

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS DE BLUMENAU  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE CONTROLE, AUTOMAÇÃO E  
COMPUTAÇÃO  
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

Filipe Pietraski

**Implementação de controle sem modelo e supervisório em processo  
de bobinagem de filme metalizado**

BLUMENAU

2022

Filipe Pietraski

**Implementação de controle sem modelo e supervisorio em processo  
de bobinagem de filme metalizado**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação do Centro Tecnológico de Ciências Exatas e Educação da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Engenheiro de Controle e Automação  
Orientador: Prof. Dr. Daniel Martins Lima

BLUMENAU

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Pietraski, Filipe

Implementação de controle sem modelo e supervisor em  
processo de bobinagem de filme metalizado / Filipe  
Pietraski ; orientador, Daniel Martins Lima, 2022.

71 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Blumenau,  
Graduação em Engenharia de Controle e Automação, Blumenau,  
2022.

Inclui referências.

1. Engenharia de Controle e Automação. 2. Processo de  
bobinagem. 3. Capacitores de filme metalizado. 4. Controle  
sem modelo. I. Lima, Daniel Martins. II. Universidade  
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de  
Controle e Automação. III. Título.

Filipe Pietraski

**Implementação de controle sem modelo e supervisorio em processo  
de bobinagem de filme metalizado**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro de Controle e Automação” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia de Controle e Automação

Blumenau, 19 de dezembro de 2022.

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Daniel Martins Lima  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Ebrahim Samer El Youssef  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Luiz Antonio Maccari Junior  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado à minha família e minha noiva, que tem me apoiado em todos os momentos da minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus.

Agradeço aos meus pais Paulo e Marilene, pelos incentivos e apoio durante meus estudos.

Agradeço à minha noiva Gabriela Simon, por todo apoio durante os momentos mais difíceis da minha jornada acadêmica.

Agradeço ao meu orientador, professor Daniel Martins Lima, que graças à sua disponibilidade e orientação foi possível concretizar este trabalho de conclusão de curso.

Por último, agradeço à empresa WEG, por confiar no meu trabalho e oportunizar o meu desenvolvimento profissional, e aos meus colegas de trabalho por todo auxílio durante a realização deste trabalho.

“ A persistência é o caminho do êxito”

(Charles Chaplin)

## RESUMO

O presente trabalho apresenta a implementação de controle sem modelo e supervisor em um processo de fabricação de capacitores por bobinagem de filme metalizado, com o intuito de melhorar a resposta do sistema atual. Utiliza-se filme de polipropileno metalizado para construção de capacitores onde o filme é enrolado várias vezes em volta de um núcleo, assim, formando uma bobina de filme metalizado. Para fabricação dessas bobinas, utiliza-se sistemas desbobinador e bobinador, sendo o principal objetivo destes sistemas manter a tensão do filme constante em toda a linha de processamento mesmo com mudanças na velocidade do filme. Devido à complexidade do processo, tem-se uma dificuldade no uso de técnicas de controle clássicas que dependem do modelo do processo, que não foi possível identificar devido à presença de uma perturbação atuante durante todo o processo e a um tempo de amostragem muito alto. Por conta destas dificuldades, partiu-se para uma técnica de controle sem modelo para implementação no processo, onde o desconhecido modelo matemático do sistema é substituído por um modelo ultra local, assim, esta técnica permite a implementação de uma estratégia de controle mesmo desconhecendo o modelo do processo. Desta forma, este trabalho teve como objetivo a implementação e testes experimentais de uma técnica de controle sem modelo aplicado a um sistema de bobinagem de capacitores de filme metalizado, produzindo capacitores com menos problemas de maneira sistemática, assim, melhorando a qualidade do produto final. Conforme os resultados obtidos, o controlador sem modelo implementado ainda necessita de ajustes para ter um desempenho superior ao controlador atual, mas a técnica de controle sem modelo se mostrou viável para este tipo de aplicações. Além disso, também foi implementado um sistema supervisor para trabalhar com o novo controlador.

**Palavras-chave:** Processo de bobinagem. Capacitores de filme metalizado. Controle sem modelo.

## ABSTRACT

This work presents the implementation of model-free and supervisory control in a process of manufacturing capacitors by winding metallized film, with the objective of improving the response of the current system. Metallized polypropylene film is used to build capacitors where the film is wound several times around a core, thus forming a coil of metallized film. To manufacture these reels, unwinding and winding systems are used, the main objective of these systems being to maintain constant film tension throughout the entire processing line, even with changes in film speed. Due to the complexity of the process, there is a difficulty in using classical control techniques that depend on the process model, which it was not possible to identify due to the presence of a disturbance acting throughout the process and a very high sampling time. Due to these difficulties, a model-free control technique was chosen for implementation in the process, where the unknown mathematical model of the system is replaced by an ultralocal model, thus, this technique allows the implementation of a control strategy even without knowing the process model. Thus, this work aimed at the implementation and experimental tests of a model-free control technique applied to a metallized film capacitor winding system, systematically producing capacitors with less problems, thus effectively improving the quality of the final product. According to the results obtained, the modeless controller still needs adjustments to perform better than the current controller, but the modeless control technique proved to be viable for this type of applications. In addition, a supervisory system was also implemented to work with the new controller.

**Keywords:** Winding process. Metallized film capacitors. Model-free Control.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Capacitor de placas paralelas. ....	15
Figura 2 – Sistema desbobinador com <i>Dancer</i> . ....	16
Figura 3 – Estrutura de capacitor de filme metalizado. ....	20
Figura 4 – Processo de autorregeneração em capacitores de filme metalizado. ....	21
Figura 5 – Máquina de bobinagem. ....	22
Figura 6 – Etapas de projeto de um sistema de controle. ....	24
Figura 7 – Diagrama de blocos para um sistema básico de realimentação. ....	26
Figura 8 – Diagrama de sistema desbobinador e bobinador com uso de <i>Dancer</i> . ....	28
Figura 9 – Diagrama de um sistema <i>dancer</i> PD. ....	29
Figura 10 – Estrutura de controle sem modelo. ....	32
Figura 11 – Resposta de controle sem modelo. ....	33
Figura 12 – Pirâmide de Automação. ....	34
Figura 13 – PLC300 WEG. ....	36
Figura 14 – IHM WEG MT8071iE. ....	37
Figura 15 – Servoconversor SCA06. ....	38
Figura 16 – WEG programming suite. ....	39
Figura 17 – Tela inicial EasyBuilder PRO. ....	40
Figura 18 – WEG Ladder Programmer. ....	41
Figura 19 – Subsistemas que formam uma bobina. ....	44
Figura 20 – Comunicação entre equipamentos. ....	44
Figura 21 – Fluxo da etapa de setup da máquina. ....	45
Figura 22 – Giro do Magazine. ....	45
Figura 23 – Foto Magazine. ....	46
Figura 24 – Fluxo do processo de bobinagem. ....	46
Figura 25 – Estrutura controle atual. ....	47
Figura 26 – Ganho Proporcional. ....	48
Figura 27 – Ganho Integrativo. ....	49
Figura 28 – Variáveis de interesse. ....	50
Figura 29 – Sinal de realimentação e de controle. ....	51
Figura 30 – Ganhos do controlador. ....	51
Figura 31 – Resposta modelo 1. ....	52
Figura 32 – Identificação do sistema. ....	53

Figura 33 – Envio de valores via rede CANOpen. ....	54
Figura 34 – Valores salvos no servoconversor. ....	54
Figura 35 – Implementação do PI + aproximação da derivada de $y$ . ....	55
Figura 36 – Implementação $au(k - 1)$ + sinal de controle. ....	55
Figura 37 – Tela Inicial. ....	56
Figura 38 – Tela Menu Principal. ....	57
Figura 39 – Tela Operação. ....	57
Figura 40 – Tela Calibração Balancim 1. ....	58
Figura 41 – Tela Calibração Balancim 2. ....	58
Figura 42 – Tela Calibração Diâmetro 1. ....	59
Figura 43 – Tela Calibração Diâmetro 2. ....	59
Figura 44 – Tela Ajuste Parâmetros Controlador. ....	60
Figura 45 – Validação da estrutura do controle sem modelo. ....	61
Figura 46 – Sintonia do estimador. ....	61
Figura 47 – Controladores em paralelo. ....	62
Figura 48 – Primeiro teste com atuação do controle sem modelo. ....	63
Figura 49 – Segundo teste com atuação do controle sem modelo. ....	63
Figura 50 – Terceiro teste com atuação do controle sem modelo. ....	64
Figura 51 – Comparação das amostras do sinal de realimentação. ....	65

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

CA - Corrente alternada

CC - Corrente contínua

CLP - Controladores lógicos programáveis

CPU - Unidade central de processamento

DHCP - Dynamic host configuration protocol

IHM - Interface Homem-Máquina

LC - Células de carga

MF - Marcador float

PI - Controladores Proporcional Integral

PID - Controladores Proporcional, Integral e Derivativo

PD - Pendulum dancer

POU - Program organization unit

SISO - Single input single output

WPS - WEG Programming Suite

WLP - WEG Ladder Programmer

## SUMÁRIO

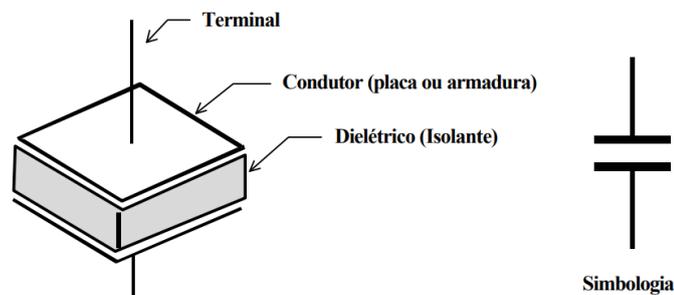
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS .....	17
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>17</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>19</b>
2.1	CAPACITORES .....	19
<b>2.1.1</b>	<b>Capacitor de filme metalizado.....</b>	<b>19</b>
2.2	BOBINAGEM DE FILME METALIZADO.....	21
2.3	CONTROLE DE PROCESSOS .....	23
<b>2.3.1</b>	<b>Sistema de Malha Aberta e de Malha Fechada .....</b>	<b>25</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Controle em bobinagem de filme metalizado.....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Controle Sem Modelo .....</b>	<b>29</b>
2.3.3.1	<i>Estimador discreto.....</i>	<i>31</i>
2.3.3.2	<i>Exemplo de implementação .....</i>	<i>32</i>
2.4	DISPOSITIVOS UTILIZADOS .....	34
<b>2.4.1</b>	<b>Controlador Lógico Programável .....</b>	<b>34</b>
2.4.1.1	<i>PLC300.....</i>	<i>35</i>
<b>2.4.2</b>	<b>Interface Homem-Máquina .....</b>	<b>36</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Servoconversor SCA06.....</b>	<b>37</b>
2.5	PROGRAMAÇÃO .....	39
<b>2.5.1</b>	<b>WEG Programming Suite.....</b>	<b>39</b>
<b>2.5.2</b>	<b>EasyBuilder Pro .....</b>	<b>40</b>
<b>2.5.3</b>	<b>WEG Ladder Programmer.....</b>	<b>41</b>
2.6	COMENTÁRIOS .....	42
<b>3</b>	<b>RESULTADOS: DOCUMENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE.....</b>	<b>43</b>

3.1	CONFIGURAÇÃO DA MÁQUINA BOBINADEIRA.....	43
3.2	FLUXO ATUAL DO PROCESSO .....	44
3.3	SISTEMA DE CONTROLE ATUAL .....	47
3.4	COMENTÁRIOS .....	49
<b>4</b>	<b>RESULTADOS: IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS E CONTROLE SEM</b>	
	<b>MODELO 50</b>	
<b>4.1.1</b>	<b>Identificação do sistema .....</b>	<b>50</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Implementação do Controle Sem Modelo .....</b>	<b>53</b>
<b>4.1.3</b>	<b>Desenvolvimento e Implementação do Supervisório .....</b>	<b>56</b>
<b>4.1.4</b>	<b>Validação do código implementado .....</b>	<b>60</b>
<b>4.1.5</b>	<b>Resultados finais .....</b>	<b>62</b>
4.2	COMENTÁRIOS .....	65
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>67</b>
5.1	SUGESTÕES FUTURAS .....	67
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Ao se projetar um processo de fabricação de um capacitor, tem-se como essencial conhecer o comportamento dos parâmetros elétricos e mecânicos e as características do componente. Capacitores são componentes capazes de armazenar energia potencial elétrica durante um período de tempo. Conforme Figura 1, os capacitores são formados por duas partes condutoras, chamados eletrodos, e um material isolante com propriedades específicas, chamado dielétrico. Podem ser divididos em dois tipos, eletrolítico e eletroestático. Os capacitores eletrolíticos são assimétricos e possuem polaridade em sua construção, e os eletrostáticos têm uma construção simétrica sem polaridade (MELLO, 2015).

Figura 1 – Capacitor de placas paralelas.



Fonte: Mussoi e Villaça (2000).

Para a construção de capacitores eletrostáticos, pode-se utilizar um filme de polipropileno metalizado (base de sua construção), onde reveste-se o filme plástico (que possui como função ser o dielétrico) com zinco e/ou alumínio de espessura nanométrica (utilizada como eletrodo). Os capacitores de filme metalizado têm como característica serem capazes de armazenar energia através de um campo elétrico criado através de várias placas em paralelo, ou seja, o filme metalizado é bobinado de forma a criar uma pilha de placas metálicas sobrepostas (MELLO, 2015).

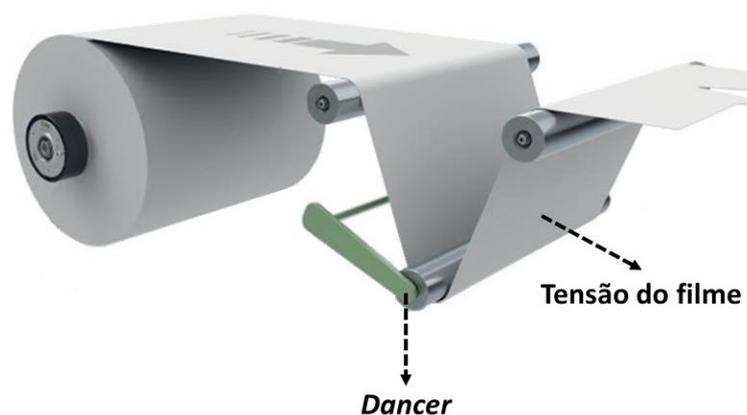
Uma característica desse tipo de capacitor é, quando submetido a uma alta tensão elétrica, tem capacidade de autorregeneração, onde uma ruptura do filme dielétrico gera um fluxo de cargas ao redor do local de ruptura, com conseqüente acúmulo de alta temperatura e pressão localizadas. Como rápida vaporização da fina camada de eletrodo no local da ruptura, tem-se um local eletricamente isolado. Após esse defeito estar eliminado, o capacitor continuará funcionando com uma pequena perda de capacitância (CHEN et al., 2012).

Capacitores de filme metalizado podem ser construídos de algumas formas diferentes, as mais comuns são por bobinagem e por empilhamento. Para o capacitor empilhado, tem-se várias camadas de filme metalizado empilhadas na vertical e, no capacitor de bobina, tem-se o filme metalizado enrolado várias vezes em volta de um núcleo formando, assim, uma bobina de filme metalizado.

Nos sistemas de bobinagem de filmes metalizados, que será considerado neste trabalho, utiliza-se um sistema desbobinador e bobinador, o principal objetivo é manter a tensão do filme constante durante todo o processo de fabricação da bobina, mesmo sob mudanças na velocidade do filme. Caso contrário, tensão insuficiente ou tensão excessiva podem resultar em enrugamento ou rasgo do filme, o que afeta diretamente a qualidade do produto final (HOU et al., 2016).

Geralmente, a medição da tensão do filme é obtida e usada como um sinal de realimentação para o controlador. Um dos métodos de medição e obtenção deste sinal é com a utilização de *dancers* (Figura 2), que é um método indireto de garantir o controle de tensão (GASSMANN et al., 2012). Tem-se a medição da posição de um pêndulo *dancer* carregado de força, ou seja, aplica-se uma força no pêndulo utilizando um cilindro pneumático ou hidráulico e mede-se a posição do *dancer*, regulando a posição do *dancer* utilizando a velocidade do motor desbobinador, assim, regulando indiretamente a tensão do filme.

Figura 2 – Sistema desbobinador com *Dancer*.



Fonte: Adaptado de RE (2022).

Devido a um forte acoplamento entre a velocidade e a tensão do filme, a variação da velocidade, as incertezas dos parâmetros do sistema e perturbações externas podem causar oscilações prejudiciais nas tensões do filme (HOU et al., 2016). Devido à complexidade do

processo como a bobinagem de filme metalizado, tem-se uma dificuldade no uso de técnicas de controle baseadas em modelos, por exemplo, cuja eficiência está intimamente relacionada à hipótese de que a dinâmica do modelo usado para projetar o controlador deve se comportar como o sistema real (SOUSA; ARAUJO, 2019).

Para técnicas mais tradicionais de projeto de controladores tem-se como necessário o conhecimento do sistema, geralmente pela obtenção da função de transferência que descreve matematicamente o comportamento do sistema. Tem-se como primeira tentativa para este projeto a identificação do sistema, porém, por se tratar de um sistema que tem um sinal de perturbação variante com atuação durante todo o processo e que tem um tempo de resposta muito rápido, não foi possível uma amostragem correta do processo, nem a distinção dos dados de entrada e saída dos sinais de perturbação e ruído do sistema, assim, não sendo possível obter uma estimação adequada para encontrar um modelo aproximado do sistema.

Conforme Sousa e Araujo (2019), atualmente são desejadas técnicas de controle que sejam livres de modelo e simples de serem implementadas e mantidas, por este motivo, partiu-se para uma técnica de controle sem modelo, onde o desconhecido modelo matemático do sistema é substituído por um modelo ultra local. Essa técnica de controle pode fornecer a automação para contornar o ajuste sob uma ampla variedade de alterações de parâmetros do sistema e ainda fornecer uma facilidade de projeto e implementação (MICHEL et al., 2022).

Assim, o presente projeto se dá pela necessidade de se produzir capacitores com menos problemas de maneira sistemática, melhorando a qualidade do produto final de modo a melhorar a resposta do sistema de controle, mesmo considerando as dificuldades de se levantar um modelo matemático tradicional do mesmo.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Realizar uma aplicação de controle sem modelo em processo de bobinagem de filmes de polipropileno (PP) metalizados e melhorar a resposta do sistema de controle.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Obter dados do processo de forma analisar seu comportamento e permitir a sintonia do controlador;
- simulação do controlador sem modelo com dados do processo para fazer o seu ajuste;
- implementar o algoritmo de controle sem modelo no servoconversor do processo;
- implementar um supervisor que permite monitorar as variáveis do processo e ajustar o controlador;
- validar o sistema de controle projetado com ensaios experimentais.

A sequência do trabalho foi dividida em quatro capítulos, sendo eles: (i) referencial teórico, apresenta os conhecimentos adquiridos para desenvolvimento deste trabalho; (ii) documentação do sistema de controle, apresenta um entendimento do processo atual, necessário para desenvolvimento e implementação dos objetivos propostos; (iii) identificação de sistemas e controle sem modelo, apresenta a tentativa de identificação do sistema, a implementação do controle sem modelo e os resultados obtidos com o funcionamento do controle sem modelo no processo; (iv) conclusão e trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

O referencial teórico do presente trabalho foi estruturado em cinco seções, a saber: sobre capacitores; bobinagem de filme metalizado; controle de processos; principais dispositivos utilizados e sobre a sua programação.

### 2.1 CAPACITORES

Juntamente dos resistores e indutores, os capacitores são importantes e fundamentais em diversos circuitos elétricos. São componentes usados para filtros de corrente contínua (*CC-Link*), filtros de corrente alternada (*CA*), *snubbers*, para armazenamento de energia, etc., em sistemas eletrônicos de potência (ZHAO; CHEN; WANG, 2019).

Capacitores são componentes elétricos passivos que armazenam carga em eletrodos que são separados por um material dielétrico (SILVA, 2018). Sendo  $Q$  a carga,  $C$  a capacitância e  $V$  o potencial elétrico, tem-se:

$$Q = CV \quad (2.1)$$

Com a energia sendo armazenada dentro de um dielétrico entre os dois condutores (SILVA, 2018), sendo  $E'$  a energia, tem-se:

$$E' = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2.2)$$

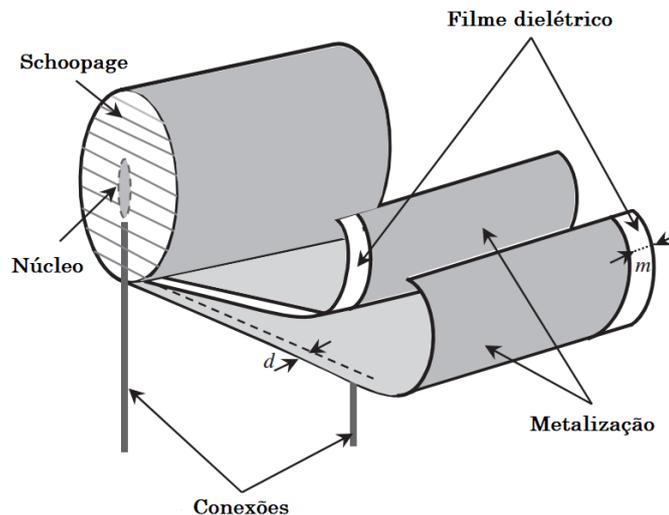
#### 2.1.1 Capacitor de filme metalizado

Um tipo de capacitor é o de filme metalizado, sendo constituído por um filme de polipropileno metalizado com uma espessura na faixa de micrômetros. Em uma ou ambas as superfícies do polímero deposita-se uma camada metálica de zinco e/ou alumínio com uma espessura de nanômetros (SILVA, 2018).

Na Figura 3, observa-se a estrutura de um capacitor de filme polipropileno metalizado que são utilizados no processo de bobinagem, sendo enrolados em torno de uma base cilíndrica isolada chamada núcleo. Para garantir as conexões com um circuito externo, uma técnica de

metalização por spray conhecida como *schoopage* é usada em ambas as extremidades da bobina (MAKDESSI; SARI; VENET, 2014).

Figura 3 – Estrutura de capacitor de filme metalizado.



Fonte: Adaptado de Makdessi, Sari e Venet (2014).

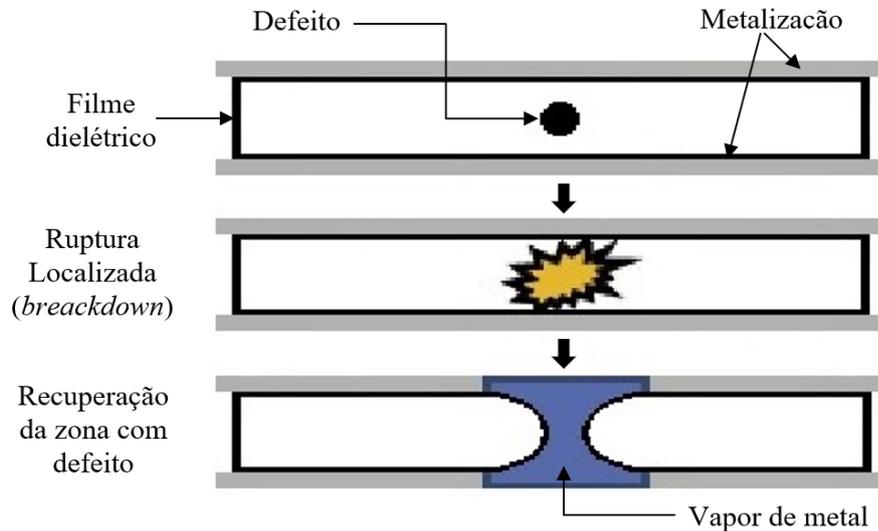
A bobina, após estar formada, é fechada em um invólucro de resina onde permanece durante toda a vida útil do capacitor (SILVA, 2018).

Os capacitores de filme metalizado funcionam bem em condições normais, porém, com o passar do tempo, esses componentes perdem gradualmente sua capacitância. A degradação geralmente está associada a processos que envolvem a quebra do polímero isolante entre as superfícies metalizadas. Quando ocorre uma ruptura dielétrica que pode ser ocasionada por condições de cargas e descargas intensas do capacitor, a alta densidade de corrente ao redor do local da ruptura vaporizará imediatamente a metalização do eletrodo metalizado, e com a vaporização da metalização ao redor dessa ruptura se obtêm um local eletricamente isolado, no entanto, essa ruptura resulta em uma pequena quantidade de perda de eletrodo, e assim, a única mudança observável e permanente é uma pequena quantidade de perda de capacitância (GODEC; MANDRINO; GABERLČEK, 2013).

Conforme Figura 4, o fenômeno de autorregeneração ocorre pois os eventos de ruptura do filme dielétrico resultam de uma descarga repentina e localizada de uma parte da carga armazenada sob a influência da temperatura e pressão, assim, a ruptura dielétrica ocorre quando o campo elétrico aplicado é muito maior do que aquele que pode ser manuseado pelo dielétrico devido à presença de impurezas ou inclusões de gases entre o dielétrico. Durante as intensas descargas elétricas, perfurações são desenvolvidas no material dielétrico e a fina camada de

metalização próxima ao local defeituoso será vaporizada e soprada e o local ficará eletricamente isolado (MAKDESSI; SARI; VENET, 2014).

Figura 4 – Processo de autorregeneração em capacitores de filme metalizado.



Fonte: Adaptado de Makdessi, Sari e Venet (2014).

Os capacitores de filme de polipropileno metalizado são amplamente utilizados em várias aplicações devido à ampla faixa de capacitâncias e tensões disponíveis (ZHAO; CHEN; WANG, 2019). Segundo Mello (2015), esse tipo de capacitor tem como vantagens a autorregeneração, estabilidade e confiabilidade, por possuir baixa variação térmica e baixa absorção de umidade.

## 2.2 BOBINAGEM DE FILME METALIZADO

Na bobinagem, geralmente é utilizada uma máquina desbobinadora e bobinadora, sendo esse equipamento cujo processo operacional é desenrolar e rebobinar um material. Se sua configuração e design permitir, pode ter a capacidade de aumentar e diminuir a velocidade da bobina, com a tensão mais adequada do filme sendo mantida durante todo processo de formação da mesma. É um processo essencial durante a linha de produção de empresas de várias áreas da indústria, como o setor de plástico, têxtil, papelão, entre outros (LOBATO; MEDINA, 2019).

Um desbobinador e bobinador pode ser classificado de acordo com sua posição como: axial, tangencial ou axial-tangencial. Um desbobinador e bobinador axial é aquele em que o filme e a estrutura da máquina são condicionados em formato vertical, sua característica é

apresentar um torque de carga com potência constante, sendo condicionada pela velocidade tangencial. O desbobinador e bobinador tangencial tem o filme e a estrutura da máquina localizados de forma horizontal, sendo por sua vez uma das máquinas mais utilizadas nas indústrias têxteis devido à sua versatilidade e à utilização de bobinas. Já no desbobinador e bobinador axial-tangencial, pode-se controlar a força de ajuste de tensão da bobina devido à sua forma axial e seu enrolamento tangencial da bobina, com sua dureza controlada por meio de um variador de força de empuxo (LOBATO; MEDINA, 2019).

Pode-se definir como axial a máquina de bobinagem (Figura 5) utilizada no processo foco deste trabalho, que tem como suas principais partes rolo de guia, rolo tensor, rolo de enrolamento, painel de controle elétrico, freio mecânico e o balancim, sendo este último um importante parte utilizada para manter a melhor tensão no filme.

Figura 5 – Máquina de bobinagem.



Fonte: WEG (2022a).

Na bobinagem de filme metalizado deve-se atentar a vários processos que ocorrem durante a fabricação da bobina e interferem no produto final. Dentre esses, a frouxidão que pode causar o enrugamento do filme, e o excesso de tensão que pode gerar o rompimento do filme, são parâmetros chave para o processo de formação da bobina. Já o alinhamento da máquina, o arrasto da guia e os mecanismos de tensionamento são os principais recursos que a

máquina de bobinagem necessita ter para otimizar esses parâmetros de processo (MCDONALD; REICHENBACH, 1990).

### 2.3 CONTROLE DE PROCESSOS

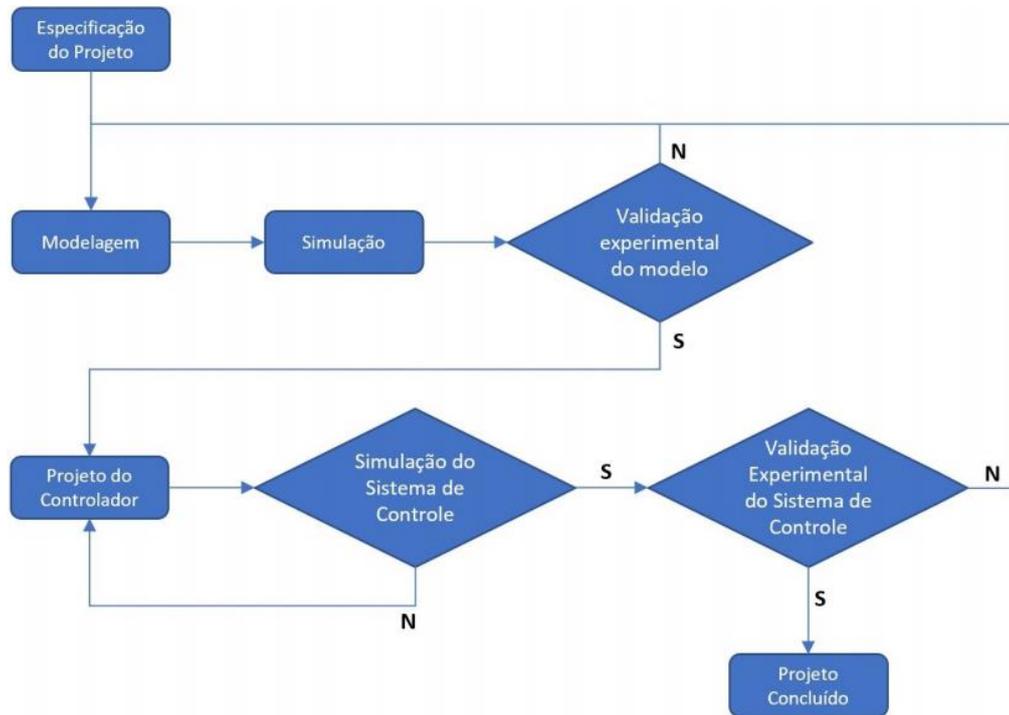
Em diversos setores industriais apresentam-se processos de complexidades variadas, aos quais necessitam exercer o controle de parâmetros essenciais para o sistema, e assim resultar no produto em conformidade com o padrão de qualidade exigido. O controle consta-se como um ramo fundamental da engenharia, responsável por realizar a integração entre sistemas e operações que envolve o processo.

O respaldo tecnológico para exercer o controle eficaz sobre um processo constitui-se de instrumentos de medição aptos para realizar a aferição das variáveis dos sistemas e elementos de atuação que permitem manter a variável de interesse em condições adequadas e precisas para o processo em questão. No âmbito da teoria de controle clássico, os sistemas de controle operam para manter a variável controlada no valor de referência especificado, comparando o valor da variável medida com o valor da referência, e a partir desta medida, exercer correções em função do erro presente na comparação entre os dois valores, sem a necessidade de intervenção humana (PESSOA; SPINOLA, 2014).

A modelagem matemática visa descrever o comportamento dinâmico do sistema, aproximando o sistema por meio de equações matemáticas. Deste equacionamento aproximado, conseguimos soluções para sistemas reais. Sob ótica da matemática aplicada, o processo de modelagem consiste em transformar problemas da realidade em problemas matemáticos e de resolvê-los interpretando suas soluções na linguagem do mundo real (BASSANEZI, 2002).

Ao se mencionar o termo modelagem de sistema, pode-se definir como sistema todo arranjo de elementos, ativos e/ou passivos, organizados de forma a executar uma determinada função. Para termos uma melhor compreensão do desenvolvimento de um sistema de controle em que a modelagem está inserida, a Figura 6 apresenta um fluxograma indo da especificação até a conclusão de um projeto.

Figura 6 – Etapas de projeto de um sistema de controle.



Fonte: Autor (2022).

A função de transferência, vale ressaltar que a mesma é uma propriedade intrínseca do sistema, independente do tempo. A função de transferência pode fornecer informações a respeito da estrutura do sistema, podendo haver a mesma função de transferência para mais de um sistema. Contudo, a função de transferência é de extrema funcionalidade para a modelagem do sistema pois, tendo seu conhecimento, a saída do sistema pode ser estudada com diversas formas de entrada visando a melhor compreensão do mesmo (CUBILLOS, 2020).

Para se obter a função de transferência de um sistema, além da via teórica através de cálculos, pode-se encontrá-la por meio experimental introduzindo entradas conhecidas e analisando a saída resultante. A ferramenta da função de transferência é empregada para se obter um modelo que descreve com uma aproximação satisfatória o sistema físico real e, assim, pode-se realizar estudos e análises em que empregam a relação de causa e efeito de forma a executar uma ação de controle.

Uma função de transferência  $G(s)$ , sendo  $s$  a variável que representa o domínio da frequência da transformada de Laplace, é uma forma alternativa de representar equações diferenciais que permite a utilização de um ferramental matemático que torna mais fácil a análise e projeto de sistemas. A função de transferência  $G(s)$

$$G(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (2.3)$$

Representa a relação entre a saída  $Y(s)$  e a entrada  $X(s)$  no domínio da frequência.

Ao obter uma função de transferência que descreve o comportamento de um determinado sistema contínuo, pode-se utilizar determinadas características desta função que facilitam a operação e implementação do controle no processo. Entre as características, pode-se citar:

- facilidade em determinar as respostas  $Y(s)$  no domínio do tempo operando apenas via tabela de transformadas;
- pode-se estabelecer a resposta de um sistema a uma determinada entrada no domínio  $s$  ao efetuar uma operação de multiplicação entre sua respectiva função de transferência  $G(s)$  e a transformada de Laplace  $X(s)$  da entrada;
- identificar os Polos e Zeros do sistema que influenciam na dinâmica do sistema.

Polos: Raízes do denominador da função de transferência.

Zeros: Raízes do numerador da função de transferência.

### **2.3.1 Sistema de Malha Aberta e de Malha Fechada**

Em um sistema de controle em malha aberta, a informação da saída não é utilizada para a definição da ação de controle a ser aplicada. Nestes casos, usualmente se tem um modelo, ou uma ideia de como o sistema se comporta, e a ação de controle é definida esperando que a saída atinja um valor ou comportamento desejado. Porém, qualquer diferença entre o modelo utilizado, ou mesmo a existência de perturbações não medidas, fará com que a saída divirja do valor desejado. Assim, somente em casos muito específicos os processos são deixados em malha aberta.

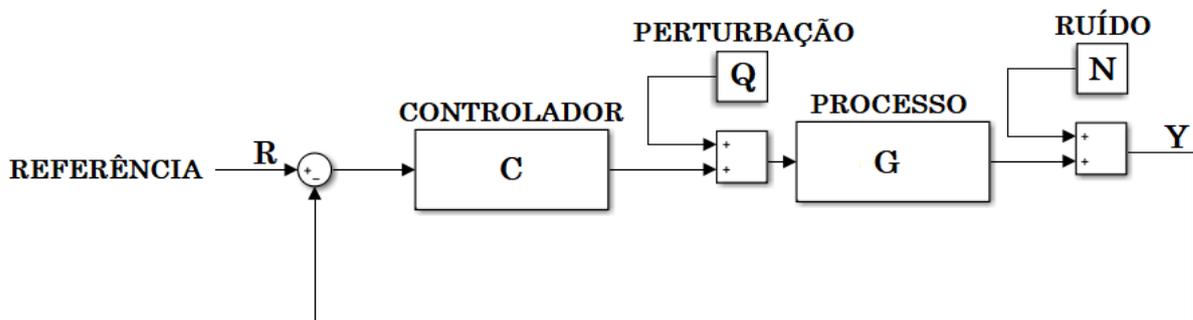
Em um processo no qual encontra-se aplicado um sistema de malha fechada, também denominado como sistema de controle com realimentação, tem-se como sua característica fundamental a aplicação de sensoriamento para aferir o sinal de saída e empregá-lo na realimentação do controle para atuar na variável a ser controlada (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013), ou seja, o sistema de malha fechada intervém na relação entrada/saída do processo, de modo a influenciar a variável controlada a se manter dentro de limites estabelecidos, em que o sistema regula a saída do sistema perante atuar na variável manipulada.

O controle de malha fechada apresenta-se amplamente implementado em diversos sistemas e depende da medição de variáveis.

À vista disto, pode-se exercer a implementação de controles por meio de configurações distintas, sendo amplamente difundido na literatura especializada e utilizado em diversos processos os controladores Proporcional e Integral (PI) e controladores Proporcional, Integral e Derivativo (PID). Eles são encontrados em mais da metade dos controladores industriais usados na atualidade. O funcionamento desses controladores se baseia no cálculo entre a variável a ser controlada, que é medida ao longo do processo com auxílio de sensores, e seu valor desejado, conhecido como *setpoint* (VASCONCELLOS, 2017).

Para um sistema de controle, tem-se um grupo de dispositivos que tem como característica coordenar e controlar o comportamento de um processo ou máquina. Para se projetar um sistema de controle, normalmente tem-se como necessário conhecer o comportamento do processo por meio de equações matemáticas, como das características do dispositivo atua no processo (FONSECA, 2022). Na Figura 7 é possível observar um diagrama de blocos para estrutura de controle clássica.

Figura 7 – Diagrama de blocos para um sistema básico de realimentação.



Fonte: Autor (2022).

As variáveis mostradas na Figura 7 são: R consiste no sinal de referência para o sistema, C representa o controlador do processo, Q simboliza a perturbação que entra no sistema, G representa a função de transferência que tem a dinâmica da planta, N consiste no ruído na saída e Y representa a saída do sistema.

### 2.3.2 Controle em bobinagem de filme metalizado

Sistemas de desbobinador e bobinador são muito comuns na indústria porque eles representam uma maneira conveniente de transportar e processar um produto de uma forma para outra (GASSMANN et al., 2012).

Nos sistemas de bobinagem de filmes metalizados o principal objetivo em aplicações industriais é manter a tensão do filme constante em toda a linha de processamento sob mudanças na velocidade do filme. Caso contrário, tensão insuficiente ou tensão excessiva pode resultar em enrugamento ou rasgo do filme, o que afeta diretamente a qualidade e a eficiência do produto final. No entanto, devido a um forte acoplamento entre a velocidade e a tensão do filme, a variação da velocidade pode causar flutuações prejudiciais nas tensões e vice-versa. Além disso, incertezas de parâmetros do sistema e distúrbios externos, como a não excentricidade e a variação do diâmetro do rolo de filme, são comuns em sistemas de enrolamento de filme metalizado. Portanto, os sistemas de controle de bobinagem de bobinas são uma das aplicações mais desafiadoras que exigem alto desempenho (HOU et al., 2016).

A tensão e a velocidade do filme são duas variáveis-chave que precisam ser monitoradas e controladas afim de atingir uma qualidade desejada do produto (GASSMANN et al., 2012). Um importante parâmetro é a aceleração do desbobinador, onde para uma aceleração reduzida, se obtêm uma variação de tensão no filme também reduzida (MCDONALD; REICHENBACH, 1990).

Um dos principais objetivos em máquinas de manuseio de bobinas é atingir uma velocidade do filme metalizado esperada enquanto mantém durante todo o processo de bobinagem a menor variação possível da tensão do filme (GASSMANN et al., 2012).

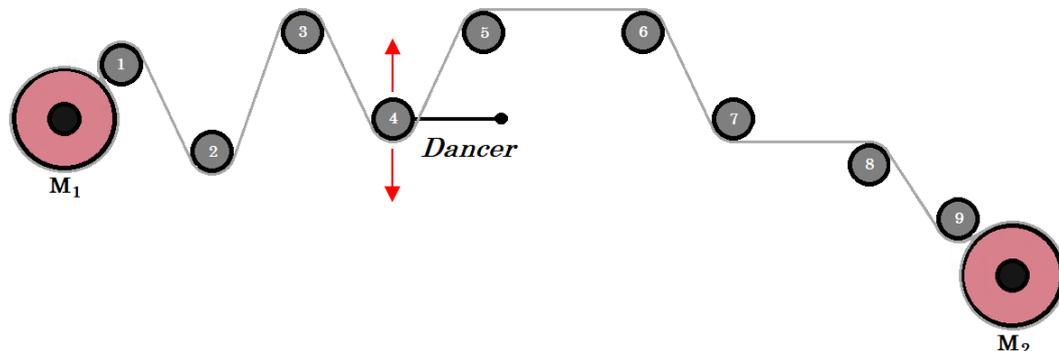
Geralmente, a medição da tensão do filme é obtida e utilizada como um sinal de realimentação para o controlador. Os dispositivos de medição mais usados são as células de carga (LCs) e os *dancers*. *Dancers* são mecanismos móveis que permitem que um rolo se mova de acordo com um grau de liberdade. Ao contrário das células de carga, o uso de mecanismos *dancers* é um método indireto para garantir o controle da tensão do filme. Para obter o sinal de realimentação para o controlador, utiliza-se a posição de um *dancer*, que fornece regulação indireta da tensão do filme: uma força desejada é aplicada ao *dancer* por um cilindro pneumático ou hidráulico que é compensado pela tensão do filme. Durante o processo de desbobinagem, a pressão no cilindro permanece constante, enquanto a realimentação de posição

é usada para ajustar a velocidade de referência do motor desbobinador (GASSMANN et al., 2012).

Usualmente, em processos de bobinagem de filme, são usados *dancers* perto do desbobinador e/ou do rebobinador, pois esses mecanismos agem naturalmente como filtros mecânicos para atenuar vários distúrbios. Esses distúrbios são devidos principalmente à excentricidade e não circularidade dos rolos de filme. Mecanicamente, dois tipos de estruturas *dancers* são normalmente usados: linear e PDs (*pendulum dancer*) (GASSMANN et al., 2012).

O sistema na Figura 8 é composto por um desbobinador, um *dancer*, alguns rolos e um rebobinador, onde um rolo de velocidade mestre (M1) é usado para regular velocidade do filme em toda a linha de processamento. A velocidade do rolo M1 é a variável manipulada do processo. A medição da tensão do filme é feita indiretamente usando um PD (rolo 4), sendo este, a saída do sistema, que deve permanecer, idealmente, sempre na posição zero.

Figura 8 – Diagrama de sistema desbobinador e bobinador com uso de *Dancer*.



Fonte: Autor (2022).

A Figura 9 apresenta um exemplo de funcionamento e variáveis de um sistema que utiliza PD. A variação do ângulo  $\alpha$  ocorre pela variação de tensão do filme, quando a tensão vence a força que o atuador exerce no rolo ocorre o deslocamento do rolo 4 para direita da imagem, e quando a força do atuador é maior que a tensão do filme, ocorre um deslocamento do rolo 4 para esquerda.



é feito empiricamente na máquina porque o ajuste analítico dos controladores PI é uma tarefa desafiadora devido às mudanças nas condições de operação e à incerteza no conhecimento dos parâmetros do material do filme e dos parâmetros da máquina. Na prática, os controladores de tensão são ajustados no local com base na observação em tempo real do desempenho da resposta à tensão do filme. Quando as condições de operação ou as propriedades do material mudam, o ganho fixo dos controladores de tensão do filme não fornece desempenho adequado ou, em alguns casos, tornam o sistema de controle de tensão do filme em malha fechada instável (RAUL; PAGILLA, 2015).

A melhor abordagem é usar um esquema de controle adaptativo que facilite o ajuste dos parâmetros do controlador para tais condições de mudança. Um controlador adaptativo pode modificar o comportamento do sistema em malha fechada compensando as mudanças nos parâmetros do sistema (RAUL; PAGILLA, 2015).

Abordagens como controle sem modelo podem fornecer a automação para contornar o ajuste sob uma ampla variedade de alterações de parâmetros do sistema e ainda fornecer uma facilidade de projeto e implementação (MICHEL et al., 2022).

Para o controle sem modelo, utilizando um sistema SISO (*single input single output*) com uma variável de controle  $u$  e uma variável de saída  $y$ , um desconhecido modelo matemático desconhecido e complexo é substituído por um modelo ultra local (FLIESS; JOIN, 2013):

$$y^{(v)} = F + \alpha u \quad (2.4)$$

onde.

- $y^{(v)}$  consiste na derivada no tempo de ordem  $v \geq 1$  de  $y$ . Sendo  $v$  um número inteiro escolhido com valor baixo, geralmente 1 ou, raramente, 2.
- $\alpha$  representa um número real, sendo um parâmetro constante não físico escolhido de tal forma que  $\alpha u$  e  $y^{(v)}$  possuam mesma magnitude.
- $F$  simboliza um valor atualizado continuamente e compreende as partes pouco conhecidas da planta, assim como efeitos das perturbações do processo. A estimativa de  $F$  requer um lapso de tempo bastante curto, sendo obtida por meio de fórmulas algébricas que contêm filtros passa-baixa e/ou integrais de tempo iteradas.

Considerando  $v = 1$  e fechando a malha de controle utilizando um controlado PID, obtém-se a equação 2.5:

$$u = -\frac{1}{\alpha} (F - \dot{y} + K_p e + K_i \int e + K_d \dot{e}) \quad (2.5)$$

onde.

1.  $u$  representa a ação de controle;
2.  $e$  consiste no erro de rastreamento, ou seja,  $e = y - \dot{y}$ , e;
3.  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$  são, respectivamente, os ganhos proporcional, integrativo e derivativo do controlador.

Observe que, combinando as equações 2.4 e 2.5, encontra-se a equação 2.6. Nesta nova equação, o parâmetro  $F$  não aparece mais na equação, ou seja, todas as partes desconhecidas, e efeitos das perturbações do processo, não aparecem mais, assim, a sintonia do controlador resume-se ao ajuste dos ganhos  $K_p$ ,  $K_i$  e  $K_d$ , que são a dinâmica do erro, tornando, assim, o ajuste mais simples (MICHEL et al., 2022).

$$K_d \ddot{e} + K_p \dot{e} + K_i e = 0 \quad (2.6)$$

### 2.3.3.1 Estimador discreto

Para implementação do parâmetro  $F$ , pode-se isolar  $F$  na Equação 2.4. Para a derivada de  $y$ , com  $\nu = 1$ , como um derivador puro não é prático, realiza-se uma aproximação de  $y^{(1)}$  por um filtro passa-alta, obtendo  $\hat{y}^{(1)}$ , resultando na Equação 2.7:

$$\hat{y}^{(1)}(t) = \frac{s}{\tau s + 1} \quad (2.7)$$

sendo  $\tau$  um parâmetro de ajuste desta dinâmica derivadora. Utilizando o método de Euler para discretizar a Equação 2.7, pode-se obter a Equação 2.8:

$$\hat{y}^{(1)}(k) = \frac{\frac{1}{\tau}(z-1)}{z-1+\frac{T_s}{\tau}} y(k) \quad (2.8)$$

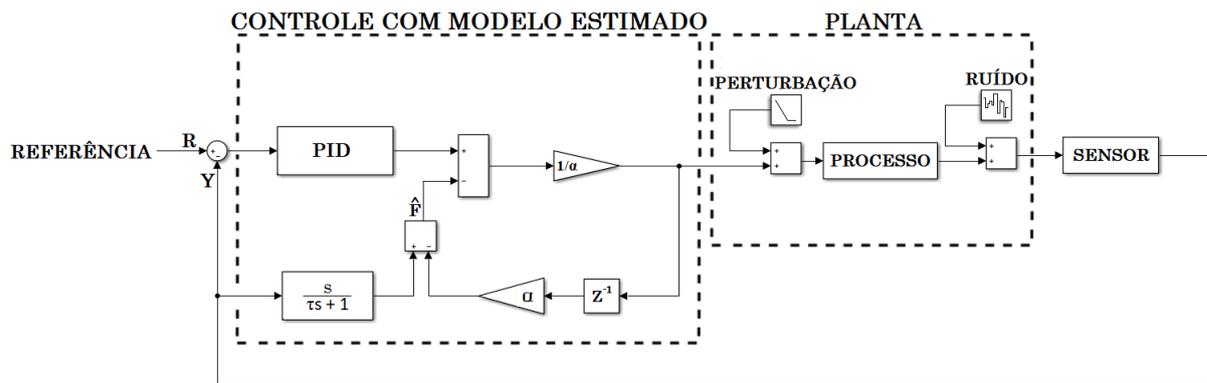
sendo  $T_s$  o tempo de amostragem utilizado para discretizar a equação.

Por fim,  $u(k)$  também precisa ser discretizado e, como o valor atual está sendo calculado, utiliza-se uma aproximação por  $u(k - 1)$ , assim, obtém-se na Equação 2.9 a forma discreta para um estimador ( $\hat{F}$ ) do parâmetro  $F$ .

$$\hat{F} = \frac{\frac{1}{\tau}(z-1)}{z-1+\frac{T_s}{\tau}} y(k) - \alpha u(k-1) \quad (2.9)$$

Com a implementação do estimador, juntamente com o controlador PID, tem-se na Figura 10, a estrutura de controle para um controle sem modelo juntamente com sua interação com o processo.

Figura 10 – Estrutura de controle sem modelo.



Fonte: Autor (2022).

### 2.3.3.2 Exemplo de implementação

Dando como exemplo a escolha de um modelo ultra local com  $\nu = 1$ , onde tem-se um sistema com seu comportamento aproximado pela função de transferência da Equação 2.10, sendo:

$$G = \frac{(s+2)^2}{(s+1)^3} \quad (2.10)$$

Para a sintonia do controlador escolheu-se um tempo de assentamento desejado para o sistema de 3s e, escolhendo os polos desejados como iguais e reais, encontra-se os ganhos do controlador como  $K_p = 3,2$  e  $K_i = 2,56$ , chegando na Equação 2.11 do controlador:

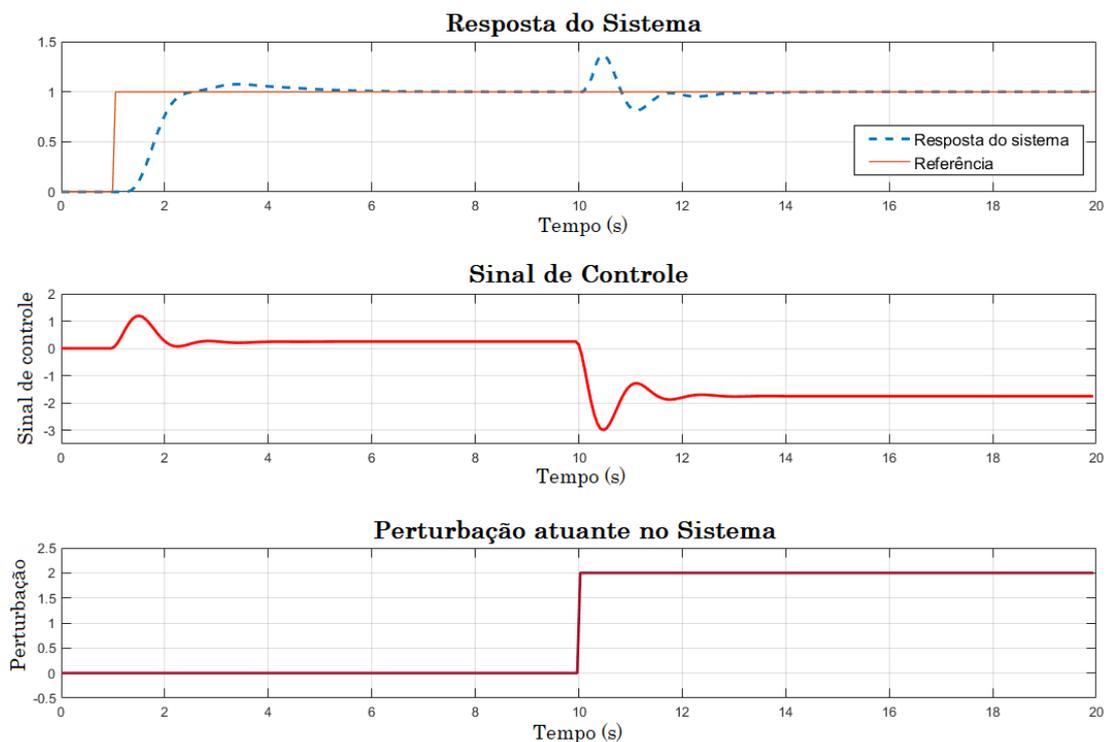
$$C = \frac{K_p s + K_i}{s} = \frac{3,2s + 2,56}{s} \quad (2.11)$$

Implementando a estrutura da Figura 10 e realizando alguns testes, para a sintonia do estimador escolheu-se  $\alpha = 4$  e  $\tau = 0,1$ , é obtida uma aproximação da derivada de  $y$  conforme a Equação 2.12:

$$\frac{s}{\tau s + 1} = \frac{s}{0,1s + 1} \quad (2.12)$$

Discretizando as equações 2.10, 2.11 e 2.12, e utilizando a ferramenta Simulink no Matlab, na Figura 11, pode-se observar a resposta do sistema e o sinal de controle enviado para implementação do controle sem modelo no tempo discreto, onde o controle se comportou muito bem frente a mudança de *setpoint*. Observa-se, também, que o controlador conseguiu atender o tempo de assentamento especificado de 3s e, dada uma perturbação atuando no processo, o controlador sem modelo conseguiu levar a resposta do sistema de volta a referência desejada.

Figura 11 – Resposta de controle sem modelo.



Fonte: Autor (2022).

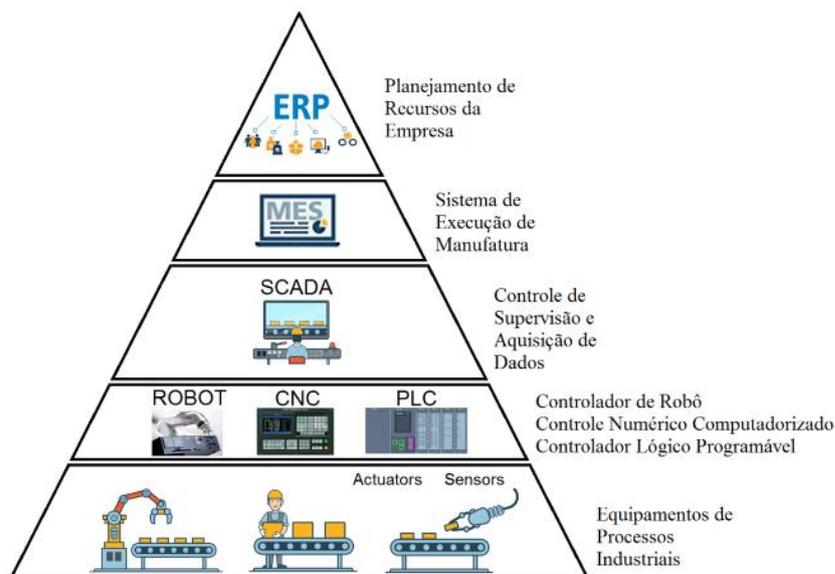
## 2.4 DISPOSITIVOS UTILIZADOS

Neste t pico são abordados os dispositivos utilizados na implementação para o controle e supervisório do processo. Neste processo, utiliza-se um PLC300 e quatro servoconversores SCA06 para acionamento e controle, e uma IHM MT8071 para supervisão e interação com o processo.

### 2.4.1 Controlador Lógico Programável

Os controladores lógicos programáveis (CLP) propiciam meios de lógica de software relativamente simples, com hardware robusto, redes com comportamentos controláveis em tempo real e com interconexão física com dispositivos como sensores e atuadores. Os CLPs são equipamentos utilizados para automação de fábrica e projeto de processos industriais regidos pela norma IEC 61131, que inclui estilo de programação, estilo de rede e interconexões físicas, cada uma permitindo a composição de componentes em sistemas de automação complexos com comportamento previsível (SEHR et al., 2021). Na Figura 12, pode-se observar a estrutura da pirâmide de automação e em qual nível da pirâmide se encaixa o CLP.

Figura 12 – Pirâmide de Automação.



Fonte: Dornelles (2021).

O CLP, juntamente de controladores de robôs e de controle numérico computadorizado, forma a camada de controle da tradicional Pirâmide de Automação, operando entre dispositivos de campo, como sensores, atuadores, sistemas de supervisão, e sistemas de controle distribuído ou interfaces homem-máquina. Nas camadas superiores, os dados adquiridos nas camadas inferiores são processados por sistemas de execução de fabricação e planejamento de recursos empresariais (SEHR et al., 2021).

A função do CLP é em monitorar entradas, realizar o processamento e tomar decisões baseadas na sua programação e, assim, controlar as saídas, automatizando um processo e/ou máquina. É utilizado para aplicações comerciais e industriais, possuindo capacidade de processar informações em tempo real, além de robustez para atuar em diversas condições severas como de poeira, umidade e altas temperaturas (NERES, 2016).

Este controlador tem em sua estrutura, basicamente, uma CPU (unidade central de processamento) e módulos de entrada e saída que podem receber/enviar sinais digitais ou analógicos (SANCHES, 2019). Podem ser programados em várias linguagens com diferentes níveis de abstração, tais como:

- a. Texto estruturado (baseado na linguagem Pascal);
- b. Lista de instruções (semelhante à linguagem assembly);
- c. Diagrama ladder (baseado em notação utilizada em circuitos de relés);
- d. Diagrama de blocos de funções (linguagem gráfica);
- e. Gráficos de funções (semelhante às redes de Petri).

#### 2.4.1.1 PLC300

O PLC300, utilizado para gravação de receitas, que são importantes informações utilizadas para o ajuste para o processamento de cada produto e, envio/recebimento de dados do servoconversor, é um CLP robusto fabricado pela empresa WEG. Este CLP foi desenvolvido para atender às demandas de controle de máquinas e pequenos processos industriais. Ele tem tamanho compacto com possibilidade de expansão, possui alta velocidade de processamento e grande capacidade de memória, com cinco portas de comunicação incluídas, assim, possibilitando que o PLC300 seja mestre de redes como CANopen, Modbus-RTU e Modbus-TCP (WEG, 2022b).

O controlador PLC300 (Figura 13) é programado utilizando o software WPS (WEG Programming Suite), e suas principais características são:

- processador ARM Cortex-M3 de 32 bits - 120 MHz;
- tensão de alimentação de 24 Vcc;
- 10 entradas digitais com frequência máxima de 4 kHz (DI9 e DI10 possuem frequência máxima de 100 kHz);
- 1 analógica com resolução de 12 bits;
- 9 saídas digitais, e uma saída PWM (D09);
- 1 saída analógica com resolução de 10 bits;
- possibilidade de expansão de E/S digital e analógico via rede CANOpen;
- porta USB para comunicação (programação e monitoramento);
- relógio em tempo real (RTC).

Figura 13 – PLC300 WEG.



Fonte: WEG (2022c).

#### 2.4.2 Interface Homem-Máquina

A IHM (Interface Homem-Máquina) é um equipamento utilizado para possibilitar a interação entre o usuário com o equipamento. O uso da IHM se dá na parametrização e visualização do funcionamento do processo, assim, este equipamento possibilita, por meio dos parâmetros de leitura, a visualização de diferentes tipos de variáveis e a inserção de constantes que podem ser utilizadas no processo (LIMA, 2020).

MT8071iE é uma IHM da linha MT8000 produzida pela WEG com classificação NEMA 4. Este equipamento tem como características sua robustez e flexibilidade. A MT8071iE (Figura 14) tem uma tela de 7 polegadas e permite a comunicação com vários equipamentos pois possui portas seriais RS232/RS485 e Ethernet de comunicação. Possui um software de desenvolvimento gratuito, além de simulador do software aplicativo no computador (WEG, 2022d).

Essa IHM possibilita a utilização do protocolo DHCP para obter automaticamente o IP para a IHM se comunicar com outros equipamentos, como também possibilita a designação manual do IP (WEG, 2017).

Figura 14 – IHM WEG MT8071iE.



Fonte: Adaptado de CSA Automação Industrial (2022).

### 2.4.3 Servoconversor SCA06

O servoconversor SCA06, utilizado para o controle do servomotor (desbobinador), possui função SoftPLC, possibilitando a programação em linguagem ladder, blocos de posicionamento e comunicação CANopen, o que permite a utilização do equipamento para as mais variadas aplicações (WEG, 2019).

Para sua programação é possível a utilização dos softwares WLP, WPS e SuperDrive G2. As principais características do servoconversor SCA06 são:

- precisão de controle do movimento;

- operação em malha fechada;
- realimentação de posição por resolver;
- alimentação de controle e potência independentes;
- flexibilidade e integração ao acionamento;
- IHM com display de LED de seis dígitos;
- CANopen / DeviceNet na versão padrão.

O SCA06 (Figura 15), disponibiliza ao usuário uma interface de operação com display para utilização no comando, ajuste e visualização dos parâmetros necessários. Possibilita, também, tempos de frenagem muito reduzidos, além de funções especiais como a utilização de blocos de posicionamento na programação em ladder do SCA06, assim proporcionando uma extrema flexibilidade e integração ao acionamento (GUAZZELLI, 2019).

Figura 15 – Servoconversor SCA06.



Fonte: WEG (2022e).

## 2.5 PROGRAMAÇÃO

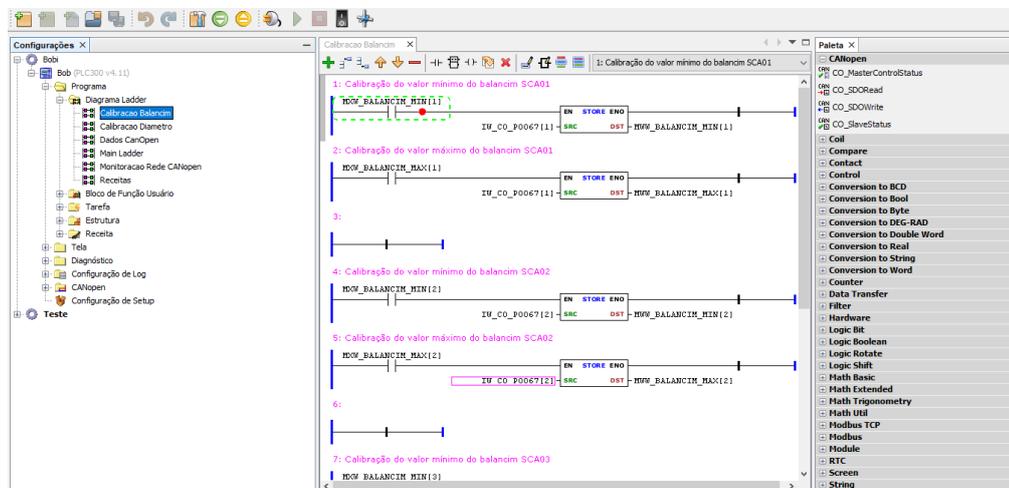
Neste tópico são abordados os três softwares utilizados para programação e configuração dos dispositivos abordados no tópico anterior.

### 2.5.1 WEG Programming Suite

O software WPS é uma ferramenta que facilita a criação de aplicações em automação com monitoramento, parametrização e programação em linguagem ladder seguindo as deliberações da norma IEC 61131-3, assim, todas aplicações desenvolvidas neste software seguem a estrutura hierárquica onde se tem a configuração no nível mais alto da hierarquia, seguido de recurso e POU (*program organization unit*), e no nível mais baixo as tarefas, que são processos que controlam a ordem e o tempo de execução dos POU's. A janela principal do WPS pode ser dividida em 6 partes principais: menu, barra de ferramentas, janela das configurações, janela do editor, janela da paleta e janela de saída (WEG, 2022f). Pode-se ver, na Figura 16, três das principais janelas disponíveis. O WPS tem como principais características:

- parametrização dos equipamentos;
- programação dos equipamentos em linguagem Ladder;
- monitoração dos equipamentos;
- assistência de criação e configuração de aplicações na área de automação.

Figura 16 – WEG programming suite.



Fonte: Autor (2022).

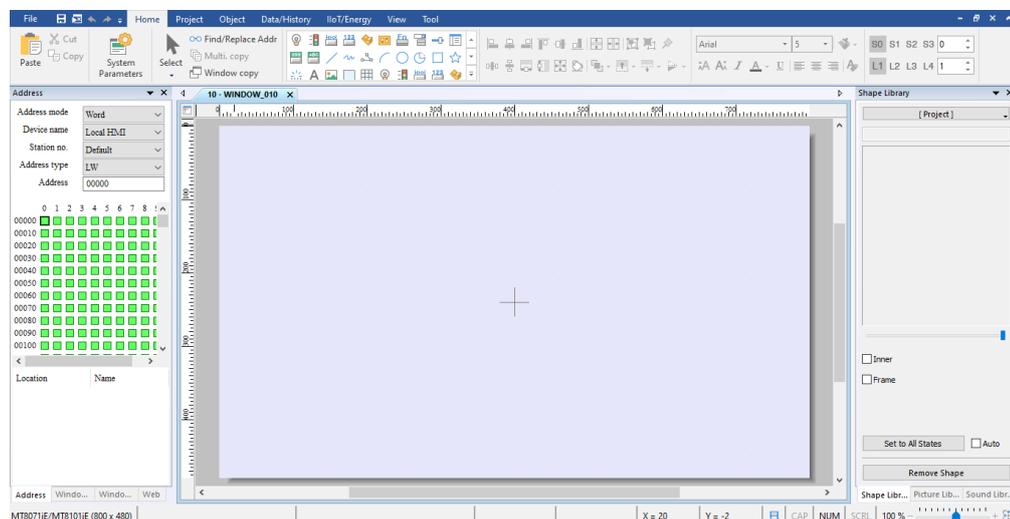
### 2.5.2 EasyBuilder Pro

O EasyBuilder PRO é um software de configuração utilizado para realizar programação e configuração de IHM, permitindo que o usuário crie o projeto com facilidade e rapidez com objetos funcionais, incluindo objeto numérico, objeto de lâmpada, botão de combinação, alarme, receitas e manutenção. O ambiente de desenvolvimento é dividido em diferentes seções, com a seção das janelas, onde é possível visualizar as diferentes janelas que serão programadas. Possui uma barra de objetos funcionais, agrupados e marcados de forma simples para facilitar seu uso, onde é possível encontrar lâmpadas de bits, lâmpadas de palavras, temporizadores, interruptores, interruptores multiestado, controles deslizantes, botões, teclas de função, gráficos, animações, numérico, ASCII e outros (BLANCO, 2019).

No EasyBuilder existem bibliotecas de gráficos e animações, as quais o usuário pode adicionar imagens dentro dos diferentes formatos permitidos (BMP, JPG, GIF e PNG). Outro aspecto notável deste software são as macros programáveis, que facilitam a programação em certas ocasiões, por meio de operações lógicas e aritméticas e o uso de diferentes funções. Essas funções permitem a manipulação de dados, aquisição e transferência de dados com o CLP (BLANCO, 2019).

Possui ambiente de simulação *online* e *offline*, de forma a simular o projeto tanto com a conexão ao CLP como sem ele. Este software também suporta mais tipos de protocolos de comunicação: Ethernet/IP, Modbus TCP. Possui a funcionalidade de transferir o projeto do PC para a IHM, assim como da IHM para o PC. Na Figura 17 tem-se a janela inicial do software.

Figura 17 – Tela inicial EasyBuilder PRO.



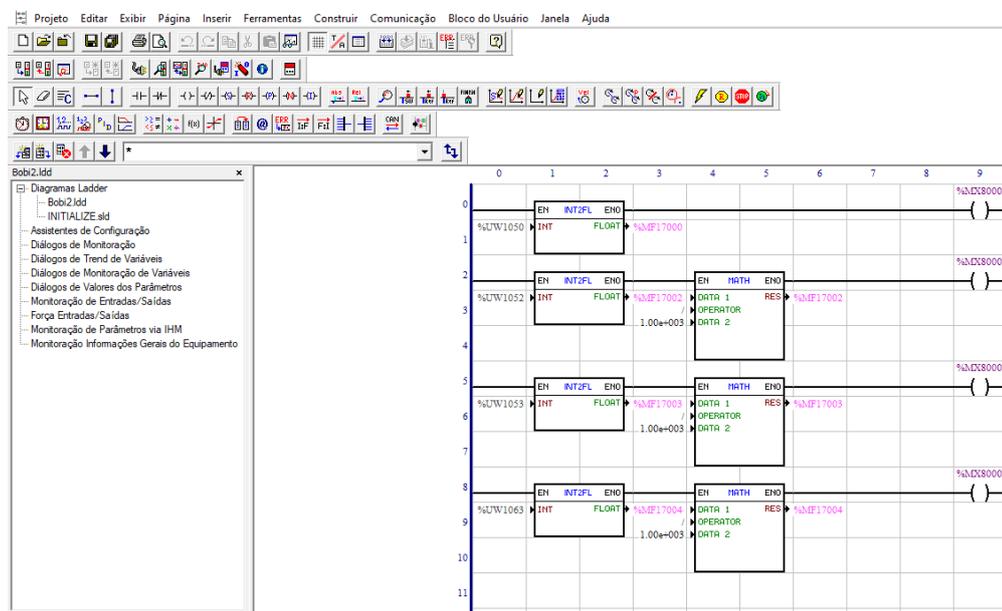
Fonte: Autor (2022).

### 2.5.3 WEG Ladder Programmer

O software WLP (WEG Ladder Programmer) é uma ferramenta que facilita a criação de aplicações em automação com programação, monitoramento e comando seguindo as deliberações da norma IEC 61131-3 (WEG, 2022g). O WLP (Figura 18) é utilizado para programação do servoconversor SCA06 e suas principais características são:

- disponibilidade de vários blocos de funções em ladder para edição do programa;
- transferência do programa compilado para os equipamentos;
- leitura do programa existente nos equipamentos, para equipamentos que suportam a funcionalidade de Upload;
- monitoramento em tempo real do programa que está sendo executado nos equipamentos;
- comunicação através de serial em RS-232 ou USB ponto-a-ponto com os equipamentos;
- comunicação serial em RS-485 com até 30 equipamentos, através de um conversor RS-232 para RS-485 conectado no PC.

Figura 18 – WEG Ladder Programmer.



Fonte: Autor (2022).

## 2.6 COMENTÁRIOS

Neste capítulo, foram tratados os assuntos mais importantes para desenvolvimento do presente trabalho. Estes assuntos podem ser divididos em grupos, sendo eles: (i) estrutura de capacitores de filme metalizado e o processo de fabricação dos mesmos; (ii) teoria sobre controle; (iii) equipamentos utilizados para acionamento, controle e supervisão do processo de bobinagem.

Para o grupo de seções que apresenta sobre capacitores e sua fabricação, tem-se o entendimento do funcionamento básico de um capacitor e as características de capacitores que utilizam filme metalizado, assim como da necessidade que existe no controle do processo de fabricação da bobina de filme metalizado utilizada para formação do capacitor.

O grupo sobre controle, apresenta a base de uma estrutura de controle, as dificuldades em realizar o controle em sistemas desbobinador e bobinador e, apresenta um método de controle não tão conhecido, o controle sem modelo.

Na última parte do capítulo, são apresentados os dispositivos utilizados para o acionamento e controle do desbobinador e, para supervisão do processo. Neste grupo é tratado, também, sobre os softwares utilizados para programação de cada dispositivo utilizado.

### 3 RESULTADOS: DOCUMENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE

Motivado pela necessidade de um entendimento maior sobre o processo, este capítulo apresenta o funcionamento do processo. Para entendimento do controle implementado após *retrofitting* realizado na máquina, contatou-se o desenvolvedor da programação do processo para obter um entendimento do atual funcionamento tanto do processo, como do controlador.

Foram obtidas informações do processo, sendo elas: a velocidade média do filme fica em torno de 6 m/s; o filme tem uma variação em sua espessura entre 2,5  $\mu\text{m}$  até 12  $\mu\text{m}$ . Também foi obtido que na situação atual o controlador necessita de várias calibrações por parte do operador, sendo necessário o envio de informações para calibração da posição do *dancer* e calibração do diâmetro, além de apresentar uma oscilação do *dancer* maior do que a esperada.

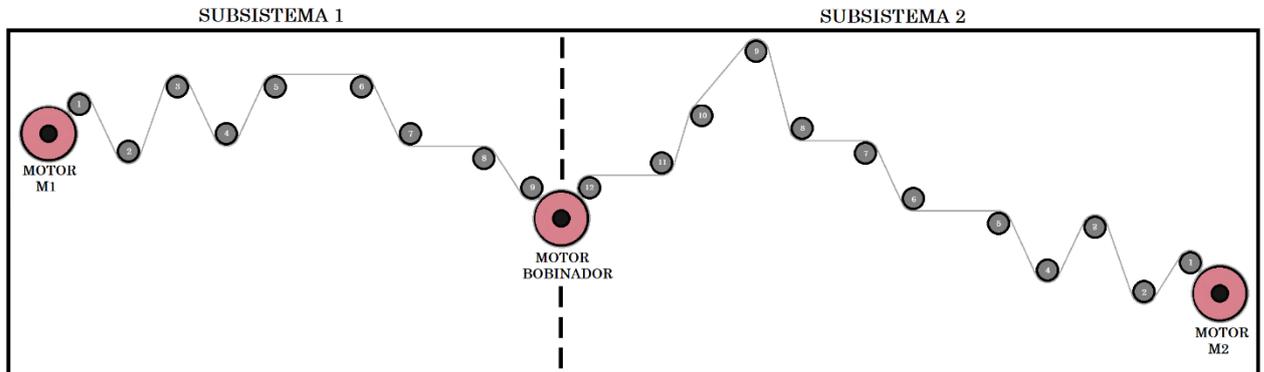
#### 3.1 CONFIGURAÇÃO DA MÁQUINA BOBINADEIRA

A máquina bobinadeira abordada no presente trabalho, funciona de modo em que podem ser fabricadas duas bobinas ao mesmo tempo. Na Figura 19, se tem um diagrama que representa uma das duas partes desta máquina, ou seja, a fabricação de uma bobina. Para formação da bobina de capacitor de filme metalizado, é necessário utilizar dois filmes que formam um par, assim, obtendo duas placas condutoras em paralelo.

Este processo foi separado em subsistemas, onde cada subsistema tem um desbobinador, um *dancer* e vários rolos. No subsistema 1, tem-se o motor desbobinador controlado por um servoconversor SCA06 denominado como M1 e, para o subsistema 2, tem-se o motor desbobinador controlado por um servoconversor SCA06 denominado M2, assim, totalizando quatro servoconversores SCA06 na máquina. O motor bobinador, que tem como função de enrolar os filmes metalizados até formação da bobina, está localizado ao centro da Figura 19.

Para está máquina bobinadeira, utiliza-se também um PLC 300 que tem como função de comunicação entre os dispositivos, ou seja, realizar a comunicação entre o usuário e os quatro servoconversores.

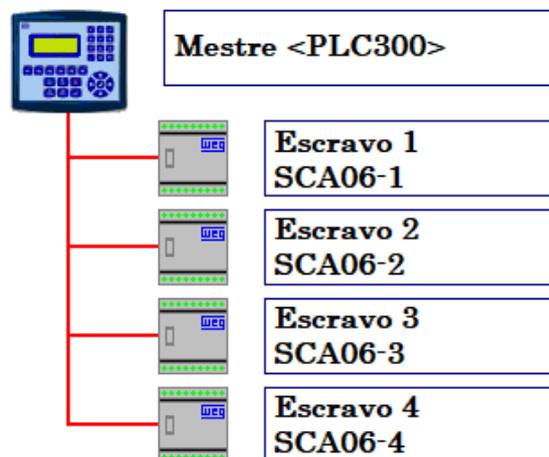
Figura 19 – Subsistemas que formam uma bobina.



Fonte: Autor (2022).

Para comunicação entre os equipamentos (Figura 20), utiliza-se o PLC300 como mestre, controlando a rede de comunicação entre os dispositivos, e os quatro SCA06 utilizados como escravos.

Figura 20 – Comunicação entre equipamentos.



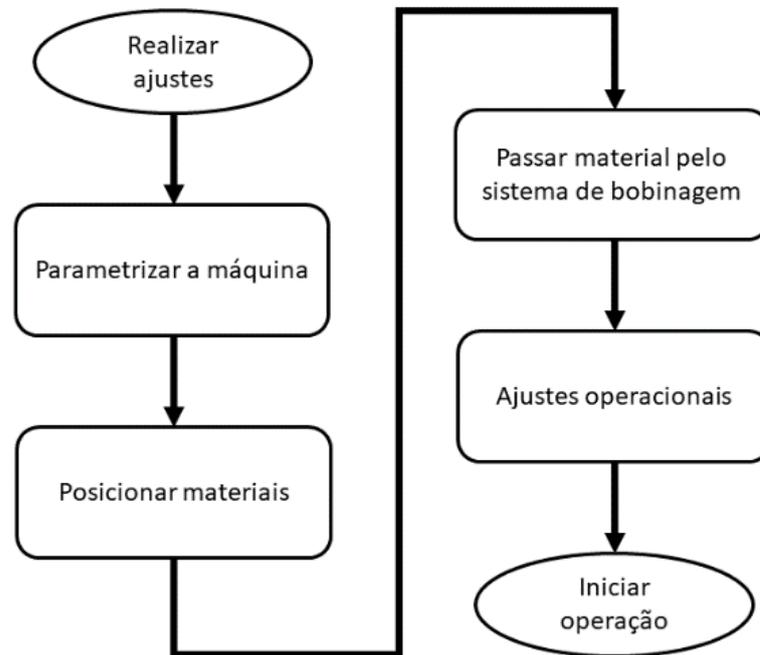
Fonte: Autor (2022).

### 3.2 FLUXO ATUAL DO PROCESSO

Para a primeira análise do fluxo de processo, realizou-se um estudo acerca da interação do usuário com o processo, as informações enviadas e recebidas pelo CLP e por último um estudo sobre o fluxo de controle atualmente utilizado.

Utilizando esta ferramenta tem-se representado, na Figura 21, um fluxo da etapa de *setup* da máquina, etapa esta que antecipa o início de operação da máquina.

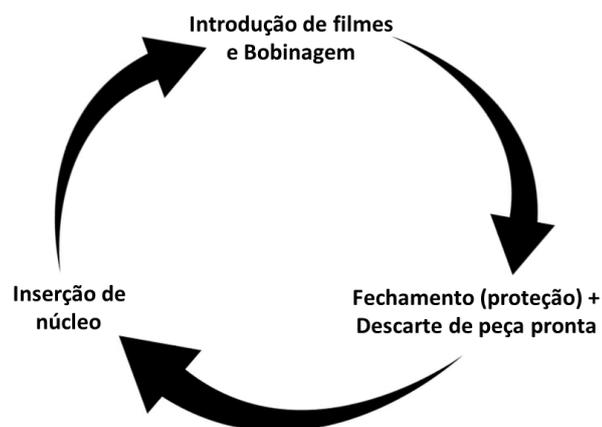
Figura 21 – Fluxo da etapa de setup da máquina.



Fonte: Autor (2022).

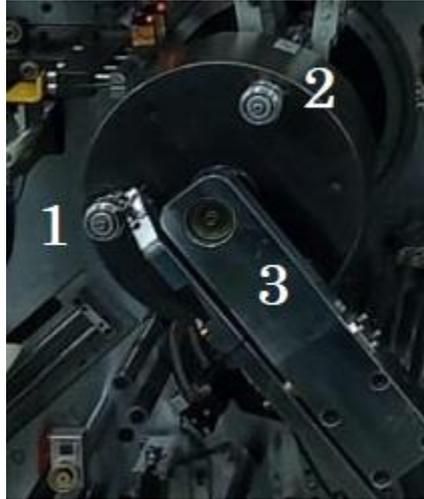
Esta máquina utiliza um magazine (Figura 23) no bobinador para que seja possível iniciar um novo elemento capacitivo (bobina) automaticamente. Conforme a Figura 22, este magazine tem três posições diferentes, sendo elas: na primeira posição, se tem a inserção do núcleo; a segunda posição é utilizada para introdução do filme e a bobinagem do mesmo; na terceira posição tem-se a colocação de x voltas de proteção na bobina e o descarte da bobina finalizada. Na Figura 24, tem-se um fluxo da etapa do processo de bobinagem.

Figura 22 – Giro do Magazine.



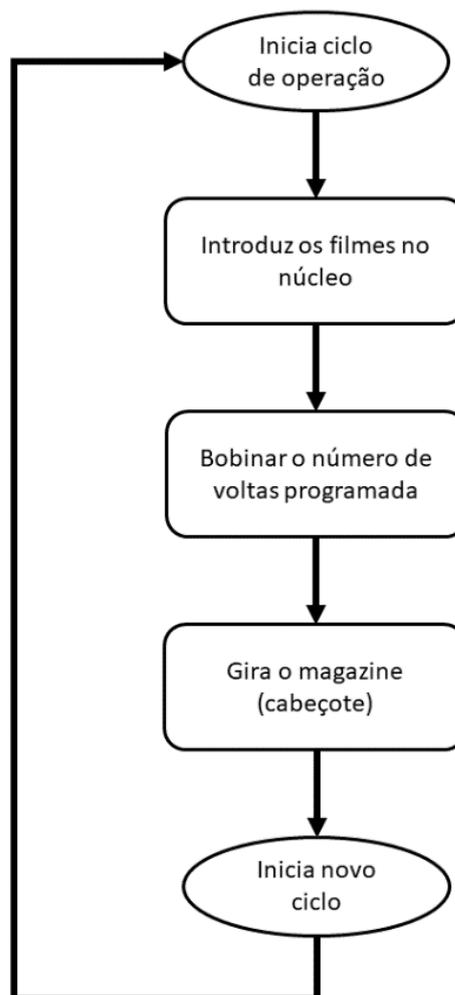
Fonte: Autor (2022).

Figura 23 – Foto Magazine.



Fonte: Autor (2022).

Figura 24 – Fluxo do processo de bobinagem.



Fonte: Autor (2022).

### 3.3 SISTEMA DE CONTROLE ATUAL

Como foco do estudo, utilizou-se o controle aplicado no escravo 1 (SCA06-1), sendo este subsistema o foco deste trabalho. Avaliando o controlador atualmente empregado por meio da programação desenvolvida no software WLP e aplicada no servoconversor, projetada de modo que a posição ideal do *dancer* seja igual a zero.

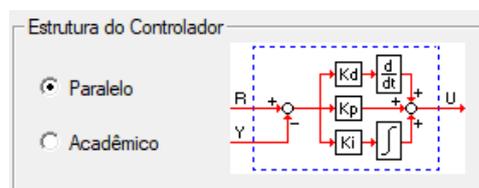
Para a referência, o valor enviado como *setpoint* para o controlador é um MF (marcador float), que é uma memória utilizada para armazenar valores do tipo float durante a programação, recebendo o valor da UW (parâmetro do usuário) 1050. Como a posição do *dancer* onde o filme metalizado tem a tensão desejada é zero, tem-se a referência definida como zero para que o controlador faça o processo seguir esse valor. Já para o sinal de controle, envia-se o valor da saída do controlador como referência para o bloco de controle de velocidade MC-MoveVelocity, sendo este um bloco próprio do software WLP, utilizado para o controle da velocidade do servomotor.

Calcula-se a realimentação que retorna para o controlador de forma a saturar o valor da posição atual do *dancer* entre dois valores definidos pelo usuário via IHM, assim, valores fora desta faixa são considerados como no momento da liberação da bobina finalizada e da colocação de um novo núcleo para iniciar uma nova bobinagem. Utiliza-se essa operação de saturação auxiliar no cálculo dos ganhos do controlador.

Conforme Figura 25, utilizou-se o controlador com sua estrutura em paralelo, onde as parcelas proporcional, integral e derivativa estão em paralelo e seus sinais são somados para formar o sinal de controle. Recebe-se o ganho derivativo via rede CANOpen, posteriormente salvo na UW 1053.

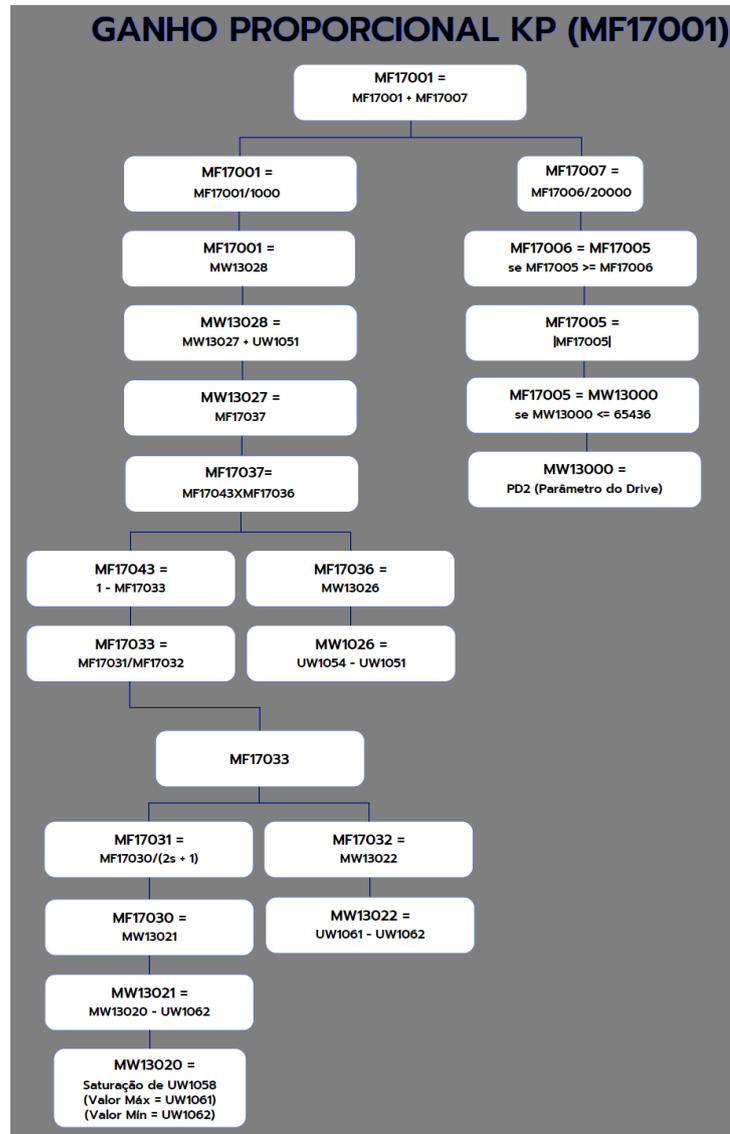
Para o ganho proporcional, pode-se visualizar na Figura 26 sua estrutura de cálculo do valor final. Recebendo o valor do diâmetro atual (UW 1058) via rede CANOpen e saturando entre dois valores de parâmetros do usuário, juntamente com o valor de velocidade atual (PD2) do servomotor controlado pelo SCA06-1.

Figura 25 – Estrutura controle atual.



Fonte: Autor (2022).

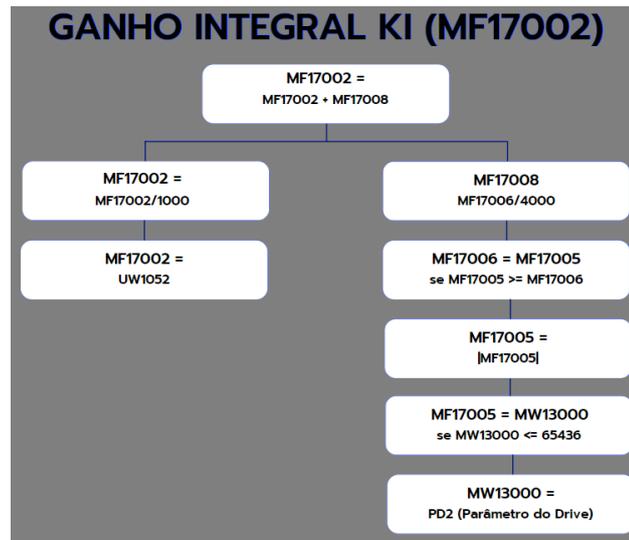
Figura 26 – Ganho Proporcional.



Fonte: Autor (2022).

Para o ganho integrativo, visto na Figura 27, calcula-se de forma a utilizar o valor de UW 1052 definido em receita e recebido do PLC300 via rede CANOpen, e utilizar o valor da velocidade atual (PD2) do servomotor controlado pelo SCA06-1.

Figura 27 – Ganho Integrativo.



Fonte: Autor (2022).

### 3.4 COMENTÁRIOS

Neste capítulo, foi apresentado o fluxo do processo e suas etapas, os cálculos realizados atualmente para obtenção dos ganhos do controlador, e a comunicação entre os dispositivos utilizados no processo.

Na primeira parte, realizando análise do fluxo e interação do usuário com o processo, pode-se destacar a necessidade atual do operador em realizar dois tipos de ajustes, sendo eles: ajuste de receita, balancim (*dancer*) e diâmetro; ajustes do par de filmes.

No entendimento sobre o controlador implementado, pode-se notar a grande utilização de valores enviados pelo usuário para o controlador, como da utilização de parâmetros do processo para auxílio nos cálculos dos ganhos. Para estes valores recebidos, são utilizados meios para filtrar a utilização dos valores, como a saturação do valor atual do diâmetro do rolo de filme metalizado entre um mínimo e um máximo, e a utilização da velocidade atual do servomotor.

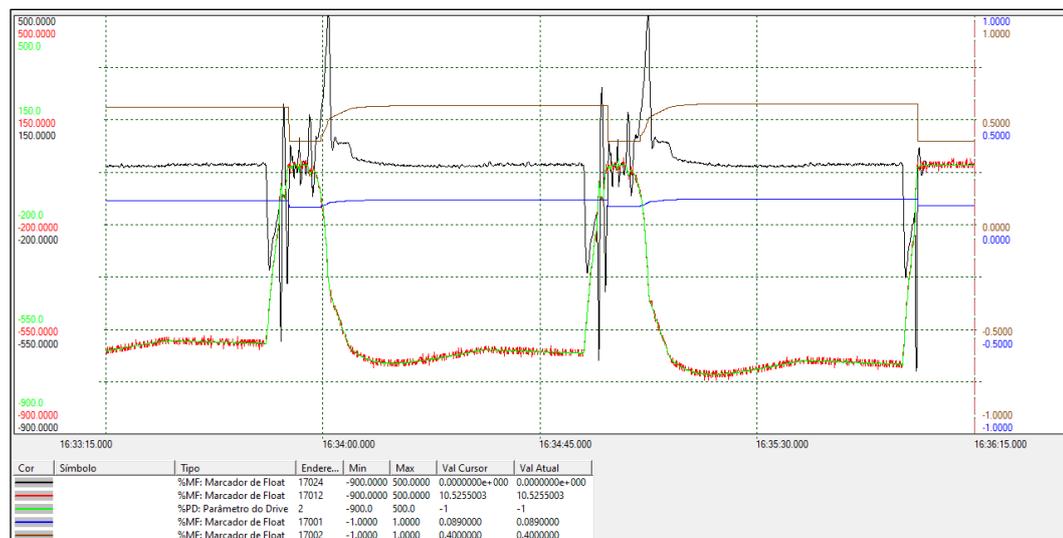
## 4 RESULTADOS: IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS E CONTROLE SEM MODELO

Este capítulo contém a tentativa de identificação do sistema, a implementação do controle sem modelo e os resultados durante a sintonia do estimador e do controle.

### 4.1.1 Identificação do sistema

Após entendimento do processo, utilizou-se a função de trend de variáveis do software WLP, conforme Figura 28, para realizar o acompanhamento online das variáveis de interesse, sendo elas: os sinais dos ganhos do controlador, em azul e marrom; a realimentação, que é a posição atual do *dancer*, em preto e; do sinal de atuação, que é uma referência de velocidade para o servomotor, em vermelho.

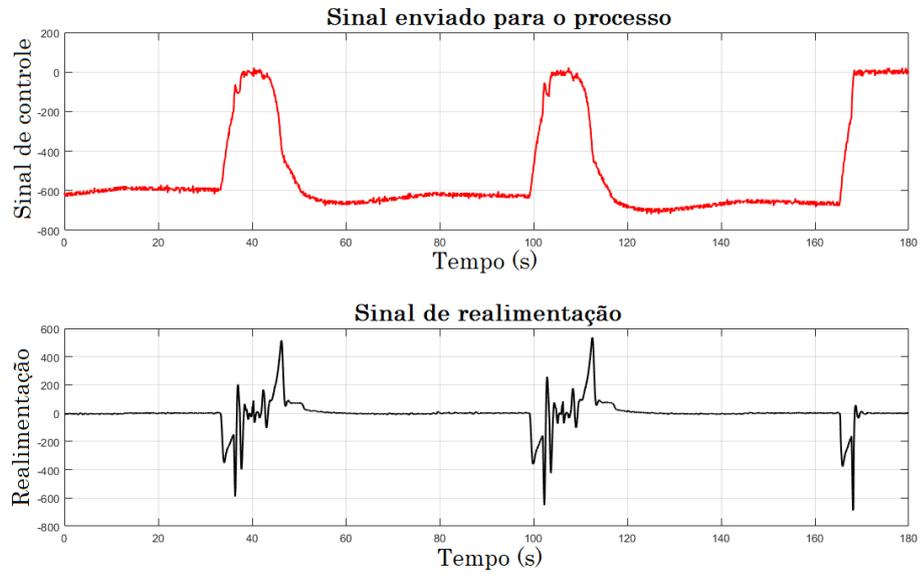
Figura 28 – Variáveis de interesse.



Fonte: Autor (2022).

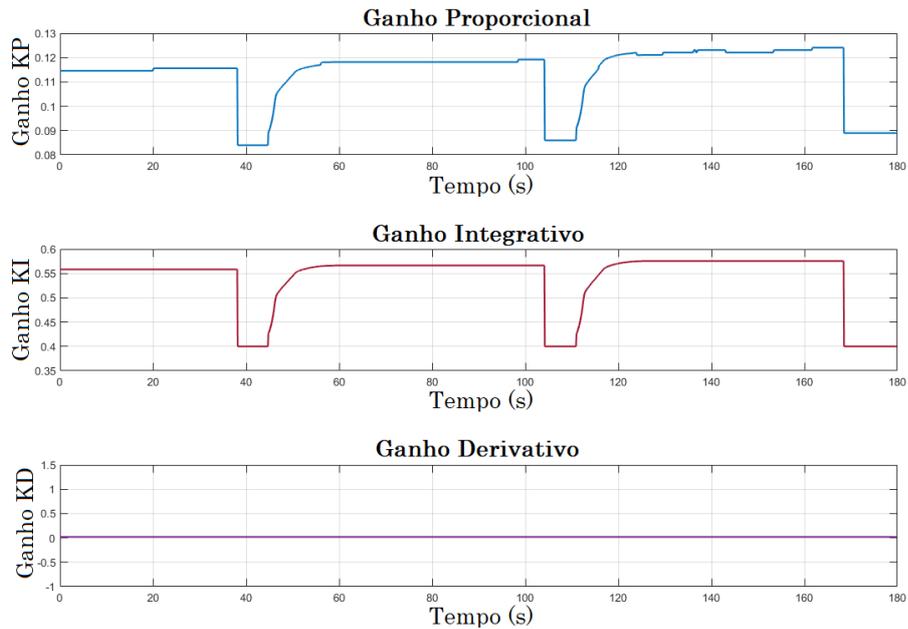
Utilizando um tempo de amostragem de 100ms, pode-se salvar em arquivo .tr e utilizar os valores para montar os gráficos com auxílio do software Matlab. Conforme Figura 29, observa-se os gráficos dos sinais de entrada e de saída do processo dada uma referência constante com valor zero e, na Figura 30, os ganhos em relação ao tempo. Pode-se observar, no sinal de realimentação, momentos de grandes variações do sinal, que são os momentos de giro do magazine, entregando a bobina formada para ser realizada a colocação da proteção e recebendo um novo núcleo.

Figura 29 – Sinal de realimentação e de controle.



Fonte: Autor (2022).

Figura 30 – Ganhos do controlador.



Fonte: Autor (2022).

Para ser projetado um controlador da forma tradicional, necessita-se de um modelo matemático aproximado relativo ao processo, deste modo, para obter a função de transferência aproximada para o processo de bobinagem de filme metalizado, utiliza-se os vetores com valores de entrada e saída do processo. Este procedimento de obtenção do modelo é facilitado com o uso de recursos provenientes do software Matlab, como a ferramenta *System*

*Identification*, na qual os dados do processo são importados e daí podem ser utilizados com diferentes técnicas de identificação para encontrar um modelo adequado para o sistema.

Conforme Figura 32, os valores de entrada e saída do processo são importados como *input* e *output*, respectivamente, utilizando o ícone *import data*. Com os dados na ferramenta, utiliza-se o ícone *estimate* e escolhendo algumas características como o número de polos e zeros, obtém-se um modelo aproximado do sistema. Para as duas funções de transferência obtidas, *tf1* e *tf2*, usou-se respectivamente 2 polos e um zero e 3 polos e dois zeros.

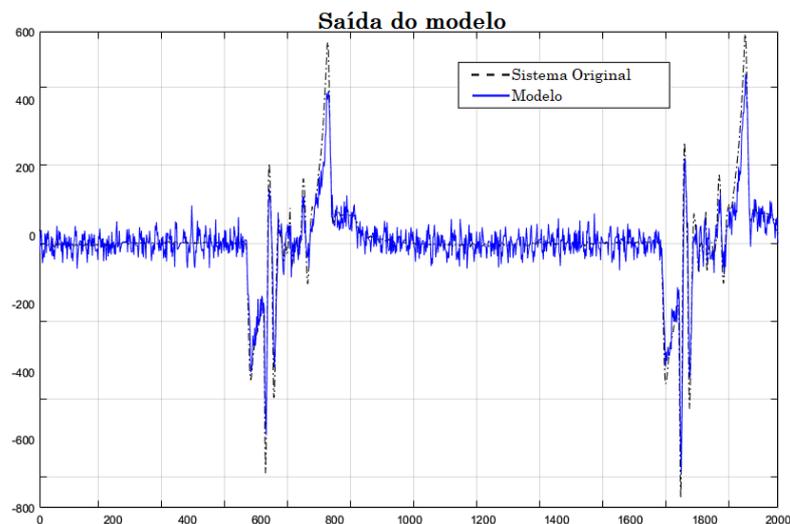
Por se tratar de um sistema muito rápido e por não ter sido possível a obtenção de um tempo de amostragem menor que 100ms, além da existência de um sinal de perturbação variante com atuação durante todo o processo, não foi possível obter modelos que representassem adequadamente o processo (Figura 31). Chegou-se nesta conclusão após análise das funções de transferências *tf1* (Equação 4.1) e *tf2* (Equação 4.2) obtidas utilizando o *System Identification*, onde as funções não apresentarem a dinâmica que se espera para o processo:

$$tf1 = \frac{-4,729s - 0,0000206}{s^2 + 0,6845s + 0,3182} \quad (4.1)$$

$$tf2 = \frac{-4,731s^2 - 0,001368s + ,000002645}{s^3 + 0,6895s^2 + 0,3182s + 0,0002983} \quad (4.2)$$

Conforme as funções de transferência obtidas com polos muitos próximos da origem, gerando um comportamento que não era desejado, assim, motivado pela necessidade de escolha de outro método de projeto de controlador, partiu-se para procura de um método que não necessita de modelo.

Figura 31 – Resposta modelo 1.



Fonte: Autor (2022).

Figura 32 – Identificação do sistema.

The screenshot displays the MATLAB/Simulink System Identification Toolbox interface. At the top, there are dropdown menus for 'Import data' and 'Import models'. The main workspace is divided into several sections:

- Operations:** A central area with a dropdown menu set to '<-- Preprocess' and an 'Estimate -->' button. A 'mydata Working Data' plot is shown in the center.
- Data Views:** A section on the left with checkboxes for 'Time plot', 'Data spectra', and 'Frequency function'.
- Model Views:** A section on the right with checkboxes for 'Model output', 'Model resid', 'Transient resp', 'Frequency resp', 'Zeros and poles', and 'Noise spectrum'.
- Data Views (Bottom Left):** A section with checkboxes for 'Time plot', 'Data spectra', and 'Frequency function'.
- Model Views (Bottom Right):** A section with checkboxes for 'Model output', 'Model resid', 'Transient resp', 'Frequency resp', 'Zeros and poles', and 'Noise spectrum'.
- Trash:** A trash can icon at the bottom center.
- Data Views (Bottom Left):** A section with checkboxes for 'Time plot', 'Data spectra', and 'Frequency function'.
- Model Views (Bottom Right):** A section with checkboxes for 'Model output', 'Model resid', 'Transient resp', 'Frequency resp', 'Zeros and poles', and 'Noise spectrum'.

Two red arrows point from the 'tf1' and 'tf2' model view plots to their respective 'Data/model Info' windows. The 'Data/model Info: tf1' window shows the following information:

- Model name: tf1
- Color: [0,0,1]
- Status: Estimated using TFEST on time domain data "mydata". Fit to estimation data: 57.65% (stability enforced). FPE: 1689, MSE: 1678
- Diary and Notes: % Import mydata; % Transfer function estimation; Options = tfestOptions; Options.Display = 'on'; Options.WeightingFilter = [];

The 'Data/model Info: tf2' window shows the following information:

- Model name: tf2
- Color: [1,0,0]
- Status: Estimated using TFEST on time domain data "mydata". Fit to estimation data: 57.8% (stability enforced). FPE: 1683, MSE: 1666
- Diary and Notes: % Import mydata; % Transfer function estimation; Options = tfestOptions; Options.Display = 'on'; Options.WeightingFilter = [];

Fonte: Autor (2022).

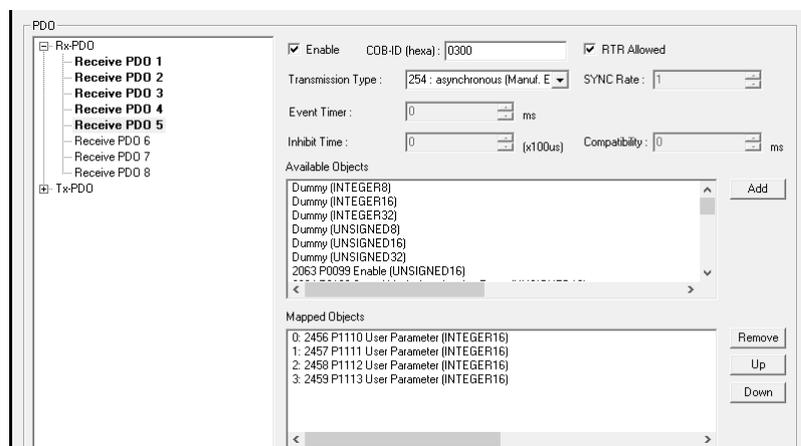
#### 4.1.2 Implementação do Controle Sem Modelo

Por não ter sido possível a identificação do sistema e projetar o controlador de maneira clássica, partiu-se para outra solução. Conforme Fliess e Join (2013), o controle sem modelo é

uma estrutura de controle onde não é necessário conhecer o sistema, onde um desconhecido modelo matemático “complexo” do sistema é substituído por um modelo ultra local, assim, decidiu-se pela utilização deste método de controle.

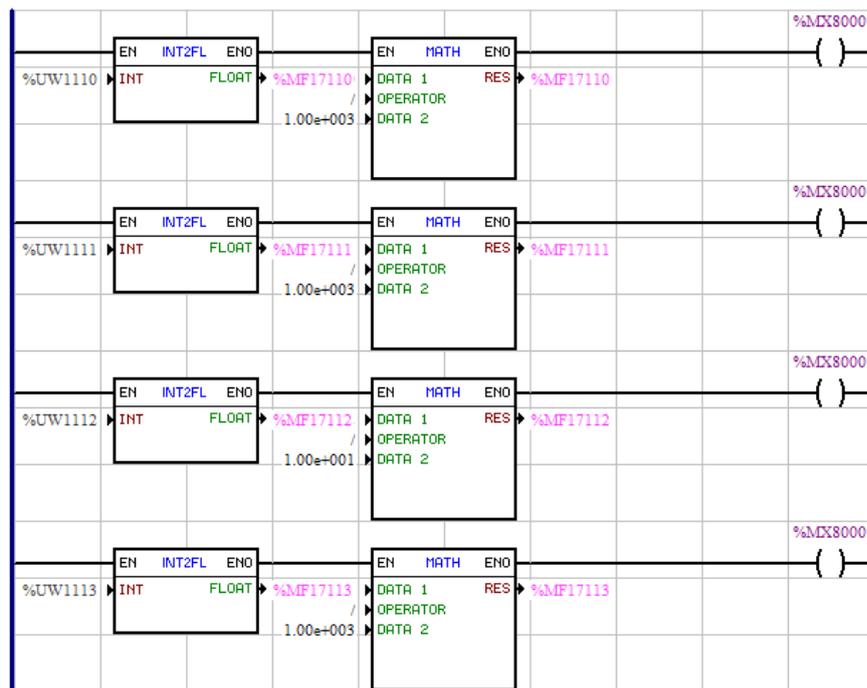
Primeiramente, conforme Figura 33, realizando a configuração da rede CANOpen via software WPS, envia-se do PLC300 para o servoconversor 01, via rede, os valores para os parâmetros do controlador e do estimador. Com os valores recebidas no servoconversor 01, salva-se esses valores em marcadores float (Figura 34).

Figura 33 – Envio de valores via rede CANOpen.



Fonte: Autor (2022).

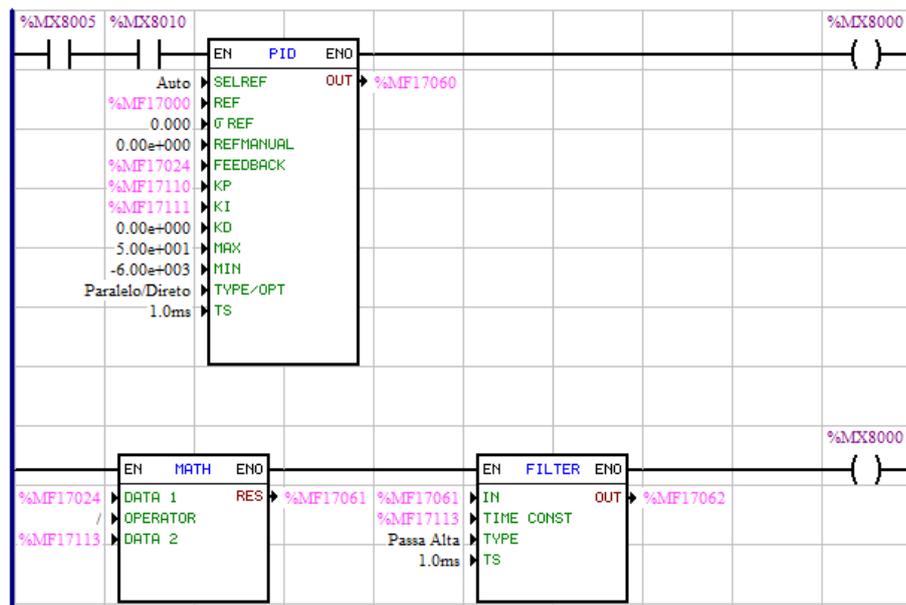
Figura 34 – Valores salvos no servoconversor.



Fonte: Autor (2022).

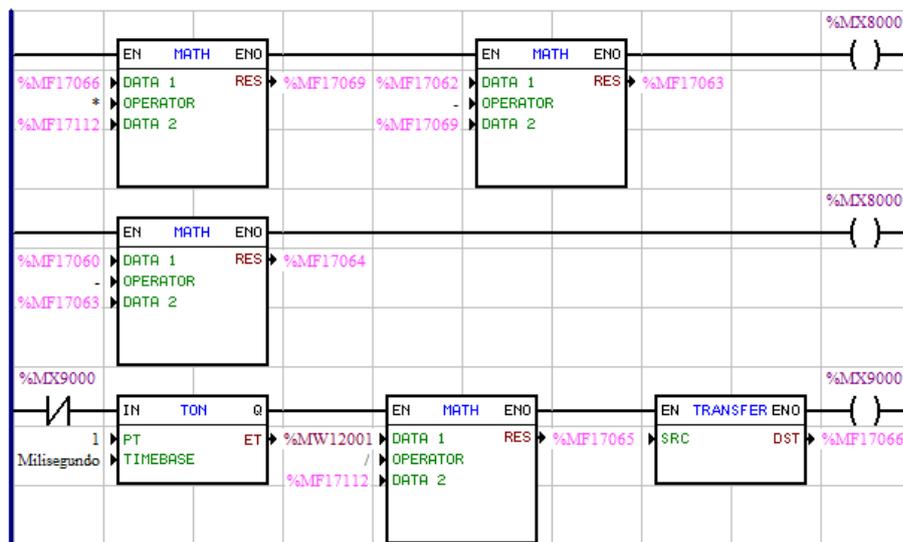
Conforme a estrutura do controle sem modelo apresentada na Seção 2.3.3, realizou-se a implementação da estrutura para o controlador sem modelo utilizando o software WLP. Na Figura 35, utilizou-se o bloco PID disponível para implementação do controlador juntamente com a utilização de um bloco de filtro configurado como passa-alta com constante de tempo  $\tau$ , utilizado para obter uma aproximação da derivada de primeira ordem de  $y$ . Conforme a Figura 36, observa-se a implementação do cálculo do sinal de controle passado vezes o parâmetro  $\alpha$ .

Figura 35 – Implementação do PI + aproximação da derivada de  $y$ .



Fonte: Autor (2022).

Figura 36 – Implementação  $\alpha u(k - 1) +$  sinal de controle.



Fonte: Autor (2022).

### 4.1.3 Desenvolvimento e Implementação do Supervisório

Para monitorar e ajustar as variáveis do processo, desenvolveu-se um supervisório pro processo para uma IHM MT8071 e, utilizando a ferramenta *Online Simulation* do software EasyBuilder PRO, pode-se realizar a comunicação e teste do supervisório desenvolvido mesmo antes de sua implementação física utilizando a IHM.

Utilizando um notebook para comunicar com o PLC300, pode-se observar nas Figuras 37, 38 e 39, respectivamente, a tela inicial ao energizar a IHM, a tela do menu principal para navegar entre as opções e, a tela de operação que disponibiliza para o operador uma visão geral das variáveis mais importantes a serem monitoradas do processo.

Figura 37 – Tela Inicial.



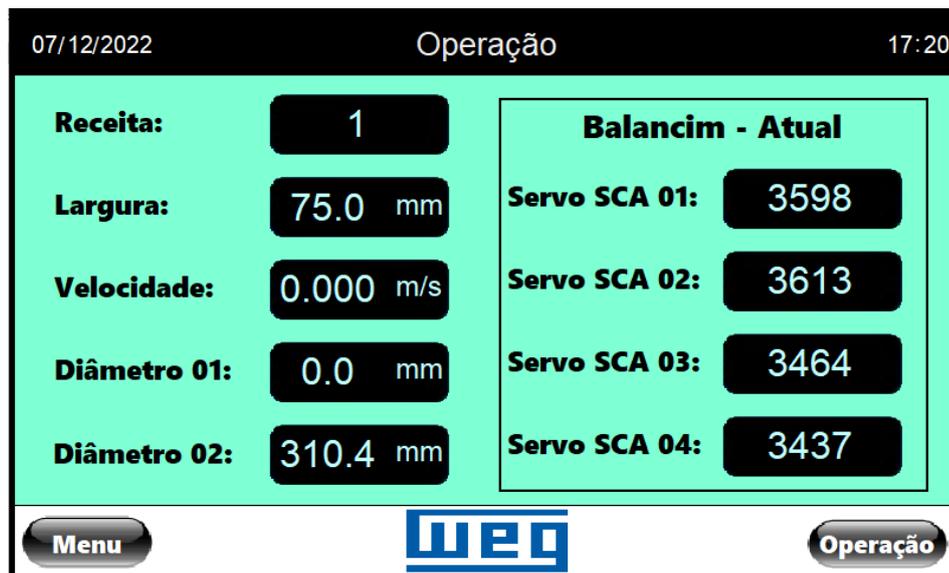
Fonte: Autor (2022).

Figura 38 – Tela Menu Principal.



Fonte: Autor (2022).

Figura 39 – Tela Operação.



Fonte: Autor (2022).

Na Figura 40, é mostrada a tela utilizada para calibração do balancim do subsistema controlado pelo servoconversor 01 e do balancim do subsistema controlado pelo servoconversor 02. Já a Figura 41 mostra a tela utilizada para calibração do balancim do subsistema controlado pelo servoconversor 03 e do balancim do subsistema controlado pelo servoconversor 04.

Figura 40 – Tela Calibração Balancim 1.

07/12/2022 **Calibração Balancim** 17:20

**Balancim - Servo SCA 01**

Mínimo: 2931 Máximo: 4264

Atual: 3598 Salva Min Salva Max

---

**Balancim - Servo SCA 02**

Mínimo: 2963 Máximo: 4264

Atual: 3613 Salva Min Salva Max

Menu **WEG** ▶ Operação

Fonte: Autor (2022).

Figura 41 – Tela Calibração Balancim 2.

07/12/2022 **Calibração Balancim** 17:21

**Balancim - Servo SCA 03**

Mínimo: 2812 Máximo: 4114

Atual: 3464 Salva Min Salva Max

---

**Balancim - Servo SCA 04**

Mínimo: 2816 Máximo: 4058

Atual: 3437 Salva Min Salva Max

Menu ◀ **WEG** Operação

Fonte: Autor (2022).

A Figura 42 e a Figura 43 mostram, respectivamente, as telas utilizadas para calibração dos diâmetros 1 e 2. A calibração do diâmetro é atualmente necessária pois a informação dos valores de mínimo e máximo dos diâmetros são utilizadas para o cálculo do diâmetro atual da bobina de filme do desbobinador.

Figura 42 – Tela Calibração Diâmetro 1.

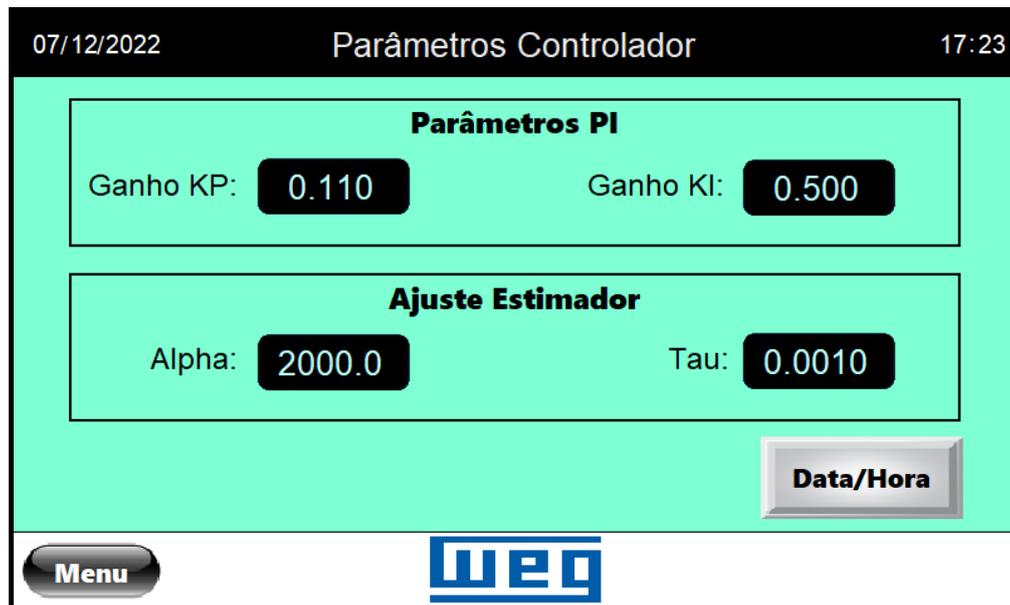
Fonte: Autor (2022).

Figura 43 – Tela Calibração Diâmetro 2.

Fonte: Autor (2022).

Na Figura 44 pode-se observar a tela utilizada para ajustes dos ganhos do controlador e dos parâmetros utilizados para o estimador do controlador sem modelo. Foram implementadas mais quatro telas, sendo elas: Tela de alarmes, Tela de receita, Tela de alteração de receita e Tela para ajuste da data e hora da IHM.

Figura 44 – Tela Ajuste Parâmetros Controlador.



Fonte: Autor (2022).

#### 4.1.4 Validação do código implementado

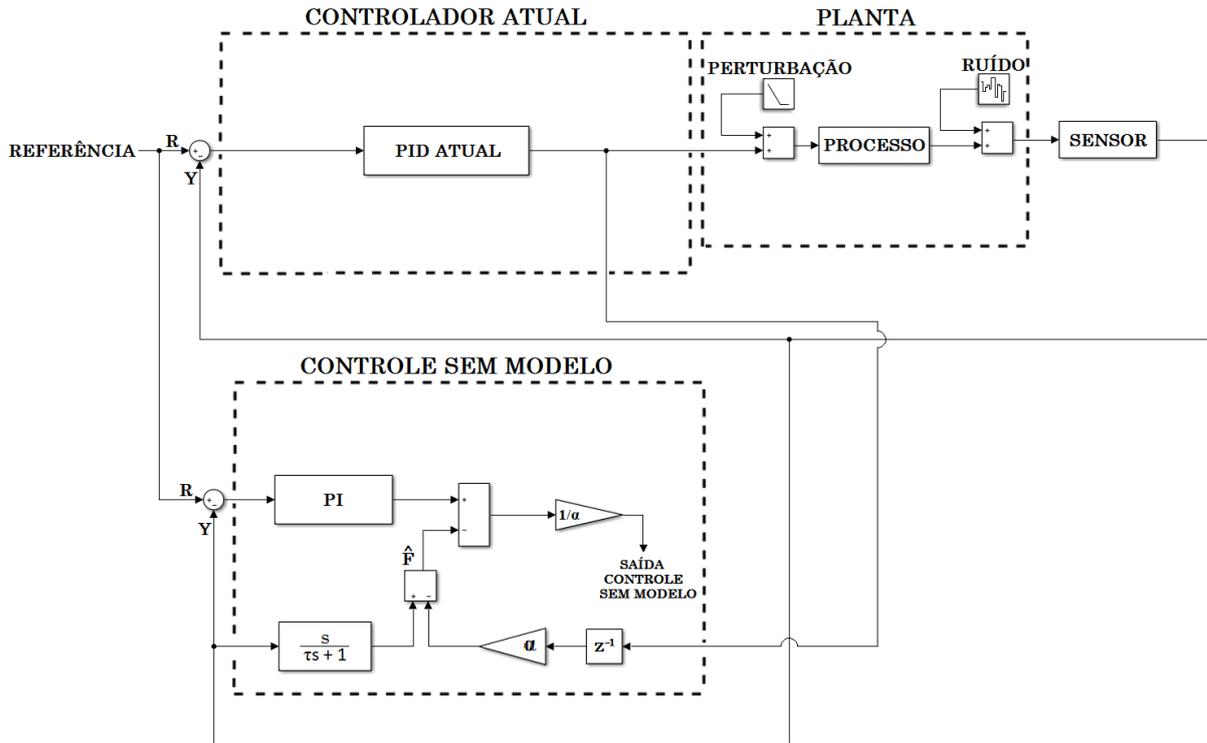
Para validar a implementação da estrutura do controle sem modelo no servoconversor e do funcionamento do estimador  $\hat{F}$ , realizou-se a implementação do controle sem modelo em paralelo ao controlador que está atualmente sendo utilizado no processo. Essa implementação em paralelo (Figura 45) ocorreu de forma que o controlador atual continuou em malha fechada e o controlador sem modelo recebia o sinal de controle do atual.

Com os controladores em paralelo implementados no servoconversor, realizou-se alguns testes para obter os parâmetros mais adequados para o estimador e, assim, foram medidas algumas variáveis durante o processo de bobinagem.

Primeiro, na Figura 46, tem-se o resultado de um teste medindo o sinal de controle do controlador atual, a saída do processo e o sinal do estimador. Após alguns testes, tem-se que utilizando  $\alpha = 2000$  e  $\tau = 0,001$ , observa-se que o estimador teve um bom resultado, com um sinal espelhado ao do sinal de controle.

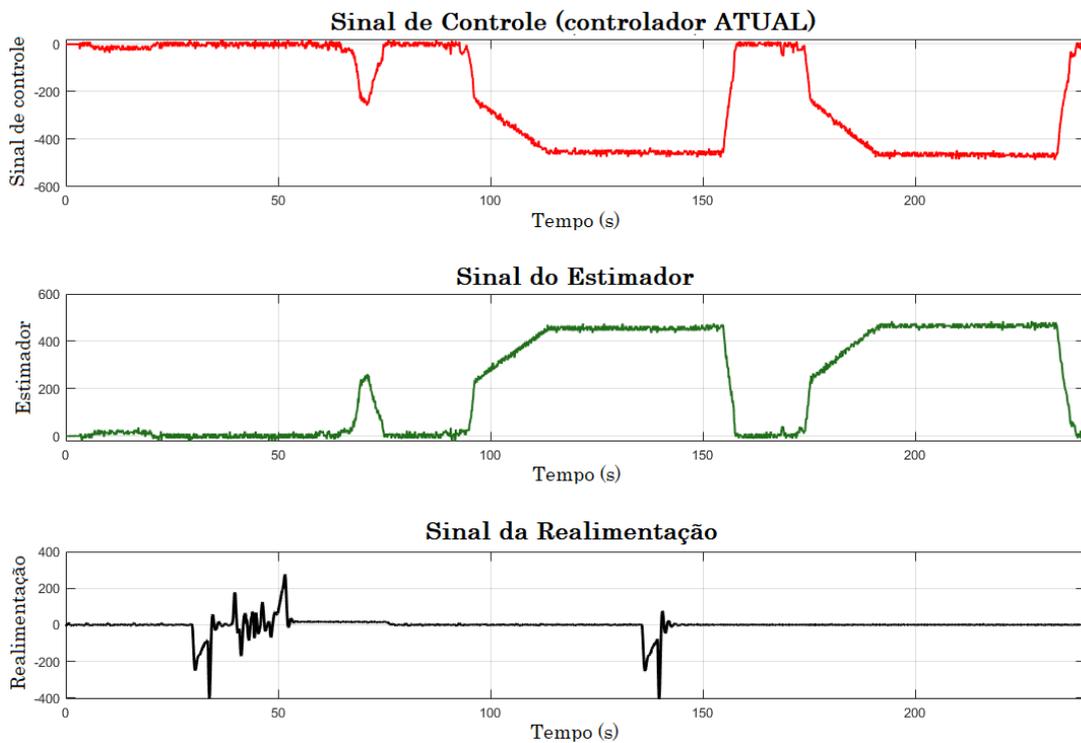
Depois do estimador estar sintonizado, partiu-se para um teste medindo os sinais de controle do controlador atual e do controle sem modelo, comparando os dois. Observa-se, na Figura 47, que os dois sinais de controle são muito próximos.

Figura 45 – Validação da estrutura do controle sem modelo.



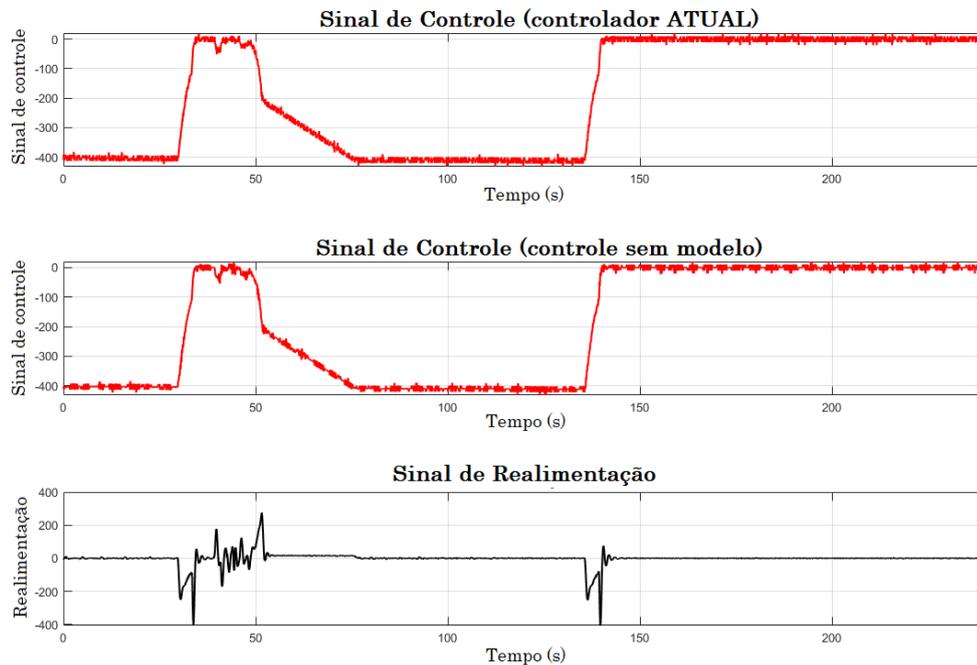
Fonte: Autor (2022).

Figura 46 – Sintonia do estimador.



Fonte: Autor (2022).

Figura 47 – Controladores em paralelo.



Fonte: Autor (2022).

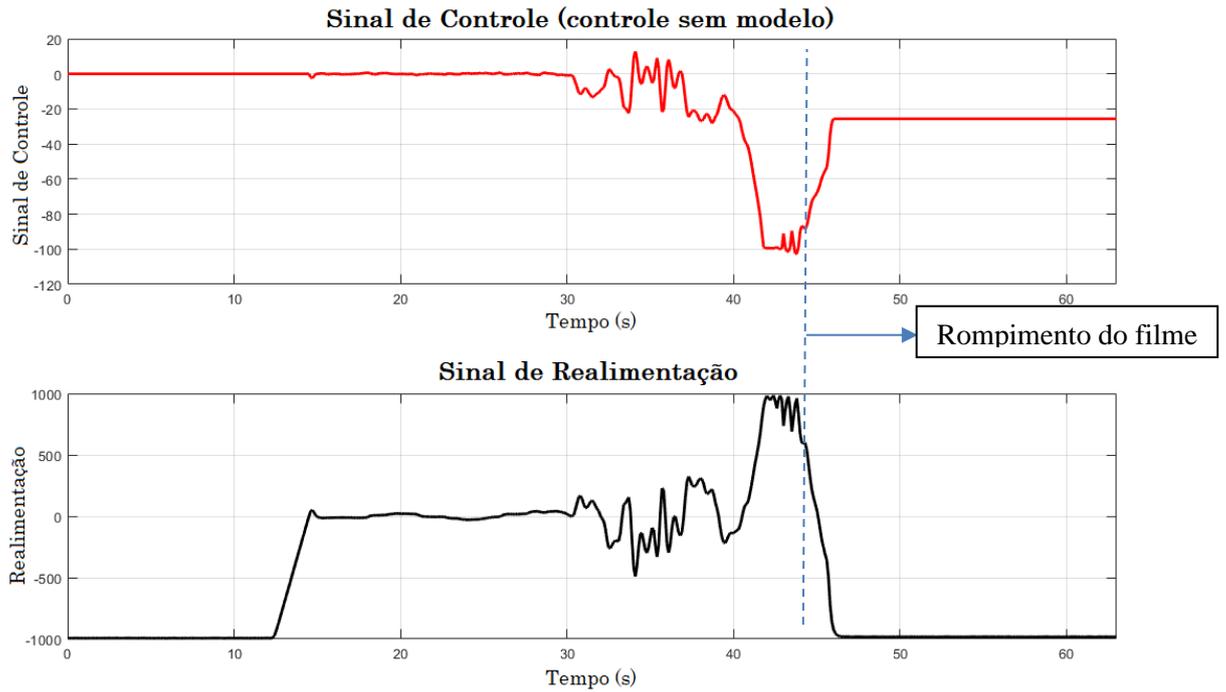
#### 4.1.5 Resultados finais

Com a sintonia do estimador realizada, partiu-se para implementação do controle sem modelo atuando no sistema. Fechando a malha com o controle sem modelo, utilizando  $\alpha = 2000$  e  $\tau = 0,001$ , iniciou-se os ajustes para os ganhos do controlador.

Na Figura 48, iniciou-se os testes com os ganhos próximos ao do controlador atual, sendo  $K_p = 0,078$  e  $K_i = 0,5$ . Com esses ganhos, tem-se um tempo de assentamento em torno de 5% do valor final de regime estacionário de aproximadamente 76,9s, observa-se que o controlador não foi agressivo o suficiente para aceleração do desbobinador acompanhar aceleração do bobinador, assim, a posição do *dancer* ficou muito elevada, gerando muita tensão no filme e conseqüentemente o rompimento do filme metalizado.

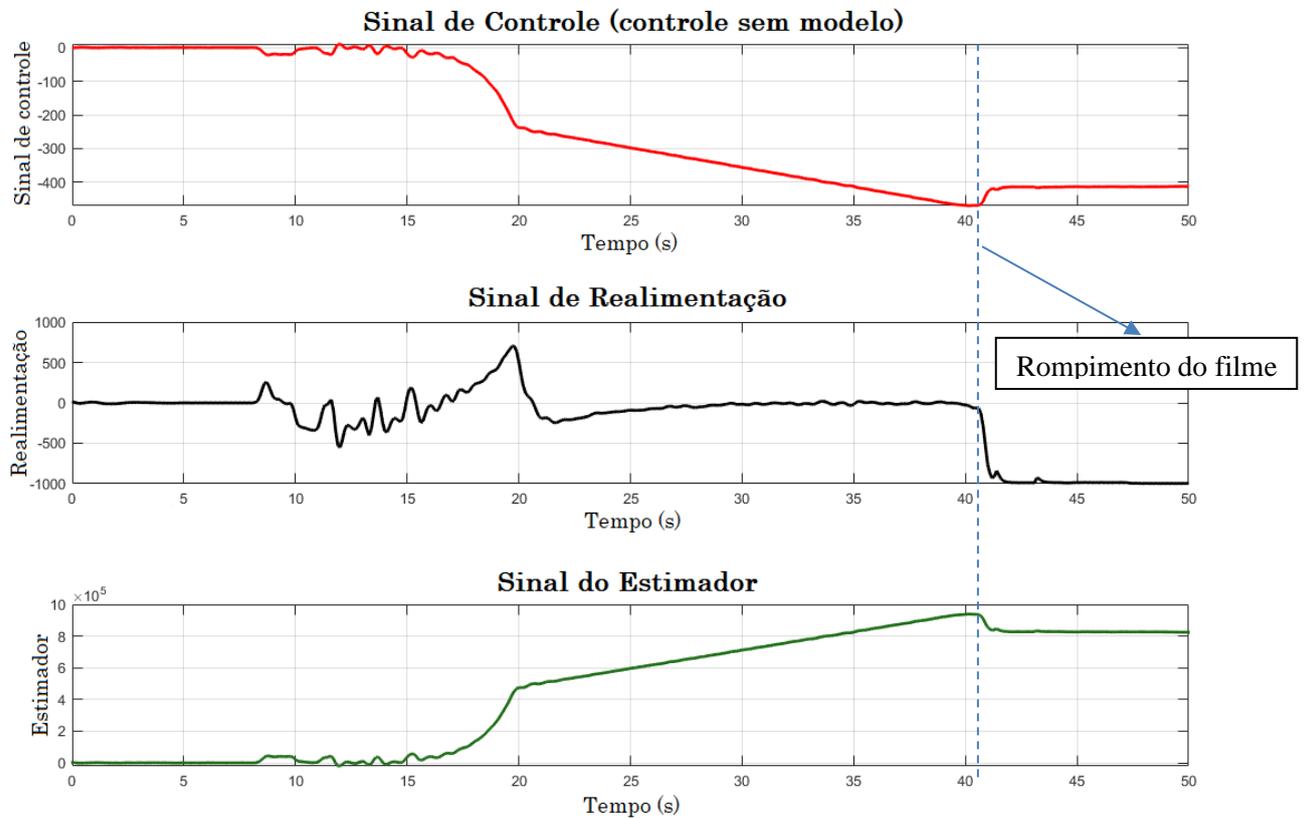
Para o segundo teste (Figura 49), utilizou-se um ganho proporcional mais alto, sendo  $K_p = 2$  e  $K_i = 0,5$ . Com esses ganhos, tem-se um tempo de assentamento de aproximadamente 11,2s, assim, obteve-se uma melhor resposta do sistema, com aceleração do desbobinador conseguindo acompanhar aceleração do bobinador, mantendo a posição do *dancer* com uma pequena oscilação até a finalização da bobina e o começo da desaceleração, onde o desbobinador não conseguiu acompanhar o bobinador, gerando muita tensão no filme e conseqüentemente o rompimento do filme metalizado.

Figura 48 – Primeiro teste com atuação do controle sem modelo.



Fonte: Autor (2022).

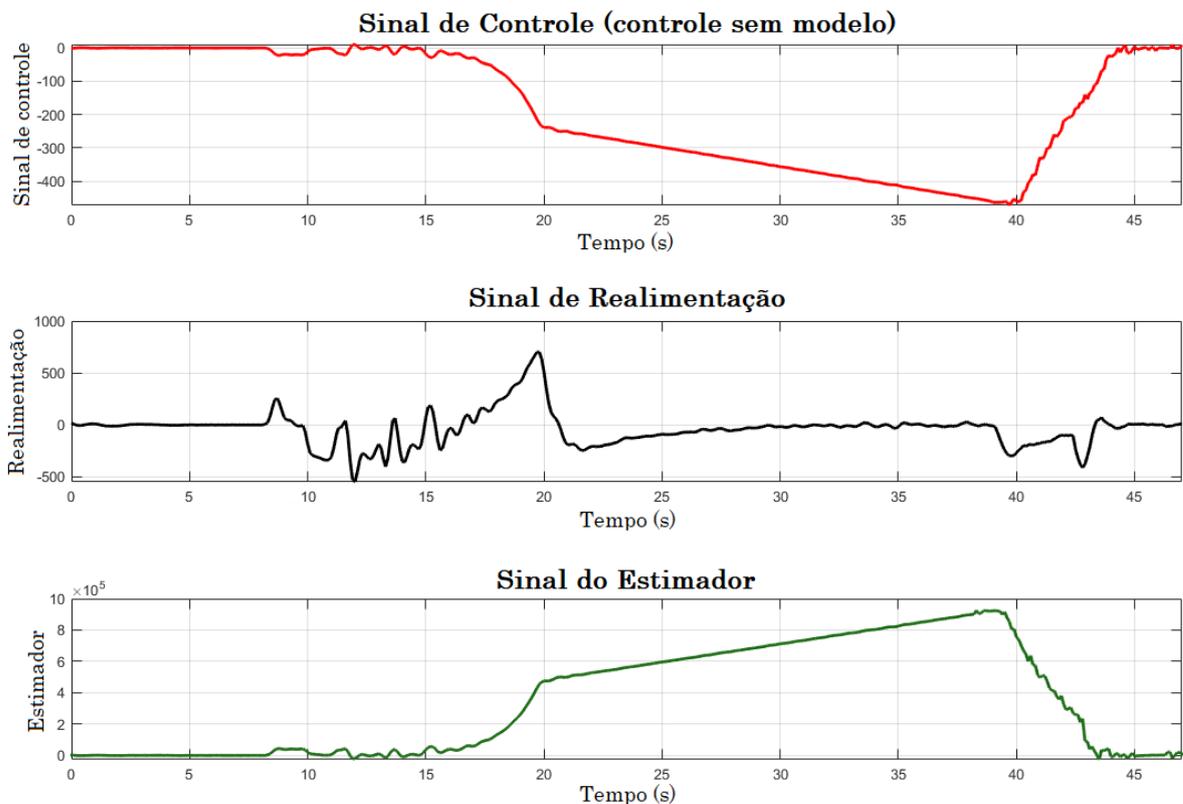
Figura 49 – Segundo teste com atuação do controle sem modelo.



Fonte: Autor (2022).

Para o último teste realizado, utilizou-se ganhos um pouco mais altos, com  $K_p = 3,5$  e  $K_i = 1,7$ , com tempo de assentamento de aproximadamente 5,66 s. Observa-se, na Figura 50, uma melhora considerável e o funcionamento do controle sem modelo para o processo de bobinagem de filme metalizado, porém, tem-se como necessário a realização de mais testes para tentativa de diminuir a oscilação do *dancer* durante a formação da bobina, como da validação do controle para os diferentes diâmetros e alturas de bobinas que são produzidas na máquina.

Figura 50 – Terceiro teste com atuação do controle sem modelo.



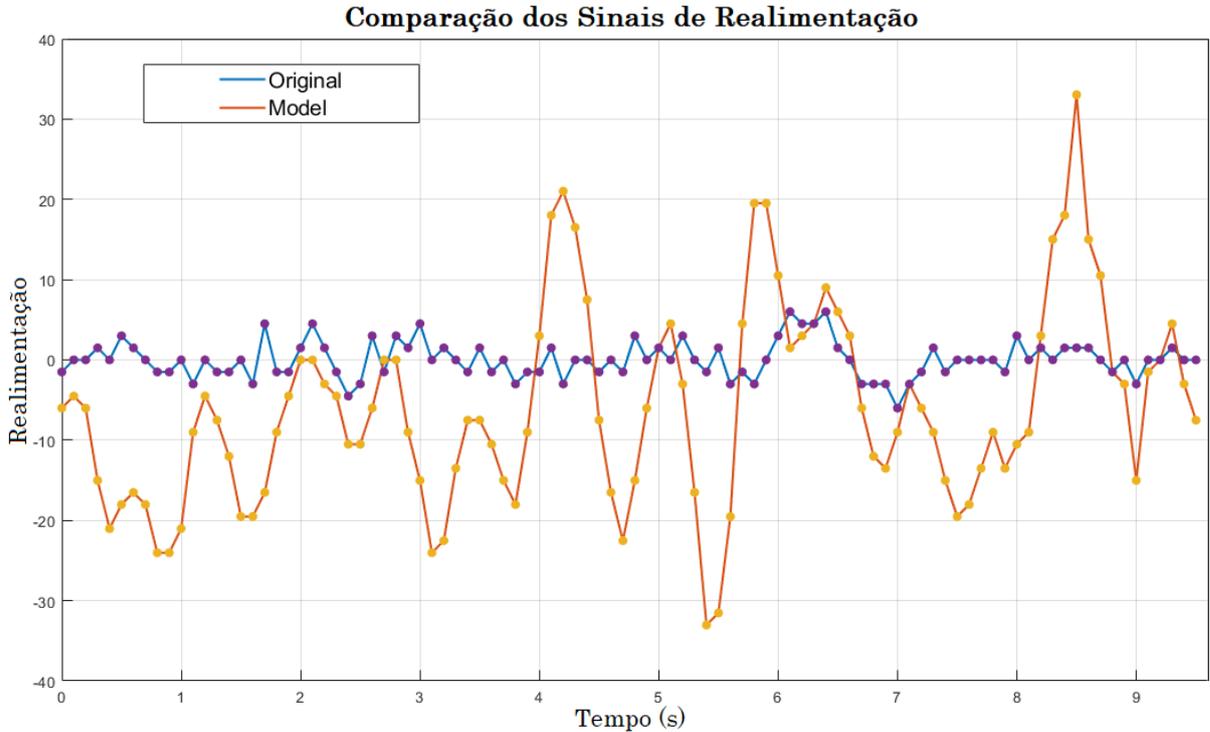
Fonte: Autor (2022).

Para validar a dinâmica do erro esperada, pode-se utilizar a Equação 2.6, porém, na parte experimental não foi possível sua utilização por não ser possível aplicar um degrau de referência, por conta da perturbação variante e atuante durante todo o processo.

Na Figura 51, pode-se observar uma comparação do sinal de realimentação recebido pelo controlador, utilizando o controlador atual (original) e o controle sem modelo ajustado com os ganhos  $K_p = 3,5$  e  $K_i = 1,7$ , durante a fabricação do mesmo produto. Para essa comparação, utilizou-se dados que compreendem bem no meio da formação da bobina, assim,

ignorando a aceleração e desaceleração do desbobinador. Observa-se que o controle sem modelo obteve um resultado pior que o controlador atual, ou seja, teve uma maior oscilação da posição do dancer que para o controlador atual.

Figura 51 – Comparação das amostras do sinal de realimentação.



Fonte: Autor (2022).

## 4.2 COMENTÁRIOS

Este capítulo foi dividido em três partes, sendo elas: identificação do sistema, supervisão desenvolvida e resultados da implementação do controle sem modelo.

Na tentativa de identificação do sistema, utilizou-se a ferramenta de acompanhamento *online* de variáveis para obtenção dos dados. Utilizando os dados do sistema e a ferramenta *System Identification*, realizou-se tentativa de identificação do sistema, não sendo possível por fatores como o tempo de amostragem e a perturbação não medida atuante no sistema. Como a identificação não foi possível, partiu-se para implementação de um controle sem modelo.

Foi apresentado, também, a implementação do controle sem modelo no servoconversor utilizando o software WLP. A partir do teste para sintonia do estimador, obteve-se bons

resultados na sua sintonia e implementação. Assim, foi possível testar o controlador sem modelo implementado.

Como o desejado é a menor variação possível do *dancer* em torno da posição de referência, assim, como do menor tempo de assentamento possível para o sistema, observa-se comparando os gráficos do sinal de realimentação do controlador atual (Figura 47) com do controle sem modelo (Figura 50), que o controle sem modelo ainda não obteve um ótimo resultado, ou seja, não manteve a posição do *dancer* em uma pequena variação da posição do (Figura 51), assim, necessitando de ajustes para redução da oscilação e redução do tempo de assentamento.

Com a implementação do controle sem modelo, os resultados obtidos com os testes foram satisfatórios, de modo que sua utilização em processo de bobinagem de capacitores pode ser realizada. Pode-se notar, porém, uma necessidade de um maior conhecimento do sistema para facilitar a obtenção dos ganhos do controlador e da necessidade de ajustes para redução da oscilação e redução do tempo de assentamento durante o processo.

## 5 CONCLUSÕES

No presente trabalho, um método de controle sem modelo foi implementado e testado para o controle em um sistema de bobinagem de filme metalizado, com objetivo de obter uma melhora na resposta do sistema. Após implementação da estrutura de controle sem modelo e da realização de testes para sintonia do estimador e controlador, concluíram-se alguns pontos, conforme abaixo.

Realizar a identificação de um sistema como o de bobinagem de filme mostrou ter algumas dificuldades, sendo as principais: a perturbação variante e atuante durante todo o processo e, a necessidade de um período de amostragem menor que 100ms, devido a velocidade do sistema.

A sintonia do controle sem modelo não se mostrou trivial, necessitando de diversos testes e de um conhecimento ao menos básico do sistema, assim, mostrando que sua implementação tem algumas dificuldades que o usuário precisa superar.

A utilização de uma interface para comunicação homem-máquina é de grande auxílio, principalmente em processos que necessitam de ajustes ou receitas para variações de produtos.

Conforme os resultados obtidos, percebeu-se uma variação do *dancer* levemente acima do controlador atualmente utilizado, assim, gerando a necessidade de melhores ajustes nos ganhos do controlador. Também, percebe-se a necessidade de ajustes nos ganhos do controle sem modelo para obter um melhor tempo de assentamento possível para o sistema.

### 5.1 SUGESTÕES FUTURAS

Para a continuidade no trabalho, foram levantados alguns pontos que faltaram ser totalmente implementados, tais como: (i) implementação física da interface homem-máquina no processo, assim, não dependendo de uma conexão com notebook para comunicação principalmente com os parâmetros de ajuste do controlador sem modelo; (ii) continuidade nos testes do controle sem modelo para diminuir a oscilação da resposta do sistema e, realização de testes com toda gama de produtos que são fabricados na máquina.

## REFERÊNCIAS

- BASSANEZI, Rodney Carlos. **Ensino-aprendizagem com modelagem matemática**. 4. ed. São Paulo: Contexto, 2002. 392 p.
- BLANCO, Elena M<sup>a</sup> Sojo. **Domotización de un edificio empresarial**. 2019. 73 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Eletrônica, Universidade de Sevilha, Sevilha, 2019.
- CHEN, Yaohong; LI, Hua; LIN, Fuchang; LV, Fei; ZHANG, Miao; LI, Zhiwei; LIU, De. Study on Self-Healing and Lifetime Characteristics of Metallized-Film Capacitor Under High Electric Field. **Ieee Transactions On Plasma Science**, v. 40, n. 8, p. 2014-2019, 2012.
- CSA. **IHM WEG MT8071iE - Touch Screen - 7" Colorida**. Disponível em: <https://csaautomacao.com.br/store/ihm-weg-mt8071ie-touch-screen-7-colorida.html>. Acesso em: 08 jun. 2022.
- CUBILLOS, Ximena Celia Méndez. **Controle de Atitude de um Satélite Aplicando a União dos métodos SDRE e H-Infinito**. 2020. 168 p. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Tecnologia Espaciais/Mecânica Espacial e Controle, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2020.
- DORNELLES, Jéssica. **Internet das Coisas na Manufatura Industrial: uma ferramenta da Indústria 4.0 para interação dos processos**. 2021. Disponível em: <https://redeindustria40.com.br/internet-das-coisas-na-manufatura-industrial-uma-ferramenta-da-industria-4-0-para-interacao-dos-processos/>. Acesso em: 08 jun. 2022.
- FLIESS, Michel; JOIN, Cédric. Model-free control. **International Journal Of Control**, v. 86, n. 12, p. 2228-2252, 2013.
- FONSECA, Gabriel Aluizio Ludwig. **Simulação e controle de um sistema de ventilação mecânica**. 2022. 78 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2022.
- FRANKLIN, Gene F.; POWELL, J. David; EMAMI-NAEINI, Abbas. **Sistemas de controle para engenharia**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2013. 721 p.
- GASSMANN, Vincent; KNITTEL, Dominique; PAGILLA, Prabhakar R.; BUENO, Marie-Ange. Fixed-Order  $H_{\infty}$  Tension Control in the Unwinding Section of a Web Handling System Using a Pendulum Dancer. **Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)**, v. 20, n. 1, p. 173-180, 2012.
- GODEC, M.; MANDRINO, Dj.; GABERLČEK, M.. Investigation of performance degradation in metallized film capacitors. **Applied Surface Science**, v. 273, p. 465-471, 2013.
- GUAZZELLI, Vinicius Figueiró. **Simulação de controle em motores de equipamentos industriais**. 2019. 59 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecatrônica, Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

HANDERSON, Lobato Martinez; EDGARD, Medina Guevara. **DISEÑO DE UNA MÁQUINA DESBOBINADORA, MEDIDORA Y CORTADORA DE TELAS ARPILLERAS DE POLIPROPILENO CON UNA VELOCIDAD DE 50m/min PARA LA EMPRESA PROCOM S.A.C. – CHICLAYO**. 2019. 231 p. TCC (Graduação) - Curso de Ingeniería Arquitectura y Urbanismo, Universidad Señor de Sipán, Pimentel (Peru), 2019.

HILLESHEIM, Luan Felipe. **Diagnóstico do processo de manufatura de medidores inteligentes de energia e proposta de automação**. 2021. 61 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2021.

HOU, Hailiang; NIAN, Xiaohong; XU, Shaozhang; SUN, Miaoping; XIONG, Hongyun. Robust decentralized control for large-scale web-winding systems: a linear matrix inequality approach. **Transactions Of The Institute Of Measurement And Control**, v. 39, n. 7, p. 953-964, 2016.

LIMA, Gutierre Apolinário de. **Implementação de uma interface IHM para a configuração do inversor de frequência CFW-11 Weg**. 2020. 72 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecatrônica, Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

MAKDESSI, M.; SARI, A.; VENET, P.. Metallized polymer film capacitors ageing law based on capacitance degradation. **Microelectronics Reliability**, v. 54, n. 9-10, p. 1823-1827, 2014.

MCDONALD, Michael J.; REICHENBACH, Marvin L.. **Sandia's new generation winding machine**. 1990. Disponível em: <https://www.osti.gov/servlets/purl/5088867>. Acesso em: 19 nov. 2022.

MELLO, Tiago Chaves. **Influência dos parâmetros do processo de serramento no corte de capacitores de filme metalizado ultrafino**. 2015. 103 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

MICHEL, Loïc; NEUNABER, Ingrid; MISHRA, Rishabh; BRAUD, Caroline; PLESTAN, Franck; BARBOT, Jean-Pierre; BOUCHER, Xavier; JOIN, Cédric; FLIESS, Michel. Model-free control of the dynamic lift of a wind turbine blade section: experimental results. **Journal Of Physics: Conference Series**, v. 2265, n. 3, p. 032068, 2022.

MORENO-GONZALEZ, Marcos; ARTUÑEDO, Antonio; VILLAGRA, Jorge; JOIN, Cédric; FLIESS, Michel. Speed-Adaptive Model-Free Lateral Control for Automated Cars. **Ifac-Papersonline**, [S.L.], v. 55, n. 34, p. 84-89, 2022. Elsevier BV.

MUSSOI, Fernando Luiz R.; VILLAÇA, Marco Valério M.. Capacitores. Ed. 3. **CEFET-SC**, Florianópolis, p.4-22, 2000.

NERES, Fabricia. **CLP CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMÁVEIS**. 2016. Disponível em: <https://docplayer.com.br/39897238-Aula-6-clp-controladores-logicos-programaveis.html>. Acesso em: 08 jun. 2022.

PESSOA, Marcelo; SPINOLA, Mauro. **Introdução à automação para cursos de engenharia e gestão**. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2014. 480 p.

RAUL, Pramod R.; PAGILLA, Prabhakar R.. Design and implementation of adaptive PI control schemes for web tension control in roll-to-roll (R2R) manufacturing. **Isa Transactions**, v. 56, p. 276-287, 2015.

RE. **T-ONE**. Disponível em: <https://www.re-spa.com/en/dettaglio/web-tension-controller-tone.aspx>. Acesso em: 30 nov. 2022.

SANCHES, Caique. **Automação de Fábrica de Farinha e Óleo Animal**. 2018. 70 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2018.

SEHR, Martin A.; LOHSTROH, Marten; WEBER, Matthew; UGALDE, Ines; WITTE, Martin; NEIDIG, Joerg; HOEME, Stephan; NIKNAMI, Mehrdad; LEE, Edward A.. Programmable Logic Controllers in the Context of Industry 4.0. **Ieee Transactions On Industrial Informatics**, v. 17, n. 5, p. 3523-3533, 2021.

SILVA, Rafael Bitello. **Resina epóxi aplicada a capacitores: Influência de diferentes agentes de cura**. 2018. 82 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Tecnologia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), Porto Alegre, 2018.

SOUSA, Judas Tg; ARAUJO, Aluizio Fausto Ribeiro. MODEL-FREE ADAPTIVE CONTROL WITH TUNED PARAMETERS BY MULTI-OBJECTIVE DIFFERENTIAL EVOLUTION. In: **Congresso Brasileiro de Automática-CBA**, v. 1, p. 01-07, 2019.

VALENTINE, Nathan; AZARIAN, Michael H.; PECHT, Michael. Metallized film capacitors used for EMI filtering: a reliability review. **Microelectronics Reliability**, v. 92, p. 123-135, 2019.

VASCONCELLOS, Augusto Pedro Mendonça de. **Projeto de Controladores PI e PID para um Forno Aquecedor de Óleo de Uma Planta de Tratamento de Hidrocarbonetos**. 2017. 62 p. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

WEG. **MT6071/8071/8101IE SERIES**. 2017. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h03/h66/WEG-guia-de-instalacao-mt6071-mt8071-mt8101ie-pt.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2022.

WEG. **Servoconversor SCA06: Manual de programação**. Manual de Programação. 2018. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hf2/h52/WEG-SCA06-manual-de-programacao-10000662686-pt.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2022.

WEG. **PRODUCTS FOR POWER FACTOR CORRECTION**. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h97/h0e/WEG-capacitors-for-power-factor-correction-50033846-en.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2022a.

WEG. **CLPs - CONTROLADORES LÓGICOS PROGRAMÁVEIS**. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h18/h29/WEG-controladores-logicos-programaveis-10413124-pt.pdf>. Acesso em: 08 jun. 2022b.

WEG. **Controlador Lógico Programável PLC300**. Disponível em: [https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Controle-de-Processos/Controladores-L%C3%B3gicos-Program%C3%A1veis/Controlador-L%C3%B3gico-Program%C3%A1vel-PLC300/Controlador-L%C3%B3gico-Program%C3%A1vel-PLC300/p/MKT\\_WDC\\_BRAZIL\\_PROGRAMMABLE\\_LOGIC\\_CONTROLLER\\_PL\\_C300](https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Controle-de-Processos/Controladores-L%C3%B3gicos-Program%C3%A1veis/Controlador-L%C3%B3gico-Program%C3%A1vel-PLC300/Controlador-L%C3%B3gico-Program%C3%A1vel-PLC300/p/MKT_WDC_BRAZIL_PROGRAMMABLE_LOGIC_CONTROLLER_PL_C300). Acesso em: 08 jun. 2022c.

WEG. **Linha MT**. Disponível em: [https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Controle-de-Processos/Interfaces-de-Opera%C3%A7%C3%A3o-%28IHMs%29/Linha-MT/Linha-MT/p/MKT\\_WDC\\_BRAZIL\\_HMI\\_LINEMT](https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Controle-de-Processos/Interfaces-de-Opera%C3%A7%C3%A3o-%28IHMs%29/Linha-MT/Linha-MT/p/MKT_WDC_BRAZIL_HMI_LINEMT). Acesso em: 08 jun. 2022d.

WEG. **Servoconversor SCA06**. Disponível em: [https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Drives/Servoacionamentos/Servoconversor/Servoconversor-SCA06/Servoconversor-SCA06/p/MKT\\_WDC\\_BRAZIL\\_SERVO\\_DRIVE\\_SCA06](https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Drives/Servoacionamentos/Servoconversor/Servoconversor-SCA06/Servoconversor-SCA06/p/MKT_WDC_BRAZIL_SERVO_DRIVE_SCA06). Acesso em: 08 jun. 2022e.

WEG. **Suporte Técnico**. Disponível em: [https://updates.weg.net/wps/300/help/pt\\_BR/](https://updates.weg.net/wps/300/help/pt_BR/). Acesso em: 08 jun. 2022f.

WEG. **WEG Ladder Programmer (WLP)**. Disponível em: [https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Drives/Softwares/WEG-Ladder-Programmer-%28WLP%29/WEG-Ladder-Programmer-%28WLP%29/p/MKT\\_WDC\\_BRAZIL\\_SOFTWARE\\_WLP](https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Drives/Softwares/WEG-Ladder-Programmer-%28WLP%29/WEG-Ladder-Programmer-%28WLP%29/p/MKT_WDC_BRAZIL_SOFTWARE_WLP). Acesso em: 08 jun. 2022g.

ZHAO, Shuai; CHEN, Shaowei; WANG, Huai. Degradation modeling for reliability estimation of DC film capacitors subject to humidity acceleration. **Microelectronics Reliability**, v. 100-101, p. 113401, 2019.