

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

VINICIUS DA SILVA PEREIRA

**PROJETO DE FABRICAÇÃO DE UM DESUMIDIFICADOR PARA PAPEL
CARTÃO DE 300 g/m² COM RESINA *HOTMELT* E FILAMENTOS DE
IMPRESSORA 3D**

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2022

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

VINICIUS DA SILVA PEREIRA

**PROJETO DE FABRICAÇÃO DE UM DESUMIDIFICADOR PARA PAPEL
CARTÃO DE 300 g/m² COM RESINA *HOTMELT* E FILAMENTOS DE
IMPRESSORA 3D**

Monografia submetida ao
Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia de Santa
Catarina como parte dos requisitos
para a obtenção do título de
Engenheiro Mecatrônico.

Professor Orientador: Prof. Dr.
Eng. Francisco Rafael Moreira da
Mota.

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Pereira, Vinicius da Silva
**PROJETO DE FABRICAÇÃO DE UM DESUMIDIFICADOR PARA PAPEL
CARTÃO DE 300 g/m² COM RESINA HOTMELT E FILAMENTOS DE IMPRESSORA
3D / Vinicius da Silva Pereira; orientação
de Francisco Rafael Moreira da Mota. - Florianópolis,
SC, 2023.**

71 p.
**Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Mecatrônica. Departamento
Acadêmico de Metal Mecânica.
Inclui Referências.**

**1. Desumidificador. 2. PID. 3. Umidade. I. Rafael
Moreira da Mota, Francisco. II. Instituto Federal de
Santa Catarina. III. PROJETO DE FABRICAÇÃO DE UM DESUMIDIFICADOR
PARA PAPEL CARTÃO DE 300 g/m² COM RESINA
HOTMELT E FILAMENTOS DE IMPRESSORA 3D.**

VINICIUS DA SILVA PEREIRA

PROJETO DE FABRICAÇÃO DE UM DESUMIDIFICADOR PARA PAPEL CARTÃO DE
300 g/m² COM RESINA *HOTMELT* E FILAMENTOS DE IMPRESSORA 3D

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora abaixo indicada.

Florianópolis, 09 de janeiro de 2023.



Documento assinado digitalmente
FRANCISCO RAFAEL MOREIRA DA MOTA
Data: 10/01/2023 11:26:50-0300
CPF: ***.003.153-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Francisco Rafael Moreira da Mota, Dr. Eng.

Orientador

IFSC



Documento assinado digitalmente
ADRIANO REGIS
Data: 10/01/2023 11:05:37-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Adriano Regis, Me. Eng.

Avaliador

IFSC



Documento assinado digitalmente
EDUARDO YUJI SAKURADA
Data: 07/01/2023 13:25:01-0300
CPF: 016.152.299-81
Verifique as assinaturas em <https://v.ifsc.edu.br>

Prof. Eduardo Yuji Sakurada, Dr. Eng.

Avaliador

IFSC



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS

DECLARAÇÃO DE FINALIZAÇÃO DE TRABALHO DE CURSO

Declaro que o(a) estudante **Vinicius da Silva Pereira**, matrícula nº **1520049463**, do Curso de Engenharia Mecatrônica, defendeu o trabalho intitulado ***PROJETO DE FABRICAÇÃO DE UM DESUMIDIFICADOR PARA PAPEL CARTÃO DE 300 g/m² COM RESINA HOTMELT E FILAMENTOS DE IMPRESSORA 3D***, o qual está apto a fazer parte do banco de dados da Biblioteca Hercílio Luz do Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.

Florianópolis, 09 de janeiro de 2023.



Documento assinado digitalmente
FRANCISCO RAFAEL MOREIRA DA MOTA
Data: 07/01/2023 11:22:35-0300
CPF: ***.003.153-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Orientador do TCC: Dr. Francisco Rafael Moreira da Mota

AGRADECIMENTOS

A possibilidade da realização deste documento se deve principalmente as pessoas que são os pilares que estruturam a minha vida, a minha família. Meus pais me ensinaram desde cedo o valor do conhecimento na vida pessoal e no molde do caráter de um indivíduo, por isso não pouparam esforços em me ajudar nessa jornada. Meu mais sincero obrigado a minha mãe Josiane e a meu pai Valdemir.

Para minha vó Marli, meu falecido avô Waldemiro, meu tio Jefferson e a minha namorada Marlucy, agradeço por me acompanharem e me incentivarem a ir em busca da minha vocação, de ser um engenheiro.

Na vida acadêmica tive a honra de ser orientado pelo professor Francisco Rafael Moreira da Mota, que com a mais perfeita habilidade de transmitir conhecimento pôde me auxiliar muito na reta final da execução deste projeto, a ele expressei meu agradecimento.

Profissionalmente eu tive o privilégio de ter um supervisor de estágio que me ofereceu a oportunidade de conciliar a temática do documento com a aplicação prática do sistema, me ajudou a ingressar no mercado de trabalho com conselhos e ensinamentos, ao Claudio também agradeço pelo aprendizado.

A todos, meu obrigado.

RESUMO

O projeto submetido consistiu na concepção, desenvolvimento e confecção de um sistema de controle PID para o uso em um desumidificador de papéis, que opera por transferência de calor, com intuito de controlar a umidade. Teve como propósito o uso em papéis com resina *hotmelt* e filamentos de impressoras 3D de forma a atender uma demanda industrial. O conceito e as soluções de requisitos do sistema foram definidos através de avaliações de alternativas e métodos de análise, satisfazendo condições do projeto. Os resultados, por sua vez, demonstraram o sucesso esperado, por validar o uso do aparato com o sistema em malha fechada e de forma geral alcançar os objetivos propostos.

Palavras-chave: Desumidificador, Papéis, Filamentos, Umidade.

ABSTRACT

The submitted project consisted of the design, development and manufacture of a PID control system for use in a paper dehumidifier, which operates by heat transfer, in order to control humidity. Its purpose was to use it in papers with hotmelt resin and 3D printer filaments in order to meet an industrial demand. The concept and system requirements solutions were defined through evaluation of alternatives and analysis methods, satisfying design conditions. The results, demonstrated the expected success, by validating the use of the apparatus with the closed-loop system and, in general, achieving the proposed objectives.

Keywords: Dehumidifier, Papers, Filaments, Humidity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Variação de umidade e temperatura durante 24 horas	15
Figura 2 – Papel cartão com resina <i>hotmelt</i>	16
Figura 3 – Filamento de impressora 3D.....	17
Figura 4 – Especificações técnicas do Arduino Uno R3.....	18
Figura 5 – <i>Pinout</i> Arduino Uno R3.....	19
Figura 6 – Dimensões do Arduino Uno R3.....	19
Figura 7 – Exemplo de PWM	20
Figura 8 – Método de Smith	21
Figura 9 – Diagrama de blocos característico de síntese direta.....	22
Figura 10 – Tabela de sintonia de controladores PID para o método de síntese direta ..	23
Figura 11 – Diagrama de blocos IMC.....	24
Figura 12 – Tabela de sintonia de controladores PID para o método de síntese direta ..	25
Figura 13 – Desumidificador <i>DryPaper</i>	26
Figura 14 – Esquemático básico de funcionamento <i>DryPaper</i>	27
Figura 15 – Compartimento de <i>hardware</i> eletrônico	27
Figura 16 – Tampa frontal do desumidificador.....	28
Figura 17 – Alojamento de sensores	28
Figura 18 – Fluxograma lógico do desumidificador.....	32
Figura 19 – Interface e suas configurações.....	33
Figura 20 – Disposição inicial dos sensores	34
Figura 21 – Conexões com o Arduino	35
Figura 22 – Serial Monitor.....	35
Figura 23 – Esquemático elétrico	37
Figura 24 – Ensaio em malha aberta com <i>duty cycle</i> em 60%.....	38
Figura 25 – Ensaio pelo Método de Smith.....	40
Figura 26 – Controlador genérico	41
Figura 27 – Ensaio em malha fechada	45
Figura 28 – Ensaio em malha aberta com <i>duty cycle</i> incrementando 10%.....	47
Figura 29 – Ensaio em malha aberta com <i>duty cycle</i> em 10%.....	48
Figura 30 – Ensaio em malha aberta com <i>duty cycle</i> em 20%.....	49
Figura 31 – Ensaio em malha aberta com <i>duty cycle</i> em 30%.....	50

Figura 32 – Ensaio em malha aberta com <i>duty cycle</i> em 40%.....	51
Figura 33 – Ensaio em malha aberta com <i>duty cycle</i> em 50%.....	52
Figura 34 – Ensaio em malha aberta com <i>duty cycle</i> em 60%.....	53
Figura 35 – Ensaio em malha aberta com <i>duty cycle</i> em 70%.....	54
Figura 36 – Ensaio em malha aberta com <i>duty cycle</i> em 80.....	55
Figura 37 – Ensaio em malha aberta com <i>duty cycle</i> em 90%	56
Figura 38 – Ensaio em malha aberta com <i>duty cycle</i> em 100%.....	57
Figura 39 – Ensaio em malha fechada por síntese direta.....	62
Figura 40 – Ensaio em malha fechada IMC.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tabela de escolha de componentes.....	30
Tabela 2 – Portas do protótipo inicial	36
Tabela 3 – Parâmetros de controle para síntese direta	42
Tabela 4 – Parâmetros de controle para IMC.....	44
Tabela 5 – Ganhos obtidos por síntese direta.....	60
Tabela 6 – Parâmetros obtidos por IMC	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC – *Alternating Current*

FDM – *Fused Deposition Modeling*

FOPDT – *First Order Plus Dead Time*

ICSP – *In-Circuit Serial Programming*

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

IHM – Interface Humano Máquina

IMC – *Internal Model Control*

IoT – *Internet of Things*

PID – *Proportional Integral Derivative Controller*

PLA – *Polylactic Acid*

PWM – *Pulse Width Modulation*

USB – *Universal Serial Bus*

LISTA DE SÍMBOLOS

Ω – Ohms

τ – Constante de tempo

θ – Atraso

V – Volts

A – Ampere

W – Watts

$^{\circ}\text{C}$ – Grau Celsius

K – Ganho

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 Objetivos.....	11
1.1.1 Principal.....	11
1.1.2 Específicos.....	11
1.2 Justificativa e relevância	12
1.3 Análise das condições práticas e de factibilidade da pesquisa.....	12
2 REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1 Umidade.....	14
2.2 Papel <i>Hotmelt</i> e seu adesivo <i>tack</i>	15
2.3 Filamentos para impressoras 3D	16
2.4 Arduino Uno.....	17
2.5 Modulação por largura de pulso (PWM)	20
2.6 Método de Smith para identificação de sistemas	21
2.7 Sintonia de controladores.....	22
2.7.1 Síntese direta.....	22
2.7.2 Controle por modelo interno - IMC	23
3 METODOLOGIA.....	26
3.1 Construção do protótipo	26
3.1.1 <i>Hardware</i>	29
3.1.2 <i>Software</i>	31
3.2 Ensaio em malha aberta	34
3.2.1 Preparação para testes.....	34
3.2.2 Fundamentação dos testes	37
3.3 Identificação do sistema	39
3.3.1 Método de Smith	39
3.4 Sintonia do controlador.....	41
3.4.1 Especificações do controlador	41
3.4.2 Cálculo dos ganhos do controlador utilizando o método de síntese direta.....	41
3.4.3 Cálculo dos parâmetros do controlador para o método IMC.....	43
3.5 Avaliação do sistema em malha fechada.....	44
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	46

4.1 Análise do <i>hardware</i> e <i>software</i> do sistema	46
4.2 Discussão dos ensaios em malha aberta.....	46
4.3 Resultados para o método de Smith.....	57
4.4 Resultados de sintonização do processo de controle.....	60
4.5 Avaliação geral do processo em malha fechada	61
5 CONCLUSÃO.....	64
REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

Com a retomada da produção após a pandemia que atingiu o mundo no ano de 2020, a indústria gráfica superou a crise encontrada e atualmente continua expandindo seus negócios. Arelada a esta situação surge oportunidades de ingresso ao setor, de forma que o autor deste documento foi contemplado com uma vaga de estágio na empresa Versapic.

Responsável pelo segmento de revestimentos e acabamentos gráficos a empresa citada tem o papel cartão com resina *hotmelt* e filamentos para a impressão 3D como principais insumos destinados a comercialização. Com o crescimento da demanda por estes produtos, simultaneamente surgem problemas, sendo principal deles, motivo pelo qual o tema para solução é proposto.

A umidade, quando não controlada, deteriora os materiais e os inutiliza, gerando perdas e consequentemente prejuízo financeiro para a empresa. Com o estudo de caso desta situação pode-se analisar as melhores condições para a estabilidade estrutural dos papéis e filamentos, além de desenvolver um sistema que proporciona este cenário. Utilizando-se da ideia de um desumidificador é possível propor, então, uma solução adequada.

A partir destas informações iniciais pôde-se, com fundamentação teórica, alcançar os objetivos e aplicar o planejamento metodológico para a realização do projeto. Consequentemente, a análise de dados e desenvolvimento de pesquisa garantem os resultados e a conclusão do projeto.

1.1 Objetivos

1.1.1 Principal

Esta pesquisa tem como objetivo geral a concepção e desenvolvimento de um projeto de controle de umidade em um desumidificador de papéis já existente, adaptando-o para operar com outros materiais de insumos gráficos.

1.1.2 Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- realizar pesquisas relacionadas a sistemas de controle e umidade relativa para conservação de papéis e filamentos;

- realizar a seleção e montagem dos componentes eletrônicos, mecânicos e de programação utilizados para a concepção do sistema proposto;
- realizar ensaios em malha aberta para obtenção de dados referentes ao sistema;
- aplicar métodos de modelagem de processos e sintonia do controlador;
- avaliar o sistema em malha fechada, para garantir que as especificações de projeto foram alcançadas.

1.2 Justificativa e relevância

O ramo de acabamentos gráficos expõe uma demanda clara para o controle de umidade sobre os insumos, de forma que o papel referenciado no título do tema proposto necessita de um estudo aprofundado de condições estáveis para sua utilização.

A perda de materiais representa para uma empresa de pequeno porte a falta de recursos para seu crescimento no mercado, portanto existe uma alta relevância em elaborar um método que reduza o desperdício de materiais e as perdas financeiras atreladas a este processo. A proposta deste tema converge justamente a um ponto de solução a esta situação.

Considera-se, portanto, alguns fatores fundamentais que devem satisfazer este cenário de estabilidade, tendo a umidade como a variável a ser controlada, além de energia convertida em calor como variável manipulada.

1.3 Análise das condições práticas e de factibilidade da pesquisa

O tema aborda a criação de um desumidificador para atender uma demanda observada em empresas de acabamento gráfico, garantindo que os objetivos iniciais sejam atendidos dentro do escopo de utilização previamente concebido, sendo estes o controle de umidade de resmas de papéis *hotmelt* e filamentos de impressora 3D.

As funcionalidades do aparato se limitam ao sistema de controle interno de umidade relativa dos insumos, de forma que não haverá um estudo de outras utilidades deste equipamento, visando atender apenas aos propósitos de evitar perdas de insumos gráficos por danos estruturais aos materiais, ocasionados pela umidade. A restrição em aprofundar estudos adjacentes ao objetivo garante que haja um controle nos recursos destinados à pesquisa, além de adequar melhor o tempo disponível dedicado ao projeto.

Os recursos foram de fácil obtenção, utilizando-se materiais, dispositivos e equipamentos já existentes no âmbito acadêmico do IFSC. Foi de total importância e utilização de laboratórios

e conhecimentos práticos em mecânica e eletrônica, a parte teórica definiu-se pelo uso de conteúdos ministrados em algumas matérias anteriores que possibilitam a integração entre conhecimento em técnica. Pode-se citar, fenômenos dos transportes, desenho técnico assistido por computador, processos de fabricação, desenvolvimento de produtos, eletrônica analógica e digital, controle de processos, acionamentos e muitas outras.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A idealização do projeto conta com temas que envolvem áreas diversas dentro da engenharia mecatrônica, desde eletrônica embarcada como o sistema de controle e seus métodos, além dos efeitos físicos das grandezas em questão, como a umidade. Vale destacar também a necessidade de externar o princípio da motivação de confecção do aparato, que envolve o termo utilizado na indústria gráfica, o adesivo *tack*.

Por meio de estudos e consultas em materiais bibliográficos pode-se, então, explanar os conceitos que permeiam o desenvolvimento do sistema e, dessa forma, agregar o conhecimento prévio para o melhor entendimento do processo metodológico utilizado.

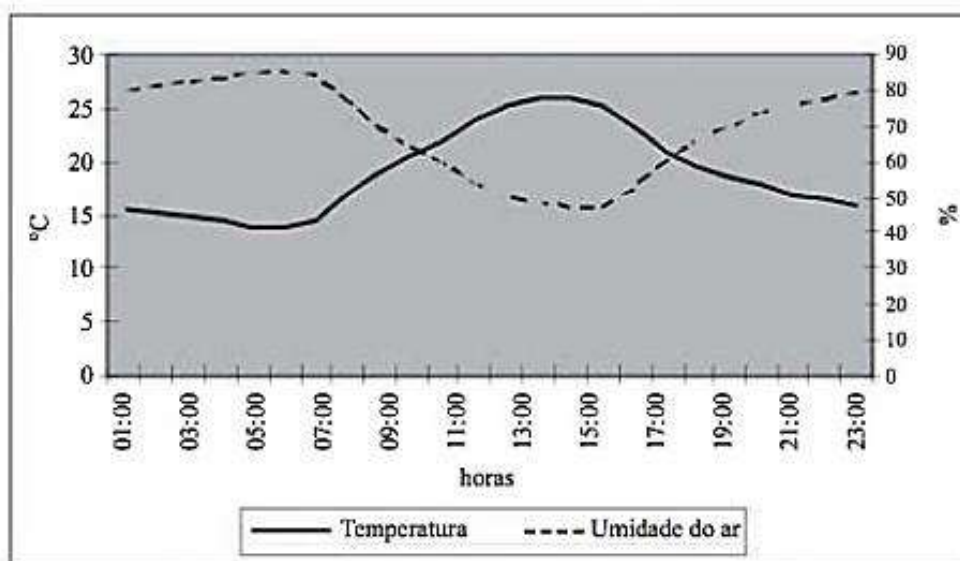
2.1 Umidade

O conceito de umidade do ar representa a quantidade de vapor de água absorvido pela atmosfera; a concentração do vapor de água quando absorvido pelo ar é geralmente menor que a de saturação. Pode-se afirmar então que:

A concentração máxima de vapor de água ou saturação aumenta com a elevação da temperatura, ou seja, com maior temperatura, logo, com maior grau de calor, o ar se torna mais quente e se expande, podendo, assim, conter mais vapor de água. Dessa forma, quanto maior a temperatura, maior a capacidade do ar de reter o vapor de água. (TORRES E MACHADO, 2012, p. 38).

Nota-se na figura 1, que durante o período de vinte e quatro horas, a umidade tem uma elevação na parte noturna quando a temperatura do ambiente geralmente é menor, e comparado ao dia que possui uma temperatura maior, tem a sua umidade relativa diminuída.

Figura 1 – Variação de umidade e temperatura durante 24 horas



Fonte: Torres e Machado (2012, p. 39)

Dessa forma percebe-se que a umidade relativa do ar é inversamente proporcional a temperatura ambiente. Essa premissa é levada em consideração para a escolha do tipo de atuador do sistema, que produz calor e consequentemente eleva a temperatura dentro do aparato quanto submetida a uma fonte de energia.

2.2 Papel *Hotmelt* e seu adesivo *tack*

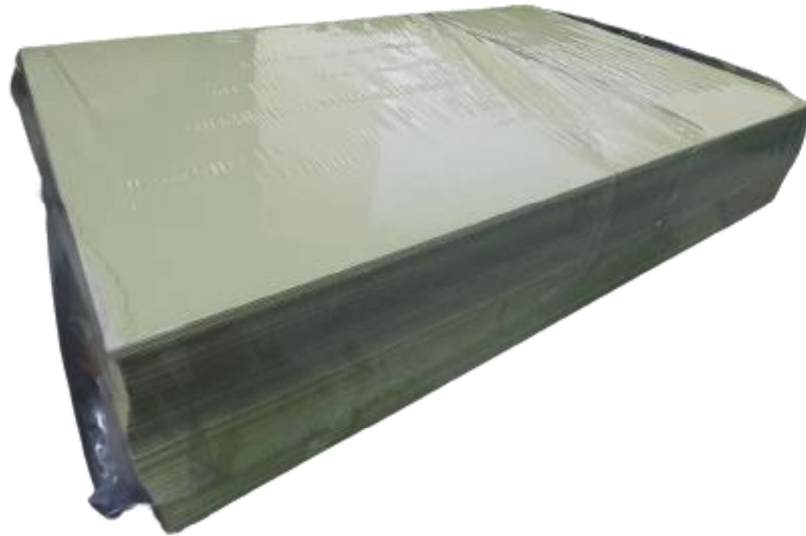
Adesivos do tipo *tack* são sensíveis a pressão e apresentam-se de forma “grudenta” em temperatura ambiente, ancorando em diversos tipos de materiais e suas superfícies apenas com uma leve aproximação entre os materiais, não necessitando de pressão externa para realizar este processo.

O papel *hotmelt*, objeto de estudo que necessita do controle de umidade, possui uma resina adesiva do tipo *tack*. Logo essa resina precisa manter-se em uma faixa de umidade que mantenha as propriedades físicas, sem danos ao material e sem prejuízos que a inutilização do material possa causar. Visto que a colagem do material deve ser feita antes que o adesivo se solidifique.

A maioria dos tipos de papéis disponíveis na indústria gráfica deve manter-se em uma faixa que varia entre 45% e 55% de umidade relativa do ar. Isto é levado em consideração quando necessita-se estabelecer um requisito para o projeto, essa faixa é o limite que se busca durante o controle de umidade dentro do aparato. (Airtec, 2022).

A figura 2 ilustra a forma física geral do papel *hotmelt* que foi objeto de experimento nos ensaios gerais do sistema. A resma possui um volume de 60mm de espessura por 210mm de largura e 312mm de comprimento.

Figura 2 – Papel cartão com resina *hotmelt*



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

2.3 Filamentos para impressoras 3D

As impressoras 3D categorizadas por serem FDM, modelagem por fusão e deposição, utilizam, como matéria prima, insumos conhecidos como filamentos. Os materiais utilizados, para compor os filamentos, são poliméricos de natureza rígida ou flexível.

Alguns destes materiais, como PLA (*Polylactic acid*) e Nylon, possuem um nível elevado de absorção de umidade, implicando em defeitos nas impressões e dificuldade na sua utilização. A faixa ideal de umidade para o armazenamento é de 10% a 13%. (Filament2print, 2018)

A figura 3 a seguir mostra o carretel, comumente disponível no mercado, que comporta o filamento enrolado, suas dimensões são de 65mm de espessura e 210mm de diâmetro externo.

Figura 3 – Filamento de impressora 3D



Fonte: 3DFila, 2022.

2.4 Arduino Uno

O sistema utilizado para o desenvolvimento do projeto foi o Arduino Uno, que é diretamente responsável pela obtenção de dados colhidos por sensores e por fazer o controle PID juntamente com o uso do PWM (*Pulse Width Modulation*). Todos os aspectos que envolvem este componente permitem o uso satisfatório das funções necessárias.

O Arduino, segundo o próprio desenvolvedor, é uma placa microcontroladora baseada no ATmega328P. Possui 14 pinos digitais de entrada e saída (dos quais 6 podem ser usados como saídas PWM), 6 entradas analógicas, um cristal oscilador de 16 MHz, uma conexão USB (*Universal Serial Bus*), um *plug* de alimentação, um conector ICSP (*In-Circuit Serial Programming*) e um botão de reinicialização. (Arduino.cc, 2022)

Através da figura 4 pode ser observada a tabela de informações técnicas da placa Arduino Uno R3, que demonstra informações importantes para o uso adequado e requisitos do sistema.

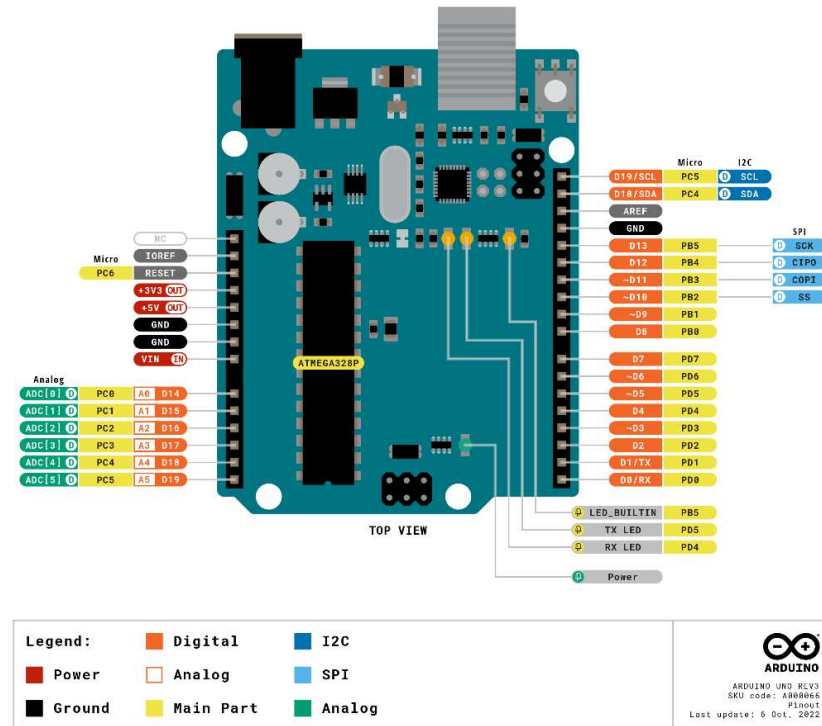
Figura 4 – Especificações técnicas do Arduino Uno R3

Board	Name	Arduino UNO R3
	SKU	A000066
Microcontroller	ATmega328P	
USB connector	USB-B	
Pins	Built-in LED Pin	13
	Digital I/O Pins	14
	Analog input pins	6
	PWM pins	6
Communication	UART	Yes
	I2C	Yes
	SPI	Yes
Power	I/O Voltage	5V
	Input voltage (nominal)	7-12V
	DC Current per I/O Pin	20 mA
	Power Supply Connector	Barrel Plug
Clock speed	Main Processor	ATmega328P 16 MHz
	USB-Serial Processor	ATmega16U2 16 MHz
Memory	ATmega328P	2KB SRAM, 32KB FLASH, 1KB EEPROM
Dimensions	Weight	25 g
	Width	53,4 mm
	Length	68,6 mm

Fonte: Arduino.cc (2022)

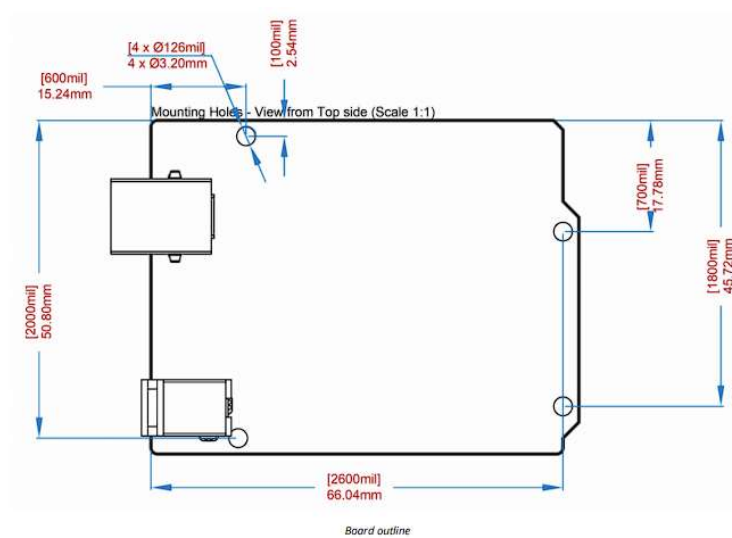
A figura 5 elucida a disposição física dos pinos que podem ser utilizados pelo usuário, da mesma forma a figura 6 informa as medidas geométricas para o desenvolvimento e projeto do sistema que o acomode.

Figura 5 – Pinout Arduino Uno R3



Fonte: Arduino.cc (2022)

Figura 6 – Dimensões do Arduino Uno R3



Fonte: Arduino.cc (2022)

2.5 Modulação por largura de pulso (PWM)

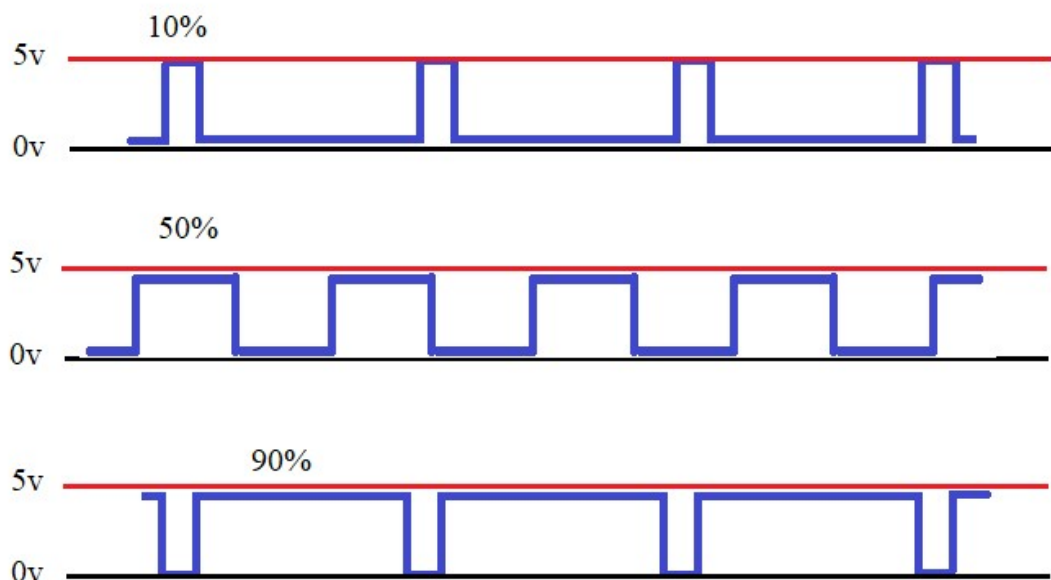
O conceito simplificado do PWM está em utilizar o chaveamento da potência atribuída a uma carga de forma que a variação do sistema se dá pela modulação da largura do pulso em questão. Especificamente para o desenvolvimento do projeto, o PWM requerido é atribuído a um sinal que por meio de outro componente fará o chaveamento da potência entregue ao atuador.

Deste modo pode-se dizer que:

O efeito da modulação PWM equivale à utilização de um interruptor que controla a potência enviada a uma carga [...]. O controle do ciclo ativo desse interruptor, ou seja, os intervalos de tempo em que o mesmo permanece aberto ou fechado, é o fator que determina a potência entregue à carga. Diz-se, pois, que estamos modulando a largura do pulso para controle da potência entregue a uma carga. (PENEDO, 2014, p. 46),

De forma a exemplificar o processo de modulação por largura de pulso, é possível visualizar na figura 7 como as diferentes configurações se comportam quando submetidas ao PWM.

Figura 7 – Exemplo de PWM



Nota-se que o conforme o *duty cycle*, ciclo de trabalho, aumenta, mais tempo o sinal se mante em nível lógico alto, e é justamente isso que emula o efeito da tensão de saída do sistema variar conforme o valor requerido. Exemplificando através da figura 7, o sinal em 50% de *duty cycle* é equivalente a 2,5V de tensão.

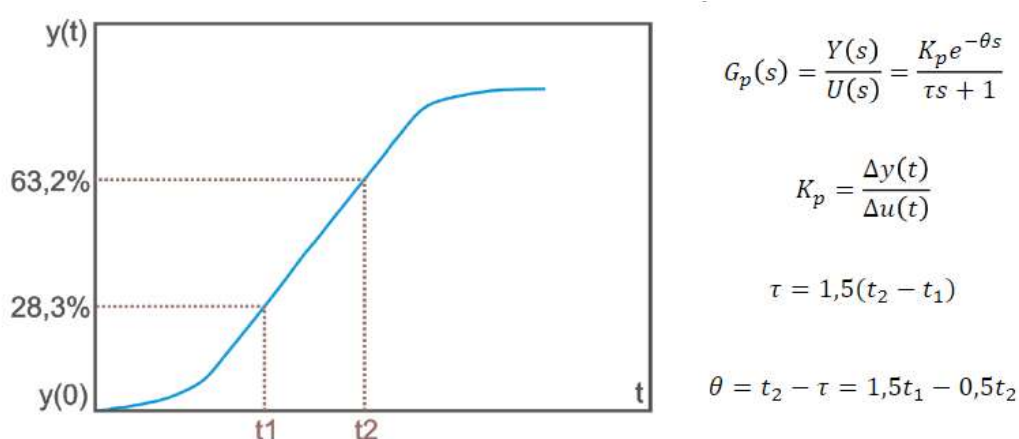
Destaca-se outra grandeza relacionada ao sistema, a frequência, que compõe o PWM e pode ser variada conforme a aplicação, no estudo proposto a frequência utilizada é de 1Hz, necessária pelos aspectos do atuador e do relé de estado sólido.

2.6 Método de Smith para identificação de sistemas

Para o estudo do processo de controle do sistema e por consequência a sua identificação, utilizou-se o método de Smith para processos estáveis que faz uso de curvas de resposta do tipo degrau como sinal de entrada. De forma que, por ser uma identificação paramétrica, pode-se extrair modelos matemáticos aproximados por meio de ensaios em malha aberta.

Evita-se também a utilização do ponto de máxima inclinação para estimação dos parâmetros de controle, que por meio da figura 8 ilustra a obtenção dos dados em uma curva e posteriormente seus cálculos.

Figura 8 – Método de Smith



Fonte: Motta, Francisco R. M. (2022 p.22)

As características deste método segundo Garcia (2017, p.65) são que “os parâmetros do modelo são estimados a partir da resposta em malha aberta do processo” além de que “a estimação dos parâmetros do modelo é realizada via construção gráfica e cálculos simples.”

O objetivo do método, portanto, é de gerar uma função transferência que se aproxime do modelo físico da planta, a aproximação acontece de acordo com a curva obtida previamente com os dados dos ensaios em malha aberta.

2.7 Sintonia de controladores

A fim de sintonizar o controlador e, desta forma, obter os parâmetros de controle, se faz necessário utilizar alguns métodos/técnicas que sejam de fácil domínio. No caso, as opções escolhidas são a de Síntese Direta e IMC (*Internal Model Control*).

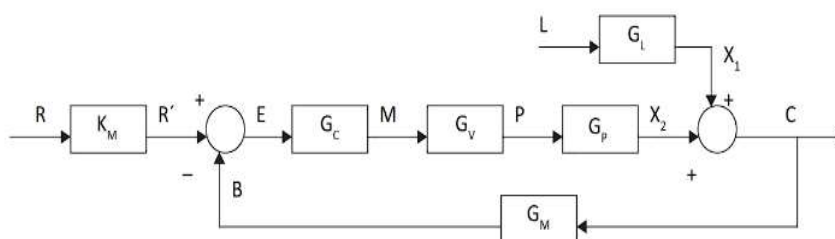
2.7.1 Síntese direta

Sobre a síntese direta pode-se afirmar que:

É um método que usa um modelo inverso do processo e cancelamento de polos e zeros para buscar o desempenho desejado em malha fechada. [...] Ela é particularmente eficiente para malhas de controle rápidas e auxilia a suprimir oscilações. [...] Um controlador por realimentação pode ser projetado usando um modelo aproximado do processo e definindo a resposta desejada em malha fechada. No método da Síntese Direta, o controlador resultante pode não ter estrutura PID. [...]. O primeiro passo do método da Síntese Direta ou Sintonia Lambda é obter um modelo aproximado do processo, via curva de reação. Deve-se então escolher uma constante de tempo em malha fechada, baseada nos requisitos do processo, e sintonizar o controlador. (GARCIA, 2017, p.438).

A figura 9 demonstra o diagrama de uma malha de controle por realimentação.

Figura 9 – Diagrama de blocos característico de síntese direta



Fonte: Garcia (2017, p.439)

Por fim, a tabela descrita pela figura 10 demonstra a sintonia de vários controladores PID para diversos modelos de processos.

Figura 10 – Tabela de sintonia de controladores PID para o método de síntese direta

Modelo do processo $G(s)$	Parâmetros do controlador PID		
	K_c	T_I	T_D
$G(s) = K$	0	$K \cdot \tau_c$	0
$G(s) = \frac{K_i}{s}$	$\frac{1}{K_i \cdot \tau_c}$	∞	0
$G(s) = \frac{K_i \cdot e^{-\theta s}}{s}$	$\frac{2 \cdot \tau_c + \theta}{K_i \cdot (\tau_c + \theta)^2}$	$2 \cdot \tau_c + \theta$	0
$G(s) = \frac{K}{\tau \cdot s + 1}$	$\frac{\tau}{K \cdot \tau_c}$	τ	0
$G(s) = \frac{K \cdot e^{-\theta s}}{\tau \cdot s + 1}$ para $e^{-\theta s} \cong 1 - \theta \cdot s$	$\frac{\tau}{K \cdot (\tau_c + \theta)}$	τ	0
$G(s) = \frac{K}{(\tau_1 \cdot s + 1) \cdot (\tau_2 \cdot s + 1)}$	$\frac{\tau_1 + \tau_2}{K \cdot \tau_c}$	$\tau_1 + \tau_2$	$\frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{\tau_1 + \tau_2}$
$G(s) = \frac{K \cdot e^{-\theta s}}{(\tau_1 \cdot s + 1) \cdot (\tau_2 \cdot s + 1)}$ para $e^{-\theta s} \cong 1 - \theta \cdot s$	$\frac{\tau_1 + \tau_2}{K \cdot (\tau_c + \theta)}$	$\tau_1 + \tau_2$	$\frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{\tau_1 + \tau_2}$

Fonte: Garcia (2017, p.439)

2.7.2 Controle por modelo interno - IMC

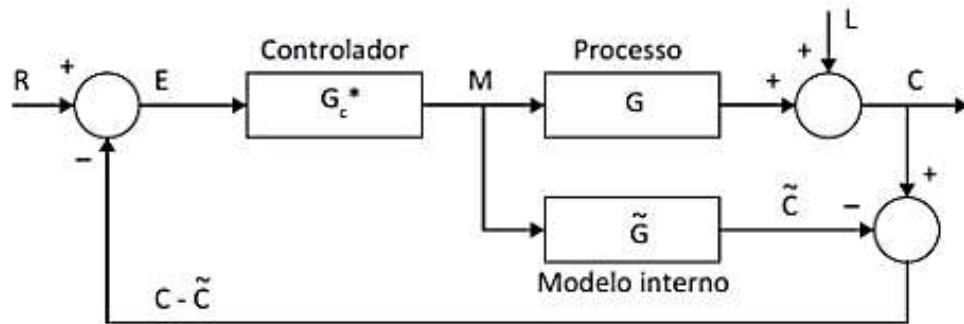
O método IMC baseia-se em uma estrutura que depende somente do modelo de planta e dos requisitos do sistema de controle definidos pelo usuário. Essa facilidade na sua utilização permite o seu uso de maneira célere durante o processo experimental na parte metodológica do projeto.

Os requisitos do método IMC são dispostos da seguinte forma:

O controlador deve cancelar a dinâmica do processo, fazendo com que os polos do processo se cancelem com os zeros do controlador e vice-versa; o controlador deve prover pelo menos um integrador na função de transferência em malha fechada, para assegurar que erros de regime permanente devidos a variações no valor de referência sejam eliminados; o controlador deve permitir que a velocidade da resposta em malha fechada (τ_c) seja especificada pelo usuário. (GARCIA, 2017, p.447).

A figura 11 representa o diagrama de blocos da estrutura adotada pelo método de controle por modelo interno:

Figura 11 – Diagrama de blocos IMC



Fonte: Garcia (2017, p.448)

Conforme descreve Garcia (2017, p.448) “[...] G é a função de transferência nominal e $\tilde{G}$, o modelo do processo. Em geral, $\tilde{C} \neq C$ devido a erro no modelo ($\tilde{G} \neq G$) e perturbações ($L \neq 0$).”

Da mesma forma que o método de síntese direta, a tabela descrita pela figura 12 demonstra a sintonia de vários controladores PID, agora para o método de controle de modelo interno para diversos modelos de processos.

Figura 12 – Tabela de sintonia de controladores PID para o método de síntese direta

Modelo $\tilde{G}$	K_c	T_i	T_d
$\frac{K_i}{s}$	$\frac{1}{K_i \cdot \tau_c}$	∞	0
$\frac{K_i \cdot e^{-\theta \cdot s}}{s}$ para $e^{-\theta \cdot s} \cong 1 - \theta \cdot s$	$\frac{2 \cdot \tau_c + \theta}{K_i \cdot (\tau_c + \theta)^2}$	$2 \cdot \tau_c + \theta$	0
$\frac{K_i \cdot e^{-\theta \cdot s}}{s}$ para $e^{-\theta \cdot s} \cong \frac{1 - \frac{\theta \cdot s}{2}}{1 + \frac{\theta \cdot s}{2}}$	$\frac{2 \cdot \tau_c + \theta}{K_i \cdot \left(\tau_c + \frac{\theta}{2}\right)^2}$	$2 \cdot \tau_c + \theta$	$\frac{\tau_c \cdot \theta + \frac{\theta^2}{4}}{2 \cdot \tau_c + \theta}$
$\frac{K}{\tau \cdot s + 1}$	$\frac{\tau}{K \cdot \tau_c}$	τ	0
$\frac{K}{s \cdot (\tau \cdot s + 1)}$	$\frac{1}{K \cdot \tau_c}$	∞	τ
$\frac{K \cdot e^{-\theta \cdot s}}{\tau \cdot s + 1}$ para $e^{-\theta \cdot s} \cong 1 - \theta \cdot s$	$\frac{\tau}{K \cdot (\tau_c + \theta)}$	τ	0
$\frac{K \cdot e^{-\theta \cdot s}}{\tau \cdot s + 1}$ para $e^{-\theta \cdot s} \cong \frac{1 - \frac{\theta \cdot s}{2}}{1 + \frac{\theta \cdot s}{2}}$	$\frac{1}{K} \frac{2 \cdot \tau + \theta}{2 \cdot \tau_c + \theta}$	$\tau + \frac{\theta}{2}$	$\frac{\tau \cdot \theta}{2 \cdot \tau + \theta}$
$\frac{K \cdot e^{-\theta \cdot s}}{s \cdot (\tau \cdot s + 1)}$	$\frac{2 \cdot \tau_c + \tau + \theta}{K \cdot (\tau_c + \theta)^2}$	$2 \cdot \tau_c + \tau + \theta$	$\frac{(2 \cdot \tau_c + \theta) \cdot \tau}{2 \cdot \tau_c + \tau + \theta}$
$\frac{K}{(\tau_1 \cdot s + 1) \cdot (\tau_2 \cdot s + 1)}$	$\frac{\tau_1 + \tau_2}{K \cdot \tau_c}$	$\tau_1 + \tau_2$	$\frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{\tau_1 + \tau_2}$
$\frac{K \cdot e^{-\theta \cdot s}}{(\tau_1 \cdot s + 1) \cdot (\tau_2 \cdot s + 1)}$ para $e^{-\theta \cdot s} \cong 1 - \theta \cdot s$	$\frac{\tau_1 + \tau_2}{K \cdot (\tau_c + \theta)}$	$\tau_1 + \tau_2$	$\frac{\tau_1 \cdot \tau_2}{\tau_1 + \tau_2}$
$\frac{K}{(\tau \cdot s)^2 + 2 \cdot \xi \cdot \tau \cdot s + 1}$	$\frac{2 \cdot \xi \cdot \tau}{K \cdot \tau_c}$	$2 \cdot \xi \cdot \tau$	$\frac{\tau}{2 \cdot \xi}$
$\frac{K \cdot e^{-\theta \cdot s}}{(\tau \cdot s)^2 + 2 \cdot \xi \cdot \tau \cdot s + 1}$	$\frac{2 \cdot \xi \cdot \tau}{K \cdot (\tau_c + \theta)}$	$2 \cdot \xi \cdot \tau$	$\frac{\tau}{2 \cdot \xi}$
$\frac{K \cdot (1 - \beta \cdot s)}{(\tau \cdot s)^2 + 2 \cdot \xi \cdot \tau \cdot s + 1} \quad \beta > 0$	$\frac{2 \cdot \xi \cdot \tau}{K \cdot (\tau_c + \beta)}$	$2 \cdot \xi \cdot \tau$	$\frac{\tau}{2 \cdot \xi}$

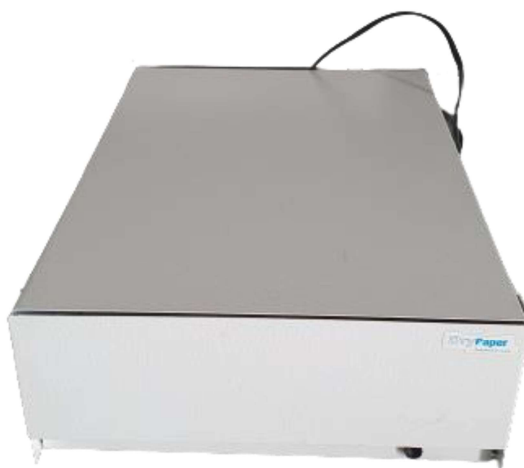
Fonte: Garcia (2017, p.448)

3 METODOLOGIA

3.1 Construção do protótipo

Com o propósito de atender as necessidades da concepção inicial do projeto, optou-se por utilizar um desumidificador de papéis que já existe no mercado, modelo “*DryPaper*”. O mesmo é composto por dois módulos básicos, sendo eles o módulo mecânico/estrutural e o módulo elétrico. O modelo físico pode ser conferido na figura 13.

Figura 13 – Desumidificador *DryPaper*

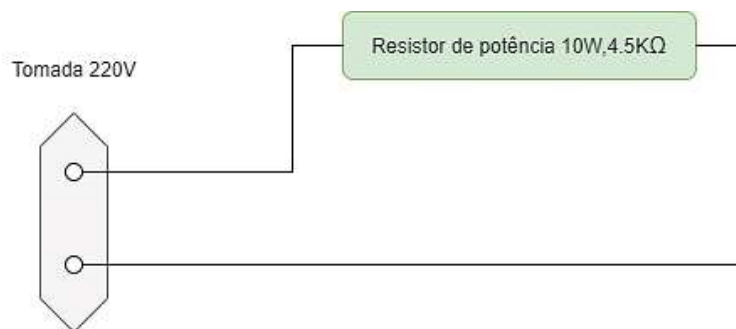


Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O módulo estrutural do desumidificador possui dimensões externas de 255mm de largura, 360mm de profundidade e 100mm de altura, tendo uma estrutura concebida em chapa de aço dobrada com 1mm de espessura. O volume interno útil é de 6,8 litros, podendo comportar resmas de folhas A4 e filamentos de impressora 3D.

A parte elétrica se resume a uma fonte de calor, e atuador do sistema, sendo composta apenas por um resistor de potência com 10W e resistência de $4,5K\Omega$, este componente consegue atingir uma temperatura de 180°C em sua superfície.

Conforme a figura 14 é possível notar o esquema de ligação básico para o funcionamento do sistema, onde uma resistência é submetida a uma tensão AC de 220V.

Figura 14 – Esquemático básico de funcionamento *DryPaper*

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Pode-se notar uma simplicidade no produto escolhido, onde não há qualquer ajuste ou controle da potência empregada ao atuador; tampouco a presença de sensoriamento do sistema, não permitindo a leitura de umidade e temperatura no interior do aparato.

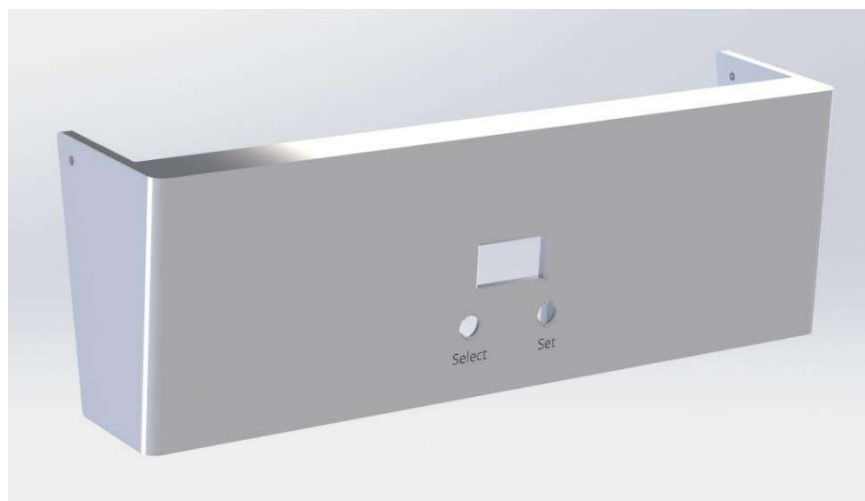
Algumas alterações foram fundamentais para realizar a mudança na estrutura do produto, entre elas foi necessário que houvesse um compartimento dedicado ao *hardware* eletrônico que compõe o sistema. Conforme a figura 15 é possível notar o modelo em 3D que foi elaborado com este intuito.

Figura 15 – Compartimento de *hardware* eletrônico

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Outra alteração necessária foi em relação a tampa frontal do produto. Optou-se por uma remodelagem 3D para atender o acoplamento do *display* e o posicionamento dos botões. Para isso, analogamente ao compartimento de *hardware* eletrônico, foi elaborado a impressão do modelo que pode ser conferido na imagem 16.

Figura 16 – Tampa frontal do desumidificador



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O alojamento dos sensores no interior do desumidificador também foi desenvolvido através de impressão 3D (Figura 17). O modelo foi planejado de forma a se localizar no topo do aparato e ser anexado à estrutura do sistema, garantindo a coleta eficaz dos valores de umidade e temperatura lidos pelos sensores.

Figura 17 – Alojamento de sensores



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

3.1.1 Hardware

Os componentes que integram o protótipo foram escolhidos com base na relação entre custo financeiro e capacidade de execução do objetivo inicial. De forma a atender os requisitos do projeto, como realizar a automatização e o controle da umidade no espaço interno do “*DryPaper*”, foi levado em consideração alguns componentes que fazem parte do módulo de controle, módulo este que foi implementado devido à necessidade de compor o produto para a validação de ensaios em malha aberta.

O desenvolvimento do projeto se concentrou em determinar primeiramente o atuador que seria utilizado para diminuir a umidade dentro do espaço dedicado. Para isso, foi necessário buscar uma alternativa que atendesse as leis de controle que posteriormente seriam implementadas. Optou-se, então, por manter o resistor de potência que já havia no aparato original (10W de potência e resistência de $4,5K\Omega$). As outras alternativas como o uso de lâmpadas incandescentes e o uso de um módulo Peltier foram descartadas por não se adequarem a estrutura já existente do produto.

De forma a executar o sensoriamento do sistema, foi necessário escolher um sensor adequado para a proposta. Tendo em vista que as análises de temperatura da versão original chegavam na faixa máxima de 30°C a 35°C, foi possível escolher o DHT11 como sensor de temperatura e umidade para o projeto. Este sensor pode fazer a leitura de temperatura na faixa de 0°C a 50°C como também de umidade na faixa de 0% a 100%; sua taxa de atualização é de 1 leitura a cada 2 segundos. O descarte das alternativas do sensor DHT22 e AHT10 se deve ao custo um pouco mais elevado que o DHT11 e também à falta de benefícios acentuados quando comparado ao sensor escolhido.

Para que o processo de controle de potência empregada ao atuador seja controlado é necessário que haja um componente que permita o chaveamento da tensão durante a operação. Este componente deve chavear conforme a lógica implementada por um microcontrolador que module o PWM na sua entrada e, além disso, é imprescindível que haja um *zero crossing* e o atuador receba uma forma de onda senoidal limpa. Portanto, para esta função foi escolhido o relé de estado sólido.

O componente lógico do projeto é responsável por processar os dados colhidos dos sensores e traduzi-los de forma a atender um padrão comportamento estabelecido previamente por meio da programação. A melhor opção encontrada, mantendo os critérios citados anteriormente, foi a de utilizar o Arduino uno. Este componente foi escolhido por possuir portas

lógicas de entradas e saídas suficientes para o desenvolvimento sistema além de possuir diversos acervos e bibliotecas dedicados ao controle PID.

A interface entre o usuário e a máquina foi idealizada com o uso de um *display oled* e *push buttons*, de maneira que o processo para a utilização do produto seja facilitado e feito de forma intuitiva. Essa IHM (Interface Homem Máquina) é intrínseca ao microcontrolador e sua programação.

A alimentação dos componentes eletrônicos é realizada através de uma fonte chaveada, que limita a tensão em 5V e mantém o sistema principal de controle operacional, juntamente com seus componentes periféricos.

A tabela 1 lista os componentes escolhidos e suas alternativas.

Tabela 1 – Tabela de escolha de componentes

Componente	Alternativa 1 (escolhido)	Alternativa 2	Alternativa 3	Ilustração	Qtd
Atuador	Resistor de potência	Lâmpadas incandescentes	Módulo de Peltier		1
Sensor de temperatura e umidade	DHT11	DHT22	AHT10		3
Relé	Relé de estado solido	Relé eletromecânico	Transistores		3
Controlador	Arduino Uno	Raspberry Pi	ESP32		1
Display	<i>Display oled</i>	<i>Display de cristal líquido</i>	-		1

Fonte	Fonte chaveada 5V	-	-		1
Botões	<i>Push button</i>	Teclado de membrana	-		2

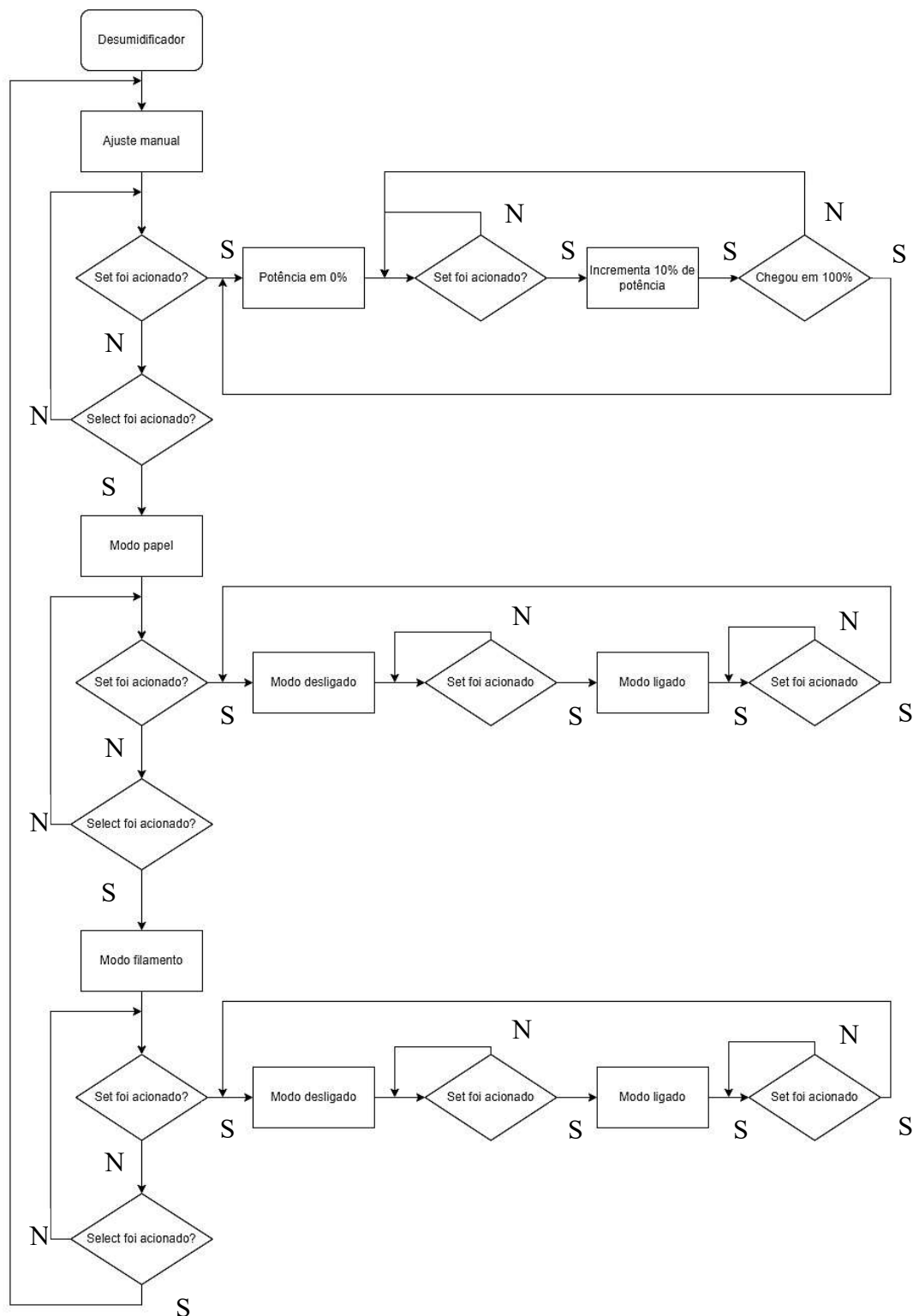
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

3.1.2 *Software*

Para a realização do sistema de controle, coleta de dados dos sensores e interação entre usuário e máquina, foi desenvolvido uma programação em C para o microcontrolador ATmega 328p presente no Arduino uno. Essa programação utilizou bibliotecas para o controle PID, sensores, ajuste de *clock* e para a utilização do *display oled*.

O fluxograma lógico da figura 18 representa a transição de estados em que a máquina pode operar. Foi implementado 3 estágios principais para o sistema: ajuste manual, modo papel e modo filamento. Estas configurações são guiadas através de dois botões: SELECT, que seleciona o estágio de preferência; e SET que ajusta o modo de operação de cada estágio.

Figura 18 – Fluxograma lógico do desumidificador



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

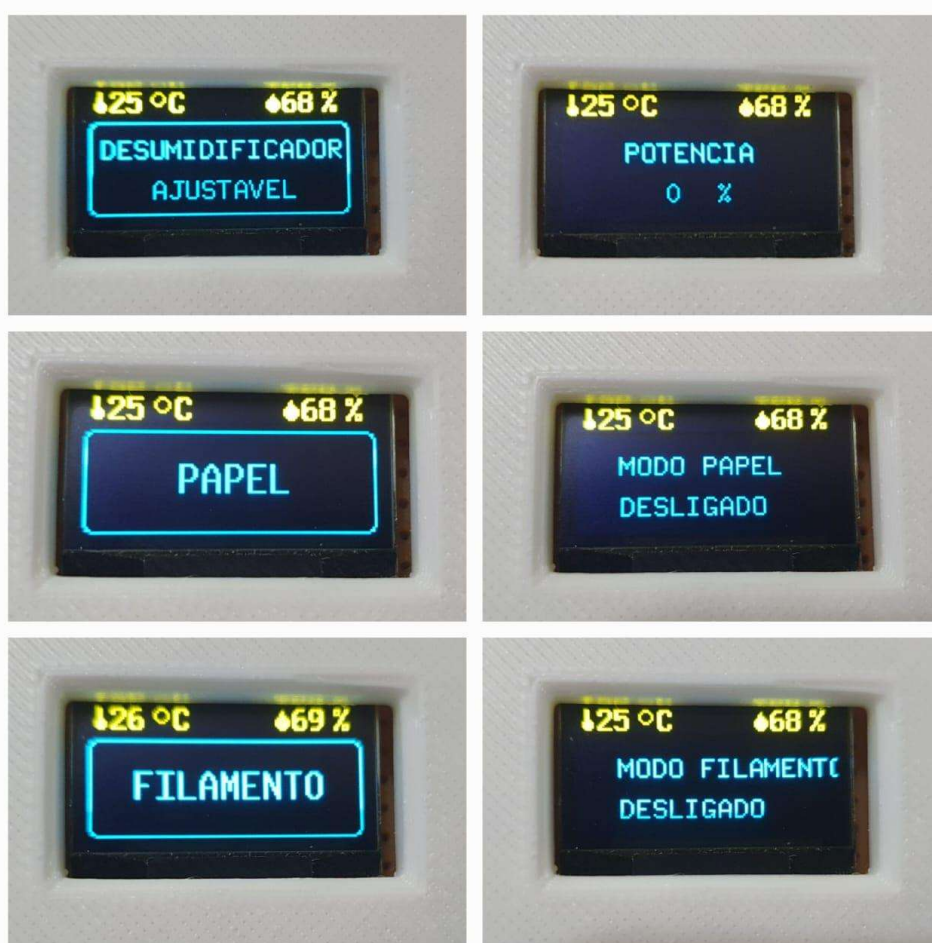
O modo de ajuste manual possibilita ao usuário a escolha da potência empregada ao atuador, de maneira que ao pressionar o botão SET há um incremento de 10% sobre a potência

anterior. Esse processo pode ser reproduzido continuamente, sendo que ao chegar em 100% o próximo ajuste levará a potência para 0%, caracterizado como o primeiro estado.

A aplicação do modo papel e modo filamento são análogas. Estes estágios são os responsáveis pela automatização do sistema, categorizando-os como processos de controle, onde a potência varia para atingir a umidade ideal para o papel ou o filamento de impressão 3D. Essa implementação acontece por meio do PID empregado na programação do microcontrolador. O que difere um estágio do outro é a umidade indicada para cada um, sendo que para o papel a faixa pode permear pelos valores de 45% a 55% enquanto para o filamento esse valor diminui para 10%. Dentro do código estes valores podem ser traduzidos como o *setpoint* da função PID.

A interface do *display oled* pode ser conferida na figura 19, que demonstra os vários estágios e suas configurações.

Figura 19 – Interface e suas configurações



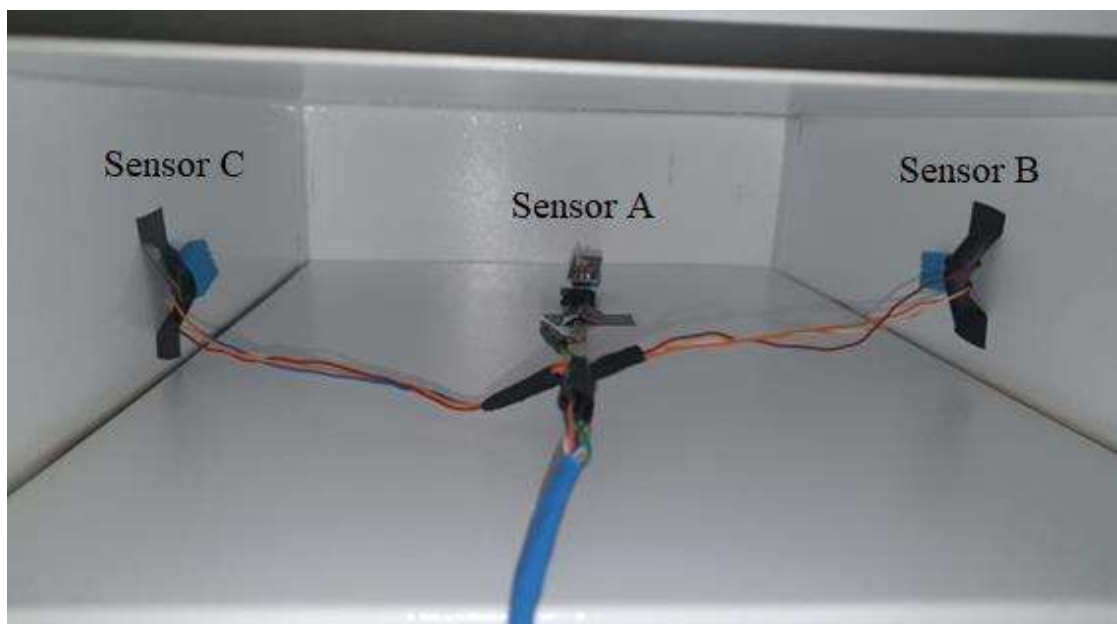
3.2 Ensaios em malha aberta

Com o intuito de avaliar o comportamento do sistema e identificar um modelo matemático que se adeque ao processo físico foi necessário realizar testes e ensaios do protótipo que, dessa forma, possibilitou o sensoriamento, a coleta de dados e obter a relação entre as grandezas físicas envolvidas, como a umidade, temperatura e potência.

3.2.1 Preparação para testes

O protótipo inicial contou com três sensores DHT11 dispostos em regiões diferentes dentro do volume estudado; estes sensores foram provisoriamente fixados sem a estrutura final acoplada. A localização dos sensores pode ser visualizada na através da figura 20, onde o sensor **A** ficou localizado no centro e fixado na base do aparato, enquanto o sensor **B** e **C** ficaram alojados na lateral direita e esquerda da estrutura, respectivamente.

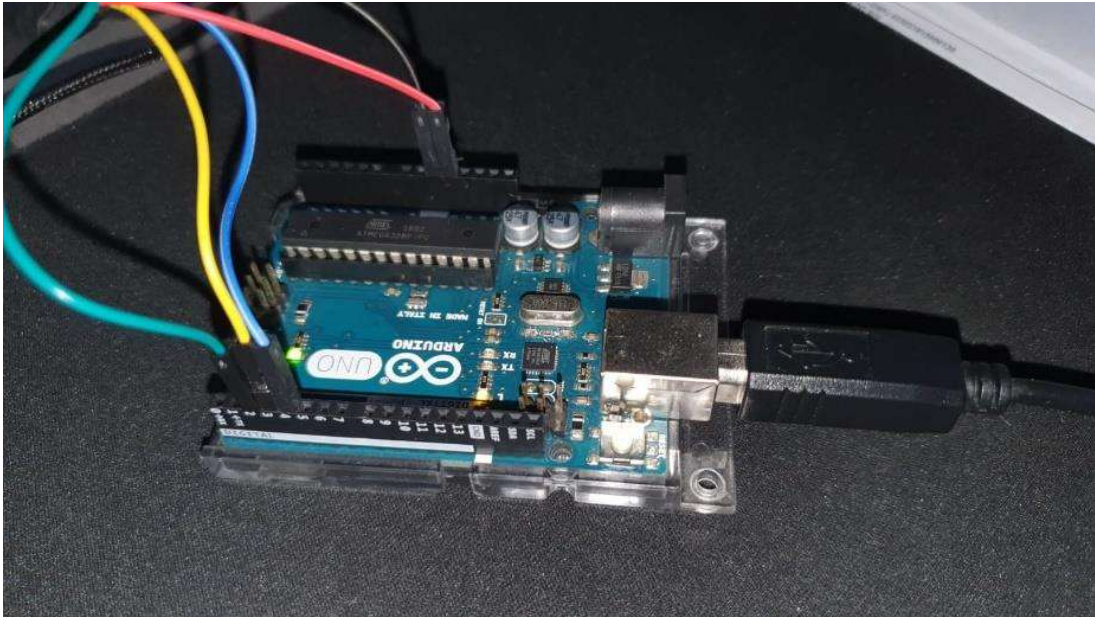
Figura 20 – Disposição inicial dos sensores



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

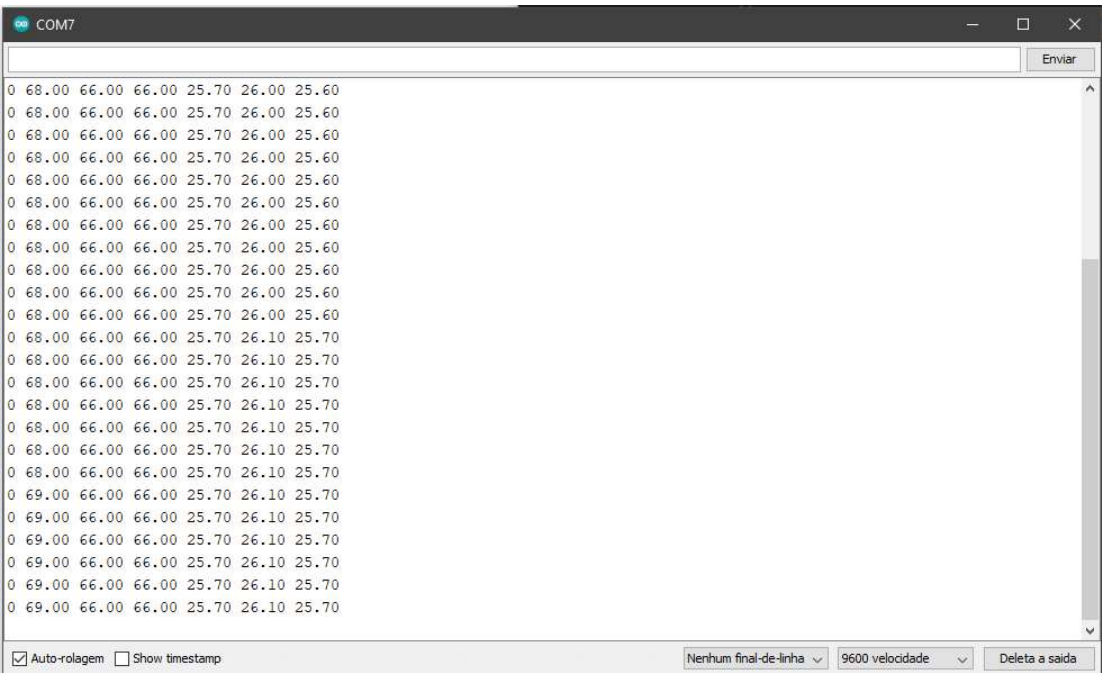
Com o sensoriamento devidamente instalado, pôde-se seguir para a etapa de coleta de dados (as conexões podem ser observadas pela figura 21) onde o Arduino é responsável pela leitura dos valores e por transmiti-los via monitor serial (figura 22) ao usuário, que possibilita a coleta e posterior tratamento dos dados.

Figura 21 – Conexões com o Arduino



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Figura 22 – Serial Monitor



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Para realizar as conexões entre os componentes e o Arduino, elaborou-se um esquemático elétrico para os ensaios iniciais, configurando as portas lógicas de acordo com a tabela 2.

Tabela 2 – Portas do protótipo inicial

Componente	Porta	Estado
Sensor A	Digital I/O 2	Entrada
Sensor B	Digital I/O 3	Entrada
Sensor C	Digital I/O 4	Entrada
PWM	Digital I/O 9	Saída
<i>Pushbutton Select</i>	Digital I/O 6	Entrada
<i>Pushbutton Set</i>	Digital I/O 7	Entrada
<i>Display oled</i>	Analog in A4 e A5	Saída

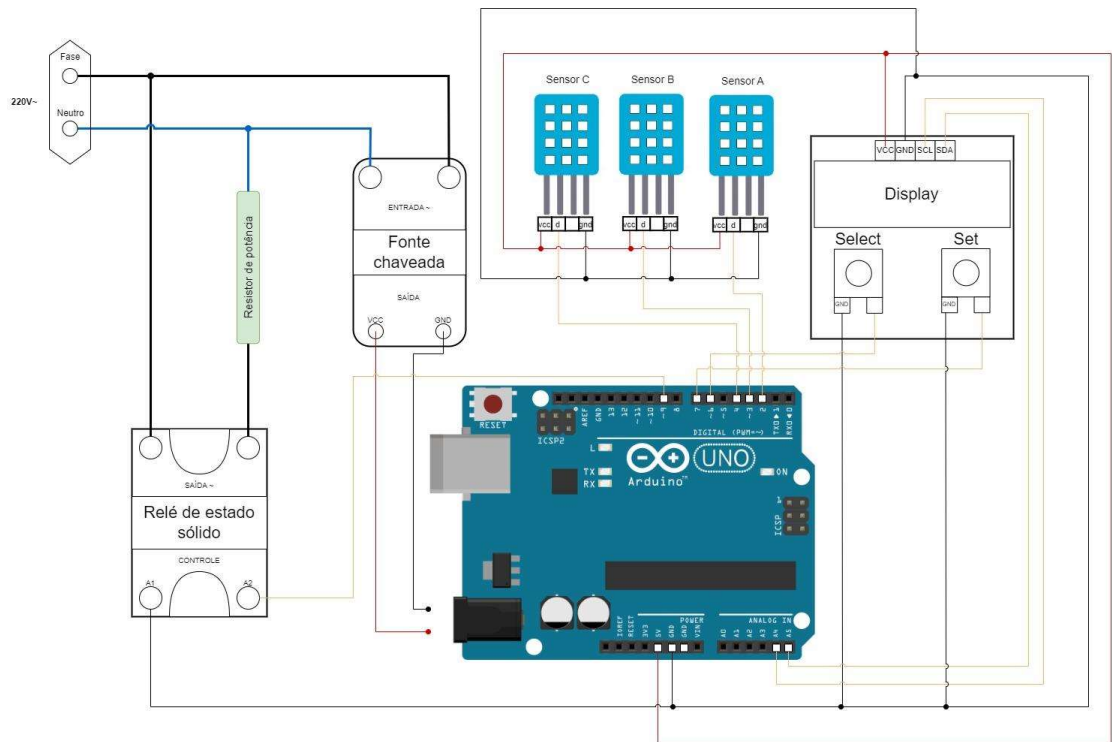
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

O esquemático elétrico do sistema, figura 23, foi projetado de forma que os sensores, botões, relé de estado sólido e o display estivessem dispostos e conectados ao Arduino através de fios com terminais de encaixe. Estas conexões preliminares foram utilizadas sem levar em consideração a estrutura final do protótipo, como o alojamento e encaixe dos componentes.

Este diagrama possui a função de auxiliar o processo de montagem e facilitar o entendimento das ligações entre os componentes que envolvem todo o sistema, além de guiar o acoplamento dos elementos na estrutura física que serve para armazenar os mesmos.

O suprimento energético deve contar com uma fonte de tensão que seja adequada ao sistema. Em razão do resistor de potência específico utilizado que possui 10W de potência e resistência de $4,5K\Omega$, se torna fundamental que haja uma tensão alternada fornecida pela rede, com o valor nominal de 220V, que servirá também para a alimentação da fonte chaveada de 5V presente no circuito.

Figura 23 – Esquemático elétrico



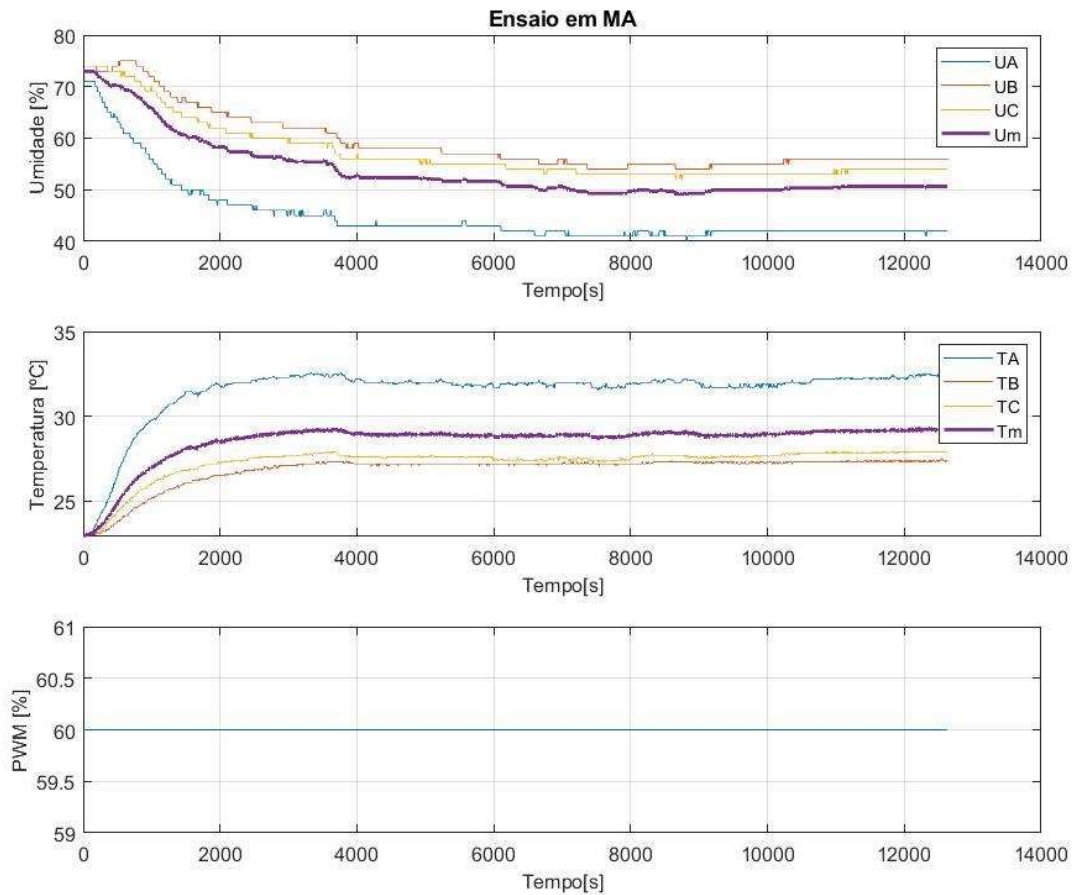
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

3.2.2 Fundamentação dos testes

Para detectar e observar o comportamento do sistema foi elaborado uma série de testes em malha aberta. O objetivo principal concentrou-se na visualização dos diferentes valores de umidade e temperatura obtidos em regiões diferentes do protótipo e como esses valores relacionam-se com a variação da potência entregue pelo atuador.

Os dados coletados foram tratados e analisados utilizando o *software* MATLAB, que possibilitou visualizar e relacionar os valores encontrados em forma de gráficos de linha.

O teste foi realizado com um valor de umidade inicial em 73% (média dos valores obtidos pelos 3 sensores) e de potência regulada do atuador, com o PWM ajustado em 60% de *duty cycle*. O propósito do teste foi de analisar o comportamento dessas variáveis quando submetidas a um longo período de tempo. O gráfico da figura 24 demonstra os resultados obtidos neste ensaio.

Figura 24 – Ensaio em malha aberta com *duty cycle* em 60%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Observa-se que ao longo de aproximadamente três horas e meia de ensaio o tempo de acomodação da curva levou cerca de 153 minutos, além de que a temperatura e a umidade, do sensor **A**, alcançaram um valor de 32,5°C (TA) e 42% (UA), respectivamente. Este sensor, posicionado ao centro do protótipo, destoou significativamente das curvas obtidas pelos sensores **B** e **C**, que mantiveram valores muito similares e estáveis; isso se dá ao fato de que a localização do sensor A é mais próxima do atuador.

Por meio desta análise, identificou-se a necessidade de calcular a média dos valores, uma vez que a diferença de valores poderia induzir a uma sintonização errônea do controle PID.

De maneira análoga ao teste realizado, com o intuito de obter os dados relativos as variáveis envolvidas, pôde-se testar a variação de PWM, *duty cycle* do sistema, implementada

pelo *software*. Sendo os testes subsequentes realizados de acordo com o incremento de 10% na potência entregue ao atuador.

No tópico resultados serão apresentados os gráficos obtidos nos ensaios para cada situação, além de ser comentado o comportamento individual das variáveis.

3.3 Identificação do sistema

A identificação do sistema busca atribuir um modelo matemático que expresse o comportamento físico do conjunto estudado, baseando-se em dados coletados previamente em ensaios de malha aberta e utilizando-os para parametrizar uma função transferência.

O comportamento observado na figura 24 pode, no domínio da frequência, ser representado por uma função de transferência de primeira ordem com atraso (FOPDT – *First Order Plus Dead Time*):

$$G_p(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_p \cdot e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (3.1)$$

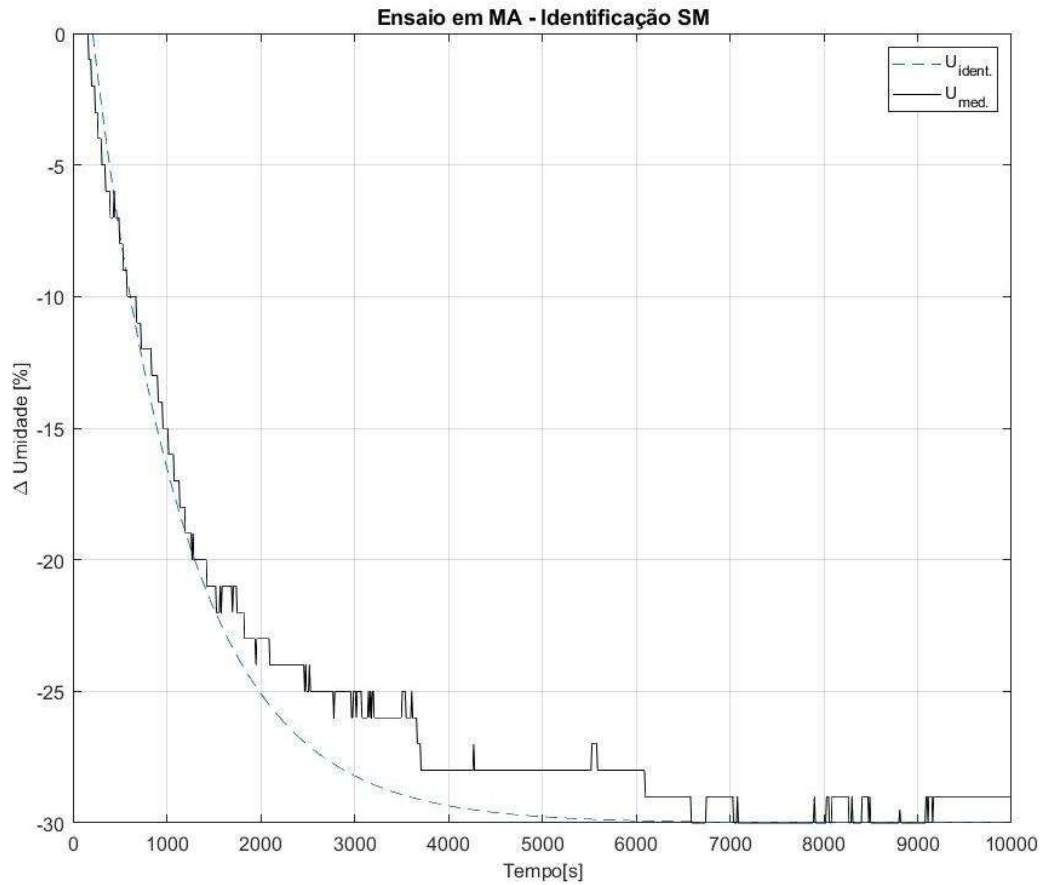
em que $G_p(s)$ representa a função de transferência do processo, $Y(s)$ representa a saída do processo, $U(s)$ representa a entrada do processo, K_p representa o ganho estático, θ representa o atraso de transporte e τ , a constante de tempo.

O método de Smith foi utilizado para obter a função transferência que leva em consideração as respostas do sistema e realiza a identificação dos parâmetros da função de transferência.

3.3.1 Método de Smith

Através do método de Smith, que utiliza de amostras em intervalo de tempo de 28,3% e 63,2% e valor final da resposta transitória, foi possível analisar as curvas obtidas pelo *software* MATLAB; a Figura 25 demonstra esse método.

Figura 25 – Ensaio pelo Método de Smith



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Nota-se, portanto, através da figura 25 a aparição de duas curvas diferentes para a variação da umidade. A curva em tracejado (U_{ident}) representa identificação do modelo com o comportamento aproximado do ensaio real; já a outra curva utiliza os valores reais medidos (U_{med}) e obtidos durante o teste.

Ao observar no gráfico anterior, optou-se por utilizar apenas o método de Smith para identificar o sistema, visto que o mesmo demonstrou uma resposta próxima a desejada considerando as circunstâncias do projeto.

A equação que representa a função transferência, extraída por meio do *software* MATLAB que gerou a curva de resposta tracejada nos ensaios, pode ser visualizada a seguir:

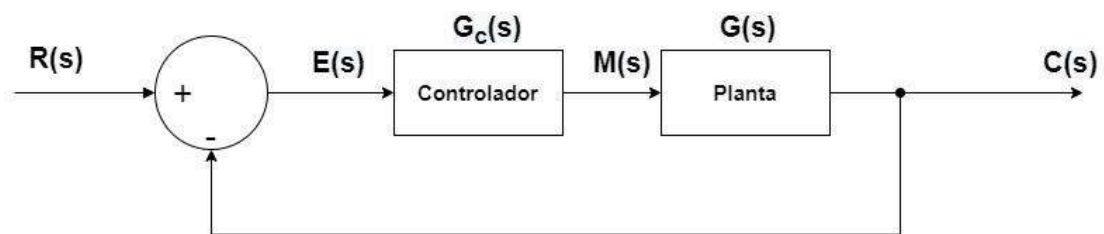
$$G(s) = \frac{-0,5 \cdot e^{-220s}}{990s + 1} \quad (3.2)$$

3.4 Sintonia do controlador

Através da função transferência obtida por meio da identificação de sistema, especificamente o método de Smith, pode-se realizar os cálculos para a projetar e sintonizar o controlador que será implementado ao sistema. Este controlador deve atender os requisitos de projeto com a finalidade de garantir o controle estável em malha fechada.

De forma a determinar os ganhos que serão utilizados no controlador em malha fechada (figura 26) houve a possibilidade de utilizar o método de síntese direta e o método IMC.

Figura 26 – Controlador genérico



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

3.4.1 Especificações do controlador

Para o comportamento geral do sistema funcionar de acordo com o desejado, é imprescindível que haja alguns requisitos que direcionem o projeto do controlador para a obtenção dos ganhos, entre as especificações estão:

- tempo de acomodação (mínimo) ser três vezes menor quando comparado com aquele observado em malha aberta;
- sobressinal com o menor valor possível, almejando que não haja a sua presença.

3.4.2 Cálculo dos ganhos do controlador utilizando o método de síntese direta

Considerando que o sistema possui um atraso, utiliza-se, portanto, o modelo de processo de primeira ordem com tempo morto para obter os ganhos desejados. Esta consideração resulta nos seguintes ganhos do controlador PID:

$$K'_c = \frac{\tau}{K_p(\tau_c + \theta)} \quad (3.3)$$

$$\tau'_I = \tau \quad (3.4)$$

$$\tau'_D = \frac{\theta}{2} \quad (3.5)$$

em que K'_c representa o ganho proporcional, τ_c representa a constante de tempo desejada em malha fechada, τ'_I representa o tempo de integração e τ'_D , o tempo de derivação. Estas expressões definem, portanto, a lei de controle PID para o sistema em malha fechada. Porém, para inserir os valores que regem o controlador no *software* do projeto é necessário que sejam convertidos em termos de K_P , K_I e K_D . Dessa forma, as equações a seguir sanam esta necessidade:

$$K_P = K'_c \quad (3.6)$$

$$K_I = \frac{K_P}{\tau'_I} \quad (3.7)$$

$$K_D = K_P \cdot \tau'_D \quad (3.8)$$

Ao substituir os valores da função transferência, encontrada pelo método de Smith (ver equação 3.2), nas equações que parametrizam o controlador, equações 3.4-3.6, e posteriormente nas equações 3.7-3.9, chega-se nos resultados apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros de controle para síntese direta

K_P	K_I	K_D
-3,6	-0,00364	-396

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

É importante ressaltar que o fator negativo que antecede os valores dos parâmetros reflete diretamente no tipo de argumento utilizado pelo código implementado no Arduino. Essa característica é própria de um decrescimento da curva estudada e desta forma necessita de um parâmetro de ação reversa na aplicação do controlador PID do Arduino, eliminando o sinal negativo dos fatores.

Também é necessário salientar que o valor de τ_c foi definido conforme a necessidade de o sistema ser três vezes mais rápido, para isso o valor de $\tau_c = \theta/3$.

3.4.3 Cálculo dos parâmetros do controlador para o método IMC

De forma a comparar a sintonia efetuada via síntese direta, foi utilizada a técnica de controle IMC. Assim, como na síntese direta, o modelo escolhido para a sintonia via IMC foi o FOPDT. Suas equações são descritas da seguinte forma:

$$K_c = \frac{\tau + \theta/2}{K_p(\tau_c + \theta/2)} \quad (3.12)$$

$$\tau_i = \tau + \theta/2 \quad (3.13)$$

$$\tau_d = \frac{\tau\theta}{2\left(\frac{\theta}{2} + \tau\right)} \quad (3.14)$$

Analogamente ao método anterior, se faz necessário a conversão dos parâmetros encontrados de maneira a padronizar em termos de K_P , K_I e K_D . Portanto os valores convertidos são dispostos como:

$$K_P = K_c \quad (3.15)$$

$$K_I = \frac{K_P}{\tau_i} \quad (3.16)$$

$$K_D = K_P \cdot \tau_d \quad (3.17)$$

Por consequência os valores encontrados podem ser vistos na tabela 3.

Tabela 4 – Parâmetros de controle para IMC

K_P	K_I	K_D
-5	-0,00433	495

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Da mesma forma que o método de síntese direta, considerou-se o valor de $\tau_c = \theta/3$, que representa o requisito do sistema ser três vezes mais rápido do que o processo em malha aberta.

3.5 Avaliação do sistema em malha fechada

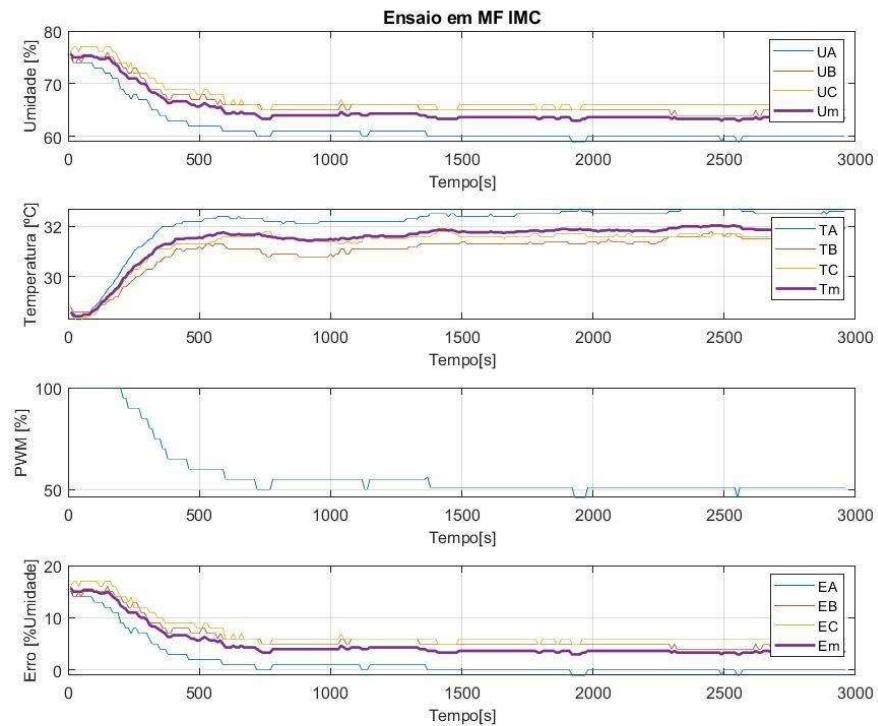
Após a obtenção dos parâmetros que determinam a sintonia do controlador PID do sistema, a etapa de ensaios e testes em malha fechada pôde ser realizada. Da mesma forma que o ensaio em malha aberta, o sistema contou com a leitura dos 3 sensores dispostos em locais diferentes do aparato, contudo, apenas o sensor central foi utilizado com a realimentação do sistema.

O objetivo dos ensaios consiste em observar o comportamento do sistema com o valor de umidade ajustado pelo *setpoint* do controlador PID. A análise desta atuação também leva em consideração a existência de sobressinal, o erro e o tempo de acomodação que a resposta apresenta, de forma a comparar com os requisitos previamente estabelecidos através das especificações do controlador.

Utilizando os parâmetros obtidos anteriormente, método IMC, e aplicando-os no *software* do sistema, chegou-se então no ensaio em malha fechada. As variáveis iniciais do ensaio contaram com 28°C de temperatura e 76% de umidade. O *setpoint* foi estabelecido em 60%.

O gráfico apresentado pela figura 27 expõe os resultados encontrados para o ensaio em malha fechada configurado com o citado anteriormente.

Figura 27 – Ensaio em malha fechada



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Nota-se que o tempo de acomodação da curva é de 23 minutos (1380 segundos), sem a presença de sobressinal e com um erro praticamente constante em 0%. Considerando o sensor **A** como o responsável pelo *feedback* do sistema, a umidade inicia-se em 76% e se estabiliza em 60%, com o valor de PWM, mais alto, iniciando em 100% e posteriormente se estabilizando em 51%.

O sistema, portanto, se comportou de forma estável, mantendo o valor de umidade igual ao solicitado, 60%. O tempo para acomodação foi por volta de 5 vezes mais rápido quando comparado em malha aberta.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Após a conclusão dos testes em malha fechada, foi possível analisar o comportamento do sistema e relacionar com a expectativa inicial do projeto, conferindo se os objetivos discutidos anteriormente foram atingidos. Esta análise leva em consideração diversos tópicos diferentes com os objetivos específicos de cada item sendo comparado com o resultado real encontrado.

4.1 Análise do *hardware* e *software* do sistema

Com a seleção e montagem dos equipamentos eletrônicos concluída pôde-se testá-los de forma satisfatória; o conjunto de componentes utilizados não demonstrou qualquer problema, e foram validados durante o ensaio em malha aberta.

A estrutura do aparato, necessitou de modificações como apresentado no tópico de *hardware*. A fabricação da nova tampa que compõe a parte frontal do equipamento foi de difícil obtenção, visto que sua dimensão por ser larga, quando comparada as mesas de impressoras 3D convencionais, chegou ao limite de curso máximo da impressora utilizada, ocasionando empenamento na peça e prejudicando sua utilização.

O *software* passou por diversas versões antes de atingir seu modelo final. Houveram códigos que foram utilizados apenas para a obtenção de dados dos sensores, outros que incorporaram o uso de PWM para teste em malha aberta e, por fim, o *software* final com o uso da interface entre máquina e usuário. Todos os ajustes utilizados foram com o objetivo de otimizar o sistema de forma que não houvesse problemas para o operador, e, portanto, concluído com êxito.

4.2 Discussão dos ensaios em malha aberta

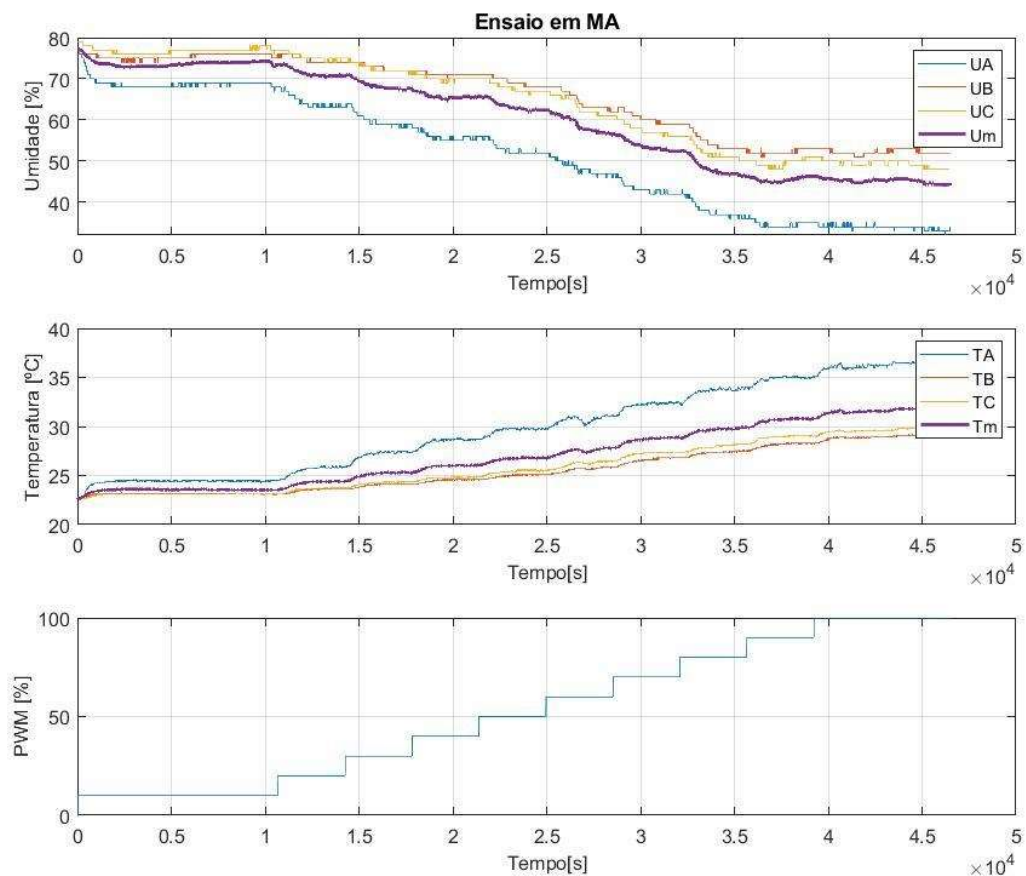
A metodologia desses ensaios exemplificou apenas de maneira genérica o processo de obtenção de dados gerados pelo sistema. Vários testes foram necessários para validar a resposta do atuador com a variação de *duty cycle* do PWM, e aquisição de umidade e temperatura pelos sensores.

A análise dos gráficos plotados após a obtenção desses dados revelou comportamentos físicos no interior do aparato, como a diferença de temperatura e umidade conforme a região em que o sensor estava localizado no interior da caixa metálica. Isso acontece pela convecção

natural do ar que emana diretamente do ponto inferior central do aparelho, justamente oriundo da posição do atuador na base do aparelho. Portanto, o sensor A foi o que mais diferiu em relação aos outros sensores, que por consequência mediam valores maiores de umidade e menores de temperatura, demonstrando fisicamente o gradiente do sistema.

A figura 28 mostra o comportamento de deslocamento de curvas entre os sensores citado anteriormente. Também demonstram os resultados obtidos com incrementos de 10% em relação a potência entregue ao atuador.

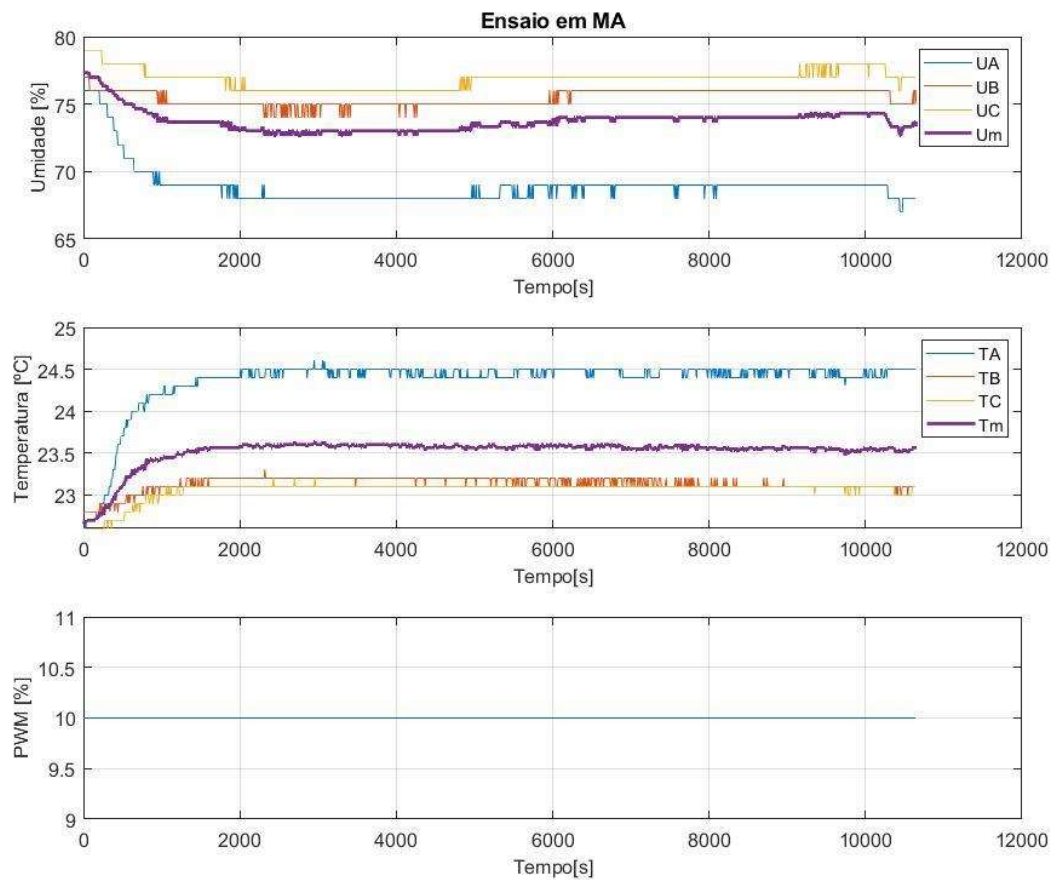
Figura 28 – Ensaio em malha aberta com *duty cycle* incrementando 10%



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Observando as próximas figuras é possível identificar os mesmos deslocamentos do ensaio anterior. Esses testes representam os dados coletados individualmente para cada potência entregue ao atuador. Vale ressaltar que o processo segue o incremento de 10% para cada teste, com intervalos de tempo entre os ensaios, para que a umidade inicial seja igual a umidade ambiente.

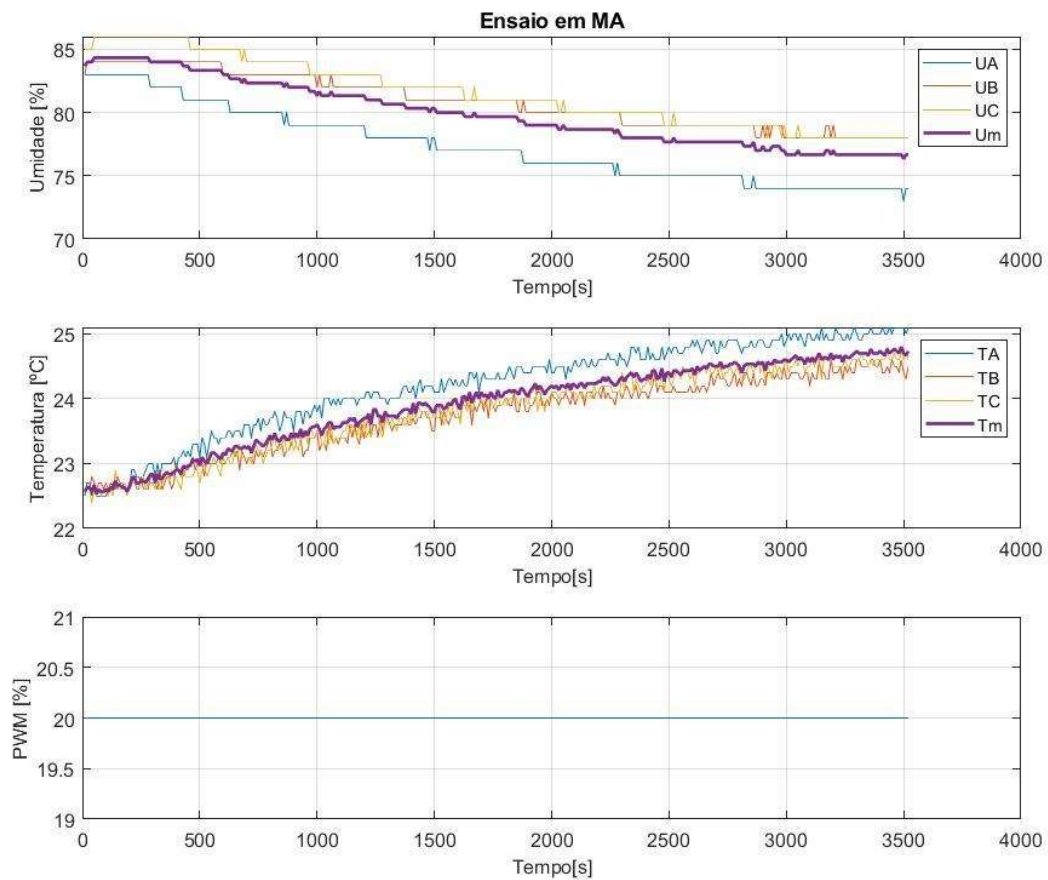
Figura 29 – Ensaio em malha aberta com *duty cycle* em 10%



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

Nota-se na figura 29, que há variação entre os valores apresentados de cada sensor, tanto para umidade como para temperatura. Neste ensaio, para o sensor **A**, o valor inicial de umidade corresponde a 76% e se estabiliza em 68% a partir de 2000 segundos. Percebe-se também um comportamento ruidoso da leitura, característica do sensor DHT11.

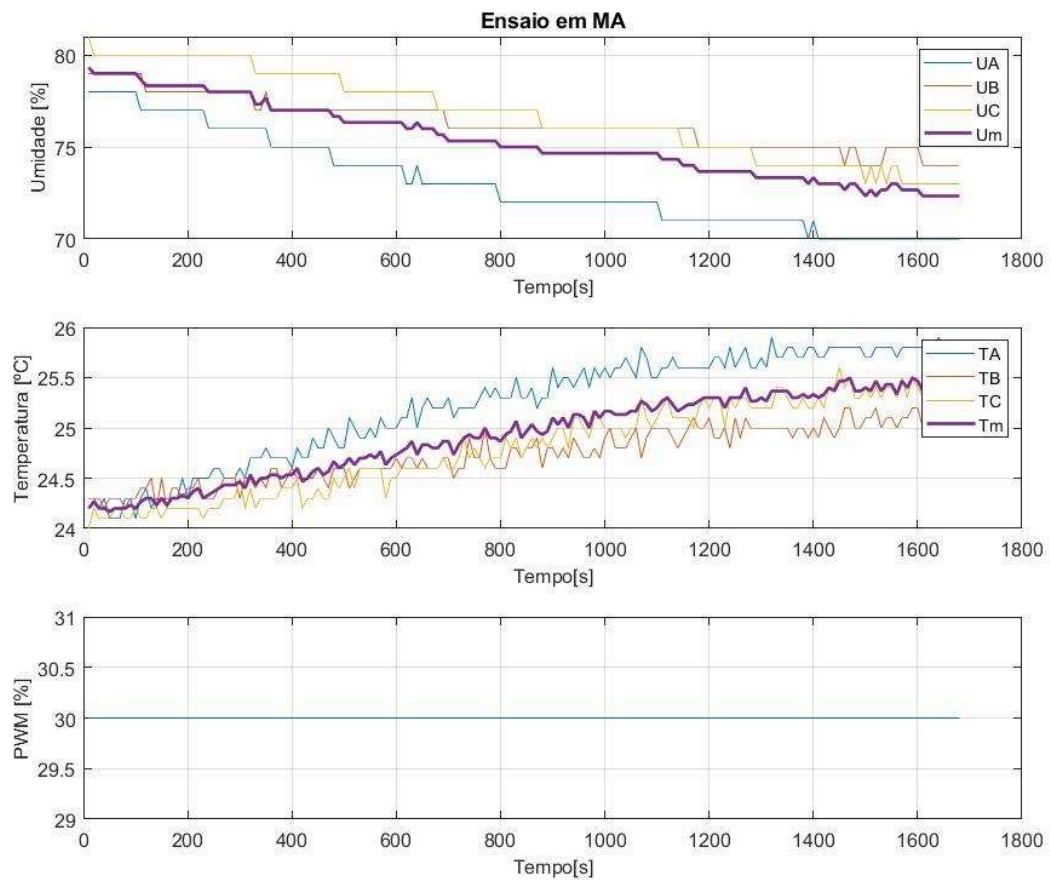
Figura 30 – Ensaio em malha aberta com *duty cycle* em 20%



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A figura 30, possui a mesma variação do ensaio anterior, entre os valores apresentados de cada sensor, tanto para umidade como para temperatura, neste ensaio, para o sensor A, o valor inicial de umidade corresponde a 83% sem tendência de se estabilizar, mas chegando a um valor final de 74% a partir de 2800 segundos. O comportamento ruidoso da leitura pelo sensor continua presente.

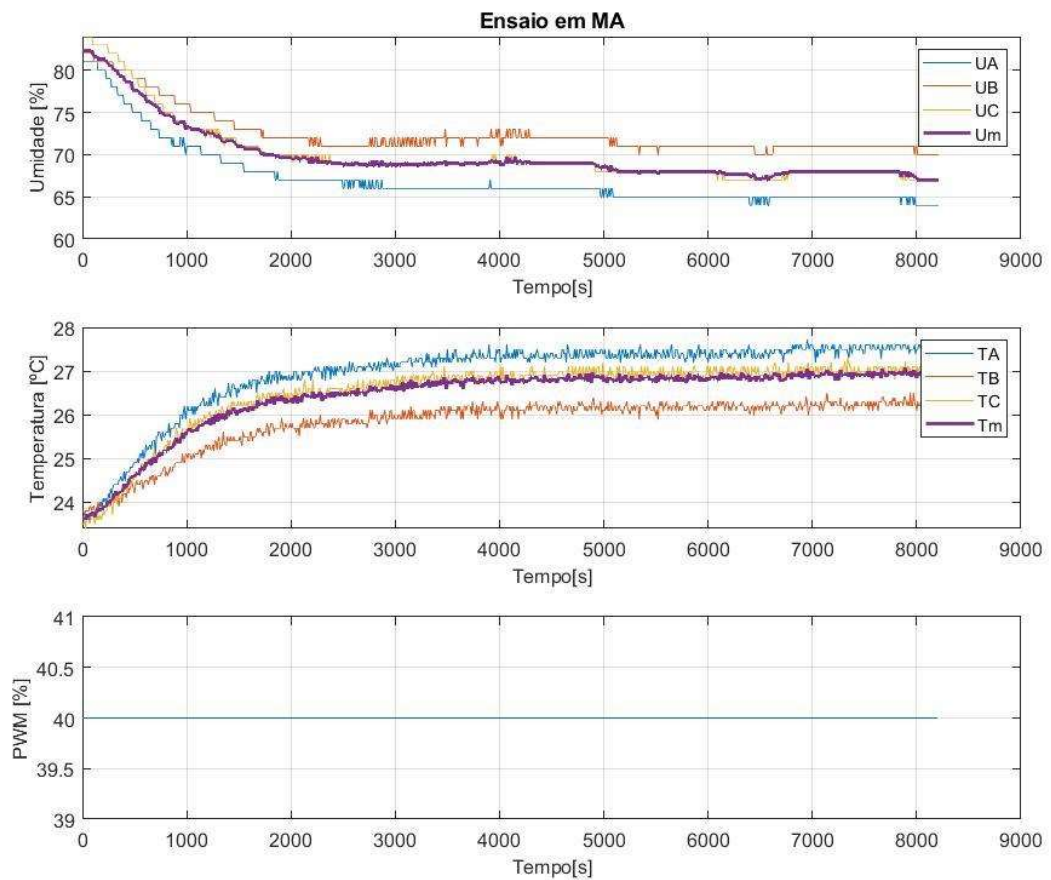
Figura 31 – Ensaio em malha aberta com *duty cycle* em 30%



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A figura 31 apresenta, para o sensor A, o valor inicial de umidade que corresponde a 78% sem tendência de se estabilizar, mas chegando a um valor final de 70% a partir de 1400 segundos. O comportamento ruidoso da leitura pelo sensor continua presente.

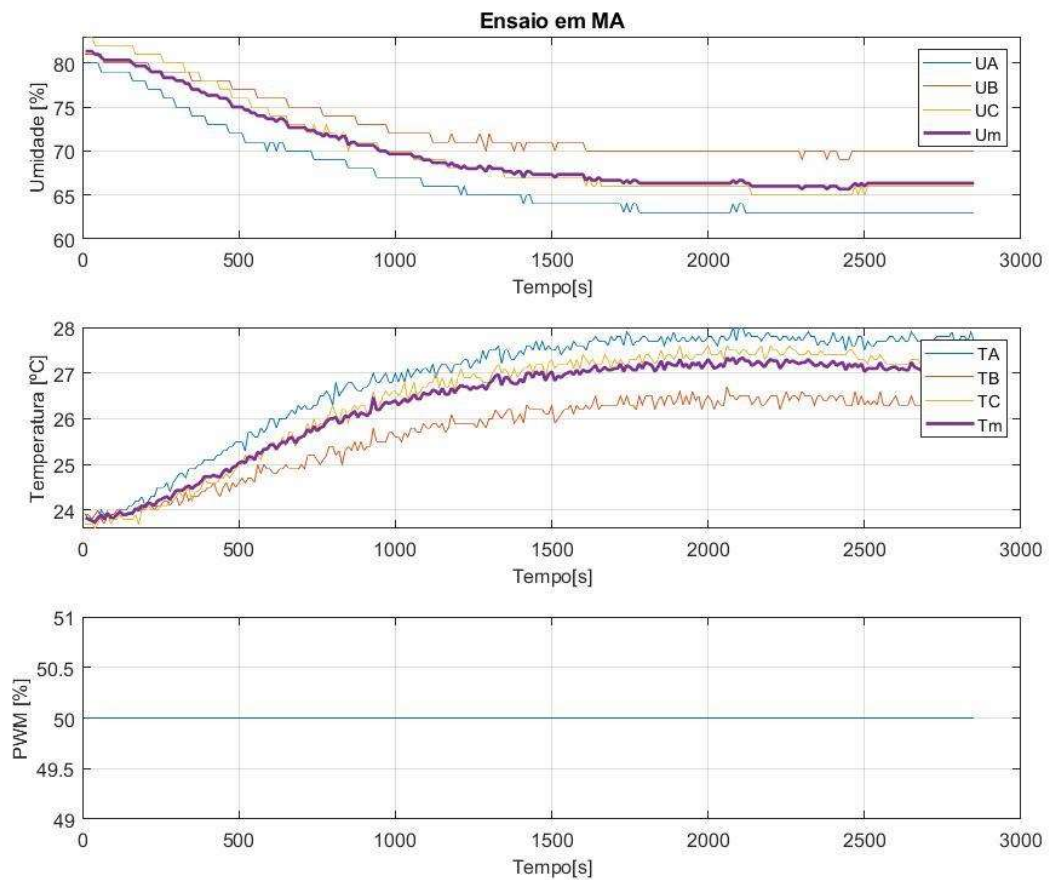
Figura 32 – Ensaio em malha aberta com *duty cycle* em 40%



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A figura 32 apresenta, para o sensor A, o valor inicial de umidade que corresponde a 81% com tendência de se estabilizar a um valor final de 65% a partir de 5200 segundos. O comportamento ruidoso da leitura pelo sensor continua presente.

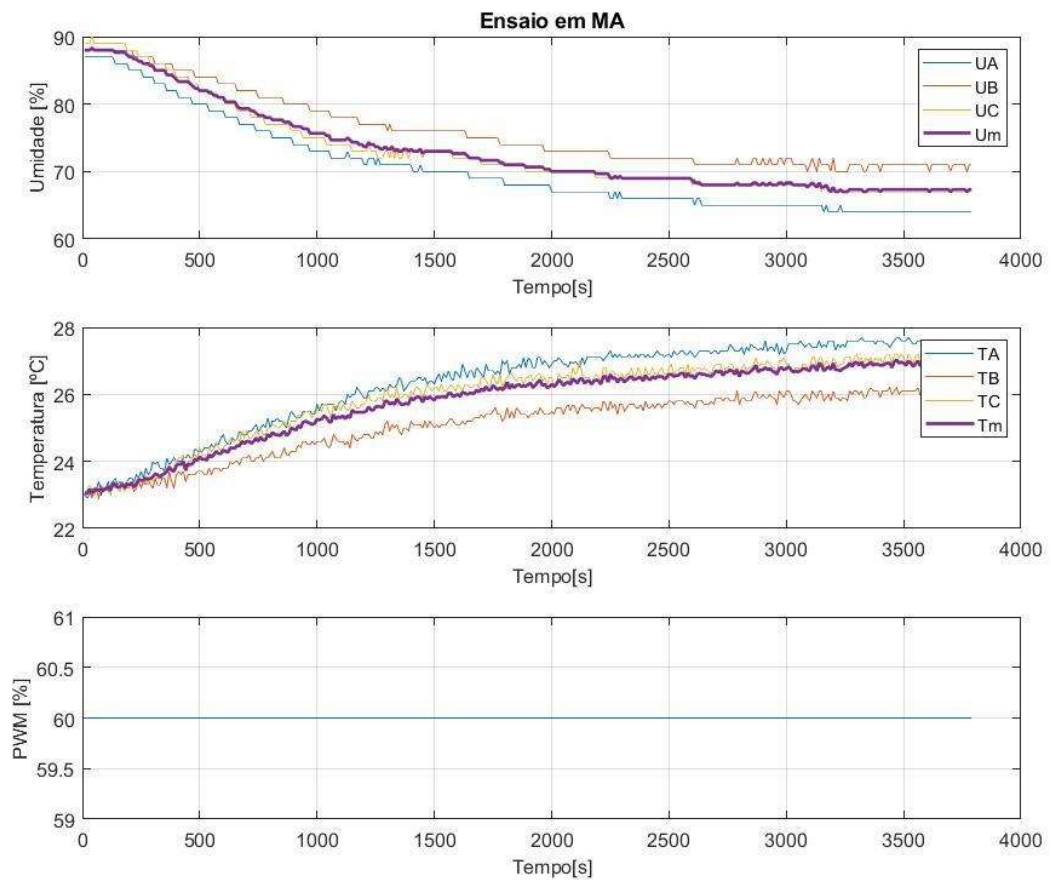
Figura 33 – Ensaio em malha aberta com *duty cycle* em 50%



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A figura 33 apresenta, para o sensor **A**, o valor inicial de umidade que corresponde a 80% com tendência de se estabilizar a um valor final de 63% a partir de 1750 segundos. O comportamento ruidoso da leitura pelo sensor continua presente.

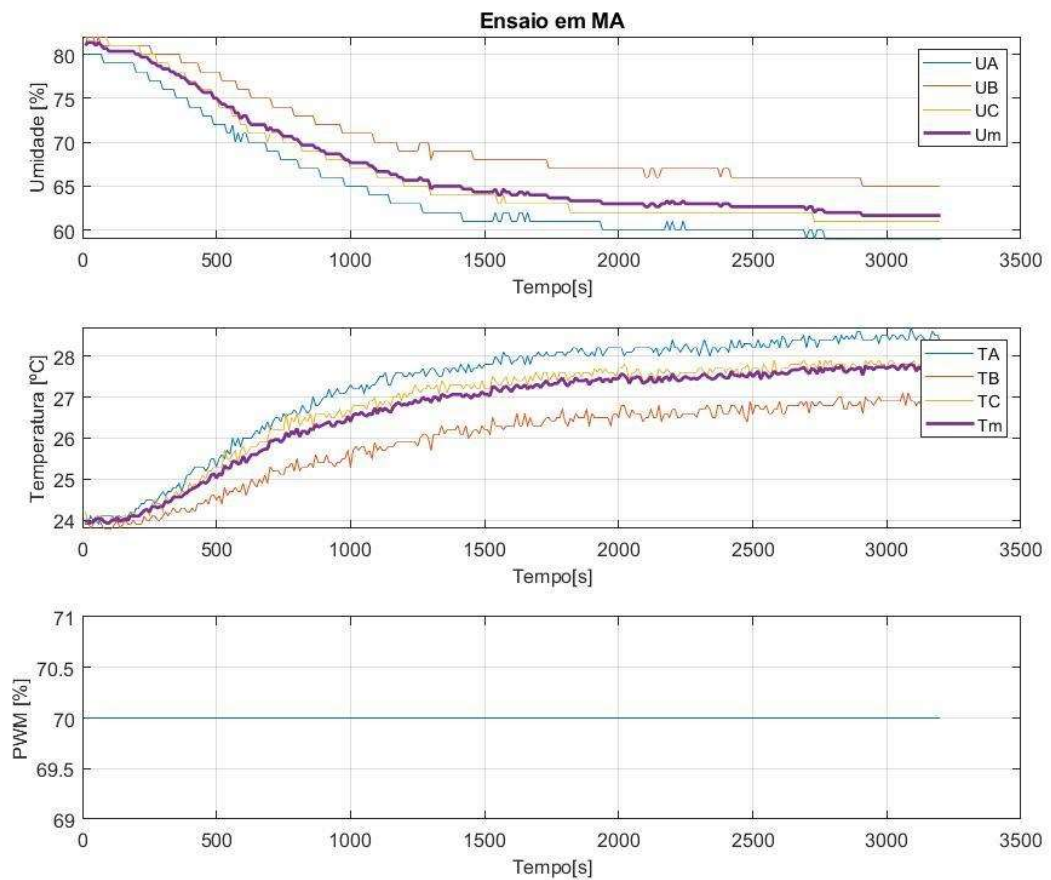
Figura 34 – Ensaio em malha aberta com *duty cycle* em 60%



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A figura 34 apresenta, para o sensor A, o valor inicial de umidade que corresponde a 87% com tendência de se estabilizar a um valor final de 64% a partir de 3200 segundos. O comportamento ruidoso da leitura pelo sensor continua presente.

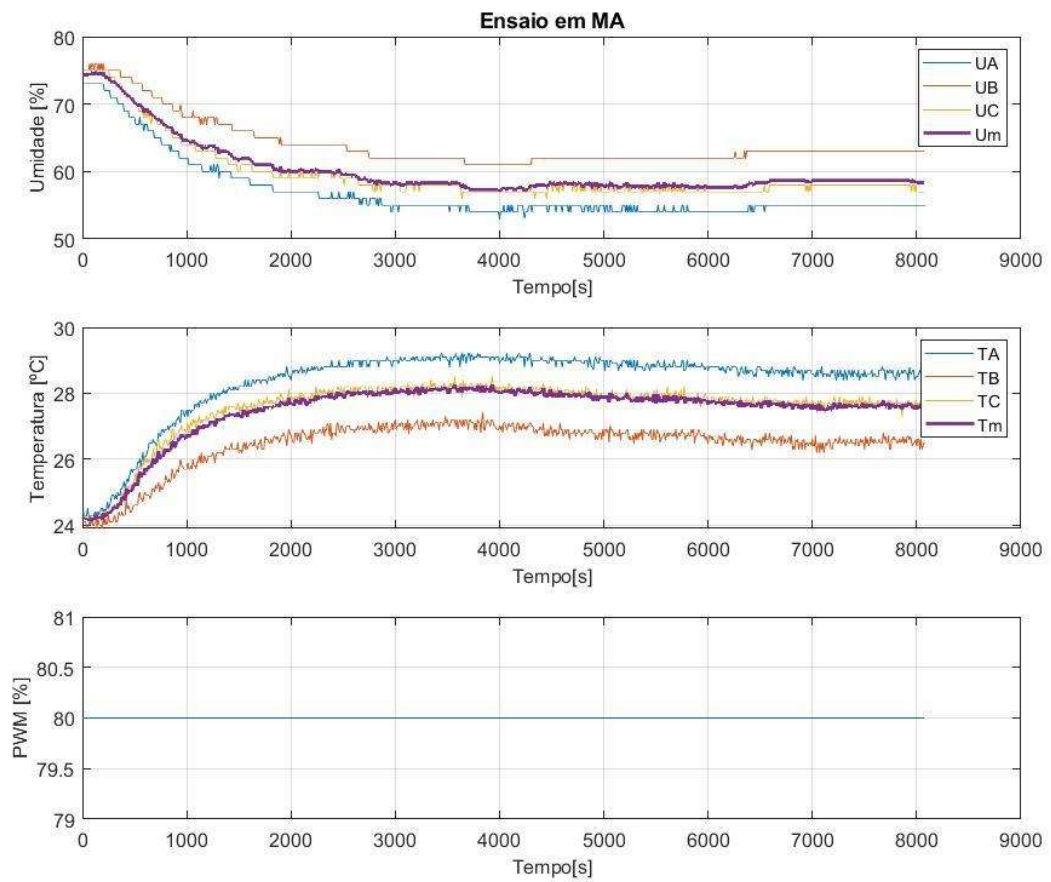
Figura 35 – Ensaio em malha aberta com *duty cycle* em 70%



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A figura 35 apresenta, para o sensor **A**, o valor inicial de umidade que corresponde a 80% com tendência de se estabilizar a um valor final de 59% a partir de 2800 segundos. O comportamento ruidoso da leitura pelo sensor continua presente.

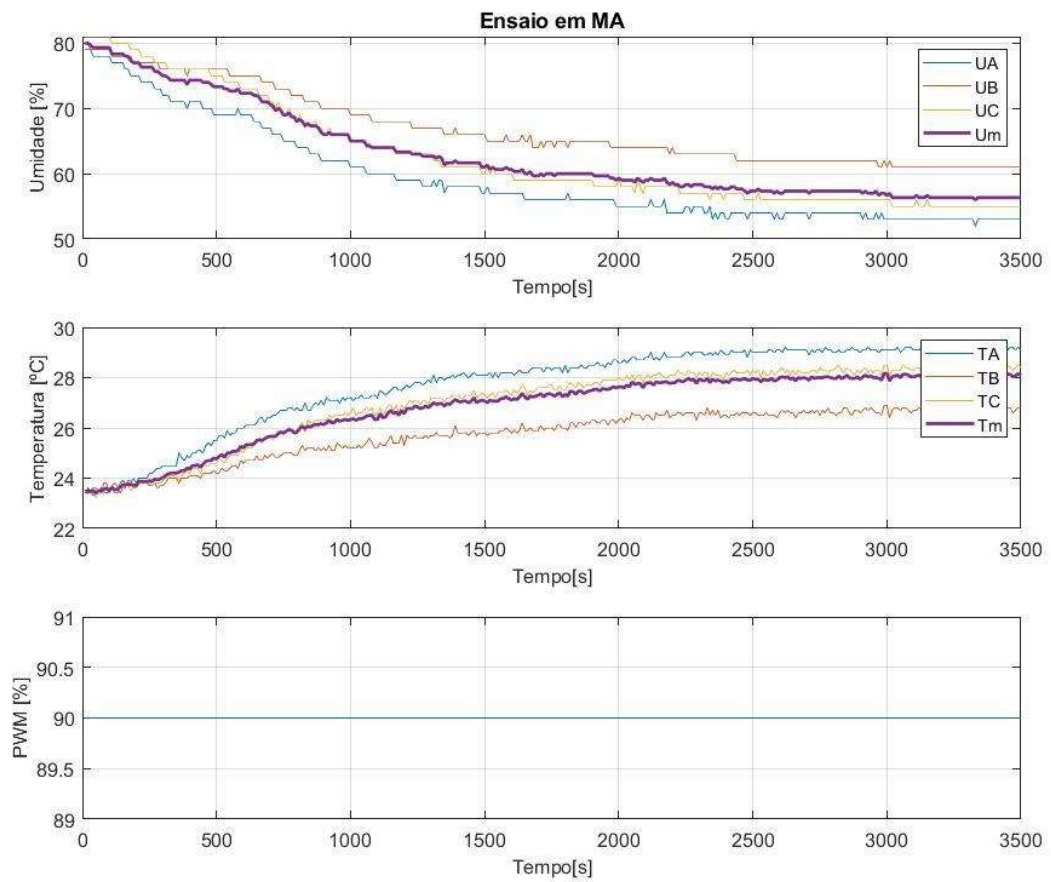
Figura 36 – Ensaio em malha aberta com *duty cycle* em 80



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A figura 36 apresenta, para o sensor **A**, o valor inicial de umidade que corresponde a 73% com tendência de se estabilizar a um valor final de 55% a partir de 4000 segundos. O comportamento ruidoso da leitura pelo sensor continua presente.

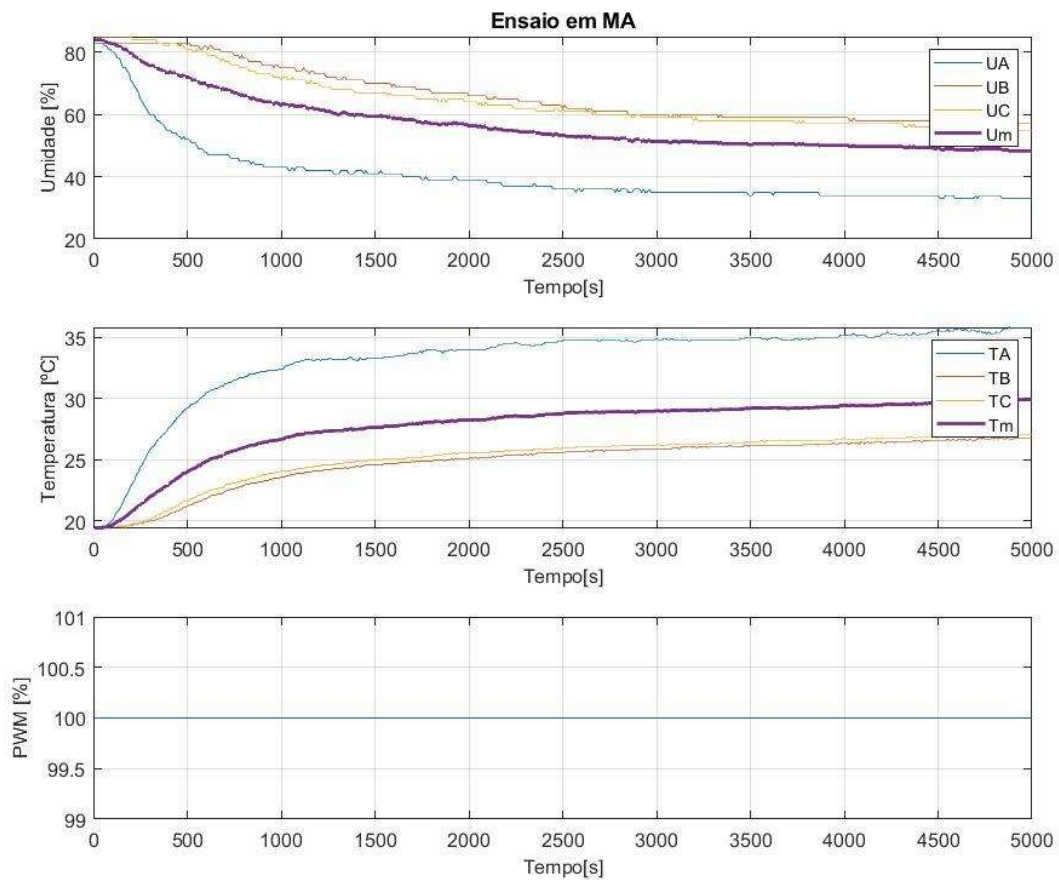
Figura 37 – Ensaio em malha aberta com *duty cycle* em 90%



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A figura 37 apresenta, para o sensor A, o valor inicial de umidade que corresponde a 79% com tendência de se estabilizar a um valor final de 53% a partir de 3000 segundos. O comportamento ruidoso da leitura pelo sensor continua presente.

Figura 38 – Ensaio em malha aberta com *duty cycle* em 100%



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022.

A figura 38 apresenta, para o sensor **A**, o valor inicial de umidade que corresponde a 83% sem tendência de se estabilizar a um valor final de 33% a partir de 4900 segundos. O comportamento ruidoso da leitura pelo sensor continua presente.

Nota-se que para cada ensaio o tempo dedicado durou entre 50 minutos até 3 horas e 20 minutos, porém a coleta de dados respeitou o intervalo de 10 segundos a cada verificação dos sensores, tendo o intuito de diminuir os ruídos do sistema.

4.3 Resultados para o método de Smith

O método para a obtenção da função transferência que representa o processo contou com diversos resultados, de maneira que ao utilizar individualmente cada ensaio em malha aberta pôde-se aplicar o método de Smith e obter uma função transferência respectiva.

As expressões a seguir representam a função transferência obtida para cada ensaio em malha aberta realizado. Destaca-se que o sensor A utilizado para os cálculos, localiza-se ao centro do aparato.

Função transferência para o ensaio em malha aberta com o a potência entregue ao atuador em 10%:

$$G(s) = \frac{-0,7 \cdot e^{-195s}}{315s + 1} \quad (4.1)$$

Função transferência para o ensaio em malha aberta com o a potência entregue ao atuador em 20%:

$$G(s) = \frac{-0,45 \cdot e^{-225s}}{1275s + 1} \quad (4.2)$$

Função transferência para o ensaio em malha aberta com o a potência entregue ao atuador em 30%:

$$G(s) = \frac{-0,2667 \cdot e^{-130s}}{660s + 1} \quad (4.3)$$

Função transferência para o ensaio em malha aberta com o a potência entregue ao atuador em 40%:

$$G(s) = \frac{-0,325 \cdot e^{-130s}}{600s + 1} \quad (4.4)$$

Função transferência para o ensaio em malha aberta com o a potência entregue ao atuador em 50%:

$$G(s) = \frac{-0,34 \cdot e^{-80s}}{660s + 1} \quad (4.5)$$

Função transferência para o ensaio em malha aberta com o a potência entregue ao atuador em 60%:

$$G(s) = \frac{-0,3833 \cdot e^{-165s}}{885s + 1} \quad (4.6)$$

Função transferência para o ensaio em malha aberta com o a potência entregue ao atuador em 70%:

$$G(s) = \frac{-0,3 \cdot e^{-145}}{735s + 1} \quad (4.7)$$

Função transferência para o ensaio em malha aberta com o a potência entregue ao atuador em 80%:

$$G(s) = \frac{-0,2375 \cdot e^{-180}}{960s + 1} \quad (4.8)$$

Função transferência para o ensaio em malha aberta com o a potência entregue ao atuador em 90%:

$$G(s) = \frac{-0,3 \cdot e^{-25}}{1005s + 1} \quad (4.9)$$

Função transferência para o ensaio em malha aberta com o a potência entregue ao atuador em 100%:

$$G(s) = \frac{-0,3 \cdot e^{-25}}{1005s + 1} \quad (4.10)$$

Nota-se, portanto, que algumas funções tiveram valores destoantes das outras, a este fato pode ser explicado pela duração do ensaio que por vezes não foram tão longos e, conseqüentemente, não houve um tempo de acomodação ideal para a aproximação.

De maneira geral os resultados foram satisfatórios, visto que mesmo por serem diferentes, puderam ser analisados para a sintonia do controlador e posteriormente as expressões selecionadas, implementadas.

4.4 Resultados de sintonização do processo de controle

Tendo as funções transferência obtidas para cada ensaio, foi possível calcular os ganhos do controlador para os dois métodos utilizados no projeto: síntese direta e IMC.

A tabela 5 exibe os valores para K_P , K_I e K_D , calculados por meio das equações 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7 e 3.8 para cada ensaio realizado pelo método de síntese direta. A linha da tabela correspondente a 60 %** refere-se a um segundo teste realizado com a potência de 60%.

Tabela 5 – Ganhos obtidos por síntese direta

Potência	K_P	K_I	K_D
10%	-1,5	-0,0047	-146,25
20%	-4,358	-0,0034	-490,38
30%	-7,070	-0,0107	-459,58
40%	-5,594	-0,0093	-363,63
50%	-6,470	-0,0098	-258,82
60%	-5,019	-0,0057	-414,09
70%	-6,282	-0,0085	-455,44
80%	-8,084	-0,0084	-727,57
90%	-9,305	-0,0092	-116,31
100%	-3,558	-0,0081	-133,45
60%**	-3,6	-0,0036	-396,0

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

A tabela 5 exibe os valores para K_P , K_I e K_D , calculados por meio das expressões 3.12, 3.13, 3.14, 3.15, 3.16 e 3.17 para cada ensaio utilizando o método IMC. A linha da tabela correspondente a 60 %** refere-se a um segundo teste realizado com a potência de 60%.

Tabela 6 – Parâmetros obtidos por IMC

Potência	K_P	K_I	K_D
10%	-2,9101	-0,0079	-216,67
20%	-5,7364	-0,0039	-593,02
30%	-9,5383	-0,0124	-564,4
40%	-7,7213	-0,011	-452,83
50%	-7,9186	-0,0103	-298,64
60%	-6,6864	-0,0065	-504,59
70%	-8,4777	-0,0099	-559,45
80%	-10,783	-0,0096	-887,29
90%	-9,7602	-0,0083	-120,5
100%	-4,6599	-0,0092	-160,88
60%**	-5	-0,0043	-495

Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Da mesma forma que os valores obtidos para as funções de transferência, alguns valores destoaram dos outros, remetendo ao mesmo fato do indicado anteriormente, de que o tempo de duração dos ensaios e a acomodação das curvas tiveram influência direta.

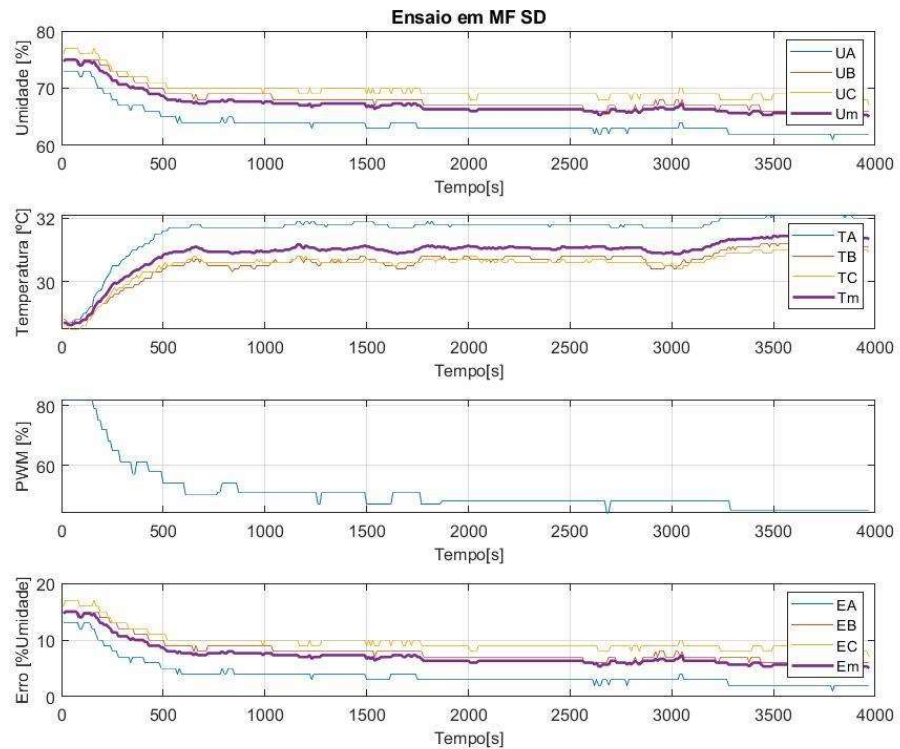
4.5 Avaliação geral do processo em malha fechada

Após a aplicação dos métodos utilizados para a sintonização dos parâmetros de controle, pôde-se fazer ensaios com o sistema em malha fechada. Nem todos os parâmetros obtidos foram utilizados, visto que houve a necessidade de filtrar os testes que durante a análise não foram categorizados como aptos. Levou-se em consideração a duração de ensaio e a existência de acomodação da curva.

Dessa forma, os gráficos a seguir revelam o comportamento do sistema em diferentes circunstâncias sob o uso de métodos e ganhos distintos.

O teste com o uso dos ganhos obtidos por síntese direta pode ser visualizado a seguir (figura 39), onde foi utilizado o ensaio em malha aberta de 60%** de potência.

Figura 39 – Ensaio em malha fechada por síntese direta



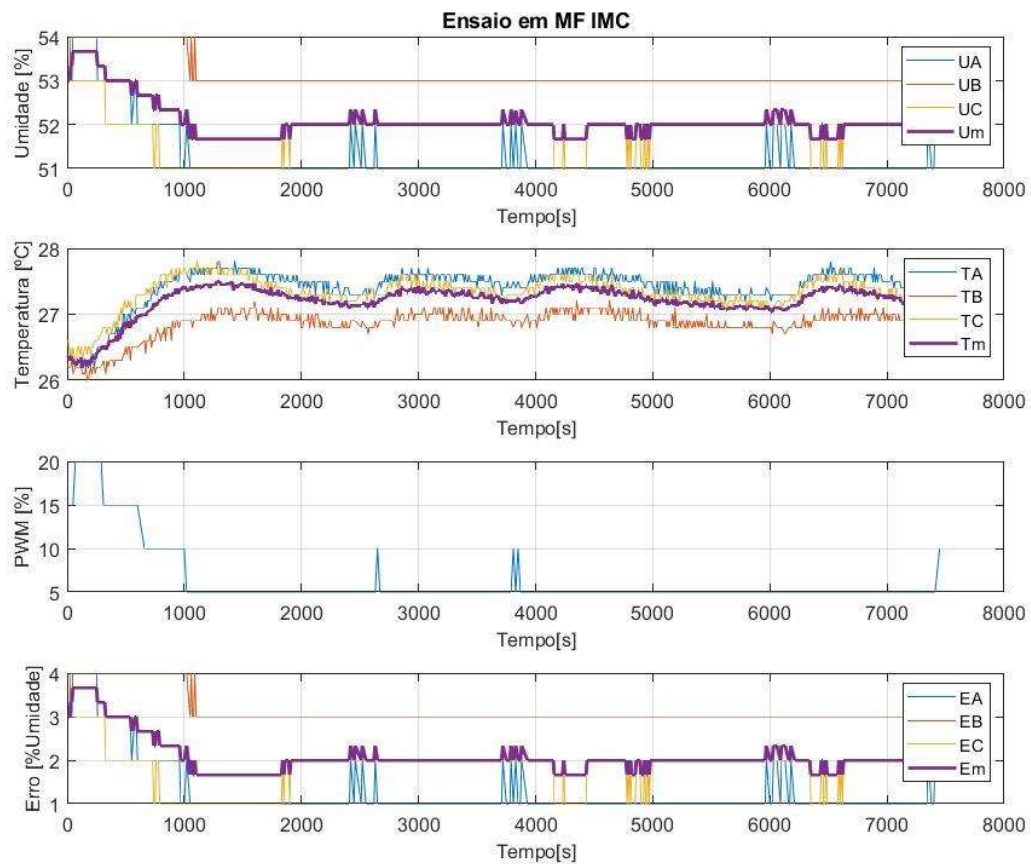
Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Nota-se que o tempo de acomodação da curva é de 50 minutos, sem a presença de sobressinal e com um erro praticamente constante. Considerando o sensor **A** como o responsável pelo *feedback* do sistema, a umidade inicia-se em 73% e se estabiliza em 62%, com o valor de PWM, mais alto, iniciando em 82% e posteriormente se estabilizando em 45%.

O sistema, portanto, se comportou de forma estável, mantendo o valor de umidade próximo ao solicitado (60%), de forma que o erro encontrado é de natureza constante, 2%. O tempo para acomodação foi 3 vezes mais rápido quando comparado em malha aberta.

A figura 40 representa a utilização dos parâmetros encontrados através do método IMC juntamente com função transferência do ensaio em malha aberta de 60% de potência.

Figura 40 – Ensaio em malha fechada IMC



Fonte: Elaborado pelo autor, 2022

Nota-se que o tempo de acomodação da curva é de 17 minutos, sem a presença de sobressinal e com um erro praticamente constante. Considerando o sensor **A** como o responsável pelo *feedback* do sistema, a umidade inicia-se em 54% e se estabiliza em 51%, com o valor de PWM, mais alto, iniciando em 20% e posteriormente se estabilizando em 5%.

O sistema, portanto, se comportou de forma estável, mantendo o valor de umidade próximo ao solicitado, de forma que o erro encontrado é de natureza constante, 1%. O tempo para acomodação foi 3 vezes mais rápido quando comparado em malha aberta.

De maneira geral os resultados foram satisfatórios, permitiram uma análise direta que confirmou a usabilidade do aparelho. Alguns ajustes no uso do controlador por meio do *software* dos sistemas não puderam ser corrigidos a tempo. Conclui-se, portanto, que o objetivo de implementar um controlador por meio de métodos de sintonia foi atingido com êxito.

5 CONCLUSÃO

Por meio dos resultados obtidos com os ensaios em malha fechada fica caracterizado o cumprimento parcial dos objetivos propostos. Houve, de forma satisfatória, a sintonização do controlador PID com o uso de diferentes ganhos, estes resultados fazem com que o projeto conquiste seu objetivo principal e demonstrem a eficiência dos métodos utilizados.

A umidade ideal para a estabilidade do papel em resina *hotmelt* foi atingida com o controle PID, a faixa estabelecida de 45% a 55% pode ser alcançada e mantida, fazendo com que o aparato conquistasse uma usabilidade validada. Vale ressaltar que o controlador PID evitou o gasto energético desnecessário, uma vez que sempre que atingia a faixa determinada não precisou de toda a potência aplicada; inevitavelmente esse fato se relaciona a diminuição nos custos com a energia consumida.

Do ponto de vista estrutural do projeto, notou-se a variação de valores captados pelos sensores, mostrando que falta homogeneidade na transferência de calor, e por consequência na redução de umidade. Isso impossibilita de certa forma constatar os valores reais das grandezas no interior da caixa metálica. Da mesma forma percebe-se que o atuador, por suas limitações físicas, tem dificuldades em reduzir a umidade ao ponto ideal para a eficaz desumidificação de filamentos para impressoras 3D.

Portanto, para otimizações futuras, indica-se o estudo para melhorar a distribuição de calor dentro do aparato bem como a possibilidade de alterar o atuador ou até mesmo dispor em maior quantidade de resistores de potência, com intuito de reduzir a discrepância entre os valores colhidos pelo sensor e também atingir a faixa ideal de umidade para filamentos de impressoras 3D. Sugere-se também a inclusão de elementos da indústria 4.0, como IoT (*Internet of Things*) e banco de dados.

De maneira geral o projeto foi bem-sucedido naquilo que o compete, pôde-se relacionar os conhecimentos gerais enunciados na revisão de literatura com os elementos metodológicos do processo de desenvolvimento, além da conquista da maioria dos objetivos inicialmente idealizados pelo autor. Nota-se também a convergência de assuntos trabalhados ao longo do curso de engenharia mecatrônica durante o processo de elaboração do projeto, culminando na aplicação dos conhecimentos adquiridos.

REFERÊNCIAS

NICOLOTTE, JOÃO HENRIQUE. SINTONIA DO CONTROLADOR DE UMIDADE DE UM DESUMIDIFICADOR DE UMA SALA DE ARQUIVOS. 2017. Monografia (Especialização em Automação Industrial) - UTFPR, [S. l.], 2017. Disponível em: http://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/17121/1/CT_CEAUT_X_2016_06.pdf. Acesso em: 05 set. 2022.

DAVID, Felipe Farage; MARIA, Thiago Leonardo; MOREIRA, Adriel Paz; VASCONCELOS, Luan Marcel Costa; SILVESTRE, Vinicius Aleixo; DAVID, Sayd Farage. DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTUFA MICROCONTROLADA VIA ARDUINO PARA CONTROLE DA TEMPERATURA E UMIDADE DO AR DE MICROSCÓPIOS ÓPTICOS. Brazilian Applied Science Review, [s. l.], 19 jan. 2021. Disponível em: <https://www.brazilianjournals.com/index.php/BASR/article/view/23463/18843>. Acesso em: 15 set. 2022.

INSUMOS PARA ACABAMENTO GRÁFICO. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.versapic.com.br/>. Acesso em: 1 jul. 2022.

DESUMIDIFICADOR DE PAPEL. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.menno.com.br/categoria-produto/escritorio/desumidificador-de-papel/>. Acesso em: 1 set. 2022.

DESUMIDIFICADOR DE FILAMENTO. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://3dlab.com.br/produto/desumidificador-de-filamento-dry-box/>. Acesso em: 1 set. 2022.

GARCIA, Claudio. Controle de processos industriais: Estratégias Convencionais. Editora Blucher, 2017. E-book. ISBN 9788521211860. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521211860/>. Acesso em: 30 nov. 2022.

How correct air humidity solves printing issues. [S. l.], 2020?. Disponível em: <https://airtecsolutions.com/applications/printing#:~:text=Optimal%20air%20humidity&text=Most%20types%20of%20paper%20are,%2C%20ultimately%2C%20your%20print%20job>. Acesso em: 15 nov. 2022.

BESKO, Marcos; BILYK, Claudio; SIEBEN, Priscila Gritten. Aspectos técnicos e nocivos dos principais filamentos usados em impressão 3D. **Gestão, Tecnologia e Inovação**, [S. l.], p. 9-18, 1 dez. 2017. Disponível em: <https://www.opet.com.br/faculdade/revista-engenharias/pdf/n3/Artigo2-n3-Bilyk.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2022.

MOTA, Francisco Rafael Moreira da. PIN22308 – MODELAGEM, SIMULAÇÃO E IDENTIFICAÇÃO DO PROCESSO. PROJETO INTEGRADOR V, [s. l.], p. 1-29, 2021.

TORRES, F.T.P.; MACHADO, P.J.D.O. Introdução à Climatologia. [Digite o Local da Editora]: Cengage Learning Brasil, 2012. 9788522112609. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788522112609/>. Acesso em: 02 Dec 2022

Penedo, S.R. M. Servoacionamento - Arquitetura e Aplicações. [Digite o Local da Editora]: Editora Saraiva, 2014. 9788536520278. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536520278/>. Acesso em: 02 Dec 2022

HUMIDADE: O grande inimigo dos filamentos para a impressão 3D. [S. l.], 21 nov. 2018. Disponível em: https://filament2print.com/pt/blog/45_problemas-humidade-filamentos-3d.html. Acesso em: 15 nov. 2022.