um sistema pode ser representado por diferentes diagramas de blocos dependendo do objetivo, em que um único diagrama de blocos pode representar diversos sistemas.

Os sistemas de controle se classificam em dois tipos: sistemas de malha aberta e sistemas de malha fechada.

2.1.1 Sistemas de Malha Aberta

Nos sistemas de malha aberta a saída (*output*) não tem efeito na ação de controle, ou seja, não é realimentada e nem somada na entrada. A Figura 1 apresenta um diagrama de blocos desse tipo de sistema (OGATA, 2010).

Figura 1 - Controle de malha aberta.



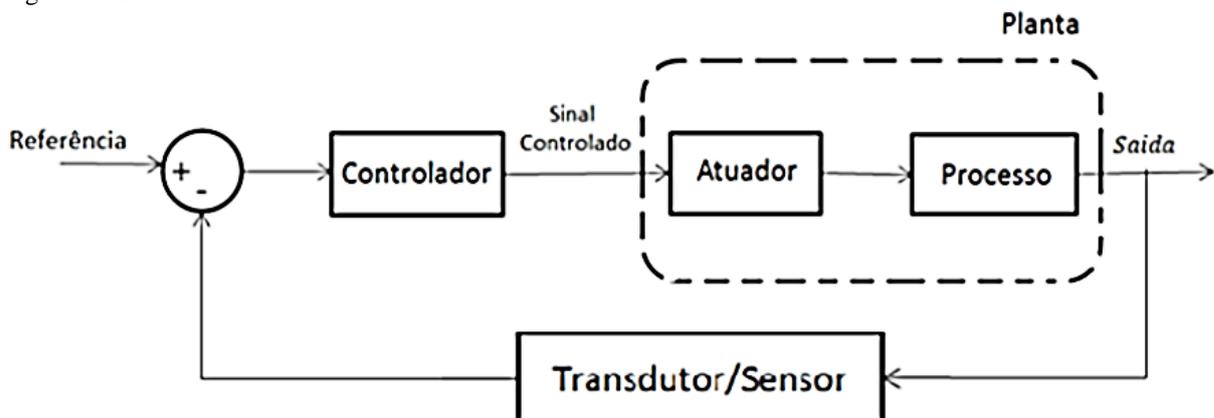
Fonte: (OGATA, 2010).

É um tipo de sistema que exige constantemente de calibração para que haja precisão, são mais simples e econômicos, sendo aconselhados em sistemas em que seja conhecida a relação entrada /saída e ausência de distúrbios internos e externos.

2.1.2 Sistemas de Malha Fechada

Sistemas de controle de malha fechada são sistemas realimentados, em que a saída afeta diretamente a entrada do sistema. A variável a ser controlada é medida por um sensor na saída que realimenta o controlador que gera o sinal de erro atuante (diferença entre o sinal de saída e o sinal de entrada), atuando para manter o valor de *setpoint* do sistema minimizando o erro atuante. A Figura 2 apresenta um diagrama de blocos desse tipo de sistema:

Figura 2 - Controle de malha fechada.



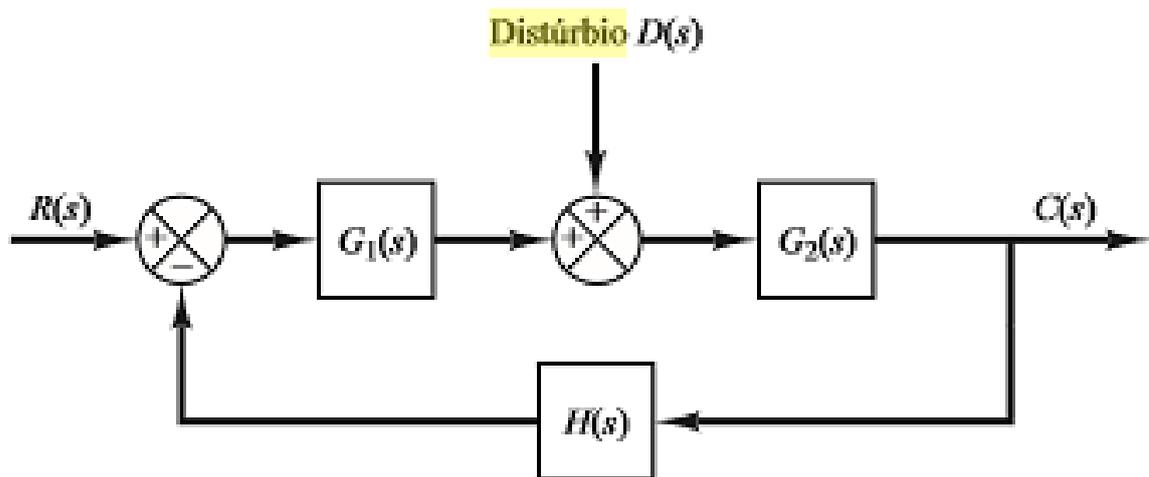
Fonte: (OGATA, 2010).

Segundo Ogata (2010) o uso de malha fechada com um coeficiente de amortecimento razoável, torna a resposta do sistema estável, mesmo em condições em que há perturbações internas e externas, com a utilização de apenas componentes acessíveis e de baixa precisão.

2.1.3 Sistemas de Malha Fechada Submetido a uma Perturbação

Existem sistemas não variantes no tempo que possuem distúrbios e entradas de referência que podem ser analisados separadamente em relação à saída, como se fossem sistemas distintos para que possa realizar o tratamento, em que cada entrada no sistema é representada pelos sinais de mais ou menos. A Figura 3 mostra um sistema de malha fechada submetida a um distúrbio:

Figura 3 - Controle de malha fechada submetido a uma perturbação.



Fonte: (OGATA, 2010).

Para observar as consequências do distúrbio $D(s)$, considera-se que o sistema está a princípio com a entrada $R(s)=0$. Calcula-se então, a resposta $DN(s)$ à perturbação apenas. Desta maneira, a resposta pode então ser definida pela Equação 1:

$$\frac{Cd(s)}{D(s)} = \frac{G2(s)}{1+G1(s)G2(s)H(s)} \quad (1)$$

Utilizando o mesmo método, pode-se conseguir a resposta do sistema da saída $C(s)$ em relação à entrada $R(s)$, considerando o distúrbio $D(s) = 0$. Desta maneira, a Equação 2 para determinar a resposta do sistema é determinada a partir de:

$$\frac{Cr(s)}{R(s)} = \frac{G1(s)G2(s)}{1+G1(s)G2(s)H(s)} \quad (2)$$

Como o sistema é linear, o retorno à aplicação conjunta da entrada e da perturbação pode ser alcançado somando as respostas separadas (Princípio da sobreposição), conforme pode ser visto na equação 3:

$$C(s) = Cd(s) + Cr(s) = \frac{G2(s)}{1+G1(s)G2(s)H(s)} [G1(s)R(s) + D(s)] \quad (3)$$

O princípio de sobreposição define que quando um sistema linear apresenta mais de uma fonte independente, a resposta do sistema pode ser obtida a partir da resposta individual a cada uma das fontes atuando de forma isolada. Assim, pode-se determinar a resposta do sistema a cada tipo de fonte considerando-a uma a uma e, posteriormente, somar algebricamente as respostas individuais. A utilização deste método pode reduzir a complexidade do sistema e facilitar a solução.

2.2 Função de transferência

Um dos métodos que pode ser usado como vantagem para analisar sistemas de controle é a transformada de Laplace, que utiliza operações com integrais e diferenciais tornando-as algébricas no plano complexo. Dessa maneira, cada componente é descrito por uma função que relaciona o valor de saída com o de entrada, também conhecida como modelagem matemática.

2.2.1 Modelagem matemática

A definição matemática de um sistema é chamada de modelagem matemática, independentemente do tipo de sistema que se deseja modelar, seja ele elétrico, hidráulico, térmico ou outros: todos eles podem ser caracterizados por equações diferenciais. Deve-se, por assim dizer, que a modelagem é a parte mais significativa da análise do sistema a ser estudado.

Um dos métodos utilizados para facilitar a análise dos sistemas de controle é a transformada de Laplace, em que cada componente é representado por uma função que relaciona o valor de saída com a entrada. A modelagem matemática torna possível a previsão da resposta de um sistema real através de técnicas matemáticas.

Bangura e Mahony (2012) esclarecem que um modelo matemático é a ideia de um sistema real com algum propósito particular, através da representação matemática.

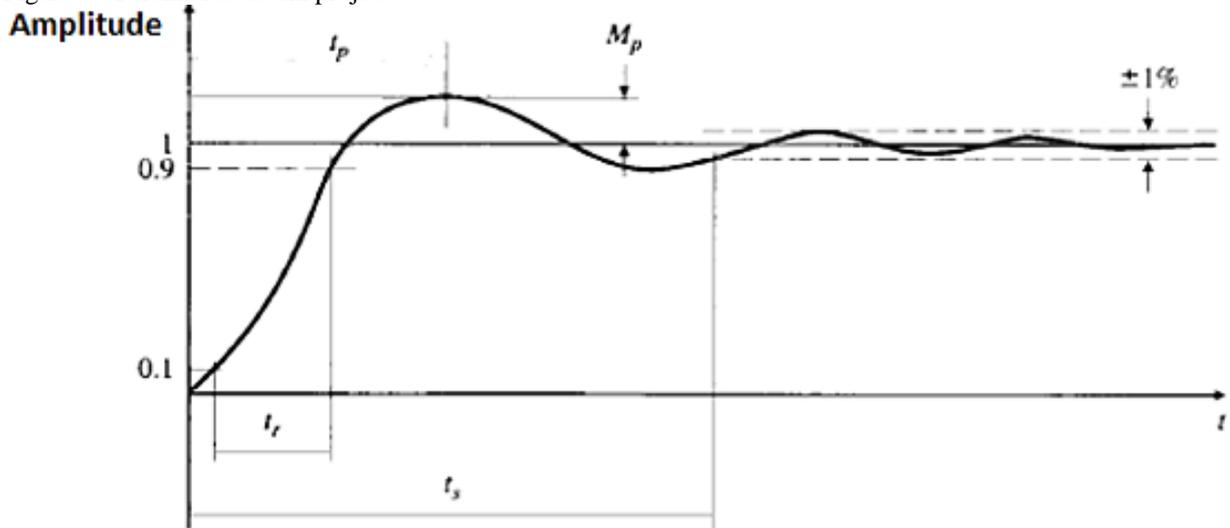
Um dos requisitos fundamentais para um sistema de controle é possuir estabilidade absoluta além da estabilidade relativa razoável, ou seja, velocidade de resposta rápida com um coeficiente de amortecimento razoável sendo capaz de reduzir os erros ou minimizá-los a uma porcentagem aceitável (ESFANDIARI; LU, 2018).

A caracterização do modelo matemático de um sistema, além de ser significativo no projeto de controle, pode ser aproveitada para realizar simulações e analisar o comportamento dinâmico, possibilitando ensaiar métodos de controle, antecipando problemas de projeto do controlador e/ou do sistema, evitando acidentes decorrentes de instabilidade, de erros no projeto quanto às características que o sistema exige.

2.2.2 Principais características de um projeto

Para projetar um sistema é necessário ficar atento ao tipo de resposta que o sistema exige, isso facilitará o projeto. A Figura 4 mostra a resposta de um sistema que aponta as características de um projeto.

Figura 4 - Parâmetros de um projeto.



Fonte: (FRANKLIN, 2009).

Onde:

- O tempo de subida (t_r), é o tempo que leva para o sistema alcançar o valor de setpoint;

- b) O tempo de acomodação (t_s), corresponde ao tempo que o sistema leva para atingir a faixa de tolerância de 2 ou 5%;
- c) O sobre sinal M_p , é a razão entre o valor máximo da resposta pelo novo setpoint (valor que excede o valor de setpoint). O valor em geral é expresso na forma de porcentagem;
- d) O tempo de pico t_p , é o valor de tempo que leva para o sistema alcançar o ponto de sobressinal.

2.3 Controladores

O controlador consiste basicamente em um ponto de soma, em que compara os sinais de entrada com os de saída, atuando para realizar a correção da diferença entre a entrada e saída conhecida como *offset*.

Estes cálculos matemáticos são chamados de lei de controle ou ações de controle. É imprescindível o conhecimento das ações de controle básicas para compreender como atuam nas plantas industriais.

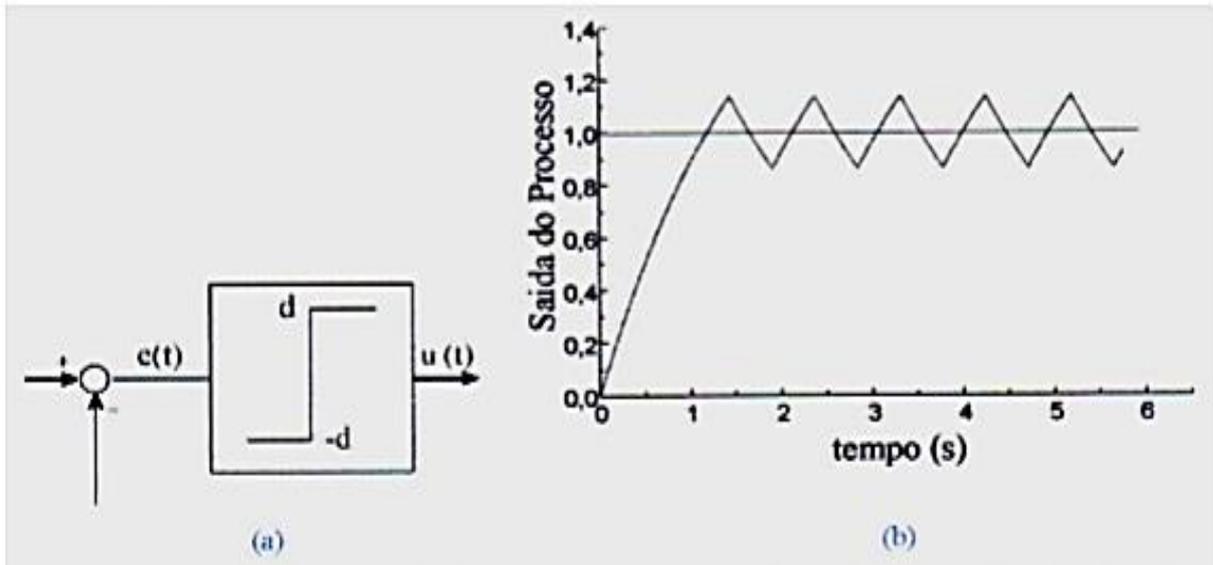
Ogata (2010) explica que a função de um controlador é comparar o valor da saída com a entrada, e atuar sobre a planta com a finalidade de minimizar ou eliminar o *Offset*.

Serão demonstradas a seguir as ações dos controladores *On/Off*, proporcional, integral e derivativa e suas ações sobre o sistema.

2.3.1 Ação *ON/OFF*

A Ação *On/Off* se caracteriza como um tipo de ação mais simples e econômica, usada tanto em sistemas industriais como domésticos, sendo inserida no sistema como um relé que atua apenas em duas posições: ligado ou desligado. A Figura 5 apresenta o diagrama de blocos e o funcionamento deste tipo de sistema:

Figura 5 - Diagrama de bloco e funcionamento da ação On/Off.



Fonte: (BEZERRA, 2007).

Este tipo de ação possui uma deficiência quanto ao comportamento dinâmico em regime permanente, apresentando oscilações em relação ao *set point*, sendo aconselhado para sistemas que não exijam precisão.

2.3.2 Ação Proporcional

O controle de ação proporcional se caracteriza como o mais delicado, em que o sinal de atuação se relaciona com o sinal de erro a todo o momento, podendo ser definido pela Equação 4:

$$u(t) = K_p e(t) \quad (4)$$

Onde:

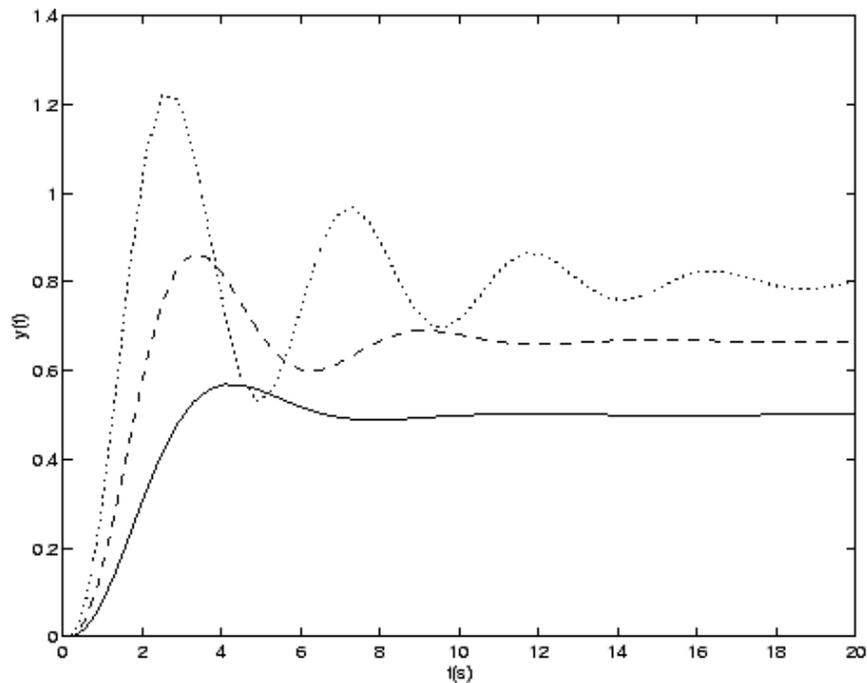
$u(t)$ = Sinal de saída do controlador

K_p = Ganho proporcional

$e(t)$ = erro atuante

O controle K_p no sistema determina o ganho e a sensibilidade proporcional, quanto maior sua componente, menor será o erro em regime permanente em malha fechada, ou seja, um sistema que atue mais próximo do valor de *set point*. A Figura 6 mostra o comportamento da ação proporcional em um sistema aumentando o ganho.

Figura 6 - Ação de controle proporcional.



Fonte: (BEZERRA, 2007).

No entanto, este controle não é possível anular o erro e quanto maior o ganho mais oscilatório o sistema será em regime transitório, sendo que o aumento excessivo dessa componente pode levar todo o sistema à instabilidade.

2.3.3 Ação integral

A ação integral se caracteriza como um tipo de ação que insere um sinal de controle $u(t)$ proporcional a integral do sinal de erro e atua conforme a amplitude do erro. No caso, quanto maior o erro mais rápido será sua ação para corrigi-lo e quanto menor a amplitude do erro mais lenta será essa ação. Pode ser demonstrado através da Equação 5:

$$u(t) = \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \quad (5)$$

Onde:

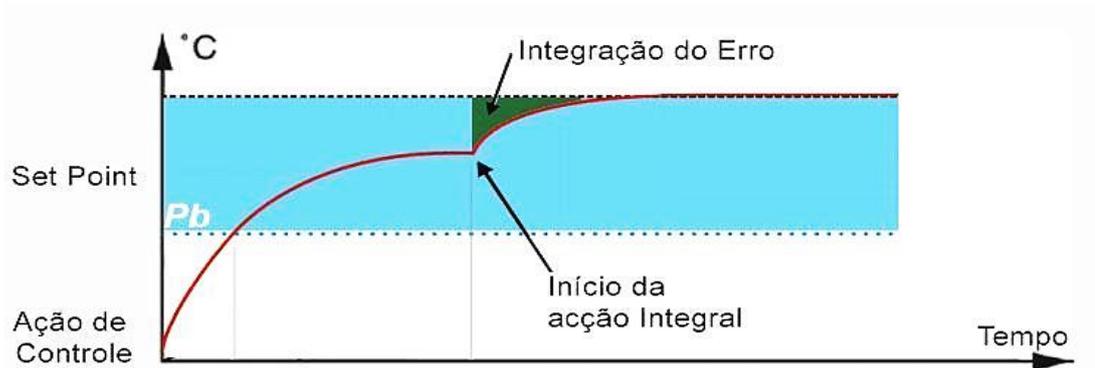
$u(t)$ = Sinal de saída do controlador

$\frac{1}{T_i}$ = Ação integral

$\int e(t) dt$ = Integral do erro atuante em relação ao tempo

A Figura 7 representa a ação integrativa.

Figura 7 - Ação de controle integral.



Fonte: (CEZAR, 2016).

Percebe-se que quando o erro do sistema for nulo em um determinado momento, a componente irá manter um valor fixo proporcional, a fim de manter o sistema estável em regime permanente.

2.3.4 Ação derivativa

Esta ação insere um sinal de controle $u(t)$ proporcional a derivada do sinal de erro atuante no sistema, de acordo com a equação 6:

$$u(t) = Td \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

Onde:

$u(t)$ = Sinal de saída do controlador

Td = Ação derivativa

$\frac{de(t)}{dt}$ = Derivada do erro atuante em relação ao tempo

É um tipo de ação que tem como objetivo uma ação antecipada do erro, tornando o sistema mais rápido. Utilizado para melhorar o tempo de acomodação da resposta transitória em sistemas de malha fechada, está diretamente relacionada com a variação da função do sistema em relação ao tempo. Caso o erro em regime permanente for nulo a ação derivativa será zero, pois atua somente em regime transitório.

2.4 Sintonização de controladores

A sintonização dos controladores Proporcional - Integral - Derivativo (PID) consiste na determinação do ajuste de seus parâmetros (Kp , Ti , Td), para alcançar um comportamento do sistema de controle aceitável e conformidade aos critérios de desempenho estabelecidos.

Para poder realizar a sintonização dos controladores, primeiro deve-se identificar a dinâmica do processo, e a partir dela determinar os parâmetros do controlador utilizando o método de Ziegler Nichols (MATAS, 2012).

2.4.1 Método de ajuste de Ziegler Nichols

Os controladores PID são os mais empregados na indústria por causa de sua facilidade e simplicidade de sintonia dos parâmetros, foram elaborados para atender diversos tipos de sistemas com baixo custo.

De acordo com Garcia (2018) os controladores podem ser baseados em um modelo de segunda ordem, que é formado por compensadores proporcionais (P), derivativo (D) e integrativo (I).

Para que se obtenha um resultado satisfatório deve-se realizar a sintonia fina, ou seja, o ajuste dos parâmetros do PID no sistema em que será inserido. A função de transferência que representa o controlador é representada pela equação 7:

$$U(s) = Kp + \frac{Ti}{s} + Tds \quad (7)$$

Onde:

$u(s)$ = Função de transferência

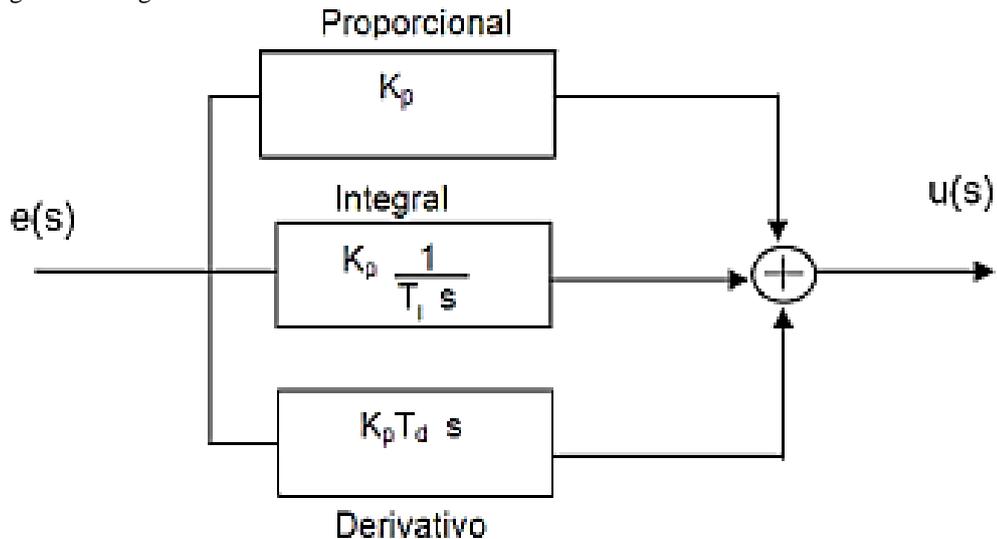
Kp = Ganho proporcional

$\frac{Ti}{s}$ = Ação integrativa

Td = Ação derivativa

A Figura 8 representa o diagrama de blocos do controlador PID:

Figura 8 - Diagrama de bloco do controlador PID.



Fonte: (SINTONIA DO COMPENSADOR PID, 2004).

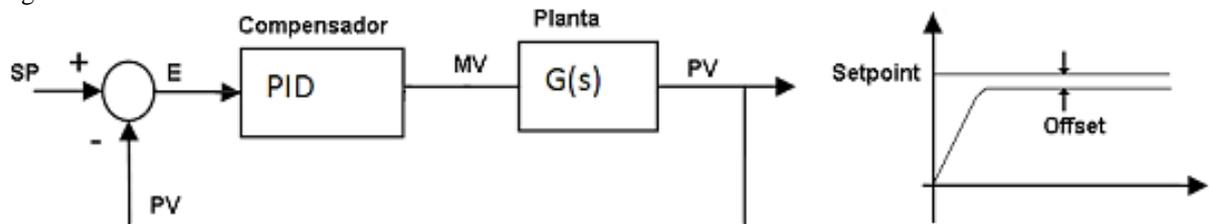
Utilizando somente o controle proporcional, o erro em regime estacionário será decorrente do valor de K_p , o K_p maior apresentará um erro menor em regime, mas deve ser ajustado, pois um ganho de K_p elevado apresentará uma grande alteração para um dado erro e uma baixa ação de controle.

A componente integral elimina o erro estacionário, mas piora o regime transitório e aumenta o tempo de acomodação, o que não é desejável.

Já a componente derivativa permite diminuir o tempo de acomodação, mas resulta num controlador delicado a ruídos e mudanças dos parâmetros.

O modo tradicional de implementar o controlador é mostrado na Figura 9.

Figura 9 - Sistema realimentado com PID.



Fonte: (CAMPOS, 2004).

Onde:

Setpoint: é o valor de referência que o processo deve alcançar.

P V: é a variável do processo, e é o valor que apresenta na saída do processo.

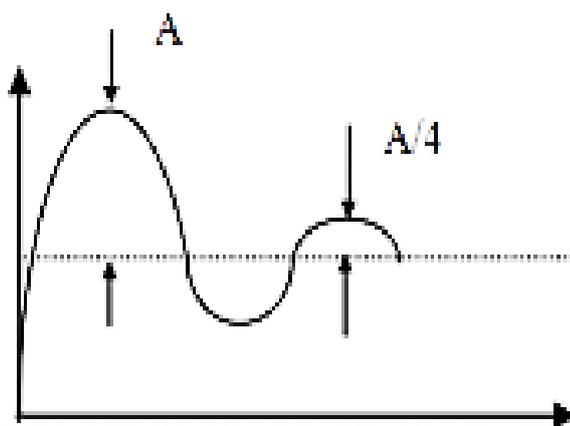
Offset: é o erro em regime permanente.

MV: é a Variável Manipulada, é a variável controlada pelo controlador.

2.4.1.1 Regras de sintonia do PID de Ziegler-Nichols para sistemas contínuos

A parametrização das componentes K_p, T_i e T_d , é conhecida como sintonia e se aplicam onde a planta é complexa dificultando seu modelo exato, sendo que as regras de sintonia auxiliam a alcançar uma resposta otimizada, obtendo um decaimento de 25% em malha fechada através das regras de sintonia de Ziegler-Nichols, conforme a Figura 10.

Figura 10 - Decaimento em malha fechada.



Fonte: (CAMPOS, 2004).

Para realizar a sintonia, primeiro deve-se encontrar a modelagem da planta, que na maioria das vezes pode ser caracterizada por um sistema de primeira ou segunda ordem.

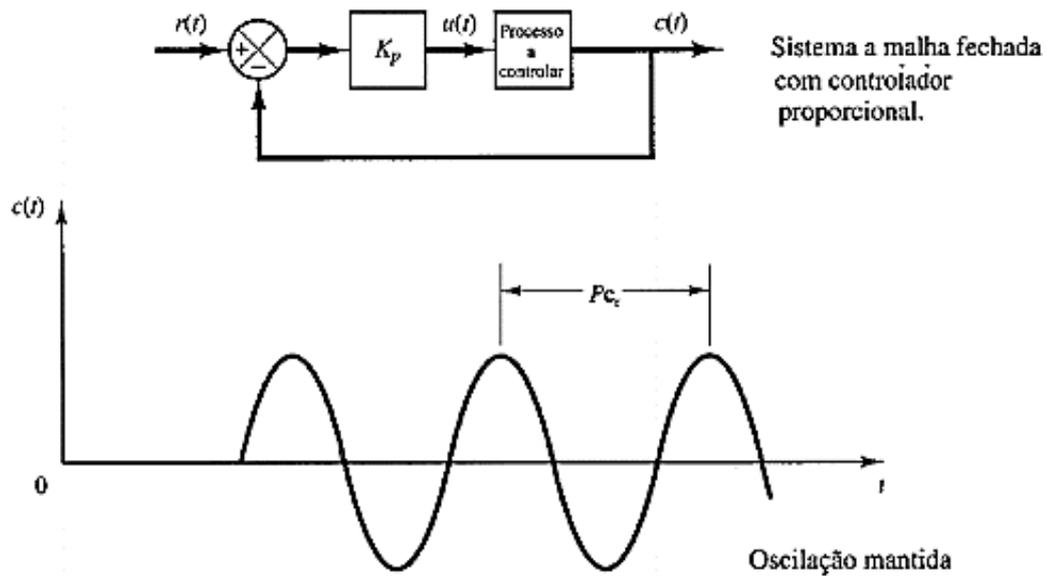
2.4.1.2 Sintonia PID pelo método em malha fechada

Para a aplicação da sintonia em um sistema de malha fechada, os valores de K_i e K_d são zerados, ampliando o ganho até o limite de estabilidade, a partir do qual o sistema em malha fechada começa a ficar instável.

Após levar o sistema a instabilidade é determinado os valores das variáveis para a realização da sintonia.

Dessa maneira, o valor de K que torna o sistema instável e oscilatório caracterizado por K_{cr} e o período de oscilação resposta do sistema é definido como P_{cr} , a Figura 11 mostra o comportamento de um sistema instável.

Figura 11 - Sistema instável.



Fonte: (CAMPOS, 2004).

Onde:

P_{cr} = período crítico

K_{cr} = ganho crítico, que conduz o sistema a instabilidade.

Através dos valores obtidos de K_{cr} e P_{cr} juntamente com o Quadro 1, pode-se obter os parâmetros do controlador PID

Quadro 1 - Regras de Ziegler Nichols em malha fechada

Tipo de controlador	Função de transferência	K_p	T_i	T_d
<i>P</i>	K_p	$0,5K_{cr}$	máximo	0
<i>PI</i>	$K_p(1 + \frac{1}{T_i s})$	$0,45K_{cr}$	$\frac{P_{cr}}{1,2}$	0
<i>PID</i>	$K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s)$	$0,6K_{cr}$	$0,5P_{cr}$	$0,125P_{cr}$

Fonte: CAMPOS, 2004.

Cada componente terá sua especificidade sobre o sistema conforme no Quadro 2.

Quadro 2 - Resumo das ações do controlador PID

	Tempo de subida	Sobressinal	Tempo de acomodação	Erro em regime permanente
Proporcional	Diminui	Aumenta	Pequenas mudanças	Diminui
Integral	Diminui	Aumenta	Aumenta	Elimina
Derivativo	Pequenas mudanças	Diminui	Diminui	Pequenas mudanças

Fonte: (SINTONIA DO COMPENSADOR PID, 2004).

Sendo que ainda:

- a) A componente proporcional (K_p): irá diminuir o tempo de subida, não eliminando o erro em regime permanente;
- b) A componente integral (K_i): irá acabar com o erro em regime permanente, porém irá prejudicar a resposta transitória;
- c) A componente derivativa (K_d): irá melhorar a estabilidade do sistema, reduzindo o sobressinal, e aperfeiçoando a resposta transitória.

Depois de realizar a sintonia do controlador, pode ser necessário realizar a sintonia fina, que é uma apuração da resposta transitória e permanente de acordo com o que se deseja no processo com auxílio do Quadro 2.

3 PROCESSO DE ÍNDIGO DENIM

O processo de índigo é responsável por tingir e engomar os fios urdidos, que são fios provindos do processo anterior a “urdideira”, com uma grande metragem, colocados de forma paralela em um único rolo para alimentar a máquina de índigo DENIM.

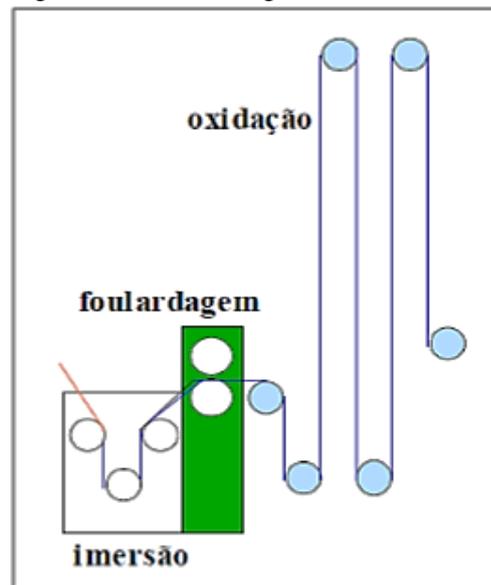
Ferreira (2011) esclarece que o processo de tingimento com azul índigo é utilizado desde a era cristã pelas civilizações asiáticas, sendo um dos pigmentos mais usados no mundo e muito popular em razão do jeans.

Atualmente, a maior parte deste pigmento utilizado é sintetizado com carboxifenila a uma temperatura de 200°C com hidróxido de sódio. O pigmento formado tem um ponto de fusão de 390°, não é solúvel em água, éter ou álcool. No entanto, o pigmento é solúvel no nitrobenzeno, ácido sulfúrico concentrado e clorofórmio, oxidando com muita facilidade quando entra em contato com o ar, obrigando a utilização de agentes redutores durante o processo de tingimento, como o Hidrossulfito de Sódio.

3.1 Tingimento

O tingimento dos fios de algodão exige algumas particularidades. A molécula do corante índigo é pequena e possui pouca compatibilidade com a fibra celulósica. A partir disso, para se obter uma boa eficiência de tingimento além da necessidade do corante ser reduzido, é necessário uma série de impregnações, prensagens, oxidação pelo ar após o processo de tingimento e do uso de alguns produtos específicos que melhoram a permeabilidade do corante pela fibra, para que seja possível alcançar uma tonalidade mais intensa. A quantidade de ciclos (impregnação, prensagem e oxidação), é determinada pela tonalidade de fio que se deseja. A Figura 12 representa um ciclo de tingimento:

Figura 12 - Ciclo de tingimento.

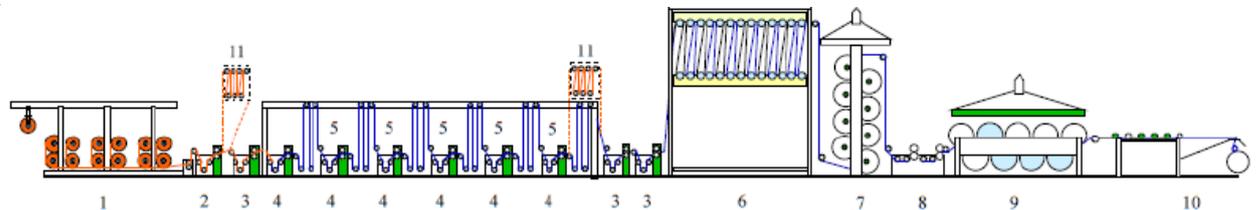


Fonte: (FERREIRA, 2011).

Será mostrado na Figura 13, a ilustração do processo de uma máquina de Índigo Denim. Contudo, é importante salientar que a máquina pode variar a sequência do processo.

Figura 13 - Esquemático de uma máquina de índigo denim.

(



Fonte: (LIMA; FERREIRA, 2011).

Onde:

- 1) Gaiolas das bobinas urdidas
- 2) Caixa de impregnação
- 3) Caixa de lavagem
- 4) Caixa de tingimento
- 5) Zona de oxidação
- 6) Acumulador
- 7) Secadeira
- 8) Caixa de goma
- 9) Secadeira da engomadeira
- 10) Cabeceira da engomadeira
- 11) Vaporizador (opcional)

3.1.1 Gaiola das bobinas urdidas

A gaiola das bobinas urdidas é uma estrutura para “segurar” os rolos oriundos da urdideira, conforme exposto na Figura 14:

Figura 14 - Gaiola das bobinas.



Fonte: o autor.

Contém estrutura metálica e um sistema de frenagem:

- a) Estrutura metálica: composta por mancais que sustentam os rolos oriundos da urdideira, e tem capacidade de 16 rolos;
- b) Sistema de frenagem: era composto por um sistema de frenagem pneumática com acionamento manual, para liberar mais ou menos ar comprimido, para os pistões onde estão as sapatas de freio, sistema em que foi implantado o sistema de malha fechada.

3.1.2 Caixa de umectação

Na caixa de umectação é onde ocorre o início do processo de tingimento do fio com o corante preto, à base de enxofre. Normalmente, este corante é posto sobre o fio antes do corante azul (índigo). A Figura 15 mostra a caixa de umectação:

Figura 15 - Caixa de umectação.



Fonte: o autor.

A umectação tem a função de aumentar o brilho e melhorar a infiltração no fio ao banho de tingimento reduzindo de 25 a 30% de índigo no tingimento (MESQUITA, 2017).

3.1.3 Caixa de lavagem

A caixa de lavagem é onde se faz a lavagem dos fios com água, para retirar possíveis resíduos presentes na superfície da fibra. A Figura 16 mostra a caixa de lavagem.

Figura 16 - Caixa de lavagem/limpeza.



Fonte: o autor.

A lavagem tem um grande impacto na qualidade final do tecido, levando em consideração que a presença de resíduos pode gerar manchas (MESQUITA, 2017).

3.1.4 Caixa de tingimento

A caixa de tingimento é a etapa em que o corante índigo entra em contato com o fio em diversos ciclos de tingimento, podendo ser preciso realizar vários ciclos dependendo da tonalidade de artigo desejado. A Figura 17 mostra a caixa de lavagem.

Figura 17 - Caixa de tingimento.



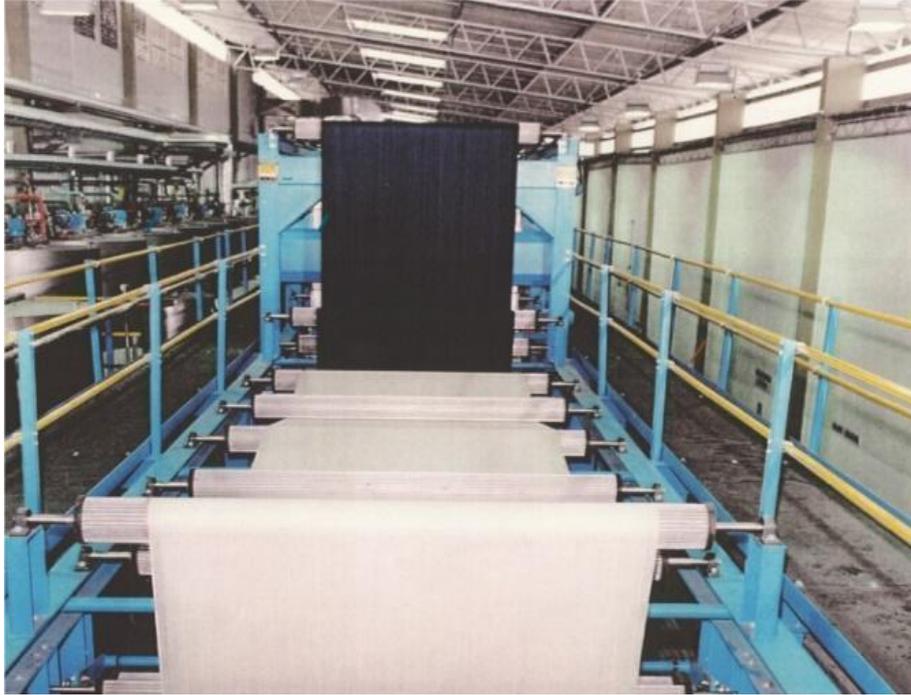
Fonte: o autor.

E para que se tenha eficiência nessa etapa é preciso controlar as concentrações de índigo em cada caixa durante o tingimento (MESQUITA, 2017).

3.1.5 Zona de oxidação

Após a passagem em cada caixa de impregnação os fios são expostos ao ar livre para que o índigo fixe sobre os fios. Esta etapa se chama oxidação. A Figura 18 mostra como é este processo.

Figura 18 - Zona de oxidação.



Fonte: o autor.

Além da fixação do tingimento nos fios a oxidação é utilizada para reestabelecer a forma insolúvel dos corantes (MESQUITA, 2017).

3.1.6 Acumulador

O acumulador é uma estrutura da máquina que permite através do acionamento de uma unidade hidráulica, o acúmulo de até 120 metros de fio caso seja necessário parar o campo seco, sem que pare o tingimento dos fios evitando manchas. A Figura 19 mostra o acumulador.

Figura 19 – Acumulador.



Fonte: o autor.

Segundo Amadio e Bergamasco (2012) para acumular 120 metros de fios o acumulador dura em torno de 5 minutos.

3.1.7 Secadeira do Índigo

Após o tingimento a secagem dos fios é feita a temperaturas elevadas na estrutura mostrada na Figura 20.

Figura 20 - Secadeira do Índigo.



Fonte: o autor.

Essa secagem tem a finalidade de deixar o fio em torno de 6 a 7% de umidade melhorando a absorção de goma na próxima etapa do processo (MESQUITA, 2017).

3.1.8 Caixa de goma

Os fios são mergulhados em uma caixa que contém goma, uma mistura homogênea podendo ser espessa, líquida ou viscosa quando aquecida e se torna elástica e sólida quando aquecida. A Figura 21 mostra a caixa de goma.

Figura 21 - Caixa de goma.



Fonte: o autor.

Esta etapa é importante para fortalecer o fio para o processo de tecelagem, impedindo-o de romper com facilidade (MESQUITA, 2017).

3.1.9 Secadeira da engomadeira

Esta etapa é responsável pela secagem dos fios após o processo de engomagem. Logo no início, os fios passam por cilindros aquecidos a 105°C, onde há uma separação dos fios em duas mantas, proporcionando um melhor encapsulamento da goma no fio e auxiliando a separação dos fios na manta.

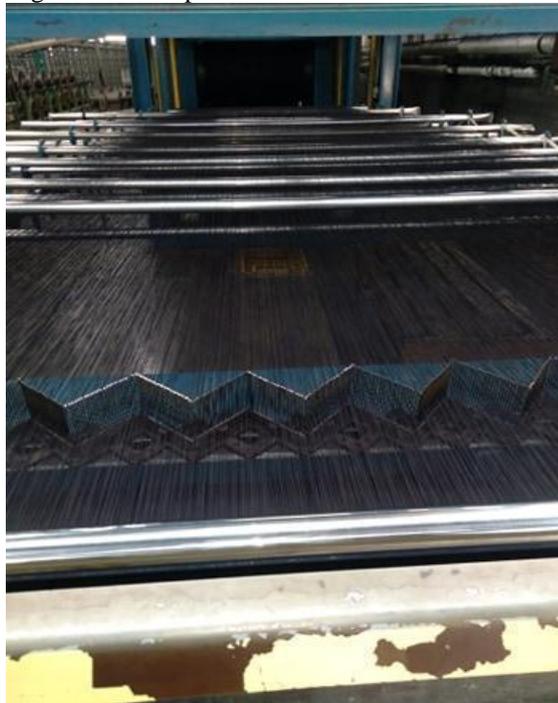
O ideal é que após a secagem os fios estejam com a umidade entre 10 e 12%. A secadeira após a caixa de goma tem a mesma estrutura física da secadeira de índigo.

3.1.10 Campo seco

No começo desta etapa, pode haver uma aplicação de cera sobre os fios, que tem a função de lubrificar a camada externa do fio, facilitando a abertura dos fios na vara e minimizando o atrito e pó na tecelagem.

A seguir a Figura 22, demonstra o campo seco:

Figura 22 - Campo seco.



Fonte: o autor.

As varas de separação cilíndrica tem a função de separar individualmente os fios, garantindo um posicionamento uniforme dos fios no rolo de urdume, ajudando na agrupagem deles.

4 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O mercado está saturado de instrumentos e sensores que permitem a coleta e armazenamento de dados, porém com custo elevado. Diante desta situação, foi desenvolvido um sistema de aquisição de dados com um preço acessível.

O dispositivo desenvolvido foi baseado na plataforma Arduino *UNO*, dois sensores de tensão *DC*, um transdutor de pressão de *0-16 BAR* com uma saída analógica de 0-10 volts, um módulo leitor de cartão *SD* Arduino, uma fonte de alimentação, uma memória *SD* de 8GB, onde os dados foram gravados.

4.1 Arduino

A primeira placa Arduino foi lançada em 2005, na Itália com o objetivo de auxiliar estudantes em prototipagens. Ao longo do tempo tornou-se largamente utilizada no meio acadêmico e em grandes corporações (ARDUINO, 2018).

O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica, que possui um microprocessador, pinos *I/O* e memória interna. O *hardware* e *software* são códigos abertos (*open source*) que os concedem que sejam utilizados para diversas finalidades.

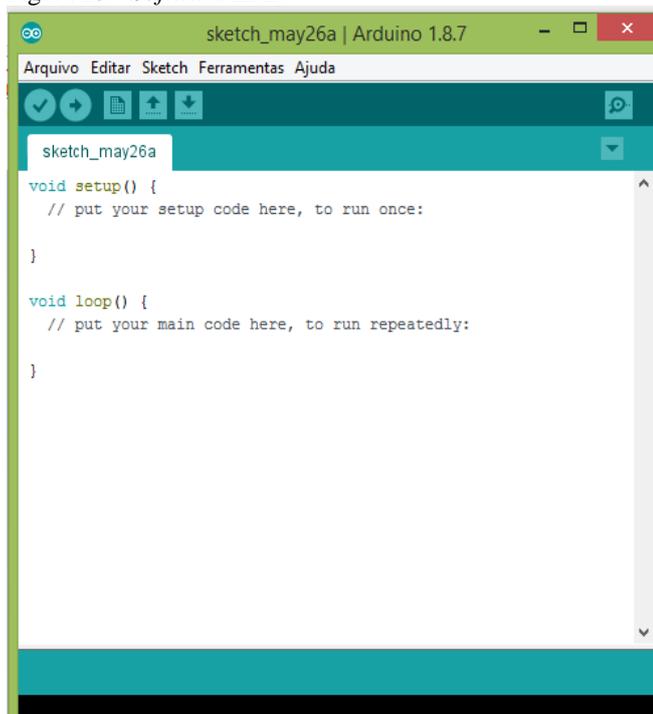
De acordo com a Zanini(2020), para que um *software* seja considerado código aberto(*open source*) existem alguns critérios:

- a) Sem discriminação das áreas de empreendimentos;
- b) Direito de licença para distribuição dispensando a necessidade de licenças;
- c) Integridade autoral do código fonte;
- d) Sem discriminação de grupos ou pessoas;
- e) A licença não pode estar ligada a um produto específico;
- f) A licença não pode restringir outros softwares;
- g) Distribuição livre;
- h) Código fonte sempre deve estar aberto;
- i) Permissão a modificações e trabalhos derivados.

Zanini (2020) ainda afirma que o conceito de código aberto é que os programadores podem ler, modificar, compartilhar o código, realizar ajustes, adequações e correções que têm como efeito uma evolução do programa.

A programação é realizada através do *software* Integrated Development Environment (IDE) em linguagem C ++. Com o cabo USB faz-se o upload, que é a ação de enviar arquivos do computador para o Arduino neste caso, que por sua vez realiza os comandos programados interagindo com o que estiver conectado a ele. A Figura 23 apresenta o *software* IDE:

Figura 23 - *Software* IDE.



Fonte: o autor.

O Arduino disponibiliza uma fonte de alimentação que pode ser usada por outros dispositivos (sensores, atuadores) de 3,3 Volts (V), 5 V e GND.

Para utilizar o Arduino basta conectá-lo ao computador através de um cabo USB.

4.2 Arduino UNO

O Arduino UNO possui 14 entradas I/O digitais e 6 entradas analógicas, 4 portas seriais, cristais osciladores de 16MHz, uma conexão USB, um *power jack*, pinos de ICSP e um botão de *reset*, além do *hardware* e *software* serem *open source*. (FERRONI, et al., 2014).

A Figura 24 apresenta o Arduino UNO:

Figura 24 - Arduino UNO.



Fonte: (ARDUINO, 2018).

Abaixo seguem as especificações fornecidas pela fabricante Arduino.CC:

Quadro 3 - Especificações fornecidas pela fabricante Arduino CC

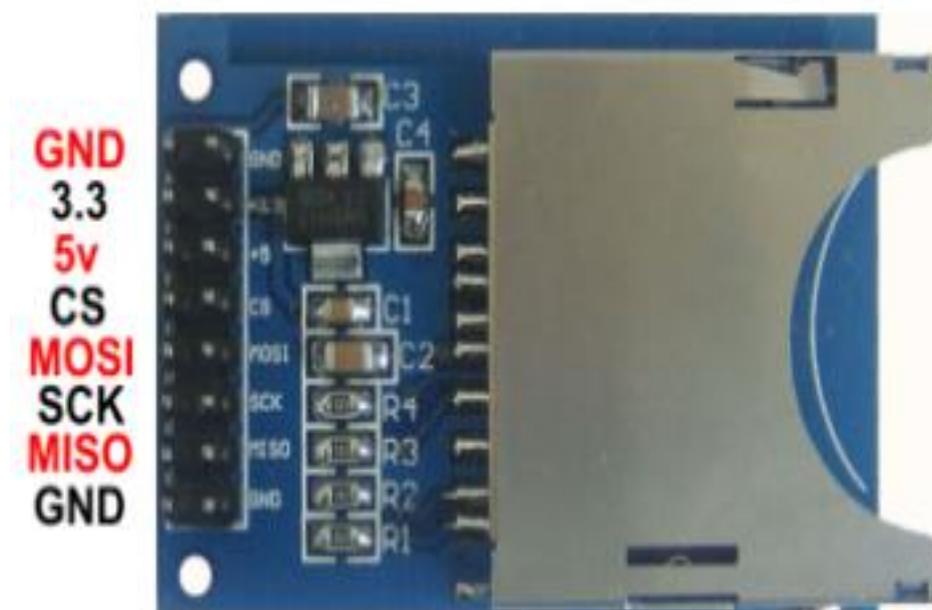
Microcontrolador	ATmega328P
Tensão operacional	5V
Tensão de entrada (recomendado)	7-12V
Tensão de entrada (limite)	6-20V
Pinos de E / S digitais	14 (dos quais 6 fornecem saída PWM)
Pinos de E / S digital PWM	6
Pinos de entrada analógica	6
Corrente DC por pino de I / O	20 mA
Corrente DC para pino de 3,3 V	50 mA
Memória flash	32 KB (ATmega328P) dos quais 0,5 KB usados pelo bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Velocidade do relógio	16 MHz
LED_BUILTIN	13
Comprimento	68,6 mm
Largura	53,4 mm
Peso	25 g

Fonte: ARDUINO, 2018.

4.3 Módulo Leitor Arduino SD.

É um módulo leitor de SD que pode acomodar uma memória SD com capacidade de 2, 4, 8, 16 ou 32 GB. Essa capacidade é uma quantidade de memória adequada para a maioria dos projetos, já que o formato de gravação é em texto. A Figura 25 apresenta o Módulo Leitor Arduino SD:

Figura 25 - Módulo Leitor Arduino SD.



Fonte: ARDUINO E CIA, 2015.

Além do mais possui um baixo consumo de memória, por exemplo: se 1.000 dados em formato de texto com quatro algarismos significativos, consomem somente cerca de 6 KB de memória. Se for considerado, que 16 dados por segundo serem contados ao usar uma memória de 8GB, armazenando dados por 1.000 dias, verifica-se que o leitor se torna muito eficiente, indicando ainda, que 8GB é uma boa quantidade de memória

4.4 Transdutor de pressão

O transdutor de pressão tem um elemento sensor piezoresistivo que converte a pressão aplicada pelo ar em sinal elétrico, onde é amplificado, linearizado e disponibilizado em sinal padronizado por uma eletrônica de alta confiabilidade construída com componentes em SMD. A Figura 26 apresenta o Transdutor de pressão:

Figura 26 - Transdutor de pressão.



Fonte: WARME, 2021.

O transdutor é a base do sistema de aquisição, pois é a partir dele que se inicia a medição da pressão pneumática do sistema de frenagem, convertendo um sinal físico em um sinal de tensão mensurável.

5 PROBLEMA NO PROCESSO DE ÍNDIGO DENIM

No início do processo da máquina de índigo na gaiola, onde ficam as 16 bobinas de fios urdidos, cada uma em torno de trinta mil a sessenta e sete mil metros de fios dependendo do processo, ocorria instabilidade no sistema de frenagem, em que acarretava oscilações no tensionamento dos fios.

Com a oscilação do freio e sua diminuição na pressão ocorria a diminuição do tensionamento dos fios, ocorrendo meada nos cilindros na caixa de impregnação e na caixa de goma, o que gerava nós e rupturas de fios no campo seco e a perda da sequência dos fios no pente. Quando ocorria este problema, era preciso reiniciar o processo, gerando uma perda de em torno de 320 metros de fios urdidos, tingidos e engomados.

Já quando oscilava e ocorria o aumento da pressão dos freios, ocorria o aumento do tensionamento dos fios, ocorrendo rupturas e/ou apresentava defeitos somente no processo posterior da tecelagem com fios sem tingimento e brilhantes nos rolos ou após tecer tecidos com diferentes tonalidades.

Abaixo, segue algumas falhas apontadas pela NBR 13378:2012, que podem ser ocasionadas devido ao tensionamento instável (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012):

- a) Faixa no urdume: fios com tonalidades diferentes se comparados aos demais da largura da manta, podendo ser provindos da variação de tensionamento entre os rolos na gaiola do índigo.
- b) Nó de urdume: destaque nos fios de urdume, emenda do fio mal executada, alterando o aspecto visual no tecido.
- c) Ruptura de urdume: é um defeito por conta do rompimento dos fios de urdume. Mesmo retirando as pontas soltas, o tecido ainda apresentará um defeito visual em sua estrutura, ou seja, quando os fios são rompidos na máquina índigo, é realizada a emenda com nós e no processo posterior de tecer o tecido apresenta pontos com tonalidades diferentes ou até mesmo esbranquiçados, no local que houve o rompimento.
- d) Parada de máquina de tingir: faixas na manta com diferentes tonalidades, normalmente provocadas por paradas na máquina de tingir e os fios ficarem mergulhados nas caixas de impregnação.

5.1 Sistema de frenagem

O sistema de frenagem da gaiola foi projetado com um sistema de malha aberta para operar entre 0 e 6 Bar de pressão, podendo ser definido a margem de trabalho pela IHM, sendo que o processo começava pelo maior pressão e diminuindo de acordo com que os fios nas boninas da gaiola iriam diminuindo, sempre mantendo o tensionamento dos fios, sendo este controle feito através de uma válvula proporcional que recebia um sinal de 4-20mA do CLP (20mA é a pressão máxima de 6 Bar e 4 mA é a pressão mínima de 0 BAR) e também é definido um valor de pressão em caso de parada no processo para que não ocasione bambeamento dos fios, normalmente essa pressão é definida entre 4,5 a 6 BAR. Porém, esse sistema estava apresentando instabilidade durante o processo, ocasionando oscilações no tensionamento dos fios durante o processo devido o sistema não possuir uma realimentação, ocorrendo perda excessiva de matéria prima, qualidade e conseqüentemente reduzindo a produtividade.

Como a válvula proporcional não estava atendendo aos requisitos que o processo exigia (diminuir a pressão do freio proporcionalmente conforme a diminuição dos fios na bobina mantendo o tensionamento), ela foi retirada e a regulagem da pressão de freio estava sendo realizada manualmente pelos operadores através de um manômetro, dessa maneira o processo não estava ocasionando instabilidade, porém, não estava atendendo aos requisitos do processo, pois desta forma estava ocorrendo inconformidade no tensionamento dos fios, pois os operadores não conseguiam controlar a pressão do freio conforme o sistema exigia.

5.2 Proposta de solução

De acordo com os sistemas de frenagem que foram implementados e sem obtenção de resultados satisfatórios, a proposta deste trabalho foi a implantação de um sistema de frenagem de malha fechada.

De acordo com Ogata (2010), o uso de malha fechada com um coeficiente de amortecimento razoável, torna a resposta do sistema estável, mesmo em condições em que há variações internas e externas, utilizando apenas componentes acessíveis e de baixa precisão.

O sistema foi composto por:

- a) Controlador PID de processo Novus;
- b) Transdutor de pressão 0-10 Volts,
- c) Válvula proporcional

O sistema funcionou da seguinte maneira: o controlador recebeu o sinal analógico da válvula proporcional que foi retirada do sistema como sinal de referência, enviou um sinal de saída analógica para controlar a válvula proporcional (atuador) e o transdutor (sensor/realimentador), que foi fixado na linha de ar comprimido do sistema de frenagem converteu a pressão da linha para sinal analógico e enviou para o controlador. Por sua vez, o controlador realizou a somatória entre o valor de referência e do sensor e minimizou o erro atuante.

6 METODOLOGIA

O trabalho aplicou um controle de malha fechada em um sistema de frenagem industrial têxtil com intuito de melhoria no controle da pressão pneumática dos freios, que é um dos requisitos fundamentais para se obter um produto final padronizado e com qualidade.

O trabalho foi realizado em cinco etapas, conforme a descrição detalhada abaixo.

6.1 Primeira etapa

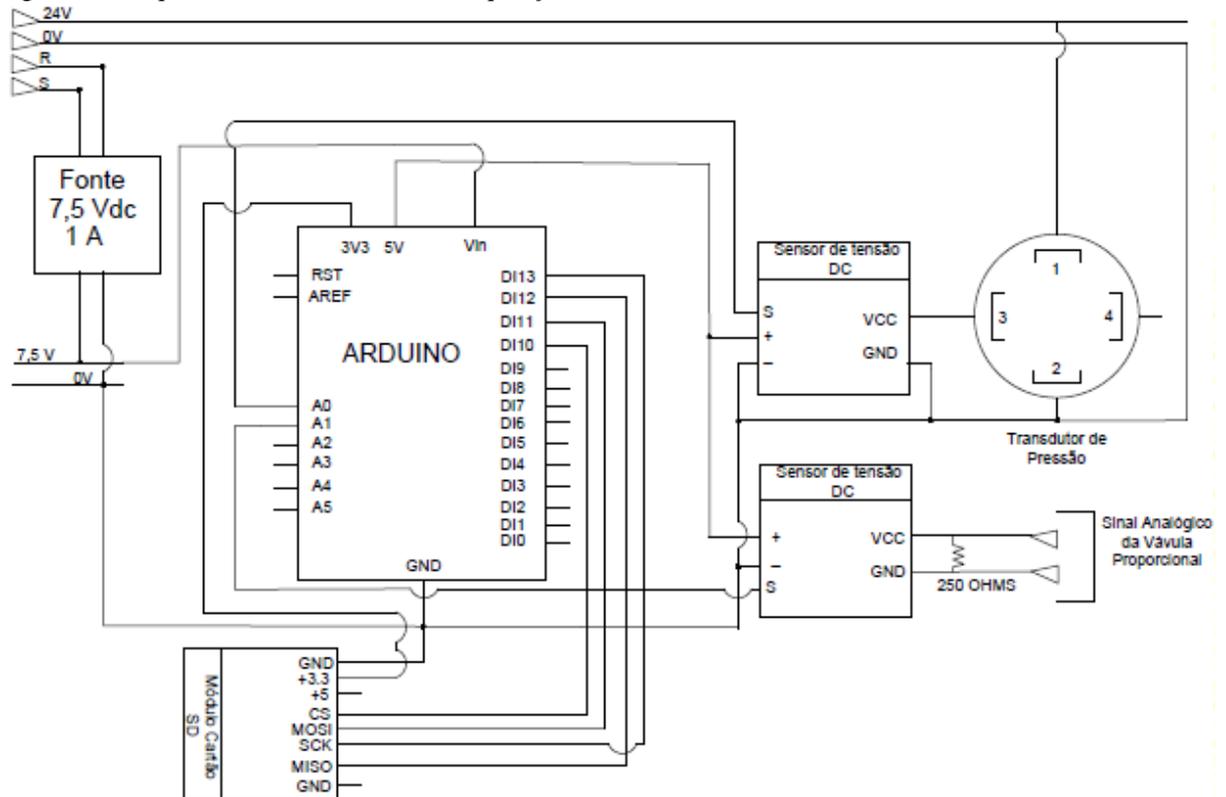
Nesta etapa foi coletado os dados do sinal analógico que são enviados para a válvula proporcional que foi retirada do sistema e da pressão pneumática que estava atuando sobre o sistema de frenagem, ambos do sistema que era controlado manualmente pelo manômetro.

A coleta de dados foi realizada pelo sistema de aquisição de dados, o sinal analógico que era destinado para a válvula proporcional, foi realizada por meio de um sensor DC em paralelo com um resistor de 250 ohms, que apresentou nos bornes do sensor uma tensão DC de 1 volt para 4 mA e 5 volts para 20 mA.

A leitura da pressão do sistema de frenagem foi realizada por um transdutor de pressão que foi inserido na linha atuante de pressão pneumática do sistema de frenagem e o sinal de saída analógica do transdutor foi conectado em outro sensor DC. Como a especificação do transdutor é de 0-10 volts com uma escala de 0-16 BAR, nos bornes do sensor DC, apresentou uma tensão de 0 volts para 0 Bar e alcançou até 3.75 Volts para 6 BAR.

Ambos os dados foram arquivados em um cartão de memória através da *shield* sd, por meio do microcontrolador Arduino. A Figura 27 representa o esquema elétrico do sistema de aquisição de dados.

Figura 27 - Esquema elétrico do sistema de aquisição de dados.



Fonte: o autor.

A montagem do sistema apresentada na Figura 28 foi realizada em uma caixa de passagem de PVC devido ao seu baixo custo e tamanho compacto para não prejudicar a locomoção dos operários na máquina ao ser instalada.

Figura 28 – Sistema de aquisição de dados.



Fonte: o autor.

A programação do arduino foi realizada no software IDE e o fluxograma que orientou a programação está sendo apresentado na Figura 51 no Apêndice A.

A coleta de dados realizada nesta etapa está no subcapítulo 7.1.

6.2 Segunda etapa

Na segunda etapa foi desenvolvido o modelo matemático dos componentes necessários para a implantação do sistema proposto e de acordo com a complexidade da modelagem do processo e a facilidade que o diagrama de blocos proporciona, a modelagem foi realizada de forma individualizada, onde cada componente representou um bloco no sistema de malha fechada.

A seguir será apresentado como foi realizado a modelagem matemática de cada componente

6.2.1 Controlador PID

De acordo com Campos(2004), a modelagem do controlador PID pode ser representada por um sistema de segunda ordem de acordo com a Equação 8, onde os valores dos parâmetros K_p , T_d e T_i foram definidos na 3ª etapa pelo método de Ziegler Nichols.

$$G(s) = K_p + \frac{T_i}{s} + T_d s \quad (8)$$

6.2.2 Válvula Proporcional

De acordo com Ogata (2010), funções de transferência de primeira ordem descrevem o comportamento da válvula proporcional representada pela Equação 9.

$$G(s) = \frac{k}{Ts+1} \quad (9)$$

Onde:

$G(s)$ = Função de transferência

K = Ganho do sistema

T = Constante de tempo

De acordo com a Fabricante da válvula proporcional reguladora de pressão Festo o tempo de resposta é de 550 milissegundos e o ganho proporcional do componente foi considerado igual a 1 para obter uma maior de *range* de controle proporcional com controlador PID, sendo assim a modelagem matemática da válvula proporcional é representada pela a Equação 10.

$$G(s) = \frac{1}{0,55s+1} \quad (10)$$

6.2.3 Transdutor de Pressão

Diniz *et al.*, 2003, descreve que o comportamento dos transdutores de pressão quando submetidos a um degrau de pressão é aparentemente com os sistemas de segunda ordem representado pela Equação 11.

$$G(s) = \frac{\omega^2 n}{s^2 + 2\xi\omega n s + \omega^2 n} \quad (11)$$

Onde:

$u(s)$ = Função de transferência

ωn = frequência natural de oscilação

ξ = coeficiente de amortecimento

Para definir os valores de ωn e ξ foi necessário utilizar algumas equações para sistemas de segunda ordem e considerado algumas particularidades do processo que permite um máximo de sobressinal (MP) de 12,5 % sem que prejudique o produto final e requer um tempo de 1 segundo para que o sistema alcance o valor de 87,5% do set point, mas como a intenção da implantação do sistema era de melhoria foi considerado um máximo sobressinal de 8,5% e um tempo de pico de 0,386 segundos.

Então, para realizar a modelagem do transdutor de pressão, primeiramente foi necessário encontrar a frequência de oscilação em regime transitório (ωd), através da Equação 12.

$$TP = \frac{\pi}{\omega d} \quad (12)$$

Onde:

TP= Tempo de pico

$\pi = 3,14$

ωd = Frequência oscilatória na transição

Substituindo os valores na fórmula, temos:

$$0,386 = \frac{\pi}{\omega d}$$

Resultando em uma frequência oscilatória transitória de 8,12 rad/s.

Em seguida foi preciso calcular o coeficiente de amortecimento (ξ) utilizando a Equação 13, que demonstra como deve ser o comportamento da resposta do sistema.

$$MP = \rho^{-\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\pi} \quad (13)$$

Onde:

MP= Máximo sobressinal

ξ = coeficiente de amortecimento

A seguir o cálculo detalhado para definir o valor de ξ .

$$0,085 = \rho^{-\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\pi}$$

$$(0,83 = \rho^{-\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\pi}) \ln$$

$$[(-2,46)^2 = (-\frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}\pi)^2]$$

$$6,05 = \frac{\xi^2\pi^2}{1-\xi^2}$$

$$6,05 - 6,05\xi^2 = \xi^2\pi^2$$

$$\xi^2(\pi^2 + 6,05) = 6,05$$

$$\xi = \frac{6,05}{\pi^2 + 6,05}$$

$$\xi = 0,38$$

Definido os valores de ω_d e ξ é possível encontrar o ω_n , por meio da Equação 14.

$$\omega_n = \frac{\omega_d}{\sqrt{1-\xi^2}} \quad (14)$$

Desenvolvendo a Equação 16, temos:

$$\omega_n = \frac{8,12}{\sqrt{1-0,38^2}}$$

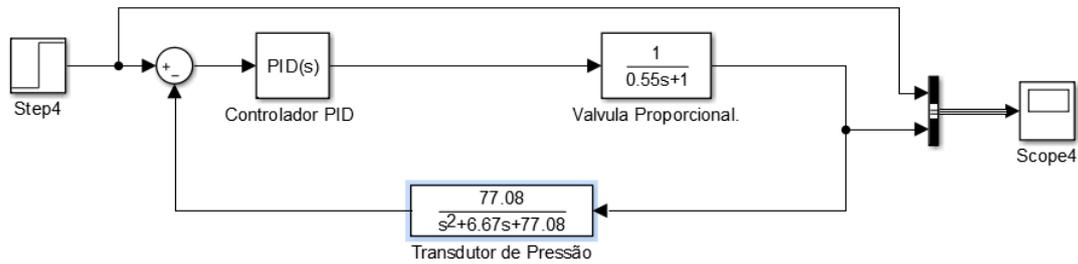
$$\omega_n = 8,78 \text{ rad/s}$$

Definidos os valores de ω_n , ω_d e ξ , foi possível descrever a modelagem matemática do transdutor de pressão conforme a Equação 15.

$$U(s) = \frac{77,08}{s^2 + 6,67s + 77,08} \quad (15)$$

Com todos os componentes modelados matematicamente, foi desenvolvido o sistema de malha fechada de frenagem em um diagrama de blocos conforme a Figura 29.

Figura 29 – Diagrama de blocos do sistema de frenagem proposto.



Fonte: o autor.

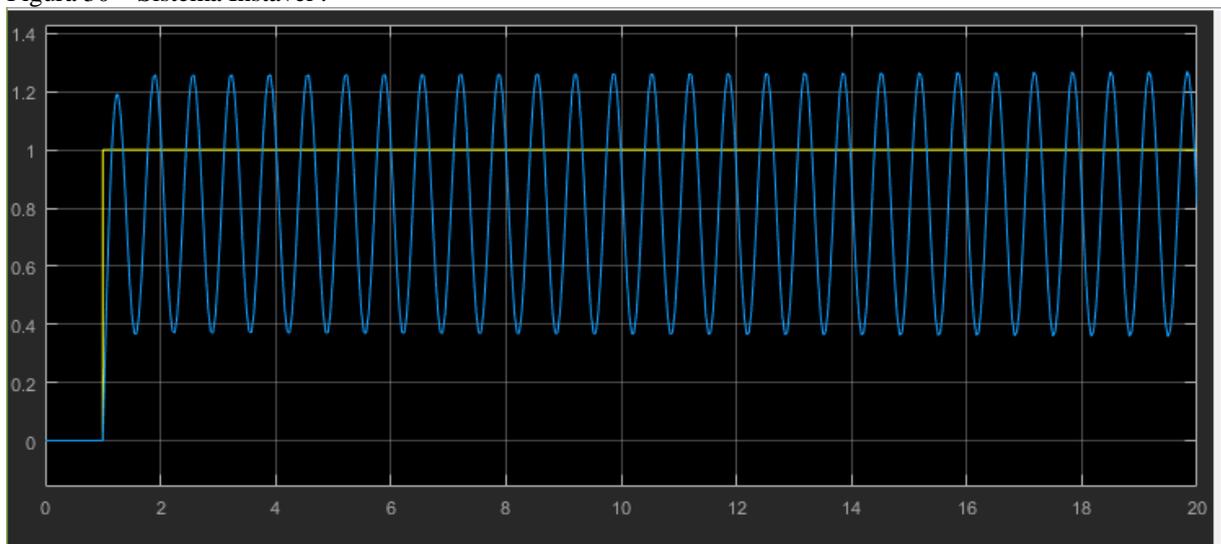
6.3 Terceira etapa

Com a modelagem do sistema de frenagem de malha fechada, nesta etapa foram realizados os testes computacionais na plataforma *Simulink-Matlab* para validação do sistema de acordo com os requisitos que o processo exige, uma resposta rápida com um sobressinal máximo de 8,5%, com um tempo de subida 0,386 segundos com uma acomodação em regime permanente de 5%.

Para realizar os testes computacionais primeiramente foi necessário definir os parâmetros do controlador PID pelo método de Ziegler Nichols.

O primeiro passo no método de Ziegler Nichols foi definir o ganho crítico (K_{cr}) e o período crítico (P_{cr}), o sistema de malha fechada proposto pela plataforma *Simulink*, zerando as componentes integral e derivativa e arbitrando valores para o ganho proporcional até levar o sistema a instabilidade conforme a Figura 30.

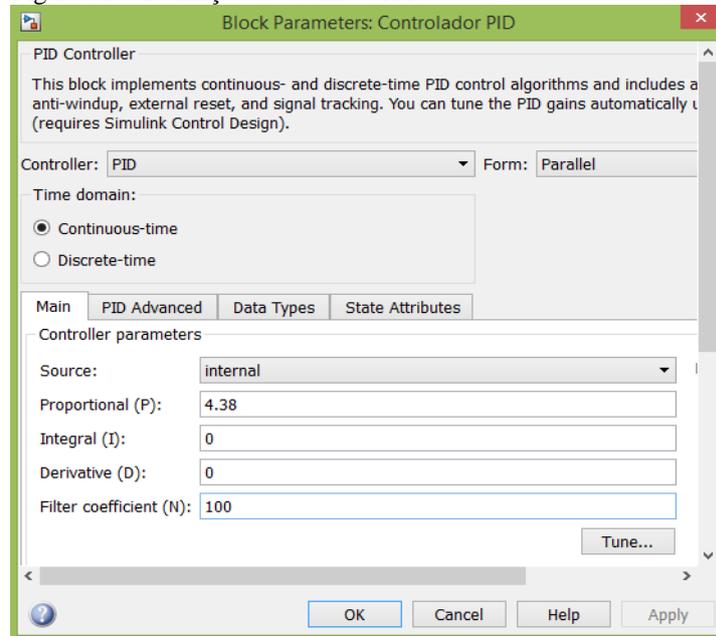
Figura 30 – Sistema Instável .



Fonte: o autor.

O valor do ganho proporcional de 4,38 conforme a Figura 31, que levou o sistema à instabilidade, foi definido como ganho crítico (K_{cr}).

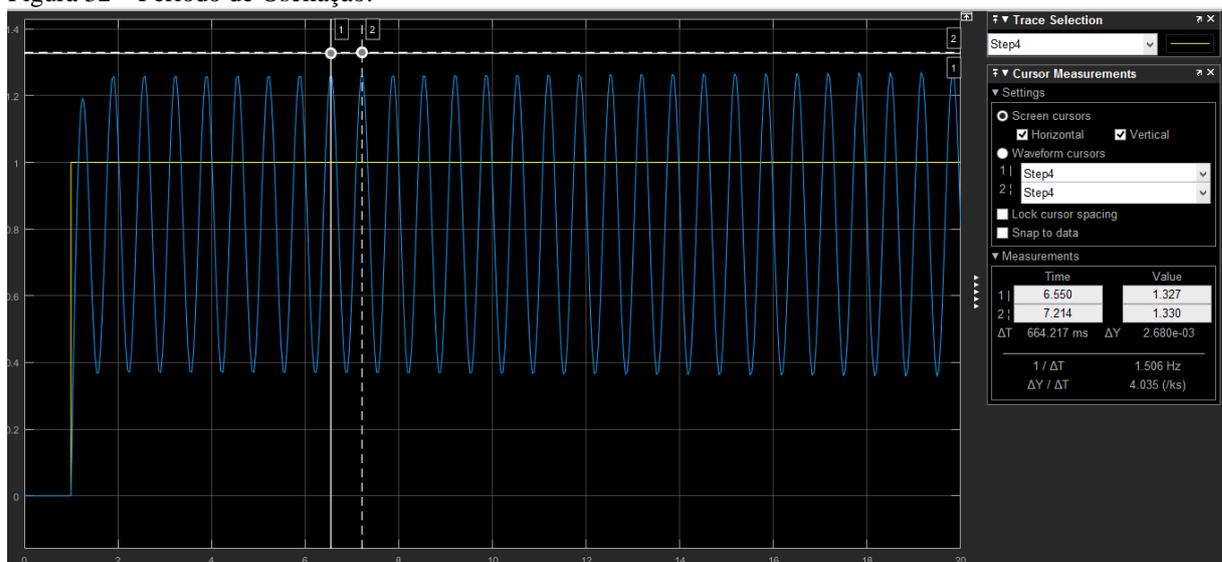
Figura 31 – Definição do Ganho Crítico.



Fonte: o autor.

E o período de oscilação da resposta do sistema de 664 milissegundos conforme a Figura 32, foi definido como período crítico (P_{cr}).

Figura 32 – Período de Oscilação.



Fonte: o autor.

Com o K_{cr} e P_{cr} definidos e através das regras de Ziegler Nichols para sistemas de malha fechada apresentado no Quadro 1, foi definido os parâmetros do controlador conforme apresentado no Quadro 4

Quadro 4 – Parâmetros do controlador pelo método de Ziegler Nichols

Ganho proporcional	2,628
Integral	0,232
Derivada	0,058

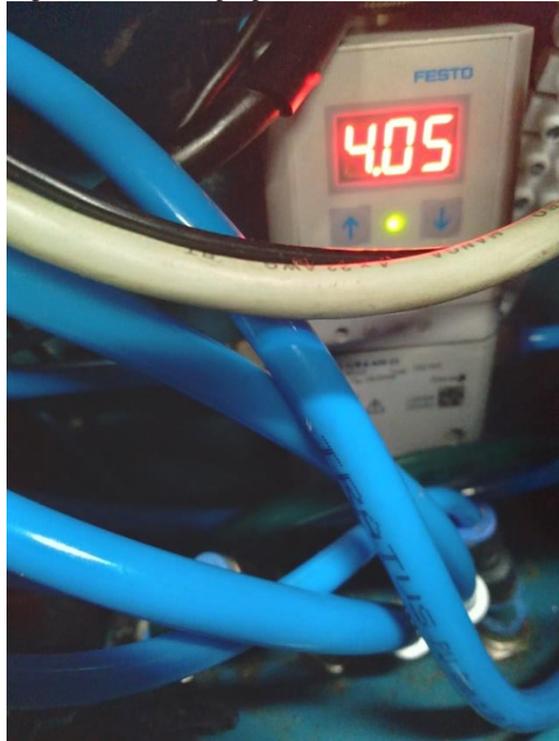
Fonte: o autor.

A resposta do sistema obtido através dos valores dos parâmetros pelo método de Ziegler Nichols e posteriormente a sintonia fina foi apresentado no subcapítulo 7.2.

6.4 Quarta etapa

Nesta etapa foi implantado o sistema de frenagem na máquina, devido o seu processo não aceitar paradas foi realizado durante o *setup* de rolos na gaiola e para isso foi desenvolvido o esquema elétrico do sistema de frenagem em malha fechada conforme apresentado na Figura 33.

Figura 35– válvula proporcional.



Fonte: o autor.

O transdutor de pressão foi fixado na gaiola dos rolos, conforme a Figura 36.

Figura 36–Transdutor de Pressão.



Fonte: o autor.

Após implantado o sistema, foi parametrizado o controlador pid conforme os valores obtidos na sintonia fina.

6.5 Quinta etapa

Na quinta e última etapa foram coletados a pressão de frenagem e do sinal analógico do sistema de frenagem de malha fechada implantado com o mesmo sistema de aquisição de dados utilizado na primeira etapa e o mesmo fluxograma de orientação de programação da Figura 51 apresentada no Apêndice A, e os resultados foram exibidos no subcapítulo 7.3.

Para analisar a resposta transitória do sistema de frenagem de malha fechada através dos dados obtidos foi utilizada a Equação 16.

$$\text{Resposta transitória} = 1 + \left(\frac{-SAB+PA}{SAB} \right) \quad (16)$$

Onde:

SAB Sinal analógico convertido em BAR

PA = Pressão atuante nos freios

E a resposta permanente também conhecida como *offset* foi utilizada a Equação 17.

$$\text{Offset} = \left(\frac{-SAB+PA}{SAB} \right) \times 100 \quad (17)$$

Onde:

SAB Sinal analógico convertido em BAR

PA = Pressão atuante nos freios

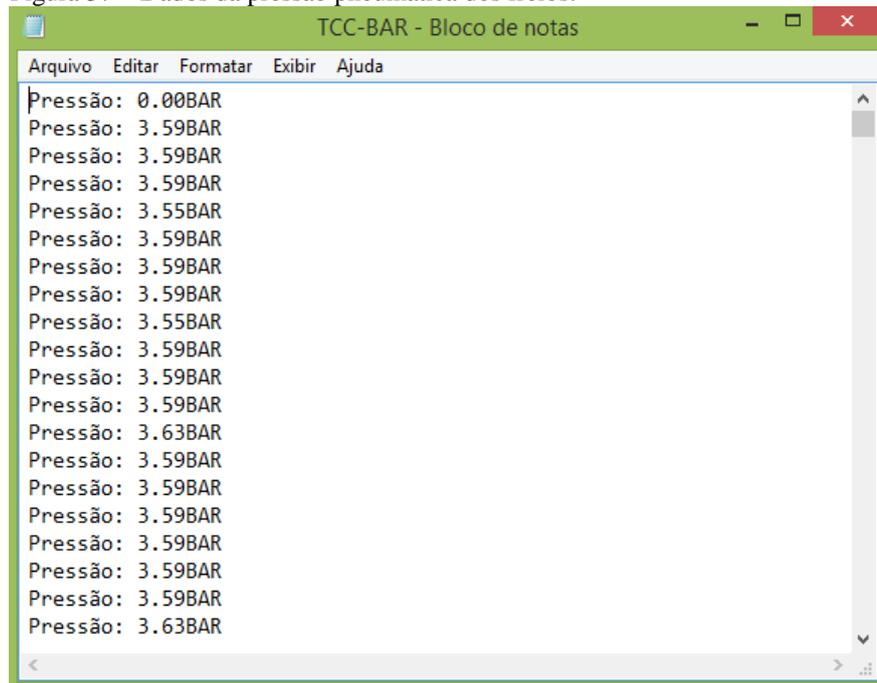
7 RESULTADOS

Os resultados obtidos com o estudo realizado neste trabalho foram divididos em três etapas, em que a primeira representa a coleta de dados do sistema de frenagem sendo controlada manualmente pelos operadores, a segunda etapa representa a simulação do sistema de malha fechada na Plataforma *Simulink* e a sua validação e a terceira representa a coleta de dados do sistema de frenagem de malha fechada.

7.1 Primeira etapa

Neste subcapítulo foram apresentados os dados no sistema controlado manualmente pelos operadores, onde a Figura 37 representa a coleta de dados da pressão pneumática dos freios.

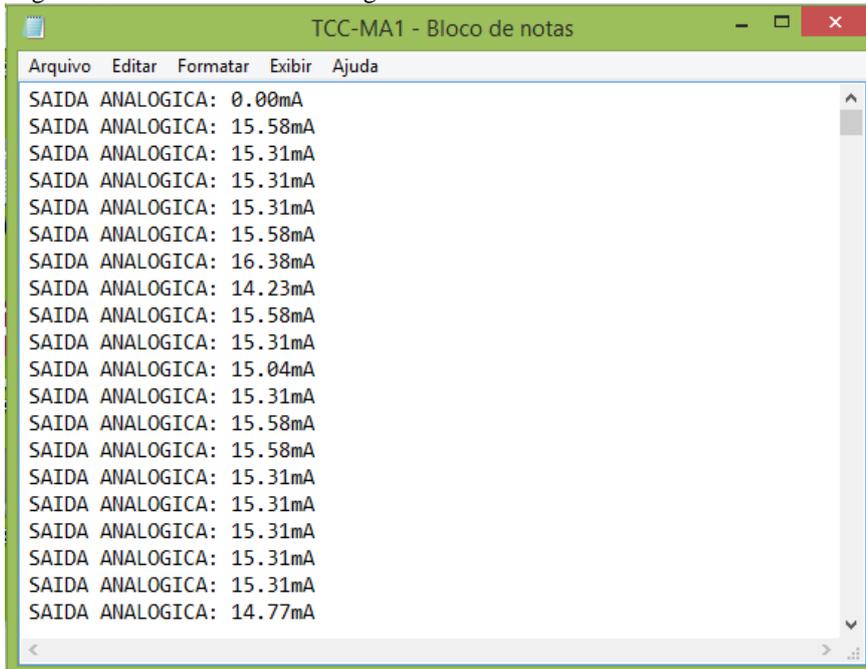
Figura 37 – Dados da pressão pneumática dos freios.



Fonte: o autor.

E a Figura 38 representa a coleta de dados do sinal analógico que era destinado para a válvula proporcional.

Figura 38 – Dados do sinal analógico.



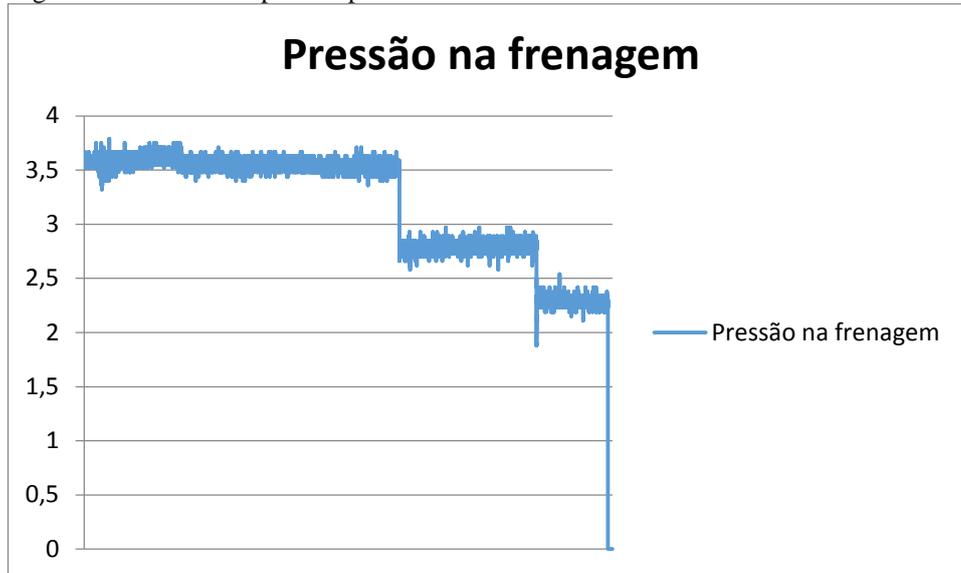
Fonte: o autor.

Os dados coletados foram inseridos no Excel® para serem apresentados em forma de gráficos, e o sinal analógico que estava em *mA* foi convertido para BAR através da Equação 8

$$Press\tilde{a}o = (Sinal\ anal\tilde{o}gico\ coletado - 0,004) \times 250 \times 1,5 \quad (8)$$

A press\tilde{a}o em BAR foi definida pelo sinal anal\tilde{o}gico coletado subtra\tilde{i}do por quatro devido o sinal ser de 4-20 mA, iniciando o sinal em 4mA e resultando em 16 mA de controle, ent\tilde{a}o multiplicou-se por 250 que representa o resistor em paralelo com sinal anal\tilde{o}gico no sensor DC e por fim multiplica-se por 1,5 que representa o fator de escala que para cada 1 volt equivale 1,5 bar de press\tilde{a}o. A Figura 39 representa o gr\tilde{a}fico dos dados obtidos da press\tilde{a}o pneum\tilde{a}tica dos freios.

Figura 39 – Gráfico da pressão pneumática dos freios.

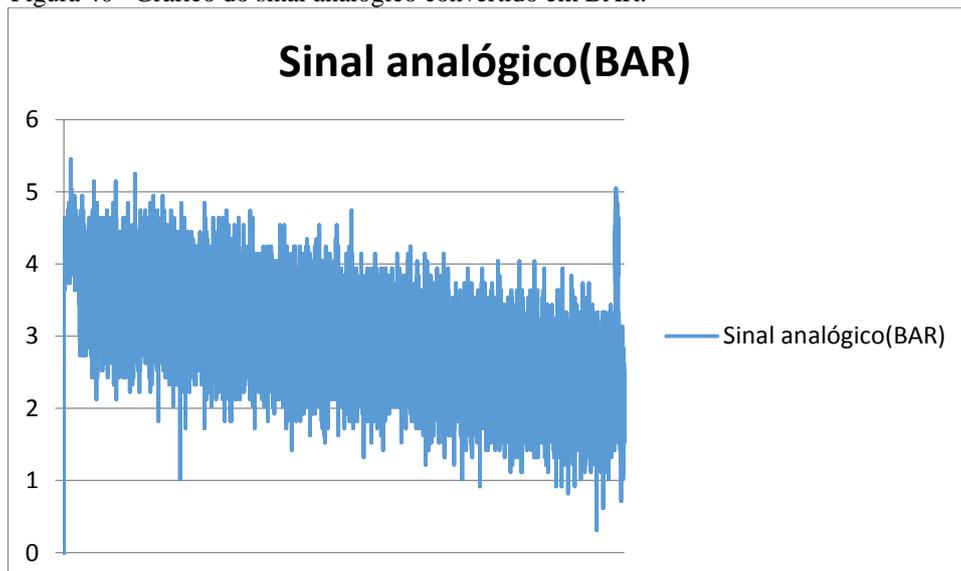


Fonte: o autor.

Através do gráfico da pressão pneumática dos freios, ficou evidente que os operadores realizaram apenas duas vezes a regulagem da pressão dos freios através do manômetro durante todo o processo, ocasionando inconformidade no tensionamento dos fios prejudicando a produtividade e qualidade do processo.

A Figura 40 representa o gráfico do sinal analógico que foi convertido em Bar para melhor análise.

Figura 40 –Gráfico do sinal analógico convertido em BAR.



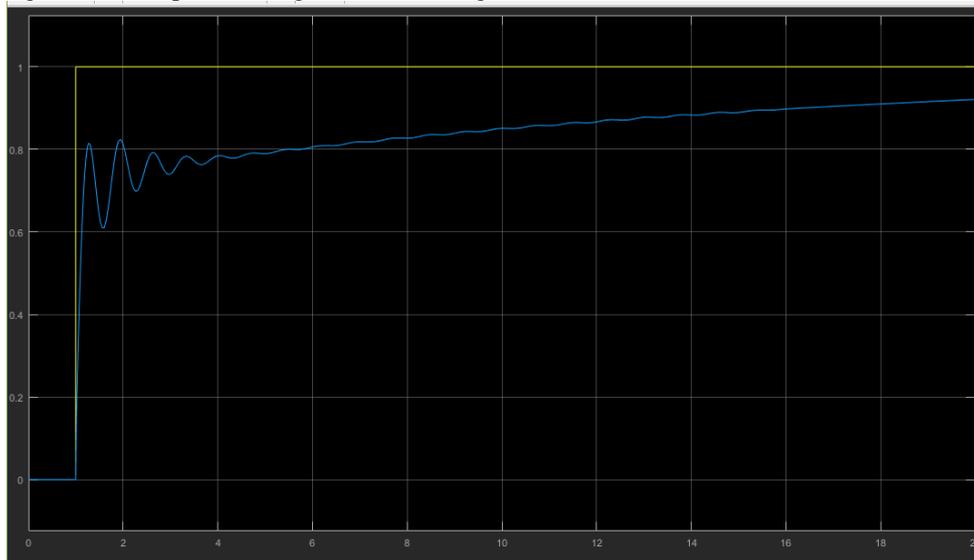
Fonte: o autor.

Os dados do sinal analógico que era destinado para a válvula proporcional está com uma amplitude alta e oscilatória, pois está tentando realizar a correção do tensionamento dos fios à medida que os fios diminuem na bobina.

7.2 Segunda etapa

Para a validação do sistema foram realizadas simulações na plataforma *simulink* com os valores dos parâmetros definidos pelo método de Ziegler Nichols, o sistema apresentou a resposta ao degrau unitário conforme apresentado na Figura 41.

Figura 41 – Resposta ao degrau unitário(Ziegler Nichols).

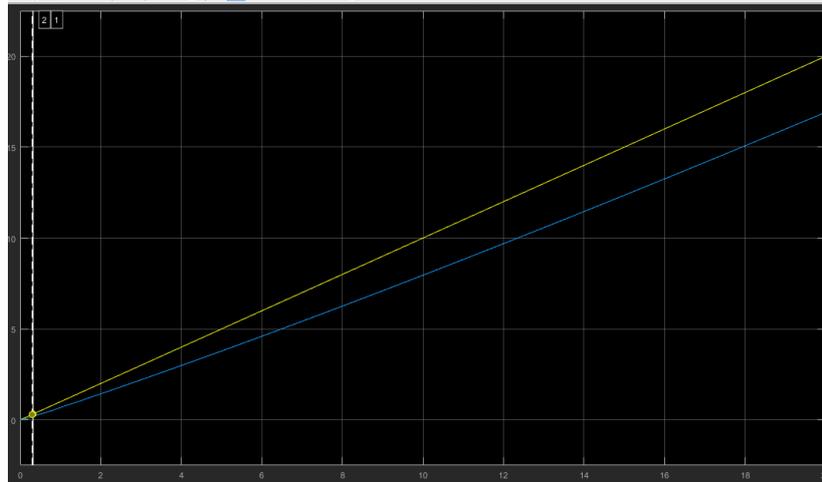


Fonte: o autor.

O sistema com os parâmetros definidos pelo método de Ziegler Nichols não atendeu aos requisitos do processo, apresentou uma resposta transitória oscilatória não alcançando o valor de *setpoint*.

E a resposta do sistema submetido a rampa unitária mostrada na Figura 42.

Figura 42 – Rampa unitária(Ziegler Nichols).



Fonte: o autor.

O sistema não se acomodou em 5% e diverge mais com o passar do tempo.

Como o sistema não atendeu aos requisitos pelo método de Ziegler Nichols, foi necessário realizar a sintonia fina com o auxílio do Quadro 2 resumo das ações do controlador PID, obtendo os seguintes parâmetros apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 – Parâmetros do controlador pelo método de sintonia fina

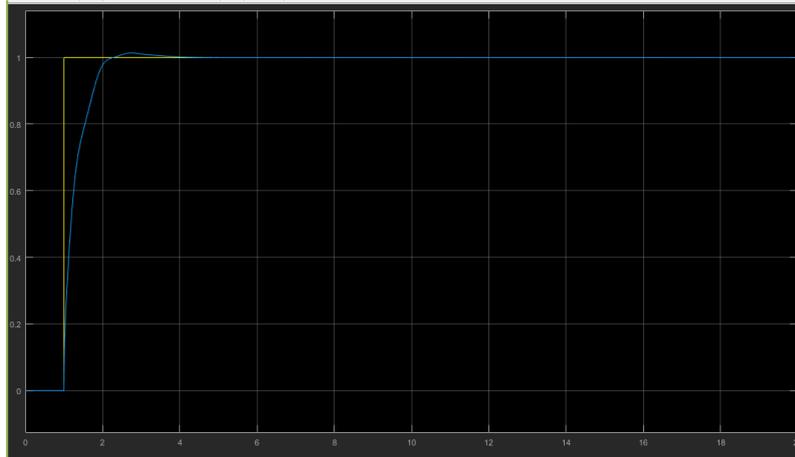
Ganho proporcional	1,35
Integral	2,8
Derivada	0,058

Fonte: o autor.

Na sintonia fina, o ganho proporcional foi reduzido para minimizar a oscilação na resposta transitória, a componente integral foi aumentada para melhorar a resposta em regime permanente já que o *offset* estava aumentando no decorrer do processo e esta componente tem uma velocidade em sua ação proporcional ao erro e a componente derivativa foi mantida.

Após a sintonia fina, o sistema respondeu ao degrau unitário conforme a Figura 43.

Figura 43– Resposta ao degrau unitário (Sintonia fina).



Fonte: o autor.

Com a sintonia fina o sistema apresentou uma resposta transitória sem oscilação com um sobressinal de 0,2%, com 0,7 segundos alcançou o 87,5% do *set point* e com 1 segundo o sistema alcançou 98%.

O sistema com uma entrada a rampa unitária se comportou conforme a Figura 44.

Figura 44– Resposta rampa unitária (Sintonia fina).



Fonte: o autor.

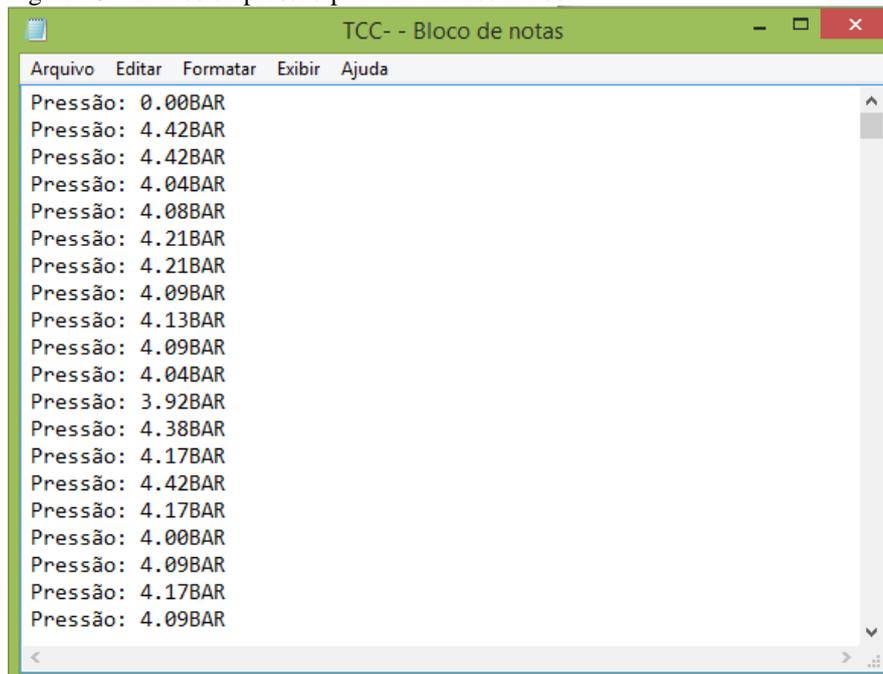
Com a sintonia fina, a resposta permanente do sistema apresentou uma acomodação em 2,5%.

Conclui-se que após a sintonia fina o sistema foi validado, pois atendeu aos requisitos mínimos exigidos pelo processo com um sobressinal de 0,2 % e com uma subida mais rápida e sem oscilação com uma acomodação em regime permanente de 2,5%.

7.3 Terceira etapa

Com o sistema de malha fechada de frenagem implantada foram coletados os dados da pressão pneumática dos freios conforme a Figura 45.

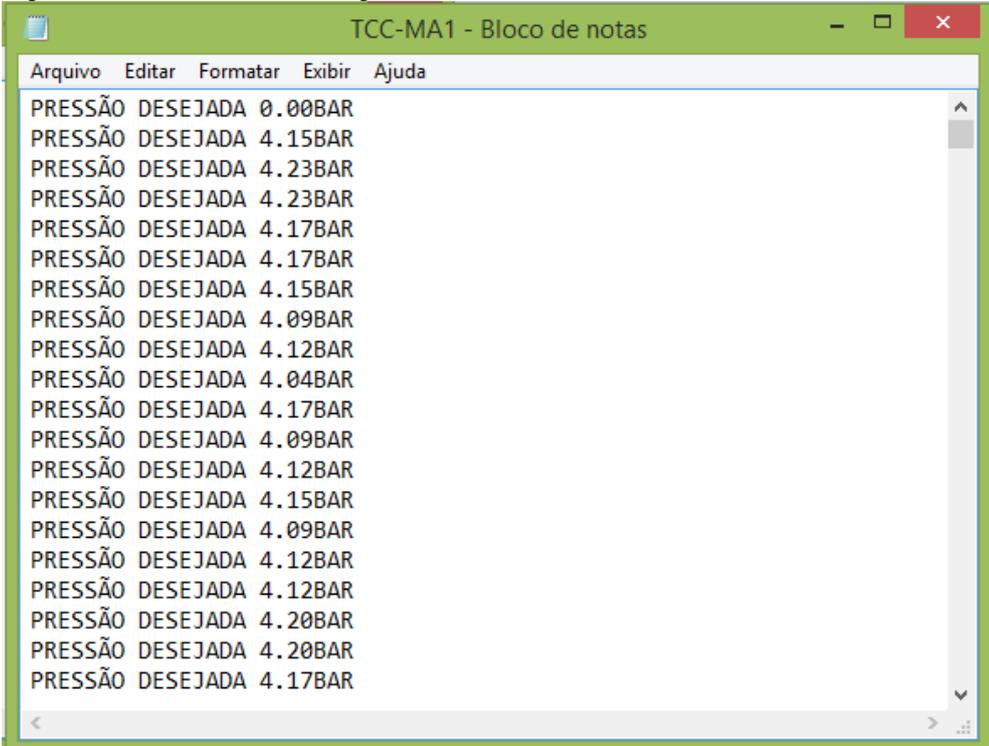
Figura 45 – Dados da pressão pneumática dos freios.



Fonte: o autor.

E do sinal analógico conforme a Figura 46, que já foi convertido em BAR no momento da coleta de dados por meio da programação.

Figura 46 – Dados do sinal analógico.



The screenshot shows a text editor window with the following data:

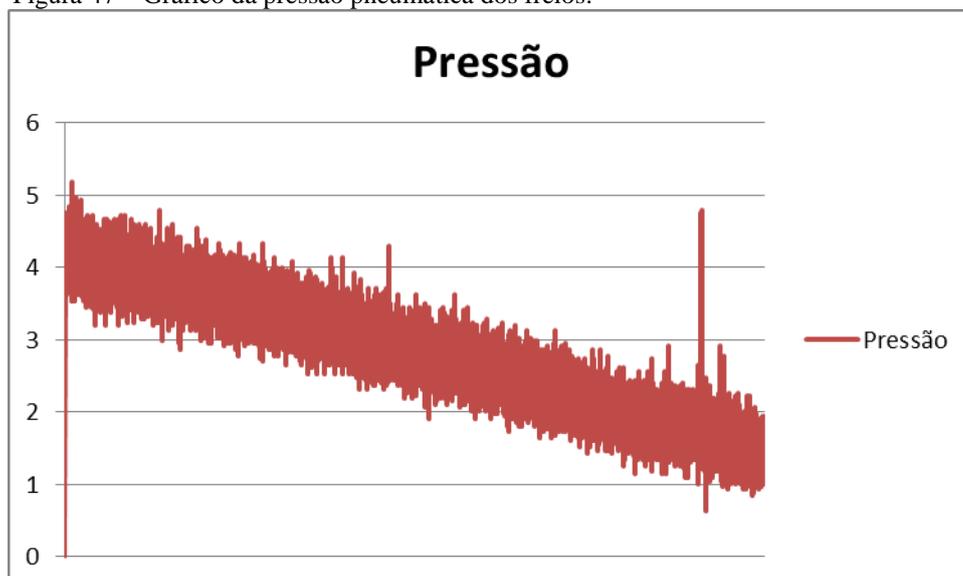
Pressão (BAR)
0.00
4.15
4.23
4.23
4.17
4.17
4.15
4.09
4.12
4.04
4.17
4.09
4.12
4.15
4.09
4.12
4.12
4.12
4.20
4.20
4.17

Fonte: o autor.

Assim como no subcapítulo 7.1 os dados foram inseridos no Excel® e transformados em gráficos para uma melhor análise.

A seguir, a Figura 47 representa a pressão pneumática dos freios.

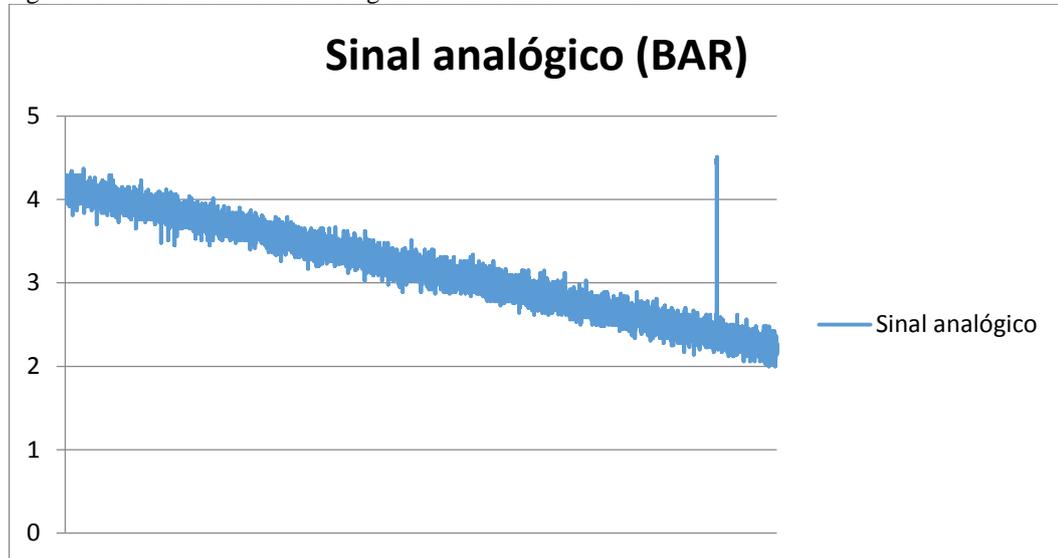
Figura 47 – Gráfico da pressão pneumática dos freios.



Fonte: o autor.

E a Figura 48 representa o sinal analógico que foi convertido em BAR

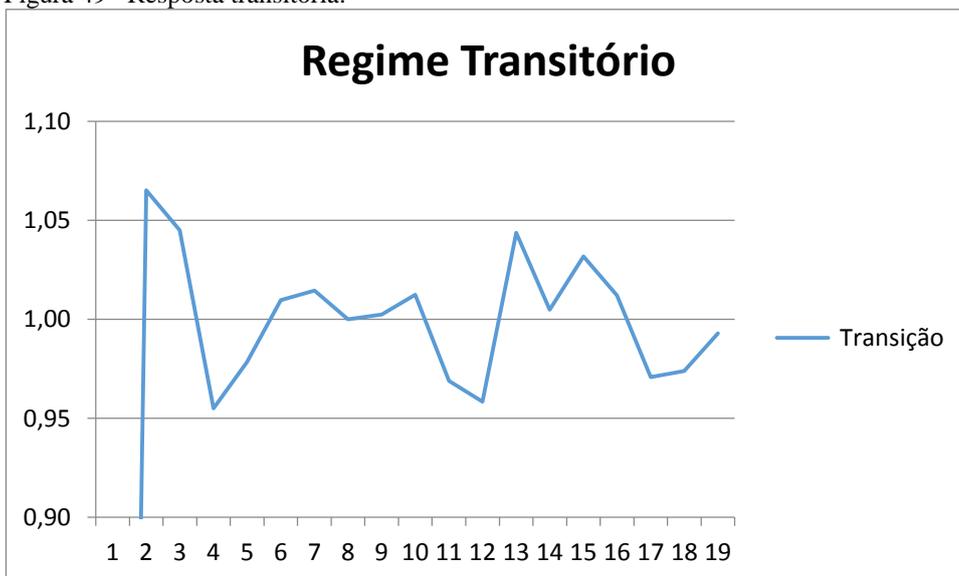
Figura 48 - Gráfico do sinal analógico convertido em BAR.



Fonte: o autor.

Através dos dados obtidos e da Equação 16, foi possível obter a resposta transitória do sistema de frenagem em malha fechada conforme a Figura 49.

Figura 49 –Resposta transitória.

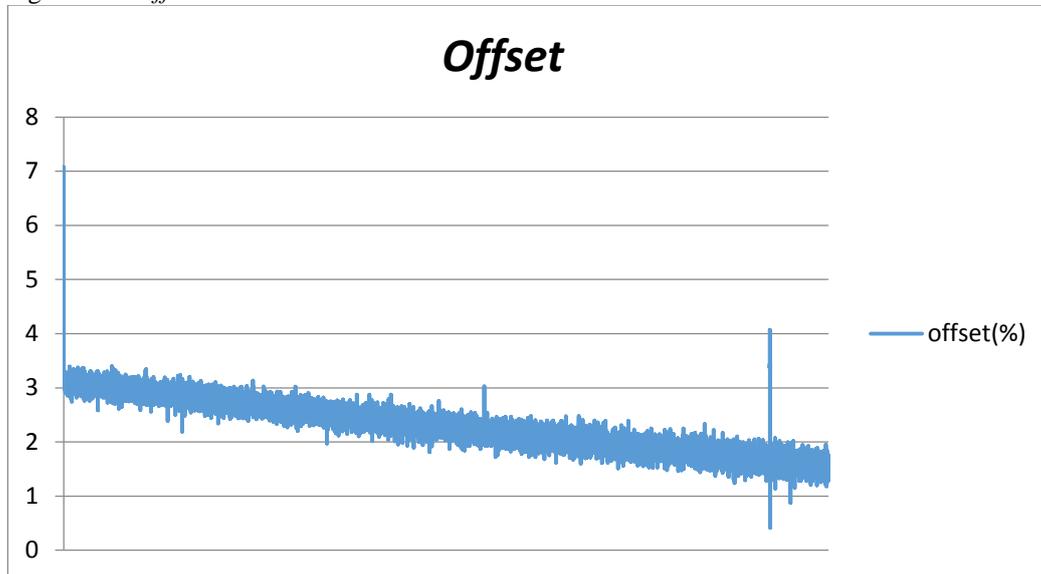


Fonte: o autor.

O sistema apresentou um tempo de pico instantâneo com um sobressinal de 7 % e se acomodando em torno de 5 % em 3 segundos.

E com a Equação 17 foi calculado o *offset* do sistema apresentado na Figura 50.

Figura 50 – *Offset*.



Fonte: o autor.

O erro em regime permanente se manteve dentro de 5% e as pequenas oscilações apresentada durante o processo foi para realizar a correção do tensionamento dos fios à medida que estavam diminuindo nas bobinas, o erro se iniciou em 3,5% e reduzindo de acordo com o andamento do processo chegando em 2,5 %, também houve uma variação mais brusca ao final do processo, pois houve uma parada na máquina e quando isso ocorre a pressão dos freios aumenta conforme o programado para não haver o bambeamento dos fios, mas ainda se manteve dentro dos 5 % exigidos.

O Quadro 6 traz consigo os dados do processo com o controle de frenagem manual e após a implantação do sistema de malha fechada.

Quadro 6 – Dados da produção

Sistema	Produção/mês	Manchas (mês)	Diferença de tonalidade(mês)
Manual	840.297	20.755 (2,47%)	43.864 (5,22%)
Malha Fechada	1.000.867	18.830 (1,88%)	29.100(2,91%)
Diferença	19,11%	0,59%	2,31%

Fonte: o autor.

De acordo com os dados obtidos na empresa do processo de antes e após implementar o sistema de malha fechada, a implantação desse sistema aumentou a produção, reduziu o percentual de manchas e diferença de tonalidades ambos em relação ao que foi produzido no mês.

De acordo com os dados obtidos na empresa do processo de antes e após implementar o sistema de malha fechada, a implantação desse sistema aumentou a produtividade em 19,11%, ultrapassando pela primeira vez a marca de 1 milhão de fios tingidos e engomados produzidos com uma redução de 2,31 % na diferença de tonalidade, mantendo a mesma porcentagem de manchas em relação ao sistema manual.

8 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresenta que o controle de frenagem das bobinas da gaiola afeta diretamente a qualidade e produtividade do processo. Um ponto crucial para melhorar o processo foi a implantação do sistema de malha fechada, já que o transdutor na linha de frenagem envia a pressão real para o controlador que realiza as correções necessárias e mantém o controle do sistema dentro do permitido.

Após a coleta de dados do sistema de controle manual constatou-se que os operadores não eram capazes de realizar o controle de frenagem conforme o processo exige, acarretando inconformidade no tensionamento dos fios e falhas que prejudicavam a qualidade e a produtividade do processo.

Diante dos sistemas já implementados e sem sucesso, foi necessário validar o sistema de malha fechada por meio da plataforma *simulink*, no qual primeiramente foi utilizado o método de Ziegler Nichols para definir os parâmetros do PID, em que apresentou um sistema que não alcançou o set point no regime transitório e no regime permanente uma divergência que foi aumentando com o decorrer do processo, desta forma foi preciso realizar a sintonia fina onde obteve respostas apuradas em que validou o sistema, com um sobressinal de 0,2% com uma subida rápida abaixo de 1 segundo e se acomodou em 2,5% em regime permanente.

E por fim, com os dados obtidos após a implantação do sistema na máquina o estudo realizado foi satisfatório, em que apresentou na resposta transitória um tempo de pico instantâneo com um sobressinal de 7 % e se acomodando em torno de 5 % em torno de 3 segundos e a resposta permanente se manteve dentro dos 5 % que o processo exige alcançando o objetivo principal do trabalho que era a diminuição da pressão dos freios conforme os fios diminuem na bobina mantendo o tensionamento dos fios.

Além do controle de frenagem reduzir as paradas forçadas que eram ocasionadas pela inconformidade do tensionamento que provocavam meadas nas caixas de impregnações, goma, rupturas e nós no campo e algumas vezes eram obrigados a reiniciar o processo concedeu mais tempo para os operadores supervisionar a planta, pois o sistema passou a ser automático.

De acordo com os dados obtidos na empresa do processo de antes e após implementar o sistema de malha fechada, a implantação desse sistema aumentou a produtividade em 19,11%, ultrapassando pela primeira vez a marca de 1 milhão de fios tingidos e engomados produzidos com uma redução de 2,31 % na diferença de tonalidade, mantendo a mesma porcentagem de manchas em relação ao sistema manual.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Guia de Implementação:** Normas para confecção jeans. Rio de Janeiro: Sebrae, 2012.
- ALBERTOS, P.; ANTONIO, S. **Multivariable Control Systems: An Engineering Approach.** New York: Springer, 2003.
- AMADIO, F. A.; BERGAMASCO, D. A. Tingimento com Corante Índigo e suas Propriedades. Americana: Fatec, 2012.
- ARDUINO. **About Us.** 2018. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/Main/AboutUs>. Acesso em: 26 maio, 2021.
- ARDUINO E CIA. **Como usar o módulo SD Card com Arduino.** Disponível em: < <https://www.arduinoocia.com.br/gravando-dados-arduino-cartao-sd-card/> > Acesso em: 16 de maio de 2021.
- BANGURA, M.; MAHONY, R. **Nonlinear Dynamic Modeling for High Performance Control of a Quadrotor.** New Zealand: Proceedings of Australasian Conference on Robotics and Automation, 2012.
- BEZERRA, J. H. **Estudo de sistema de controle usando o Controlador PID em processos industriais.** (Dissertação - mestrado profissional). Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2007.
- CAMPOS, M. C.M. ;TEIXEIRA, H.C.G. **Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais.** São Paulo: Blucher, 2006.
- CAMPOS, P. R. B. **Sintonia do Compensador PID.** Cornélio Procópio: UTFPR, 2004.
- CEZAR, P. **Controladores PID.** Ribeirão Preto: Smarti, 2016.
- ESFANDIARI R. S.; LU B.. **Modeling and Analysis of Dynamic Systems.** 3a ed. Boca Raton: CRC Press, 2018.
- FERREIRA, E. L. **Índigo Natural:** O azul de origem vegetal. Material impresso: atêlie de Ecnobotânica. São Paulo, 2011.
- FERREIRA, P.; LIMA, P. **Índigo:** Tecnologias, Processo, Tingimento e Acabamento. .Fiação e Tecelagem São José S/A, 2007.
- FERREIRA, M.C.Z. **Diretrizes de utilização de licenças de software livre e creative commons;** Florianópolis: UFSC, 2020.
- FERRONI, E. H.; et al. **A plataforma arduino e suas aplicações.** Varginha: UNIS, 2014.
- FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; EMAMI-NAEINI, A. **Feedback Control Of Dynamic Systems.** 8. ed. USA: Prentice Hall, 2019.

GARCIA, C. **Controle de processos industriais**. 1. ed. – São Paulo: Bucher, 2018.

LATHI, B.P.; **Sinais e Sistemas Lineares**. 2. Ed – Porto Alegre: Bookman; 2012.

MATAS, A. L. **Sintonia de Controladores PID com Controle Adaptativo por Modelo de Referência (MRAC) Aplicado a um Motor de Corrente Contínua**. São Carlos: USP, 2012.

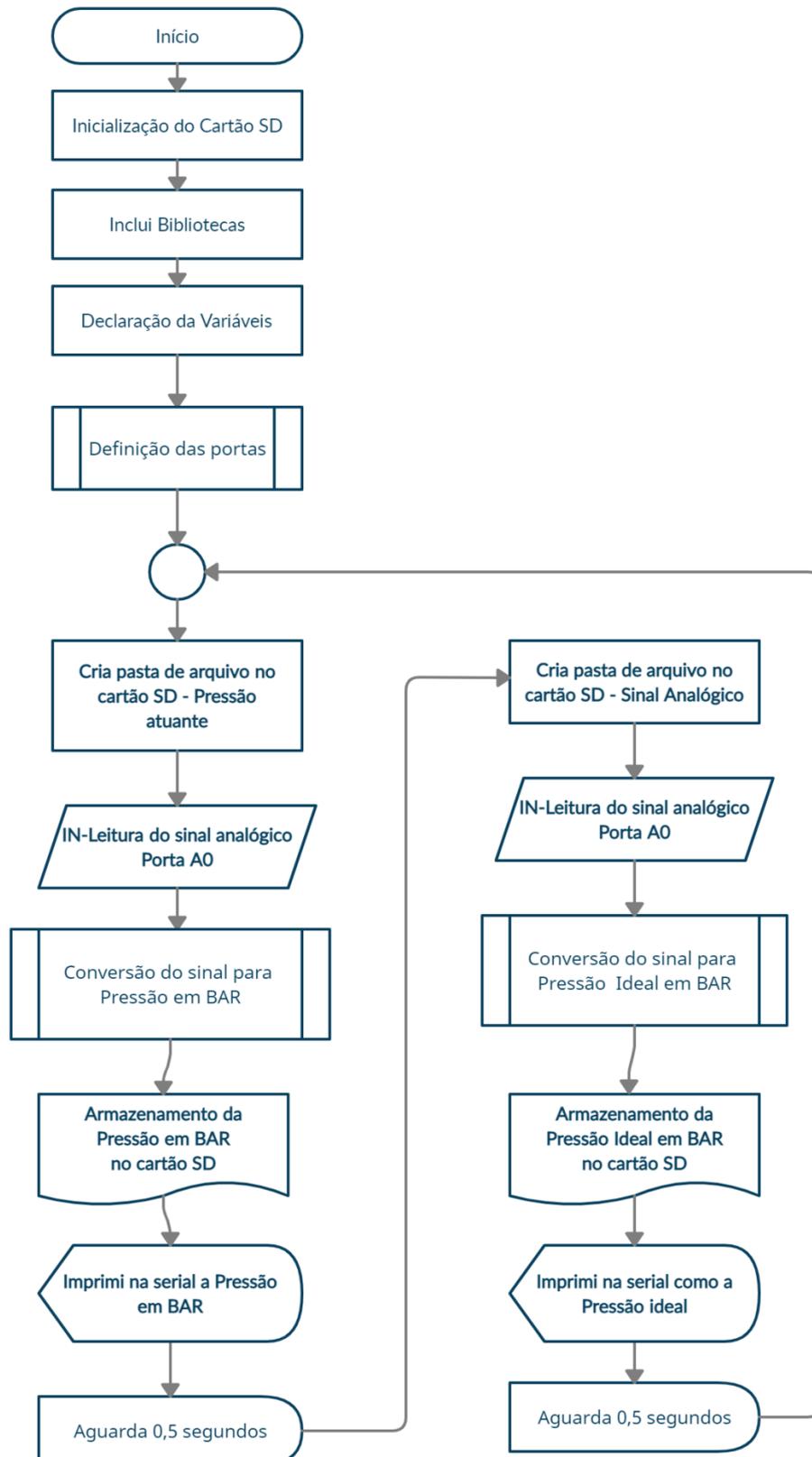
MESQUITA, C. M. S. **Controle de qualidade na indústria têxtil**. Fortaleza: UFC, 2017.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5 Ed. São Paulo: Prentice-Hall, 2010.

WARME. Transdutor de pressão. Disponível em: <<http://www.warme.com.br>>. Acesso em: 16 de maio de 2021.

APÊNDICE A

Figura 51 – Fluxograma de orientação de programação do Arduino



Fonte: o autor.