

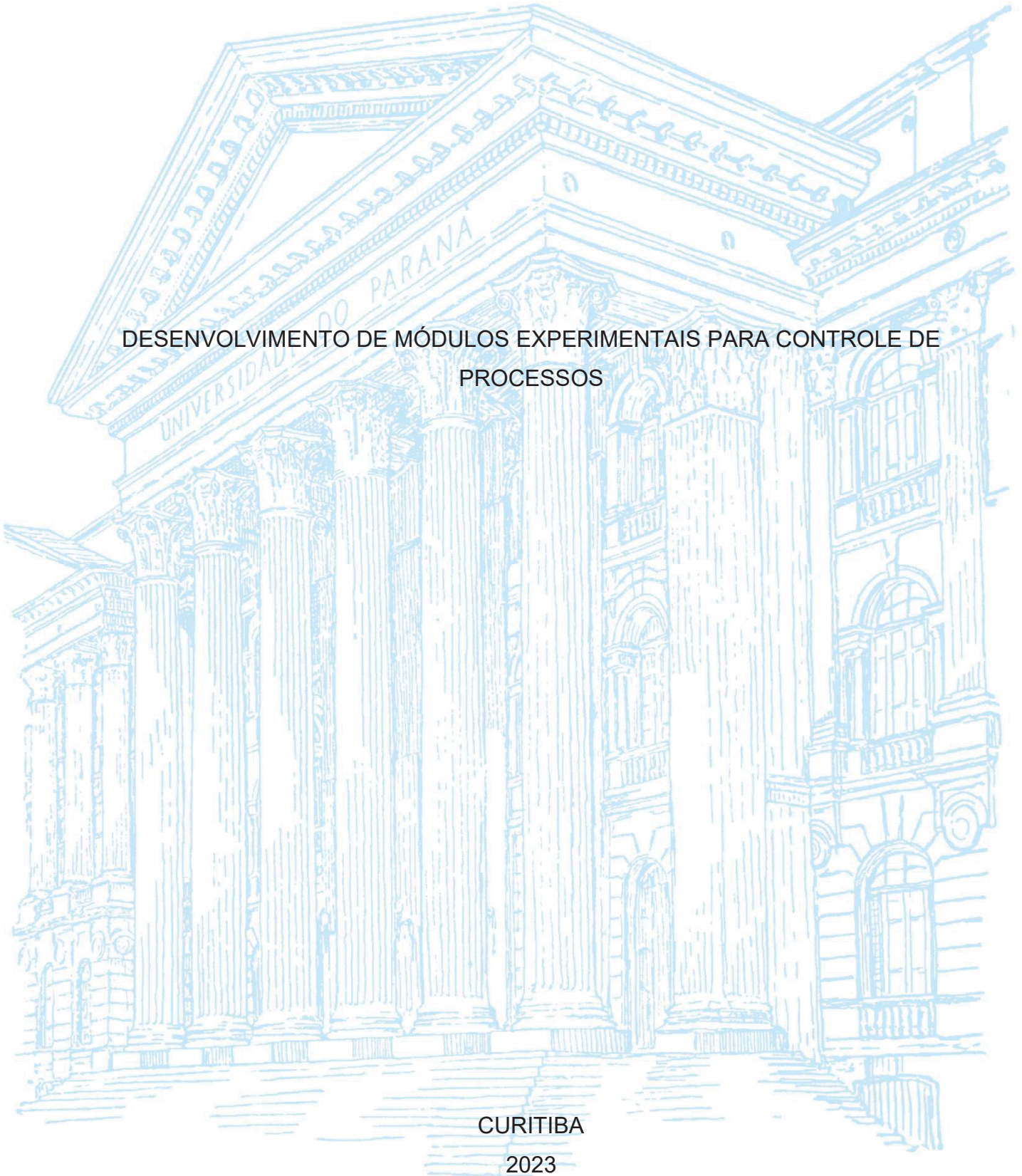
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ALISSON LUAN DAGA

DESENVOLVIMENTO DE MÓDULOS EXPERIMENTAIS PARA CONTROLE DE
PROCESSOS

CURITIBA

2023



ALISSON LUAN DAGA

DESENVOLVIMENTO DE MÓDULOS EXPERIMENTAIS PARA CONTROLE DE
PROCESSOS

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Kaminski Lenzi

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Daga, Alisson Luan
Desenvolvimento de módulos experimentais para controle de processos /
Alisson Luan Daga. – Curitiba, 2023.
1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de
Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Marcelo Kaminski Lenzi

1. Controle de processos químicos. 2. Temperatura. 3. Umidade. I.
Universidade Federal do Paraná. II. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Química. III. Lenzi, Marcelo Kaminski. IV. Título.

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

ATA Nº176

ATA DE SESSÃO PÚBLICA DE DEFESA DE MESTRADO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA

No dia quatorze de setembro de dois mil e vinte e três às 13:30 horas, na sala de Reuniões do DEQ, Prédio da Engenharia Química no Centro Politécnico, foram instaladas as atividades pertinentes ao rito de defesa de dissertação do mestrando **ALISSON LUAN DAGA**, intitulada: **Desenvolvimento de módulos experimentais para controle de processos**, sob orientação do Prof. Dr. MARCELO KAMINSKI LENZI. A Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA QUÍMICA da Universidade Federal do Paraná, foi constituída pelos seguintes Membros: MARCELO KAMINSKI LENZI (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ), CECÍLIA VILANI (PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO), LUÍS RICARDO SHIGUEYUKI KANDA (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ). A presidência iniciou os ritos definidos pelo Colegiado do Programa e, após exarados os pareceres dos membros do comitê examinador e da respectiva contra argumentação, ocorreu a leitura do parecer final da banca examinadora, que decidiu pela APROVAÇÃO. Este resultado deverá ser homologado pelo Colegiado do programa, mediante o atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca dentro dos prazos regimentais definidos pelo programa. A outorga de título de mestre está condicionada ao atendimento de todos os requisitos e prazos determinados no regimento do Programa de Pós-Graduação. Nada mais havendo a tratar a presidência deu por encerrada a sessão, da qual eu, MARCELO KAMINSKI LENZI, lavrei a presente ata, que vai assinada por mim e pelos demais membros da Comissão Examinadora.

CURITIBA, 14 de Setembro de 2023.

Assinatura Eletrônica

14/09/2023 15:33:15.0

MARCELO KAMINSKI LENZI

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

14/09/2023 15:28:26.0

CECÍLIA VILANI

Avaliador Externo (PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO)

Assinatura Eletrônica

14/09/2023 16:50:05.0

LUÍS RICARDO SHIGUEYUKI KANDA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA QUÍMICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ALISSON LUAN DAGA** intitulada: **Desenvolvimento de módulos experimentais para controle de processos**, sob orientação do Prof. Dr. MARCELO KAMINSKI LENZI, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 14 de Setembro de 2023.

Assinatura Eletrônica

14/09/2023 15:33:15.0

MARCELO KAMINSKI LENZI

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

14/09/2023 15:28:26.0

CECÍLIA VILANI

Avaliador Externo (PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO)

Assinatura Eletrônica

14/09/2023 16:50:05.0

LUÍS RICARDO SHIGUEYUKI KANDA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, professor Dr. Marcelo Kaminski Lenzi, pelo incentivo e apoio no desenvolvimento deste trabalho, por manter me no caminho do desenvolvimento pessoal e intelectual através dos estudos, e pelas conversas sobre família.

A minha esposa Josiane, por todo o amor, suporte, compreensão e carinho que tem por mim e nosso filho, e possibilitando que me ausentasse em certos momentos para o foco neste trabalho.

Ao meu filho Anthoni que trouxe um novo sentido e compreensão na minha vida, e na forma de amar.

A minha mãe e irmã pelo apoio incondicional, nas decisões e escolhas da minha vida.

Ao meu amigo Thiago Dalgalo, que mesmo longe ainda agrega muito a este trabalho.

A todos os professores do PPGEQ, que disponibilizaram seu tempo em sala de aula e nos tempos de LABENG.

*“If you knew the magnificence of 3, 6 and 9,
you would have a key to the universe.”*

Nikola Tesla

RESUMO

Este estudo utilizou de um módulo experimental para aplicação dos conhecimentos em controle de processo, utilizando-o no processo de aprendizagem da disciplina de controle. Através do tratamento de variáveis utilizadas nas indústrias, como temperatura, umidade do ar e vazão, é utilizada uma sequência de acionamentos e conexão de equipamentos e instrumentos, para o estudo de sintonia do controle PID em suas diferentes variações. A introdução do controle de processos na Engenharia Química, é deficitária em práticas que possam auxiliar o aluno a ver e aplicar a fundamentação teórica apresentada. A utilização de um módulo experimental, aproxima o aprendizado a equipamentos da indústria, pois se pode utilizar de diversos sensores e componentes vistos somente em grandes plantas, preparando assim, o aluno para seus desafios futuros. O controle dos processos químicos é baseado em malhas de controle que buscam otimizar os resultados e insumos, e estão presentes na grande maioria dos processos industriais. A implementação de um modelo visual e prático para um controle multivariável de temperatura e umidade do ar, traz diferentes níveis de dificuldade e aprendizado. A possibilidade de aplicar os conceitos de estimação de parâmetros e posterior parametrização do controlador pelo aluno, utilizando de um módulo de baixo custo e com alto valor de aprendizagem no estudo de processos em escala piloto e da aplicação das técnicas de controle aplicadas a engenharia química. É proposto um estudo das aplicações das técnicas de controle básicas e multivariável a um sistema em escala piloto, onde pode-se controlar a temperatura e umidade do ar. O módulo experimental é composto de um elemento de aquecimento, um umidificador de ar e ventoinhas tanto para a circulação do ar quente no interior do módulo, e uma para a exaustão do ar interno ao sistema. O controle é aplicado ao sistema de aquecimento, onde com a variação da tensão aplicada altera a potência de aquecimento, velocidade da ventoinha de circulação de ar quente, intensidade de geração de névoa de água e velocidade de ventoinha de exaustão. As variáveis que serão monitoradas são a temperatura do sistema de aquecimento, três sensores que monitoram a temperatura e umidade do ar, instalados em diferentes pontos da caixa e os tacômetros das ventoinhas de exaustão e circulação. O controle de todos os sensores e atuadores é realizado por um controlador digital, da família do Arduino, onde pode-se configurar diferentes parâmetros de operação. Obtendo como resultado um módulo experimental onde foi possível realizar o controle tanto da temperatura e a umidade do ar no interior da caixa.

Palavras-chave: Controle de Processos. Controlador PID. Multivariável. Planta Piloto. Módulo Didático. Módulo Experimental. Temperatura e umidade.

ABSTRACT

This study used an experimental module to apply knowledge in process control, using it in the learning process of the control discipline. Through the treatment of variables used in industries, such as temperature, air humidity and flow, a sequence of activations and connection of equipment and instruments is used to study the tuning of PID control in its different variations. The introduction of process control in Chemical Engineering is lacking in practices that can help the student see and apply the theoretical foundation presented. The use of an experimental module brings learning closer to industry equipment, as it can use various sensors and components seen only in large plants, thus preparing the student for their future challenges. The control of chemical processes is based on control loops that seek to optimize results and inputs, and are present in the vast majority of industrial processes. The implementation of a visual and practical model for multivariable control of air temperature and humidity brings different levels of difficulty and learning. The possibility of applying the concepts of parameter estimation and subsequent parameterization of the controller by the student, using a low-cost module with high learning value in the study of pilot-scale processes and the application of control techniques applied to chemical engineering. A study of the applications of basic and multivariable control techniques to a pilot-scale system is proposed, where air temperature and humidity can be controlled. The experimental module is composed of a heating element, an air humidifier and fans both for circulating hot air inside the module, and one for exhausting air internal to the system. The control is applied to the heating system, where with variation in the applied voltage changes the heating power, hot air circulation fan speed, water mist generation intensity and exhaust fan speed. The variables that will be monitored are the temperature of the heating system, three sensors that monitor the temperature and humidity of the air, installed at different points in the box and the tachometers of the exhaust and circulation fans. Control of all sensors and actuators is carried out by a digital controller, from the Arduino family, where different operating parameters can be configured. Obtaining as a result an experimental module where it was possible to control both the temperature and humidity of the air inside the box.

Keywords: Process control. PID controller. Multivariable. Pilot plant. Didactic Module.

Experimental Module. Temperature and humidity.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	19
FIGURA 2 – DESCRIÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE.....	21
FIGURA 3 – CARACTERÍSTICAS PARA AVALIAÇÃO DE PERFORMANCE DE RESPOSTA DE SISTEMA SUB-AMORTECIDO	23
FIGURA 4 - REPRESENTAÇÃO EM DIAGRAMA DE BLOCOS DA ESTRUTURA DE CONTROLE DE UM SISTEMA TITO COM EMPARELHAMENTO 1- 1/2-2.....	28
FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO EM DIAGRAMA DE BLOCOS DA ESTRUTURA DE CONTROLE DE UM SISTEMA TITO COM EMPARELHAMENTO 1- 2/2-1.....	29
FIGURA 6 - REPRESENTAÇÃO DAS BANDAS DE GERSHGORIN DE UMA MALHA DE CONTROLE GENÉRICA EM UM SISTEMA MIMO	30
FIGURA 7 – PLANTA E ELEMENTOS ENVOLVIDOS	33
FIGURA 8 – MÓDULO EXPERIMENTAL UTILIZADO NO TRABALHO	34
FIGURA 9 – O SISTEMA DE AQUECIMENTO E INDICAÇÃO DOS COMPONENTES	35
FIGURA 10 – UMIDIFICADOR DE AR COM CONTROLE DE INTENSIDADE E PARTE INTERNA	37
FIGURA 11 – SAÍDA LINEAR DE TENSÃO X HUMIDADE	38
FIGURA 12 – COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA – SISTEMA DE AQUECIMENTO	41
FIGURA 13 – COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA - AQUECIMENTO.....	42
FIGURA 14 – COMPORTAMENTO DA UMIDADE - AQUECIMENTO	42
FIGURA 15 – COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA - RESFRIAMENTO.....	43
FIGURA 16 – COMPORTAMENTO DA UMIDADE – RESFRIAMENTO	43
FIGURA 17 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO TESTE COM BASE NA RESPOSTA AO DEGRAU.....	46
FIGURA 18 - REPRESENTAÇÃO EM DIAGRAMA DE BLOCOS DO TESTE DO PONTO CRÍTICO.....	47
FIGURA 19 – CURVA DE REAÇÃO	49
FIGURA 20 - RESPOSTA AO DEGRAU DO PROCESSO TEMPERATURA- TEMPERATURA.....	60

FIGURA 21 - RESPOSTA DO MODELO FOPDT OBTIDO DO PROCESSO TEMPERATURA-TEMPERATURA.....	61
FIGURA 22 - RESPOSTA AO DEGRAU DO PROCESSO TEMPERATURA- UMIDADE.....	61
FIGURA 23 - RESPOSTA DO MODELO FOPDT OBTIDO DO PROCESSO TEMPERATURA-UMIDADE	62
FIGURA 24 - RESPOSTA AO DEGRAU DO PROCESSO UMIDADE- TEMPERATURA.....	62
FIGURA 25 - RESPOSTA DO MODELO FOPDT OBTIDO DO PROCESSO UMIDADE-TEMPERATURA	63
FIGURA 26 - RESPOSTA AO DEGRAU DO PROCESSO UMIDADE-UMIDADE	64
FIGURA 27 - RESPOSTA DO MODELO FOPDT OBTIDO DO PROCESSO UMIDADE-UMIDADE	64
FIGURA 28 - RESPOSTA DA TEMPERATURA AO CONTROLADOR IMC NA MALHA TEMPERATURA, PARA UM $\Delta T = 1$ [°C].....	68
FIGURA 29 - RESPOSTA DA UMIDADE AO CONTROLADOR IMC NA MALHA TEMPERATURA, PARA UM $\Delta T = 1$ [°C].....	68
FIGURA 30 - RESPOSTA DA UMIDADE AO CONTROLADOR IMC NA MALHA UMIDADE, PARA UM $\Delta H = 2$ [%].....	69
FIGURA 31 - RESPOSTA DA TEMPERATURA AO CONTROLADOR IMC NA MALHA UMIDADE, PARA UM $\Delta H = 2$ [%].....	69
FIGURA 28 - TESTE 01 - RESPOSTA TEMPERATURA	76
FIGURA 29 - TESTE 01 - RESPOSTA UMIDADE	77
FIGURA 30 - TESTE 02 - RESPOSTA TEMPERATURA	77
FIGURA 31 - TESTE 02 - RESPOSTA UMIDADE	77
FIGURA 32 - TESTE 03 - RESPOSTA TEMPERATURA	78
FIGURA 33 - TESTE 03 - RESPOSTA UMIDADE	78
FIGURA 34 - TESTE 04 - RESPOSTA TEMPERATURA	79
FIGURA 35 - TESTE 04 - RESPOSTA UMIDADE (LINEAR).....	79
FIGURA 36 - TESTE 04 - RESPOSTA UMIDADE (EXPONENCIAL)	80
FIGURA 37 - TESTE 05 - RESPOSTA TEMPERATURA	80
FIGURA 38 - TESTE 05 - RESPOSTA UMIDADE	81
FIGURA 39 - TESTE 06 - RESPOSTA TEMPERATURA	81
FIGURA 40 - TESTE 06 - RESPOSTA UMIDADE	82

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 – MÉTODO DE ZIEGLER E NICHOLS PARA CURVA DE REAÇÃO ...	49
TABELA 02 – MÉTODO DE COHEN E COON PARA CURVA DE REAÇÃO	50
TABELA 3 - REGRA DE SINTONIA PARA O MÉTODO IMC PRIMEIRA ORDEM COM ATRASO	57
TABELA 4 – PARÂMETROS PELO MÉTODO ITAE.	58
TABELA 5 - PARÂMETROS DO MODELO FOPDT OBTIDOS PARA O PROCESSO $G_{p11}(S)$ (<i>TEMPERATURA – TEMPERATURA</i>) PELA RESPOSTA AO DEGRAU E ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS PELO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO DE NELDER-MEAD	65
TABELA 6 - PARÂMETROS DO MODELO FOPDT OBTIDOS PARA O PROCESSO $G_{p12}(S)$ (<i>TEMPERATURA – UMIDADE</i>) PELA RESPOSTA AO DEGRAU E ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS PELO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO DE NELDER- MEAD	65
TABELA 7 - PARÂMETROS DO MODELO FOPDT OBTIDOS PARA O PROCESSO $G_{p21}(S)$ (<i>UMIDADE – TEMPERATURA</i>) PELA RESPOSTA AO DEGRAU E ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS PELO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO DE NELDER- MEAD	65
TABELA 8 - PARÂMETROS DO MODELO FOPDT OBTIDOS PARA O PROCESSO $G_{p22}(S)$ (<i>UMIDADE – UMIDADE</i>) PELA RESPOSTA AO DEGRAU E ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS PELO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO DE NELDER- MEAD	66
TABELA 9 - PARÂMETROS DOS CONTROLADORES PID DESCENTRALIZADOS E ÍNDICES IAE E ISE OBTIDOS (SEM DESACOPLAMENTO)	67

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

A	- Altura
AC	- <i>Alternating Current</i> (Corrente Alternada)
ADC	- <i>Analogue-to-Digital Converter</i> (Conversor Analógico-Digital)
C	- Comprimento
CV	- <i>Controlled Variable</i> (Variável Controlada)
DV	- <i>Disturbance Variable</i> (Variável de Perturbação)
DX A/C	- <i>Direct Expansion Air Conditioning</i> (Ar-Condicionado de Expansão Direta)
FOPDT	- <i>First Order Plus Dead Time</i> (Primeira Ordem com Tempo Morto)
HVAC	- <i>Heating, Ventilating and Air Conditionig</i> (Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado)
Hz	- Hertz
IAE	- <i>Integral Absolute Error</i> (Integral do Erro Absoluto)
IMC	- <i>Internal Model Control</i> (Controle pelo Modelo Interno)
ISE	- <i>Internal Square Error</i> (Integral do Erro Quadrático)
ITAE	- <i>Integral Time Absolute Error</i> (Integral do Erro Absoluto Ponderado no Tempo)
L	- Largura
LESF	- Laboratório de Engenharia de Sistemas Fracionários
LQG	- <i>Linear-Quadratic-Gaussian</i> (Gaussiana Linear Quadrática)
LSE	- <i>Least Square Estimation</i> (Estimativa de Mínimos Quadrados)

MIMO	- <i>Multiple-Input-Multiple-Output</i> (Múltiplas-Entradas-Múltiplas-Saídas)
MV	- <i>Manipulated Variable</i> (Variável Manipulada)
NTC	- <i>Negative Temperature Coefficient</i> (Coeficiente Negativo de Temperatura)
P	- Proporcional
PID	- Proporcional Integral Derivativo
PPGEQ	- Programa de Pós-graduação em Engenharia Química
PWM	- <i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
RMS	- <i>Root Mean Square</i> (Raiz Quadrada da Média)
RGA	- <i>Relative Gain Array</i> (Matriz de Ganho Relativo)
RNGA	- <i>Relative Normalized Gain Array</i> (Matriz de Ganho Normalizado Relativo)
RP	- Regime Permanente
SISO	- <i>Single-Input-Single-Output</i> (Entrada-Única-Saída-Única)
SOPDT	- <i>Second Order Plus Dead Time</i> (Segunda Ordem Mais Tempo Morto)
TITO	- <i>Two Inputs Two Outputs</i> (Duas Entradas Duas Saídas)
TRIAC	- <i>Triode for Alternating Current</i> (Tríodo de Corrente Alternada)
UFPR	- Universidade Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

t_r - Tempo de subida

t_p - Tempo do primeiro pico

t_s - Tempo de assentamento

β - Beta

θ - Tempo de retardo

τ - Constante de tempo

(a/b) - *Overshoot*

p - Período da Oscilação

K_{ij} - Ganho do sistema (*adimensional*)

L_{ij} - Atraso de transporte (*segundos*)

τ_{ij} - Constante de tempo do sistema

$G(j\omega)$ - Planta

$N(a)$ - Função descritiva do relé

d - Amplitude do relé

a - Amplitude da oscilação

ω_u - Frequência crítica da planta

$\epsilon(t)$ - Erro de predição

$\varphi(t)$ - Vetor de regressores

U - Coeficiente padrão

\hat{y} - Valor estimado

y - Valor medido

N - Número de medições

U_b - Coeficiente de Desvio

$\bar{\hat{y}}$ - Valor médio dos valores estimados

\bar{y} - Valor médio dos valores medidos

U_v - Coeficiente de variância

$\sigma_{\hat{y}}$ - Desvio padrão para os valores estimados

σ_y - Desvio padrão para os valores medidos

U_c - Coeficiente de covariância

ρ - Coeficiente de correlação

λ_{ij} - Ganho relativo

y_i – Variável do processo

u_j – Variável manipulada

k - Quociente de interação

$G_{p_{ij}}(j0)$ - Ganho de estado estacionário

$\tau_{ar,ij}$ - Tempo de residência médio

K_{C_i} - Ganho proporcional do controlador descentralizado

T_{I_i} - Constante de tempo integral do controlador

T_{D_i} - Constante de tempo derivativa do controlador

$C_{IMC_i}(s)$ - Controlador IMC da malha

$G_{p_{ii}}(s)$ - Processo que compõe a matriz da planta

$e(t)$ - Erro do sistema

T - Tempo finito

L_{ij} - Tempo de retardo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 JUSTIFICATIVA	16
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 Objetivo geral	18
1.2.2 Objetivos específicos.....	18
1.3 METODOLOGIA.....	19
2 REVISÃO DE LITERATURA	21
2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	21
2.1.1 Fundamentos de Sistemas de controle	21
2.1.1.1 Estratégia de controle.....	23
2.1.1.2 Algoritmo de controle.....	24
2.1.1.3 Instrumentação	25
2.2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE.....	25
2.2.1 Sistemas de controle Multivariável	25
2.2.1.1 Controle descentralizado	27
2.2.1.2 Estabilidade em malha fechada.....	29
2.2.2 Sistemas MIMO Temperatura e Umidade	30
2.3 CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO	31
3 MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1 MÓDULO EXPERIMENTAL	33
3.1.1 Equipamentos do módulo.....	35
3.1.1.1 Resistência de aquecimento.....	35
3.1.1.2 Gerador de névoa.....	36
3.1.1.3 Ventiladores.....	37
3.1.2 Sensores do módulo.....	37
3.1.2.1 AM1011a	37
3.1.2.2 DS18B20	38
3.1.2.3 HDC1080.....	38
3.1.2.4 ADS1115	39
3.1.2.5 LM 35.....	39
3.1.2.6 SERVO MOTOR.....	39
3.2 ESTRUTURA DE CONTROLE PROPOSTA.....	39

3.2.1 Classificação das variáveis	39
3.2.2 Caracterização das restrições de controle	40
4 MODELAGEM DO SISTEMA E ANÁLISE DE ACOPLAMENTO	45
4.1 OBTENÇÃO DE MODELOS DO SISTEMA MULTIVARIÁVEL	45
4.1.1 Testes realizados	45
4.1.1.1 Modelo baseado na resposta ao degrau	46
4.1.1.2 Modelo baseado no ponto crítico.....	46
4.1.2 Identificação de parâmetros dos modelos	47
4.1.2.1 Método da curva de reação do sistema.....	48
4.1.2.2 Método dos mínimos quadrados	51
4.1.2.3 Estimação paramétrica	52
4.1.3 Validação dos modelos	52
4.2 CRITÉRIOS DE EMPARELHAMENTO DE MALHA.....	53
4.2.1 Matriz RGA.....	54
4.2.2 Matriz RNGA	55
5 PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR.....	56
5.1 PROJETO DE CONTROLADORES E DE DESEMPENHO	56
5.1.1 Técnicas de sintonia multivariável sem desacoplamento	56
5.1.1.1 Método IMC Generalizado.....	56
5.1.1.2 Método baseado em ITAE-s	57
5.1.2 Índices de desempenho	58
5.1.2.1 Índice IAE	58
5.1.2.2 Índice ISE	59
5.2 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE	59
6 RESULTADO E DISCUSSÃO	60
6.1 IDENTIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS FOPDT	60
6.2 CÁLCULO DAS MATRIZES RGA, RNGA	66
6.3 PROJETO E ANÁLISE DOS CONTROLADORES.....	67
6.4 SIMULAÇÃO DO SISTEMA APÓS SINTONIA DOS CONTROLADORES	67
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
7.1 CONCLUSÕES	71
7.2 TRABALHOS FUTUROS	71
REFERÊNCIAS.....	73

APÊNDICE A – MODELAGEM DOS PROCESSOS FODPT DA MATRIZ DA PLANTA.....	76
--	-----------

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de controle com realimentação, são mais antigos que a humanidade, começando com os sistemas de controle biológico formado nos primeiros habitantes do nosso planeta. Os relatos de controles com realimentação, datam da Grécia, para contagem do tempo. Através de um sistema de tanques e boias, para que o nível do tanque que pingava se mantivesse constante, através de uma boia como válvula, assim conseguia-se informar o tempo decorrido (NISE, 2012).

O primeiro trabalho significativo de controle automático, foi o regulador centrífugo para o controle de velocidade de máquinas a vapor, construído por James Watt, no século XVIII. Em 1922, no controle automático de embarcações, Minorsky demonstrou como a estabilidade poderia ser determinada a partir de equações diferenciais. Em 1932, Nyquist trabalhou na determinação da estabilidade de sistemas em malha fechadas com base em entradas conhecidas em sistemas de malha aberta. Na década de 1940, métodos de resposta em frequência tornaram possível aos engenheiros projetar sistemas de controle em malha fechada, utilizando PID em sistemas de controle de pressão, temperatura etc. Entre 1960 e 1990, o controle ótimo, adaptativo e os desenvolvimentos na teoria de controle moderno voltaram-se para o controle robusto (OGATA, 2011).

A técnica de otimização de sistemas operacionais utilizando-se de controladores automatizados torna-se uma ferramenta importante no cenário industrial. Uns dos principais desafios da indústria contempla o aumento da eficiência energética. Isso deve-se ao elevado custo da energia e a dificuldade em conservá-la durante o processo, seja por baixo rendimento dos equipamentos, falta de isolamento adequado, falha de válvulas ou mal dimensionamento do projeto. De tal modo, o aumento da eficiência energética é importantíssimo para o desenvolvimento sustentável, além de estimular a competitividade e acrescentar ganhos econômicos, sociais e ambientais (CRIPA, 2020).

1.1 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento de modelos matemáticos para entender, prever e controlar o meio sempre foi um desafio. Para tanto, a comunidade científica desenvolve e utiliza diversos modelos matemáticos para simular situações reais em linguagens

computacionais. Esses modelos matemáticos podem ser obtidos a partir das leis da física, mas o custo desse tipo de avaliação é muito alto, pois envolve tempo e dificuldade de se obter um modelo correto e, portanto, resultados válidos.

Para o ambiente acadêmico a utilização de módulos experimentais torna-se um sistema didático que, caso se prove eficaz, pode ser utilizado em aulas práticas como uma plataforma de testes e demonstração de técnicas de controle de processos que são simuladas através dele. O módulo experimental proposto, é caracterizado como o objeto de aprendizagem, segundo (BRAGA, 2014), podem ser considerados objetos de aprendizagem quaisquer recursos como imagens, vídeos, softwares e simulações. O módulo didático é constituído de um microcontrolador Arduino, que faz o gerenciamento dos módulos responsáveis pela aquisição dos dados de saída dos sensores, ou seja, a leitura do valor de tensão fornecido por um circuito elétrico, que é enviado a um computador que executa uma plataforma desenvolvida para a apresentação dos valores numéricos e em forma de gráficos as variáveis físicas do projeto, em tempo real.

Alguns artigos e pesquisas já foram produzidos em relação à utilização de módulos didáticos utilizando o Arduino junto com plataformas computacionais, dentre elas podemos citar (NOVICKI, 2019), que desenvolveu um módulo para identificação de malha aberta e malha fechada para controle de um sistema térmico, baseado em Arduino Uno, sendo uma alternativa de baixo custo. (QUADROS, 2019) trabalhou em um módulo didático experimental para identificação e controle de sistema térmico multivariável, onde foi utilizado o Arduino Due e o MATLAB foi usado para o controle e visualização do processo.

Preende-se ao término desta pesquisa, que todo o conhecimento adquirido e o módulo experimental montado e testado de forma efetiva par o controle multivariável da temperatura e umidade, possa ser utilizada para a implementação de um sistema didático no laboratório LESF – Laboratório de Engenharia de Sistemas Fracionários – do PPGEQ/UFPR – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Paraná. Além disso, este trabalho resultará em mais um equipamento que pode servir de apoio didático para as aulas da disciplina de Controle de Processo, e no desenvolvimento de pesquisas que demandam tais instrumentos.

Então se pode chegar à conclusão de que é possível implementar um sistema didático que possa ser uma ferramenta eficaz no aprendizado das teorias aplicadas

ao controle de temperatura e umidade, auxiliando assim, o entendimento sobre as técnicas de controle e sintonia.

1.2 OBJETIVOS

Aproximar acadêmicos de engenharia química dos conceitos práticos de controle de processos, com a interação em um módulo experimental, na identificação de parâmetros e parametrização de controladores. O controle se dará sobre as seguintes grandezas, temperatura e umidade do ar.

1.2.1 Objetivo geral

Construção de módulo experimental, para controle de temperatura e umidade, utilizando um controlador analógico, com monitoramento em tempo real das variáveis controladas e manipuladas, para aulas práticas de identificação de parâmetros e aplicações de conceitos de controladores PID, na disciplina de controle para a graduação em engenharia química.

A utilização do módulo experimental para controle de processos buscará a materialização da espiral do conhecimento, permitindo a interação do aluno com os conhecimentos internalizado e prático, indispensável para a área de controle de processos.

1.2.2 Objetivos específicos

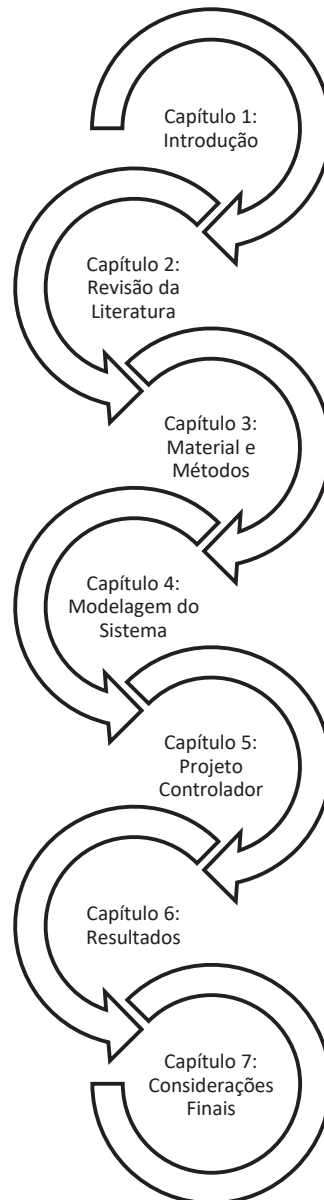
Os objetivos específicos são:

- Montagem de um aparato experimental para monitoramento e controle da temperatura e umidade do ar;
- Modelar, identificar e validar o sistema multivariável que caracteriza o módulo experimental;
- Selecionar as principais estratégias de controle e técnicas de sintonia existentes;
- Implementar a estrutura de controle proposta para o módulo experimental.

1.3 METODOLOGIA

Esta tese será organizada na estrutura de trabalho como representado no organograma da FIGURA 1.

FIGURA 1 – ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO



FONTE: O autor (2023).

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, com conceitos importantes para uma boa compreensão dos sistemas SISO, MIMO e das lógicas de controles.

O Capítulo 3 descreve os materiais e métodos para o desenvolvimento do módulo experimental e a composição da lógica de monitoramento e controle.

O Capítulo 4 apresenta a modelagem do sistema e análise do acoplamento entre as plantas.

O Capítulo 5 apresenta o projeto e implantação do controlador do módulo experimental.

O Capítulo 6 apresenta os resultados e discussões a respeito de todo o volume de informação tratado.

Por último o Capítulo 7 aborda a conclusão do trabalho e as sugestões para futuros trabalhos.

Este trabalho está vinculado à linha de pesquisa de modelagem, simulação, otimização e controle de processos químicos do PPGEQ/UFPR – Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Paraná.

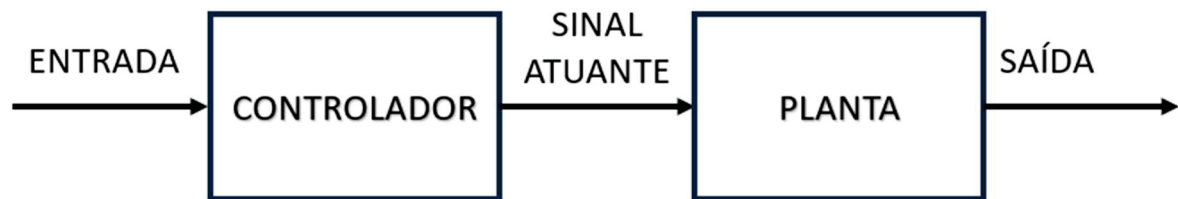
2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1.1 Fundamentos de Sistemas de controle

É um sistema composto por subsistemas e processos, que tem por fim o controle das saídas de um processo (planta). Um sistema de controle apresenta uma saída ou resposta em função de uma entrada ou um estímulo (NISE, 2012).

FIGURA 2 – DESCRIÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE.



FONTE: Própria, traduzido e baseado em (NISE, 2012).

Como observado na FIGURA 2, um sistema de controle fornece uma saída para uma entrada. A entrada pode ser entendida como uma resposta desejada e a saída como uma resposta real (NISE, 2012).

Ainda conforme (NISE, 2012).

[...] Utilizando os sistemas de controle, podemos movimentar grandes equipamentos com uma precisão que, de outra forma, não seria possível. Podemos apontar enormes antenas em direção às maiores distâncias do universo para capturar sinais de rádio de baixa intensidade, o que manualmente seria impossível.

Assim, pode se ter a dimensão e as inúmeras vantagens da utilização de sistemas de controle e sistemas automatizados em meio industrial, pois pode ser realizado uma extensa variedade de tarefas que não podem ser realizadas sem o auxílio destes recursos.

Para garantir a estabilidade de um processo, podemos separar em três grupos de variáveis (SEBORG; THOMAS F. EDGAR, 2011).

1. Variáveis Controladas (CV): são as variáveis do processo que podem ser controladas, e mantidas em um valor de referência desejado pelo usuário. Dá-se a este valor o nome de *set-point*.
2. Variáveis Manipuladas (MV): são as variáveis do processo que devem ser manipuladas/alteradas, para manter os valores definidos nas CVs em seu *set-point*.
3. Variáveis de Perturbação (DV): são as variáveis que interferem nos valores das CVs, mas que não é possível ser manipuladas. Estas variáveis causam oscilações no sistema estacionário, como por exemplo, alterações na temperatura ambiente e variações da rede de energia. Estas variáveis, em alguns casos, são possíveis de medir, mas em outros acabam incorporadas na medição das CVs, e se comportam como ruído de medição.

A estabilidade de um processo automático, é garantida em duas possíveis configurações (ALBERTOS; SALA, 2004):

1. Malha aberta: não há retroalimentação vinda do processo, e as MVs são alteradas conforme informações fornecidas pelo operador, como por exemplo a temperatura de um chuveiro, onde a abertura da válvula manualmente controla a temperatura que sai a água;
2. Malha fechada: o controlador que determina o valor das MVs baseado nas informações fornecidas das saídas das CVs, ajustando todo o processo para manter-se no estado estacionário desejado, e ajustado pelo operador. Como exemplo, a abertura da válvula do chuveiro seria uma função de um atuador automático, baseado no erro da medida da temperatura real e o valor e *set-point* estabelecido.

Um processo em malha fechada, pode assumir diferentes formas de respostas, para uma alteração de *set-point*, que é conhecido como resposta amortecida, sub-amortecida e criticamente amortecida.

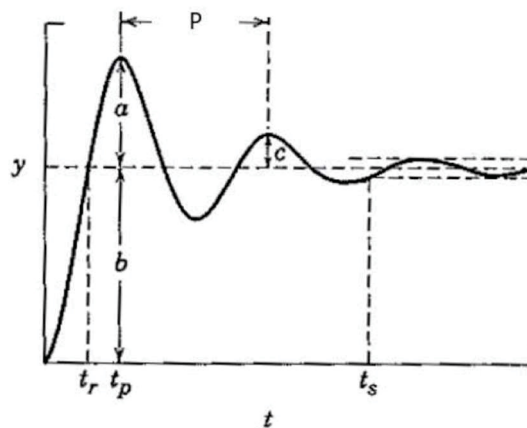
Para processo com uma resposta sub-amortecida, existe definições importantes, para a avaliação da eficiência do controlador:

1. Tempo de subida (t_r): tempo que a saída do processo, atinge pela primeira vez o valor do *setpoint* definido;
2. Tempo do primeiro pico (t_p): tempo para a saída do processo atingir o máximo valor;

3. Tempo de assentamento (t_s): tempo necessário para que a saída do processo se mantenha em uma faixa de $\pm 5\%$ do estado estacionário.
4. *Overshoot* (a/b): razão entre a amplitude da saída acima do valor do novo estado estacionário e o valor abaixo do novo estado estacionário;
5. Período da oscilação (p): é o tempo entre duas cristas consecutivas no valor de saída do processo.

Podemos visualizar na FIGURA 3, como é feito o levantamento das variáveis.

FIGURA 3 – CARACTERÍSTICAS PARA AVALIAÇÃO DE PERFORMANCE DE RESPOSTA DE SISTEMA SUB-AMORTECIDO



FONTE: (SEBORG; THOMAS F. EDGAR, 2011).

O controle de processos em malha fechada pode ser separado em três etapas principais: estratégia de controle; algoritmos de controle e instrumentação.

2.1.1.1 Estratégia de controle

Para a implementação de uma malha de controle, deve-se definir os CVs e MVs, e após isso implementa-se a estratégia de controle, pois é a melhor forma de conectar todo o sistema que envolve as variáveis do processo, que pode ser as controladas, manipuladas ou perturbações.

O objetivo da malha de controle é manter as variáveis controladas em seus valores definidos, alterando as variáveis manipuladas. Para a malha executar essa função, existe dois grupos de estratégias de controle: *feedback* e *feedforward*. Outras, como por exemplo cascata, adaptativo, supervisorio, distribuído, inteligência artificial e desacoplamento, são variações destes dois grandes grupos (MOLLENKAMP, 1988).

A estratégia *feedback* é conhecida desde o século III D.C., na área de controle de processos, ela era utilizada no controle de reservatórios, para se obter níveis

constantes, e na vazão de óleo para lâmpadas (EDGAR, 1998). Na malha de controle *feedback*, a variável controlada é medida, comparada com seu valor de *setpoint* e a diferença entre estes dois valores, torna-se a entrada do controlador, que é onde o algoritmo irá atuar, para minimizar o erro. No caso em que a diferença entre o *setpoint* e o valor medido seja zero, o processo está atuando na condição devida e não é necessária uma atuação por parte do controlador. A desvantagem desta estratégia de controle, é o impacto que têm às perturbações desconhecidas, modificando a variável controlada significativamente, e retirando o sistema de uma região controlável (SEBORG; THOMAS F. EDGAR, 2011).

Na malha de controle *feedforward*, apenas as perturbações são medidas, e o controlador toma a ação, antes mesmo da variável controlada desviar do *setpoint*. O uso de apenas uma malha *feedforward* possui desvantagens marcantes, pois todas as perturbações devem ser medidas, e para aquelas não medidas nenhuma ação é tomada. Comumente é encontrado em processos industriais, a utilização de ambas as estratégias de controle em conjunto, surgindo assim uma malha *feedback-feedforward*, onde a variável controlada e as perturbações são medidas, diminuindo assim o tempo de resposta sobre perturbações externas (SEBORG; THOMAS F. EDGAR, 2011).

2.1.1.2 Algoritmo de controle

O algoritmo de controle, faz as comparações entre os valores medidos das variáveis controladas com o *set-point* e toma a ação no processo, quando há um erro, ou uma diferença entre os dois valores. O controlador PID tem funções distintas, como descrito em (SEBORG; THOMAS F. EDGAR, 2011):

1. Proporcional: em uma malha *feedback*, este termo é responsável em reduzir o sinal de erro para zero. Sua desvantagem em se utilizar apenas este método, é a presença de um *offset*, erro presente no estado estacionário, intrínseco aos controladores P;
2. Integral: a saída do controlador é dependente da integral do erro em função do tempo. Este termo é o responsável por eliminar o *offset*, pois ao integrar o erro no tempo, o valor é acumulado, alterando assim a ação de controle. Sua desvantagem, é o fenômeno conhecido como *reset-windup*, que é resultado em grandes alterações de *set-point*,

como o erro é muito grande, ocorre o acúmulo de ação de controle, podendo gerar *overshoot* elevados;

3. Derivativo: tem o objetivo de antecipar a ação do controlador, tomando a derivada do erro em função do tempo.

A equação de um controlador PID, em função do tempo é dada pela Equação

1:

$$u(t) = \bar{u} + K_c \left[e(t) + K_I \int_0^t e(t^*) dt^* + K_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad \text{EQUAÇÃO (1)}$$

2.1.1.3 Instrumentação

A instrumentação é caracterizada pelos equipamentos (sensores, transdutores, atuadores, servidores etc.) utilizados para integrar toda a malha de controle. A escolha e dimensionamento de cada um destes elementos é de fundamental importância para uma resposta rápida a flutuações e estabilidade do processo. Tomando como exemplo os sensores, pode-se utilizar vários critérios de escolha, como performance, confiabilidade, materiais de construção etc. (SEBORG; THOMAS F. EDGAR, 2011).

2.2 REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

2.2.1 Sistemas de controle Multivariável

O controle de sistemas multivariáveis, é considerado como uma atividade não-trivial devido ao acoplamento de malhas de controle, uma alteração no ponto de operação de uma malha resulta em um distúrbio nas demais malhas acopladas.

Em muitos casos industriais, um sistema complexo pode ser dividido em subprocessos, assim as variáveis podem ser agrupadas em diferentes conjuntos para cada subsistema. Esta divisão corresponde em muitos casos a subsistemas realmente projetados e, em outros casos, é apenas uma estrutura conceitual para projetos de controle (ALBERTOS; SALA, 2004).

Os sistemas multivariáveis, também denominados como sistema MIMO, são sistemas que apresentam mais de uma variável de entrada e mais que uma variável de saída. A grande diferença entre um sistema SISO e um MIMO, é a presença de

combinações no sistema. No entanto, a maioria das técnicas utilizadas para sistemas monovariáveis podem ser estendidas para sistemas multivariáveis (S. SKOGESTAD; I. POSTLETHWAITE, 2001).

Considerando um sistema multivariável com m entradas e n saídas, a representação matricial deste sistema no domínio da frequência complexa s é dada de acordo com a Equação 2 e 3.

$$Y(s) = G_p(s)U(s) \quad \text{EQUAÇÃO (2)}$$

$$\begin{bmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \\ \vdots \\ Y_n(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{p11}(s) & G_{p12}(s) & \cdots & G_{p1m}(s) \\ G_{p21}(s) & G_{p22}(s) & \cdots & G_{p2m}(s) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{pn1}(s) & G_{pn2}(s) & \cdots & G_{pnm}(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \\ \vdots \\ U_m(s) \end{bmatrix} \quad \text{EQUAÇÃO (3)}$$

onde: $Y(s)$ é o vetor de saída que representa um conjunto de variáveis de processo $Y_1(s), Y_2(s), \dots, Y_n(s)$, com ordem $n \times 1$; $U(s)$ é o vetor de entrada que representa um conjunto de variáveis manipuladas $U_1(s), U_2(s), \dots, U_m(s)$, com ordem $m \times 1$; e $G_p(s)$ é a matriz de função de transferência da planta, com ordem $n \times m$.

No sistema MIMO, caso seja feita uma alteração em uma das entradas do sistema, e esta afetar as demais saídas, então existe uma interação entre as entradas e as saídas do sistema. A interação determina o grau de acoplamento do sistema multivariável, sendo designada como:

- *fracamente acoplado ou sem acoplamento*, quando a entrada u_1 só afeta a saída y_1 , u_2 só afeta y_2 , e assim por diante;
- *fortemente acoplado*, quando a alteração em uma entrada u_i , com $i = 1, \dots, m$, afeta todas as saídas do sistema, ou seja, y_1, y_2, \dots, y_n . Se o efeito da variável manipulada for maior do que os demais existentes na planta, então o acoplamento apresenta dominância no sistema (ALBERTOS; SALA, 2004).

Um sistema de controle multivariável pode ser tratado como um sistema de controle que envolve diversas variáveis manipuladas e variáveis de processo, no intuito de atenuar as interferências causadas pela interação entre as malhas de controle.

O controle MIMO tem as seguintes vantagens e desvantagens (S. OBERMANN, 2015).

- *vantagens*: a redução da variabilidade no processo, que proporciona economia de energia e recursos, melhor qualidade e menor perda de

produção; trazendo a operação mais próxima de restrições, para atingir uma maior rentabilidade e eficiência operacional.

- *desvantagens*: dificuldade na implantação dos controladores e no controle de camadas reguladoras, e susceptível às alterações do processo pelo operador e aos distúrbios.

Os problemas de controle multivariável são analisados a partir de três abordagens distintas (L. A. G. CHÍA, 2015):

- *controle descentralizado*, que utiliza múltiplos controladores na estrutura de controle, um para cada variável a ser controlada na planta;
- *controle com desacoplamento*, baseado na inclusão de pré-compensadores na planta, a fim de neutralizar a interação entre malhas de controle;
- *controle centralizado*, no qual o controlador trabalha como único bloco para controlar os diferentes sinais da planta.

Devido ao controle centralizado de sistemas MIMO ser complexo de se implementar na área de controle de processos, o controle desacoplado e o controle descentralizado são as estratégias mais aplicadas na prática. Por isso nesta dissertação o controle descentralizado foi escolhido, e será abordado na subseção 2.2.1.1.

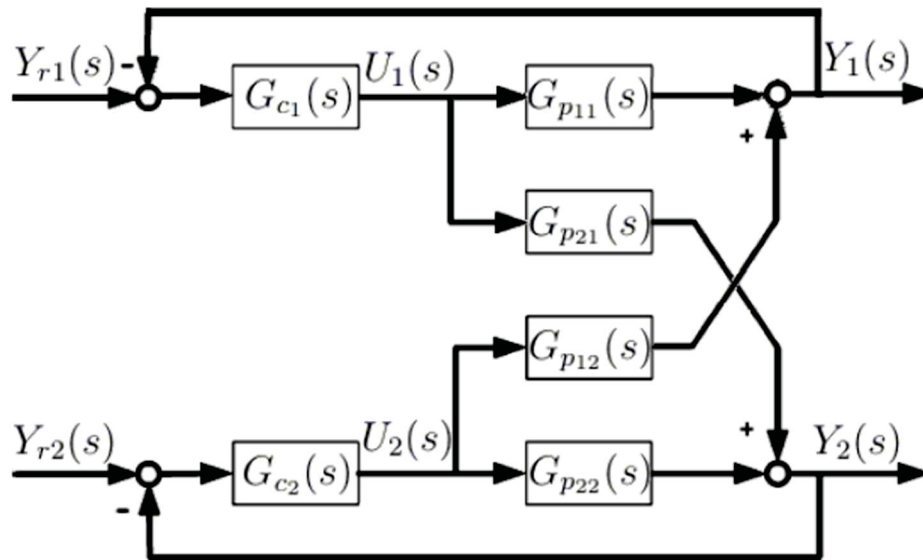
2.2.1.1 Controle descentralizado

Para simplificar a análise e a síntese dos controladores, os problemas associados ao controle multivariável são resolvidos a partir do controle descentralizado, que utiliza técnicas de projeto de sistemas do tipo SISO no emparelhamento de variáveis manipuladas e variáveis de processo (SILVA, 2010).

As configurações da estrutura de controle descentralizada para um sistema TITO são apresentadas, conforme observados na Figura 4 e Figura 5. Em ambas as configurações, a matriz dos controladores descentralizados $G_c(s)$ produz variável manipulada $U(s) = [U_1(s) U_2(s)]^T$ para atuar na matriz da planta $G_p(s)$, com o objetivo de tornar a variável de processo $Y(s) = [Y_1(s) Y_2(s)]^T$ igual à referência $Y_r(s) = [Y_{r1}(s) Y_{r2}(s)]^T$, onde o T , representa a transposta da matriz.

Na Figura 4, o controlador $G_{c1}(s)$ tem como entrada o erro $E_1(s) = Y_{r1}(s) - Y_1(s)$, enquanto o controlador $G_{c2}(s)$ tem como entrada o erro $E_2(s) = Y_{r2}(s) - Y_2(s)$. Esta configuração pode ser referenciada como uma estrutura de controle com emparelhamento 1-1/2-2.

FIGURA 4 - REPRESENTAÇÃO EM DIAGRAMA DE BLOCOS DA ESTRUTURA DE CONTROLE DE UM SISTEMA TITO COM EMPARELHAMENTO 1-1/2-2.



FONTE: (ALBERTOS; SALA, 2004).

Se esta configuração provocar instabilidade em malha fechada ou dificultar a sintonia dos controladores descentralizados, então uma estratégia alternativa é fazer o controlador $G_{c1}(s)$ ter como entrada o erro $E_1(s) = Y_{r2}(s) - Y_2(s)$ e o controlador $G_{c2}(s)$ ter como entrada o erro $E_2(s) = Y_{r1}(s) - Y_1(s)$ (SEBORG; THOMAS F. EDGAR, 2011).

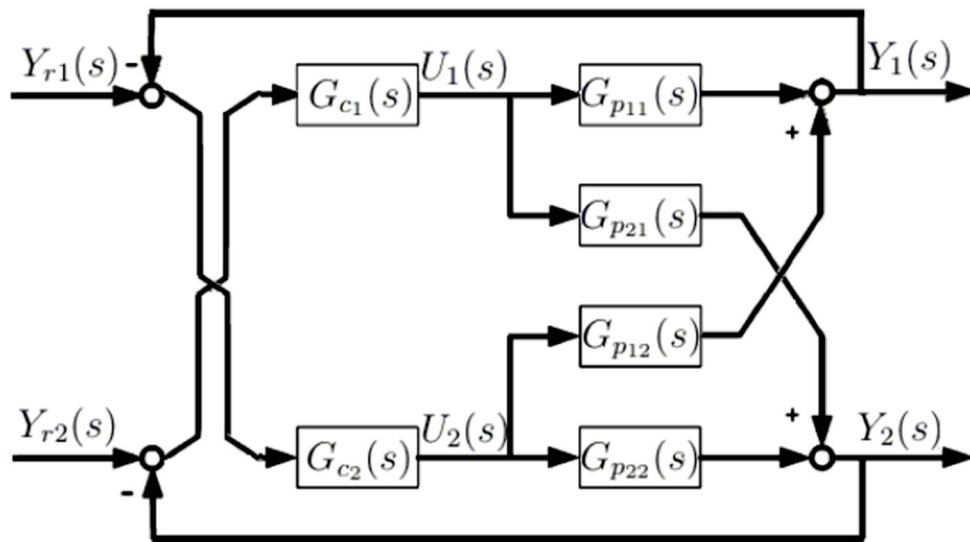
A configuração presente na Figura 05 pode ser referenciada como uma estrutura de controle com emparelhamento 1-2/2-1 (SEBORG; THOMAS F. EDGAR, 2011).

De forma genérica, a matriz planta $G_p(s)$ pode ser expressa pela Equação 4.

$$G_p(s) = \begin{bmatrix} G_{p11}(s) & G_{p12}(s) \\ G_{p21}(s) & G_{p22}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Y_1(s)}{U_1(s)} & \frac{Y_1(s)}{U_2(s)} \\ \frac{Y_2(s)}{U_1(s)} & \frac{Y_2(s)}{U_2(s)} \end{bmatrix} \quad \text{EQUAÇÃO (4)}$$

onde: $G_{pij}(s)$, com i, j variando de 1 a 2, é a função de transferência de cada processo SISO no domínio da frequência complexa, resultante das combinações entrada-saída possíveis em um sistema TITO.

FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO EM DIAGRAMA DE BLOCOS DA ESTRUTURA DE CONTROLE DE UM SISTEMA TITO COM EMPARELHAMENTO 1-2/2-1.



FONTE:(ALBERTOS; SALA, 2004).

2.2.1.2 Estabilidade em malha fechada

O teorema de Gershgorin estabelece que os autovalores de uma matriz estão contidos dentro de um conjunto de discos centralizados nos elementos diagonais dessa matriz. O raio de cada disco é igual a soma do módulo dos elementos não diagonais da correspondente linha ou coluna (R. S. VARGA, 2004). Em malha aberta, a curva de Nyquist $L_{ij}(j\omega_k)$, sobreposta por N círculos, tem os raios determinados pela Equação 5.

$$R_j(\omega_k) = \sum_{i=1, i \neq j}^n |L_{ij}(j\omega_k)| = \sum_{i=1, i \neq j}^n |G_{ci}(\omega_k)G_{pij}(\omega_k)|, \text{ com } k = 1, \dots, N \quad \text{EQUAÇÃO (5)}$$

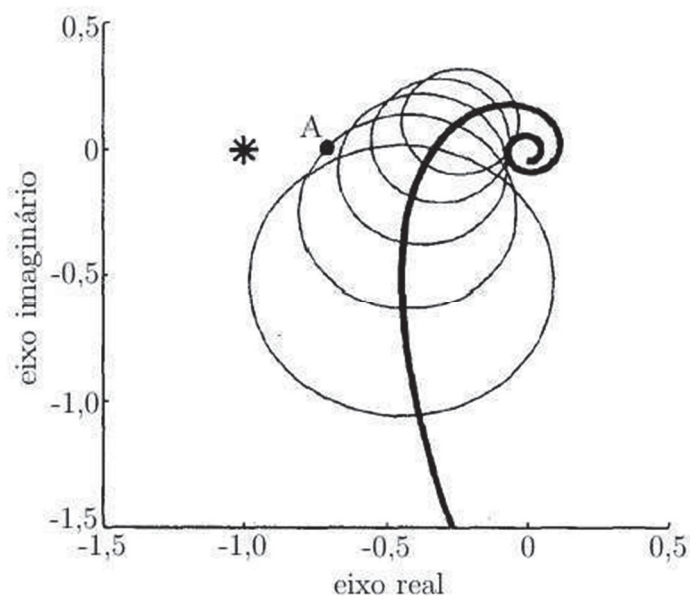
Toda banda composta por esses discos para toda a frequência $\omega > 0$ é chamada de banda de Gershgorin. Essa banda cobre a região em que é traçada a curva do lugar característico. Logo, se todo o disco de Gershgorin exclui o ponto crítico -1, pode-se afirmar que a estabilidade em malha fechada é garantida ao se contar o

número de voltas das bandas de Gershgorin em -1 , tendo o número de voltas do lugar característico (T. A. M. EUZÉBIO, 2015).

Na Figura 06 são apresentadas as bandas de Gershgorin sobrepostas às curvas de Nyquist de uma malha genérica. Como as bandas de Gershgorin não envolvem o ponto crítico, então o sistema multivariável é estável em malha fechada.

Essa análise de estabilidade representa apenas uma condição suficiente. Ou seja, se as bandas de Gershgorin contêm o ponto crítico, nada pode ser afirmado sobre a estabilidade ou instabilidade de um sistema multivariável em malha fechada (EUZÉBIO, 2015).

FIGURA 6 - REPRESENTAÇÃO DAS BANDAS DE GERSHGORIN DE UMA MALHA DE CONTROLE GENÉRICA EM UM SISTEMA MIMO



FONTE: Adaptado de (SEBORG; THOMAS F. EDGAR, 2011)

2.2.2 Sistemas MIMO Temperatura e Umidade

Pode-se encontrar uma grande quantidade de trabalhos na literatura tratando da identificação de Sistemas HVAC. Uma seleção de trabalhos, especialmente aplicável para este estudo são mencionados nesta seção.

(JÖNSSON, 2015) fez o estudo de um sistema de HVAC para uma sala, onde se pretende controlar a temperatura e umidade do ar. Seu estudo se baseia em

identificar diferentes parâmetros do controlador MIMO para cada estação do ano, focando na diminuição do consumo de energia.

(QI; DENG, 2009) em seu artigo apresenta uma investigação sobre o desenvolvimento de uma estratégia de controle MIMO para controlar simultaneamente a temperatura e a umidade do ar interno, variando as velocidades do compressor e do ventilador de alimentação em um sistema DX A/C experimental. O controlador baseado em MIMO foi projetado com base no modelo dinâmico linearizado do sistema experimental DX A/C. A técnica Linear Quadrática Gaussiana (LQG) foi usada no projeto do controlador baseado em MIMO.

(MATAMOROS e colab., 2020) teve como objeto do trabalho controlar a temperatura e a umidade de um sistema em um invólucro atmosférico para bioimpressão. O controle foi realizado com um controlador (PID) desacoplado que foi projetado, simulado e testado experimentalmente para garantir o bom funcionamento de todos os seus componentes.

(WANG; ZHU, 2020) em seu trabalho de análise do modelo do sistema de temperatura e umidade, utilizou o método *feedforward* e de desacoplamento, para fornecer uma maneira eficaz para a modelagem e controle do sistema de temperatura e umidade. Para a geração de calor foi utilizado o mesmo sistema, mas em seu trabalho foi utilizado a geração de névoa e um sistema de desumidificação, utilizando métodos diferentes do que será aplicado no modelo experimental, objeto deste estudo.

2.3 CONTRIBUIÇÃO DO TRABALHO

Em grande parte dos trabalhos presentes na literatura, a análise dos parâmetros para sistemas MIMO, que abordam o controle de temperatura e umidade são escassos.

Neste trabalho proposto, de identificação e controle de processo MIMO, tratando a temperatura e umidade em um mesmo módulo experimental, representa um trabalho inovador na área, sendo as análises, formas de controle e a versatilidade do módulo, aplica-se nos mais diferentes casos do estudo de controle de processos.

O módulo experimental proposto, possui um baixo custo de implementação e montagem, além de ser um diferencial para estudos de sistemas com diferentes formas de entradas e saídas, em que não se faz necessário um alto investimento para

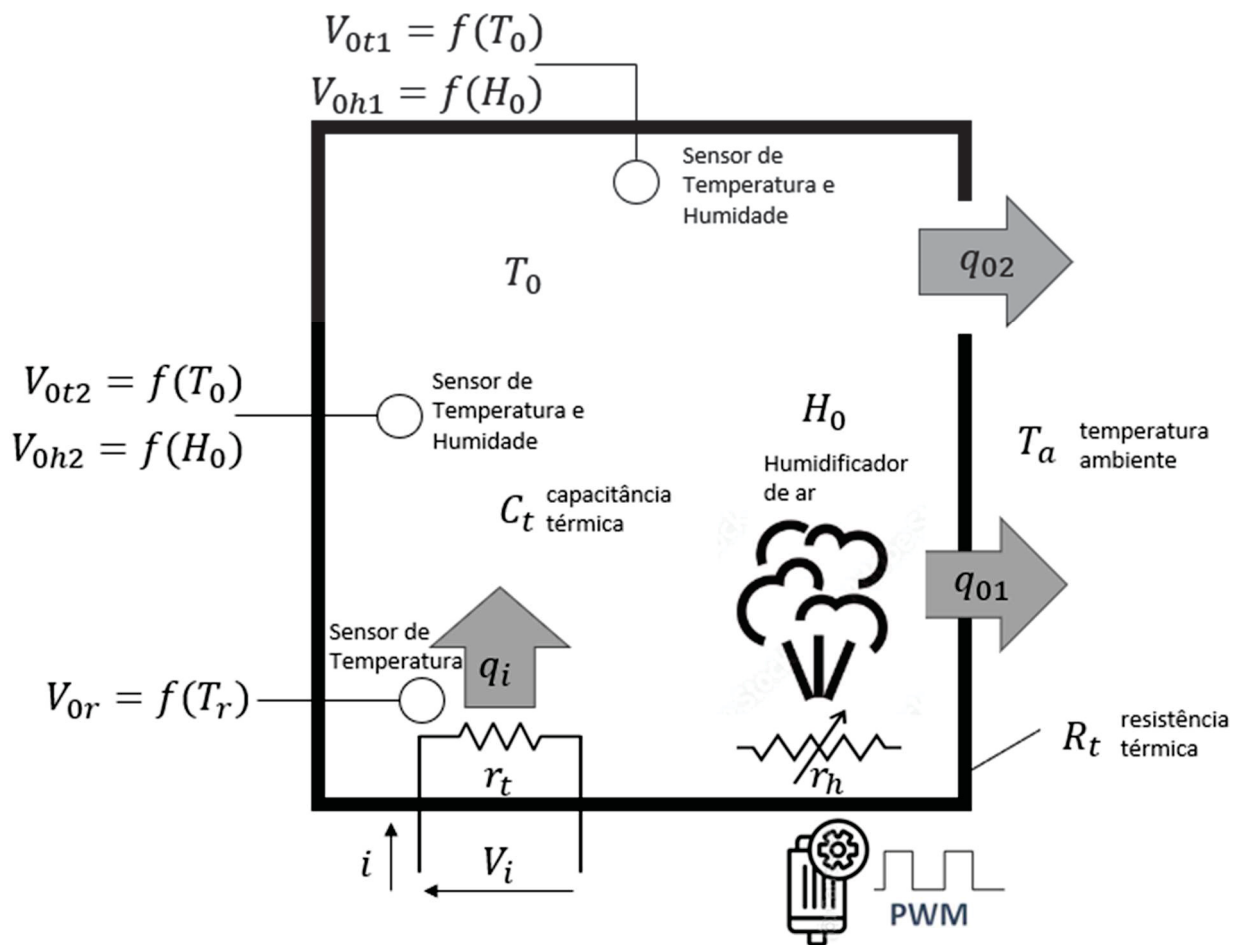
realizar diversas formas de análise. Trabalhos utilizando sistemas similares ao proposto não foram encontrados na literatura, onde há a transferência de calor por convecção e condução, bem como a transferência de massa.

3 MATERIAL E MÉTODOS

A proposta do trabalho é a utilização de um aparato experimental, para o estudo do controle multivariável da interação entre a temperatura e umidade em um sistema fechado, como representado na FIGURA 7.

As etapas que foram desenvolvidas no trabalho, envolvem a montagem do módulo experimental, entendimento dos limites de operação do módulo, e o controle multivariável da temperatura e umidade através do microcontrolador.

FIGURA 7 – PLANTA E ELEMENTOS ENVOLVIDOS



FONTE: O autor (2023).

3.1 MÓDULO EXPERIMENTAL

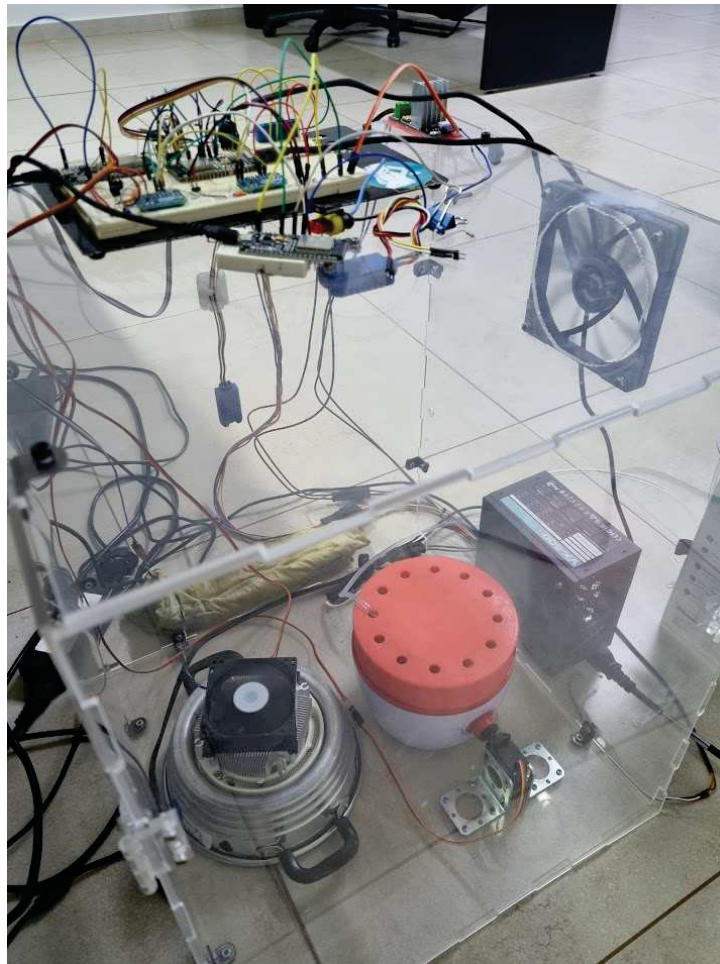
A estrutura do módulo experimental, é composta por um sistema de aquecimento e umidificação do ar, coexistentes em uma caixa de acrílico. Existe

apenas uma saída na caixa, em que está fixada uma ventoinha para a renovação do ar.

A escolha do acrílico foi para poder se observar a iteração da temperatura e a umidade do ar. Para a segurança do módulo, foi levantado a propriedade térmica como o coeficiente de condutibilidade térmica é de $0,201 \text{ W/m.k}$, a temperatura de deflexão térmica (HDT) que é de $101 \text{ }^\circ\text{C}$ e o ponto de Vicat (amolecimento) é de $121 \text{ }^\circ\text{C}$. Portanto para manter a integridade do aparato experimental, será admitido como temperatura máxima da fonte de calor a temperatura de $90 \text{ }^\circ\text{C}$.

O módulo experimental, possui as seguintes dimensões internas $400 \times 400 \times 500 \text{ mm}$ (CxLxA), e pode ser visualizado nas FIGURA 8.

FIGURA 8 – MÓDULO EXPERIMENTAL UTILIZADO NO TRABALHO



FONTE: O autor (2023).

3.1.1 Equipamentos do módulo

O módulo experimental, é constituído de dois elementos principais, que são o objeto deste estudo. A resistência de aquecimento e o umidificador de ar, pois são estes componentes que serão controlados para que se tenha um ambiente controlável dentro da caixa.

Também estarão dispostos no interior do módulo vários tipos de sensores, para o monitoramento das diversas variáveis do sistema, como a temperatura e umidade do ar.

A interligação com o ambiente externo, se dá através de uma ventoinha, que faz a exaustão dos gases no interior do módulo experimental.

3.1.1.1 Resistência de aquecimento

A resistência de aquecimento, é formada por uma base metálica, que suporta uma placa de cerâmica com a resistência de aquecimento.

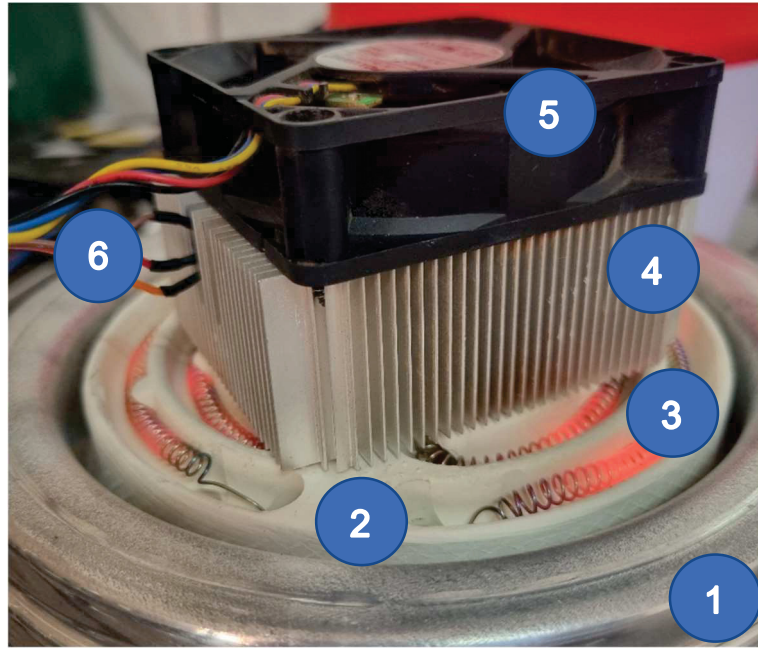
A resistência possui uma potência de 500 W, para uma tensão de 127 V, onde podemos calcular sua resistência como sendo de 31 m Ω .

Sob a resistência, foi instalado um dissipador de calor e uma ventoinha de processador de microcomputador, onde é possível ler a temperatura do dissipador, através de um LM35 instalado entre as aletas, controlar a velocidade da ventoinha e acompanhar a velocidade em que a ventoinha está girando.

Na Figura 9 pode-se identificar o sistema como um todo, e as indicações de cada elemento que compõe o sistema de aquecimento do módulo experimental.

1. Base de metal, para o suporte do bloco de aquecimento;
2. Porcelana para acomodação da resistência;
3. Resistência de aquecimento;
4. Dissipador de calor;
5. Ventoinha acoplada ao ventilador;
6. Sensor de temperatura LM35;

FIGURA 9 – O SISTEMA DE AQUECIMENTO E INDICAÇÃO DOS COMPONENTES



FONTE: O autor (2023).

3.1.1.2 Gerador de névoa

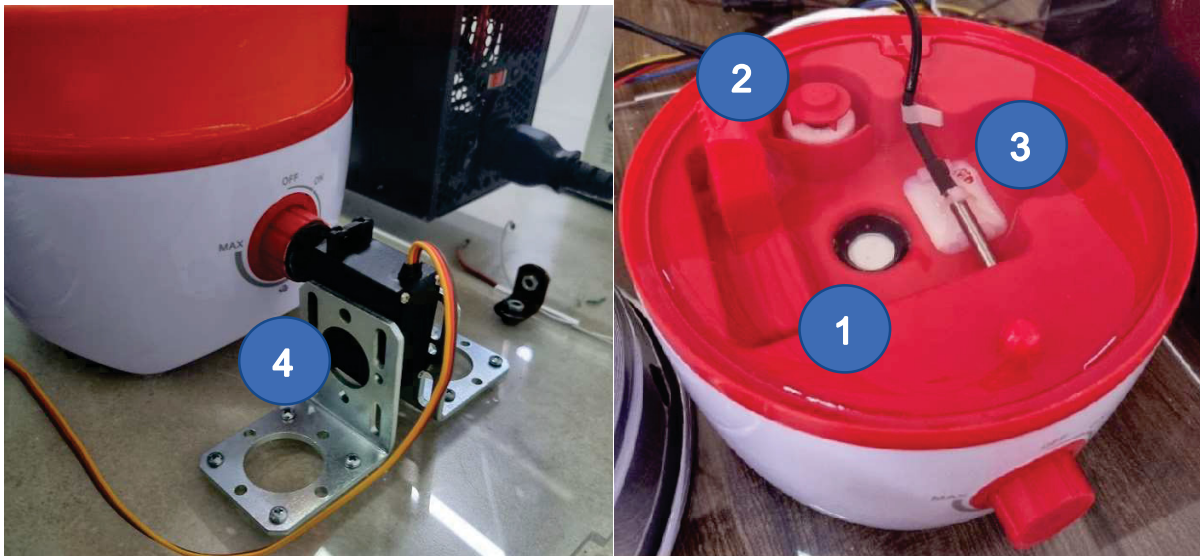
Para o controle da umidade do ar no módulo experimental, utilizou-se um umidificador de ar ultrassônico, modificado com uma tampa impressa em 3D.

Foi instalado no interior do umidificador, um sensor de temperatura digital, o DS18B20, para o acompanhamento da temperatura em que a água do umidificador está sendo mais uma variável a ser considerado no estudo, onde a quantidade de água em que foi utilizada no reservatório, durante o experimento foi de 220 ml.

Na Figura 10, é possível verificar a instalação de cada item do umidificador, com as indicações dos componentes deste sistema.

1. Reservatório de água do umidificador e sensor ultrassônico;
2. Boia de nível de água;
3. Sensor de temperatura DS18B20;
4. Ajuste da intensidade de umidificação através de um servomotor;

FIGURA 10 – UMIDIFICADOR DE AR COM CONTROLE DE INTENSIDADE E PARTE INTERNA



FONTE: O autor (2023).

3.1.1.3 Ventiladores

No módulo experimental, existe duas ventoinhas para a circulação interna do ar quente, do sistema de aquecimento. E uma ventoinha para a exaustão do ar interno ao módulo.

Os ventiladores utilizados, têm por características serem de 4 fios. Suas alimentações são em 12V e o seus controles de velocidade é feito por um sinal PWM (*Pulse Width Modulation*), ainda dispendo de uma saída para monitorar a velocidade em que eles estão operando, e cada revolução gera 2 pulsos, que podem ser contados pelo controlador.

3.1.2 Sensores do módulo

3.1.2.1 AM1011a

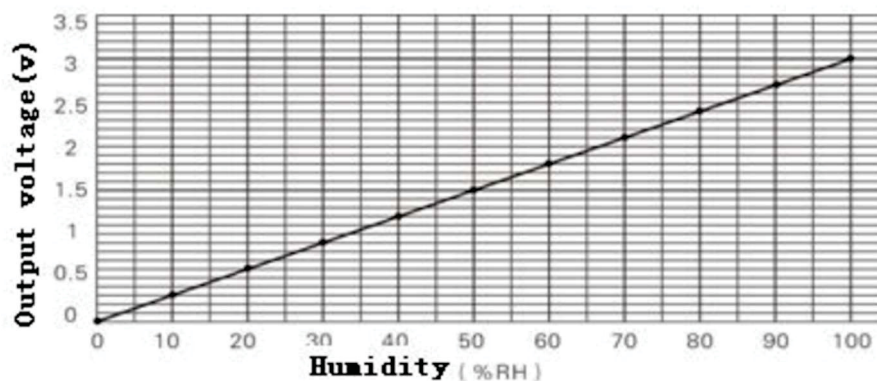
O módulo sensor AM1011a, instalado no topo e na lateral do módulo experimental, é um sensor que têm como parâmetros de medição a temperatura e umidade do ar, de forma analógica. Sua escolha se deu para que possa ser implementado uma malha de controle analógica no módulo experimental em trabalhos futuros.

A temperatura neste sensor é medida através de um termistor, cuja resistência se altera conforme a temperatura que ele está submetido, e é da família dos termistores NTC (*Negative Temperature Coefficient*), onde o aumento da temperatura provoca a diminuição na resistência.

No programa do controlador, foi implementado um algoritmo para o cálculo do coeficiente β (Beta), e para o cálculo da temperatura, foi utilizado a equação de Steinhart-Hart. Os parâmetros para o cálculo de β , foram retirados do *datasheet* do fabricante do sensor, para temperaturas de 0°C e 100°C.

A umidade do ar, é também medida na saída do sensor, e é linear de 0-3 V, que corresponde 0% a 100% de umidade. E pode ser verificado na FIGURA 11, retirada do *datasheet* do sensor.

FIGURA 11 – SAÍDA LINEAR DE TENSÃO X HUMIDADE



FONTE: Datasheet AM1011a (2009).

3.1.2.2 DS18B20

O sensor de temperatura DS18B20, é um sensor de temperatura com saída digital. Este sensor foi utilizado para a medição da temperatura da água do umidificador. Como ele possui um invólucro, ele pode ser mergulhado em líquidos para o monitoramento de temperatura.

3.1.2.3 HDC1080

O sensor de temperatura e umidade, foi instalado no topo do módulo experimental, e está ao lado de um sensor AM1011a, para efeito de comparação de valores de temperatura e umidade. O sensor HDC1080, possui excelentes

características como a precisão e repetibilidade, para a umidade relativa à precisão típica é de $\pm 2\%$, e a precisão da temperatura típica $\pm 0,2^\circ\text{C}$.

O sensor de umidade e temperatura já são calibrados de fábrica.

3.1.2.4 ADS1115

Para realizar as leituras dos sinais analógicos, ao invés de utilizar o conversor ADC, do próprio controlador, optou-se pela utilização do conversor analógico digital de 4 canais ADS1115, de alta precisão. Este conversor possui um ADC de 16 bits.

3.1.2.5 LM 35

Para medir a temperatura do dissipador (T_r), e a temperatura ambiente (T_a) foi utilizado o sensor analógico de temperatura LM35, que possui 3 terminais: a) GND = 0 V; b) V_s = tensão de alimentação, que pode variar entre 4 a 20 volts; c) V_{out} = tensão proporcional à temperatura. O LM 35 possui um *range* entre -55°C a 150°C .

3.1.2.6 SERVO MOTOR

Para o controle da intensidade do umidificador ultrassônico, foi instalado um servomotor no botão de controle de intensidade. Este servo motor do modelo MG99R, tem capacidade de girar até 180° , com torque máximo de 11 kgf.cm. Sendo um atuador na malha de controle da névoa gerada, com sua entrada sendo dada pelo ângulo em que se quer que ele esteja.

3.2 ESTRUTURA DE CONTROLE PROPOSTA

Na definição da estrutura de controle para o módulo experimental, foi realizada a classificação das variáveis presentes no processo e a caracterização das restrições de controle.

3.2.1 Classificação das variáveis

Devido ao fato de que o módulo experimental apresenta duas entradas e duas saídas, este pode ser modelado como um sistema multivariável. Logo a seguinte classificação foi feita na estrutura de controle do sistema:

- as variáveis manipuladas $U_1(s)$ e $U_2(s)$ representam o sinal de tensão $V(s)$ e a resistência $R(s)$ aplicados nos atuadores do módulo experimental, ou seja, no TRIAC do módulo *dimmer* e no gerador de névoa respectivamente;
- as variáveis do processo $Y_1(s)$ e $Y_2(s)$ representam a temperatura medida $T(s)$ e a umidade relativa do ar $H(s)$ monitoradas por meio do sensor de temperatura e umidade, no interior do módulo experimental;
- as referências $Y_{r1}(s)$ e $Y_{r2}(s)$ representam os sinais de referência para a temperatura medida $T_r(s)$ e a umidade do ar medida $H_r(s)$, que são definidos como condição de operação do módulo experimental.

3.2.2 Caracterização das restrições de controle

Após a implementação da estrutura de controle proposta no módulo experimental, é necessário que:

- a planta opere na faixa percentual dos valores de referência ($\leq 5\%$), de forma a minimizar efeitos externos de variação de temperatura e umidade;
- as condições do sistema de controle multivariável não excedam os limites operacionais da planta, como, por exemplo a temperatura interna da câmara exceder o limite dos sensores de temperatura e umidade;

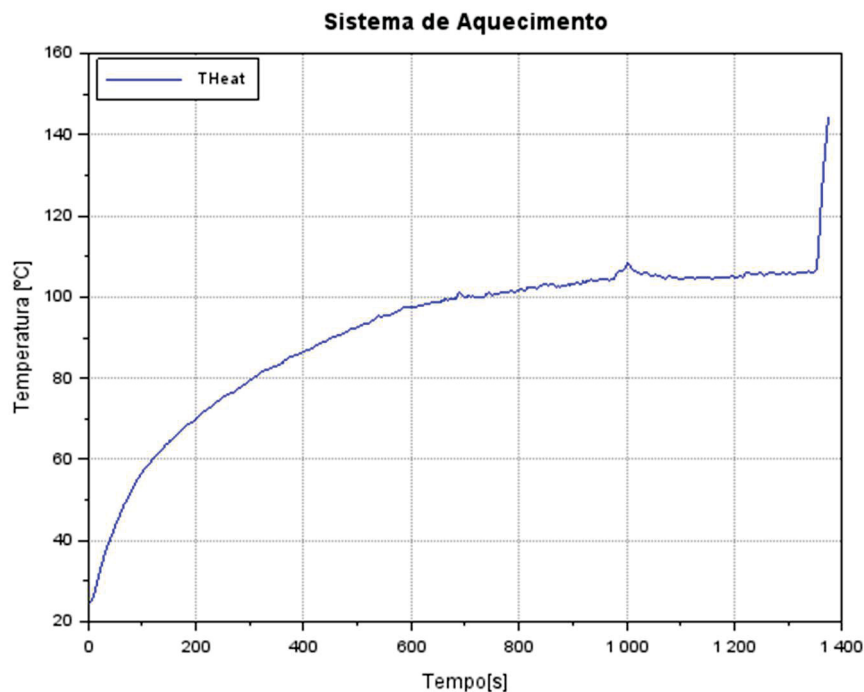
Para o entendimento dos limites de funcionamento da planta, e o comportamento da temperatura e umidade no interior do módulo experimental, foi realizado um teste, com as seguintes considerações abaixo.

O teste compreendeu os seguintes requisitos:

1. Ventilador de exaustão na velocidade mínima, PWM em 0%;
2. Ventilador de aquecimento na velocidade máxima, PWM em 100%;
3. Resistência de aquecimento na potência máxima, PWM em 100%;
4. Umidificador com o botão de controle de potência na posição 0°;

Este teste, onde foi utilizado as medidas do sensor LM35 instalado nas aletas do dissipador de calor da resistência de aquecimento, mostrou que a temperatura máxima do sistema de aquecimento pode ultrapassar os 100°C, temperatura que foi ultrapassada no tempo 684 segundos. Pode-se verificar que a capacidade máxima de troca de calor está próxima aos 105°C, e o ventilador de aquecimento conseguiu manter-se operando durante 667 segundos, quando a proteção térmica do ventilador atuou e desligou ele, fato que pode se verificar no aumento abrupto de temperatura no final, fato que pode ser verificado na FIGURA 12.

FIGURA 12 – COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA – SISTEMA DE AQUECIMENTO



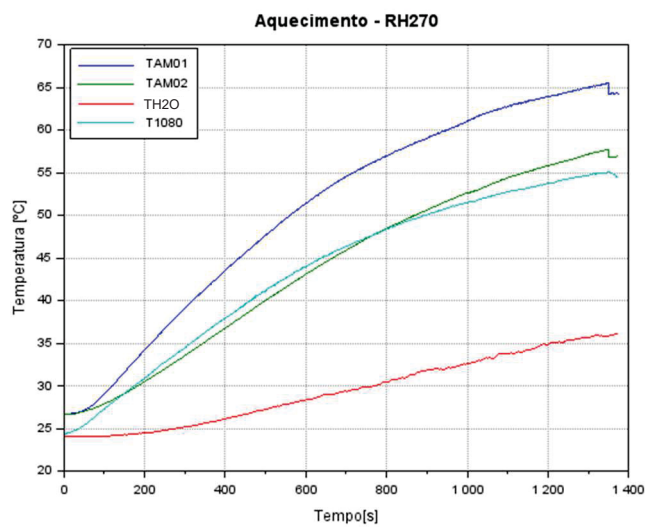
FONTE: O autor (2023).

A temperatura do ar interno, se manteve diferente para os três sensores, mas muito próxima aos sensores TAM02 e T1080, que estão praticamente juntos dentro do módulo experimental. O sensor TAM01 está localizado na parede do módulo experimental e o TH2O é a temperatura da água no interior do umidificador. Efeito que pode ser visualizado na FIGURA 13.

Foi possível observar também a influência da temperatura na umidade relativa do ar no sistema, e como são inversamente proporcionais, para uma condição fixa de geração de névoa de água no interior da câmara, servomotor na posição 180°. Onde os dados de RH01 e RH02 vem do sensor AM1011a e o RH1080 do sensor HDC1080.

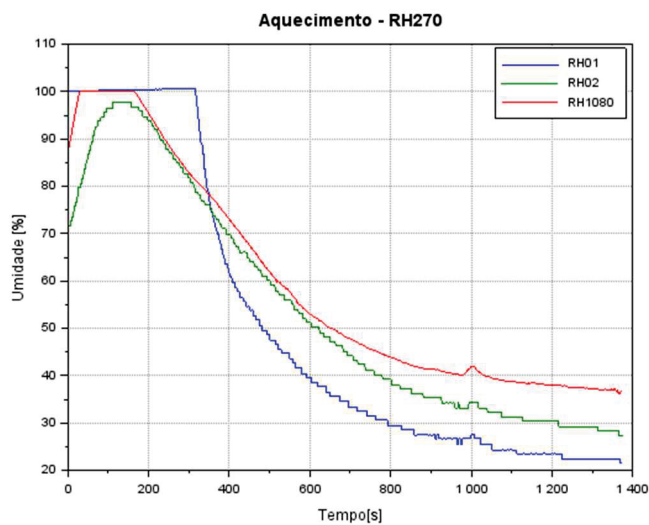
Pode-se observar que para umidades relativas abaixo de 50%, os sensores AM1011a são mais sensíveis que o digital, pois o RH02 e o HDC1080 estavam praticamente na mesma posição da caixa. Pode-se observar um aumento da umidade nos primeiros 200 segundos, alteração essa que pode ser explicada pela resposta do sistema de umidade ser bem mais rápida que o da temperatura, principalmente a temperaturas mais baixas, até 35 °C. Apresentado na FIGURA 14.

FIGURA 13 – COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA - AQUECIMENTO



FONTE: O autor (2023).

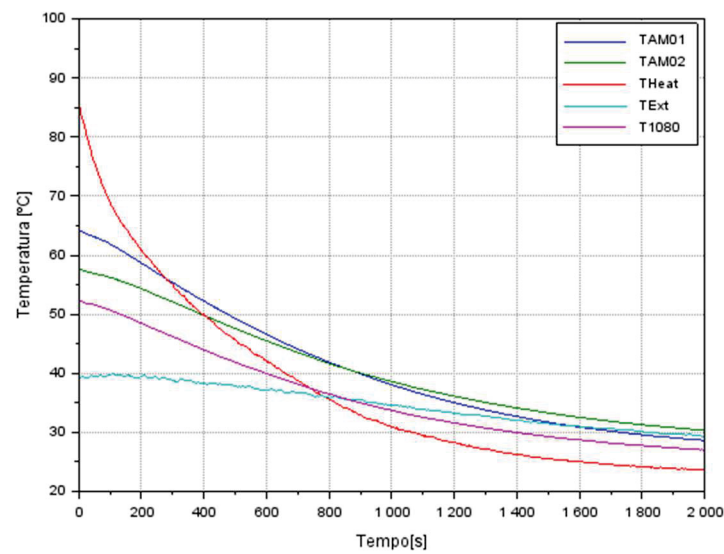
FIGURA 14 – COMPORTAMENTO DA UMIDADE - AQUECIMENTO



FONTE: O autor (2023).

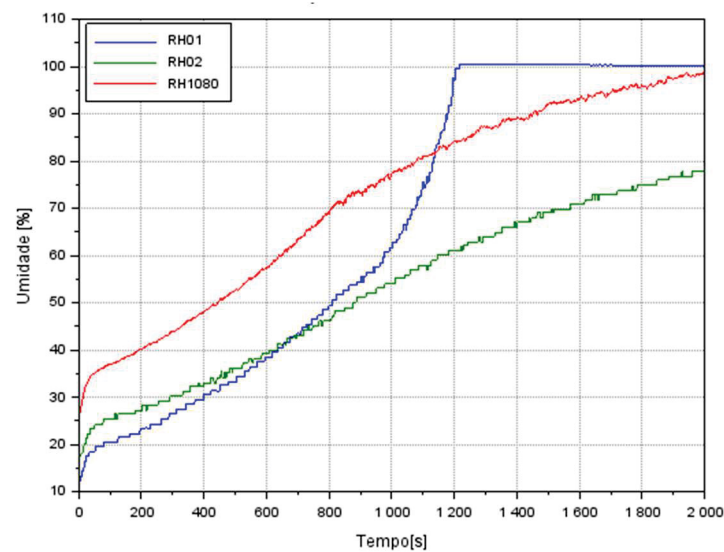
Outro comportamento observado nos testes de limites de operação, foi como o módulo experimental se comporta na condição de resfriamento. Pode ser observado na FIGURA 16, uma diferença entre a resposta dos 3 sensores utilizados na planta, sendo o RH01 o que chega mais rápido a saturação por estar mais próximo ao gerador de névoa, e para os sensores RH02 e RH1080 na presença de geração de névoa no interior do módulo, o sensor RH1080 reconhece a variação inicial melhor que o RH02, diferente da resposta na condição de desumidificação.

FIGURA 15 – COMPORTAMENTO DA TEMPERATURA - RESFRIAMENTO



FONTE: O autor (2023).

FIGURA 16 – COMPORTAMENTO DA UMIDADE – RESFRIAMENTO



FONTE: O autor (2023).

Na condição de resfriamento, os parâmetros utilizados para a geração dos dados de temperatura e umidade, são apresentados abaixo.

1. Ventilador de exaustão na velocidade mínima, PWM em 0%;
2. Ventilador de aquecimento na velocidade máxima, PWM em 100%;
3. Resistência de aquecimento na potência mínima, PWM em 0%;
4. Umidificador com o controle do servomotor na posição 180°;

4 MODELAGEM DO SISTEMA E ANÁLISE DE ACOPLAMENTO

A modelagem da planta é etapa primordial da metodologia para desenvolvimento de um sistema de controle multivariável, pois consegue-se extrair dos dados características importantes relacionadas a operação da planta, e pode-se obter uma abstração da mesma. Quanto mais aproximado for o modelo obtido do comportamento real da planta, mais fácil é a definição das especificações dos controladores a ser projetado.

4.1 OBTENÇÃO DE MODELOS DO SISTEMA MULTIVARIÁVEL

A matriz da planta $G_p(s)$ no módulo experimental é composta por quatro processos: $G_{p11}(s)$ representando o processo *Temperatura – Tensão*, $G_{p12}(s)$ representando o processo *Temperatura – Resistência*, $G_{p21}(s)$ representando o processo *Umidade – Tensão* e $G_{p22}(s)$ representando o processo *Umidade – Resistência*.

As funções de transferência $G_{pij}(s)$ dos processos são assumidas como modelos de primeira ordem com atraso, do inglês *First Order Plus Dead Time* (FOPDT), ou modelos de segunda ordem com atraso, do inglês *Second Order Plus Dead Time* (SOPDT), conforme apresentado nas Equações 6 e 7 respectivamente.

$$G_{pij(FOPDT)}(S) = \frac{K_{ij}e^{-L_{ij}s}}{\tau_{ij}s+1} \quad \text{EQUAÇÃO 6}$$

$$G_{pij(SOPD)} = \frac{K_{ij}e^{-L_{ij}s}}{(\tau_{1ij}s+1)(\tau_{2ij}s+1)} \quad \text{EQUAÇÃO 7}$$

onde: K_{ij} é o ganho do sistema (*adimensional*), L_{ij} é o atraso de transporte (*segundos*), τ_{ij} é a constante de tempo do sistema com modelo FOPDT (*segundos*) e τ_{1ij} e τ_{2ij} são a primeira e a segunda constantes de tempo do sistema com modelo SOPDT (*segundos*), com i e j variando de 1 a 2.

4.1.1 Testes realizados

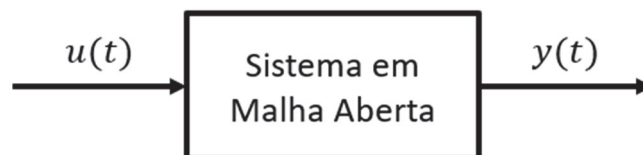
Os modelos FOPDT e SOPDT do módulo experimental foram obtidos a partir de testes realizados com base na resposta ao degrau e no ponto crítico.

4.1.1.1 Modelo baseado na resposta ao degrau

O primeiro teste a ser realizado para a modelagem do sistema TITO, foi baseado na resposta ao degrau do sistema. Este teste consiste na aplicação de um degrau na variável manipulada e, em seguida a coleta dos dados na variável de processo em malha aberta.

A representação em um diagrama de blocos deste teste, considerando uma entrada do tipo degrau unitário, pode ser verificada na Figura 17:

FIGURA 17 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO TESTE COM BASE NA RESPOSTA AO DEGRAU.



$$u(t) = \begin{cases} 1, & t \geq 1 \\ 0, & t < 0 \end{cases}$$

FONTE: Adaptado (SEBORG; THOMAS F. EDGAR, 2011).

4.1.1.2 Modelo baseado no ponto crítico

O outro teste que realizado é baseado no ponto crítico (relé-pulso) do sistema, que consiste na combinação do método do relé com a resposta ao degrau.

Segundo (K. J. ÅSTRÖM E T. HÄGGLUND, 1984), o sistema em malha fechada no método do relé exibe um ciclo limite no ponto em que a Equação 8 é satisfeita.

$$N(a)G(j\omega) = -1 \quad \text{EQUAÇÃO (8)}$$

onde: $G(j\omega)$ é a planta a ser identificada e $N(a)$ é a função descritiva do relé, como representado na Equação 9.

$$N(a) = \frac{4d}{\pi a} \quad \text{EQUAÇÃO (9)}$$

onde: d é a amplitude do relé na entrada do sistema e a é a amplitude da oscilação na saída do sistema.

Temos que, a intersecção da curva de *Nyquist* de $G(s)$ com $N(a)$ ocorre no ponto crítico da planta, conforme (BARROS, 2003), pela Equação 10.

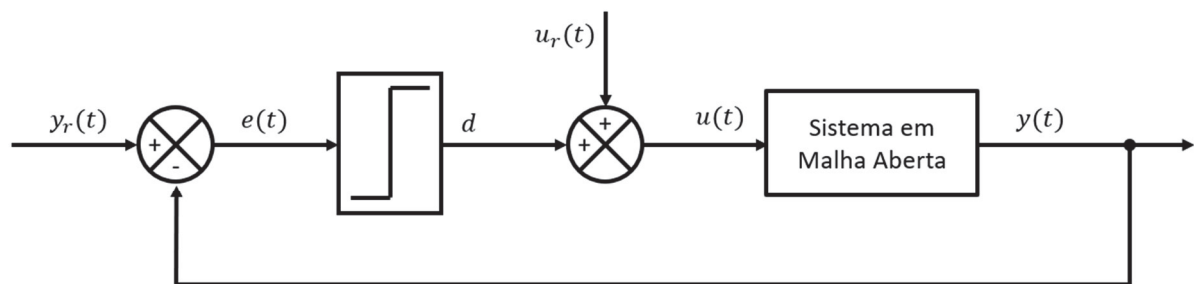
$$G(j\omega) = -\frac{\pi a}{4d} \quad \text{EQUAÇÃO (10)}$$

onde: ω_u é a frequência crítica da planta.

No teste do relé-pulso, são aplicados chaveamentos consecutivos na entrada da planta, durante um período definido. Este tempo de chaveamento é em função da dinâmica da planta em relação a variável manipulada. No fim dos chaveamentos, aplica-se um degrau, aguarda o RP e retira-se o degrau, para avaliar o tempo de assentamento, para avaliar a resposta ao estímulo gerado.

A representação em diagrama de blocos deste teste é apresentada na Figura 18 abaixo.

FIGURA 18 - REPRESENTAÇÃO EM DIAGRAMA DE BLOCOS DO TESTE DO PONTO CRÍTICO.



$$u(t) = \begin{cases} u_r(t) + d, & e(t) \geq 0 \\ u_r(t) - d, & e(t) < 0 \end{cases}$$

FONTE: Adaptado (BARROS, 2003).

Neste trabalho, optou-se por utilizar os modelos obtidos com base na resposta ao degrau, devido a resposta lenta do sistema e para extrair as informações para modelar a dinâmica de cada processo do módulo experimental.

4.1.2 Identificação de parâmetros dos modelos

Os parâmetros dos modelos que representam os quatro processos, que compõe a matriz da planta $G_p(s)$, são obtidos por meio de técnicas de identificação de

sistemas como o método da curva de reação do sistema e o método dos mínimos quadrados.

4.1.2.1 Método da curva de reação do sistema

Para a primeira sintonia, será utilizado a sintonia pelo método da curva de reação do sistema. Este método foi proposto por Ziegler e Nichols para a sintonia *online* de controladores. Ele se baseia em um único teste experimental com o sistema em malha aberta, ou seja, o controlador em modo manual. É medido experimentalmente a resposta da planta a uma entrada em degrau unitário. Caso a planta não possua integradores ou polos complexos conjugados dominantes, a resposta do sistema ao degrau pode ter um aspecto de S, como pode-se ver na FIGURA 19.

Para (OGATA, 2011), a curva em formato de S, pode ser caracterizada por duas constantes, o atraso θ e a constante de tempo τ , e a função de transferência $Y(s)/U(s)$ pode ser aproximada por um sistema de primeira ordem com um atraso de transporte, como segue:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad \text{EQUAÇÃO (11)}$$

Para o levantamento da resposta do sistema, é produzido um sinal do tipo degrau com amplitude M na entrada da planta, e a resposta $y(t)$ do sistema será registrada. O gráfico desta resposta ao degrau é conhecido por curva de reação do sistema. Este método se aplica em casos em que a resposta ao degrau da planta em malha aberta tem o aspecto típico de um sistema de primeira ordem com atraso.

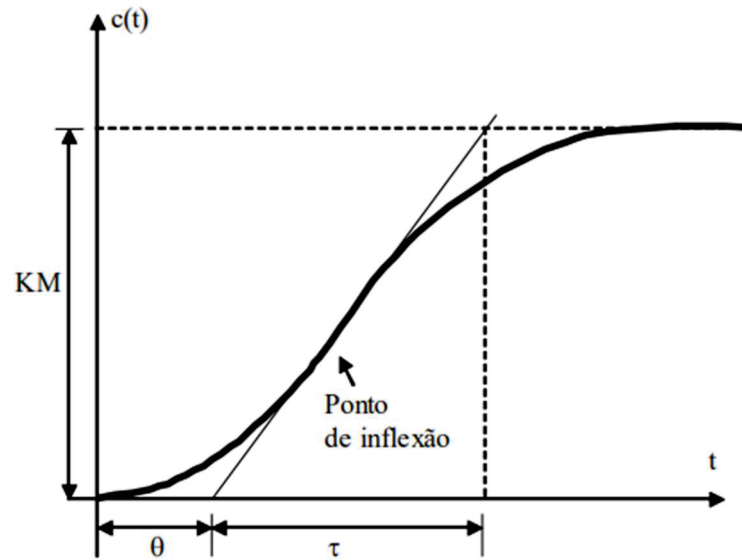
As constantes θ e τ são conhecidas na literatura, como tempo de retardo e constante de tempo. O ganho do sistema em estudo, é calculado utilizando a abaixo, onde M é a amplitude do sinal degrau de entrada.

$$K = \frac{c(\infty)}{M} \quad \text{EQUAÇÃO (12)}$$

Para encontrar os valores dos tempos θ e τ , pode-se utilizar a linha tangente no ponto de inflexão e a intersecção da reta com o estado estacionário inicial e o regime permanente final. Podemos também utilizar métodos de aproximação entre a resposta de um sistema de primeira ordem com atraso e a curva de reação do sistema.

O método é baseado na definição dos tempos t_1 e t_2 , nos quais a curva de reação atinge $0,283 \cdot c(\infty)$ e $0,632 \cdot c(\infty)$ respectivamente.

FIGURA 19 – CURVA DE REAÇÃO



FONTE: Tannuri (2020).

Uma boa aproximação para θ e τ é dada pelas Equação 13:

$$\tau = \frac{3}{2}(t_2 - t_1) \text{ e } \theta = t_2 - \tau \quad \text{EQUAÇÃO (13)}$$

Os valores dos parâmetros do compensador, devem ser escolhidos conforme a TABELA 01 a seguir, segundo Ziegler e Nichols.

TABELA 01 – MÉTODO DE ZIEGLER E NICHOLS PARA CURVA DE REAÇÃO

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta}$	∞	0
PI	$0,9 \frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta}$	$\frac{\theta}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta}$	2θ	$0,5\theta$

FONTE: Tannuri, 2020.

Essas relações de sintonia do controlador, foram obtidas empiricamente com o objetivo de conseguir uma taxa de decaimento na ordem de $\frac{1}{4}$.

De forma semelhante, utilizando o embasamento empírico, Cohen e Coon desenvolveram fórmulas para os ganhos de controle, também com o objetivo de obter decaimento $\frac{1}{4}$ em malha fechada.

TABELA 02 – MÉTODO DE COHEN E COON PARA CURVA DE REAÇÃO

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta} \left[1 + \frac{\theta}{3\tau} \right]$	∞	0
PI	$\frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta} \left[0,9 + \frac{\theta}{12\tau} \right]$	$\frac{\theta \left[30 + 3 \left(\frac{\theta}{\tau} \right) \right]}{9 + 20 \left(\frac{\theta}{\tau} \right)}$	0
PID	$\frac{1}{K} \frac{\tau}{\theta} \left[\frac{16\tau + 3\theta}{12\tau} \right]$	$\frac{\theta \left[32 + 6 \left(\frac{\theta}{\tau} \right) \right]}{13 + 8 \left(\frac{\theta}{\tau} \right)}$	$\frac{40}{11 + 2 \left(\frac{\theta}{\tau} \right)}$

FONTE: Tannuri, 2020.

O método da curva de reação apresenta a seguintes vantagens:

1. É preciso realizar apenas um único experimento, não sendo necessário um processo de tentativa e erro.
2. Os parâmetros do controlador são calculados de maneira simples.

Como desvantagens:

1. O experimento deve ser realizado em malha aberta. Caso ocorra alguma perturbação durante o teste, nenhuma ação corretiva é executada e os resultados podem ser bastante distorcidos.
2. A obtenção precisa dos parâmetros θ e τ pode ser difícil se a medida da resposta do sistema se apresenta afetada de ruído.
3. Este método tende a ser sensível aos erros de calibração do controlador, em oposição ao método de Ziegler-Nichols da oscilação mantida.
4. A resposta do sistema tende a ser oscilatória, dado que o método foi desenvolvido para produzir uma taxa de decaimento de $\frac{1}{4}$.

5. O método não se aplica a sistema que tenha uma resposta oscilatória em malha aberta.
6. O método apresenta bons resultados apenas quando a relação θ/τ estiver entre 0,1 e 0,5.

4.1.2.2 Método dos mínimos quadrados

Um método bastante aplicado para a estimação paramétrica, é o método dos mínimos quadrados, amplamente conhecido como método *Least Square Estimation* (LSE).

Inicialmente consideramos a equação de diferença linear, apresentada na Equação 4. Quando aplicado uma entrada $u(t)$, a saída $y(t)$ do processo pode ser escrita de acordo com (LJUNG, 1987), pela Equação 14.

$$y(t) + a_1y(t-1) + \dots + a_{n_a}y(t-n_a) = b_1u(t-1) + \dots + b_{n_b}u(t-n_b) + \epsilon(t) \quad \text{EQUAÇÃO (14)}$$

$$y(t) = \varphi^T(t)\theta + \epsilon(t) \quad \text{EQUAÇÃO (15)}$$

onde: $\epsilon(t)$ é o erro de predição, $\varphi(t)$ é o vetor de regressores, expresso pela Equação 15 e definido pela Equação 16, e o θ é o vetor com os parâmetros do modelo a serem estimados, conforme a Equação 17.

$$\varphi(t) = [\varphi_1 \varphi_2 \dots \varphi_n]^T = [-y(t-1) - y(t-2) \dots - y(t-n_a) \ u(t-1) \dots u(t-n_b)]^T \quad \text{EQUAÇÃO (16)}$$

$$\theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_n]^T = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_{n_a} \ b_1 \ \dots \ b_{n_b}]^T \quad \text{EQUAÇÃO (17)}$$

Se um conjunto de dados Z^N com $(t = 1, \dots, N)$ foi coletado da planta, representado pela Equação 18,

$$Z^N = [y(1), u(1), y(2), u(2), \dots, y(N), u(N)] \quad \text{EQUAÇÃO (18)}$$

e o erro de predição obtido for representado pela Equação 19,

$$\epsilon(t, \theta) = y(t) - \varphi^T(t)\theta \quad \text{EQUAÇÃO (19)}$$

então a função custo $V_N(\theta, Z^N)$ associada à estimação é calculada conforme a Equação 20.

$$V_N(\theta, Z^N) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \epsilon^2(t, \theta) \quad \text{EQUAÇÃO (20)}$$

Logo, a estimação dos parâmetros neste método, dada pela Equação 21, é feita para minimizar a função de custo, de acordo com (LJUNG, 1987).

$$\hat{\theta}_N^{LS} = \underset{\theta}{\operatorname{argmin}} V_N(\theta, Z^N) = [\sum_{t=1}^N \varphi(t)\varphi^T(t)]^{-1} \sum_{t=1}^N \varphi(t)y(t) \quad \text{EQUAÇÃO (21)}$$

4.1.2.3 Estimação paramétrica

Após a realização dos experimentos no módulo experimental, os parâmetros que constituem os modelos FOPDT e SOPDT propostos ao sistema TITO (ou seja, K_{ij} , L_{ij} , τ_{ij} , τ_{1ij} e τ_{2ij} , com i, j variando de 1 a 2) foram estimados por meio de um *software* desenvolvido no *Scilab*, que apresenta os métodos dos mínimos quadrados e do método da curva de reação.

No *software* foi utilizado o arquivo de dados gerados em cada experimento, onde é carregado as variáveis de entrada e de saída do processo SISO. O modelo do processo e o método de identificação são definidos, e como saída é exibido em indicadores numéricos, além da visualização das curvas experimentais e estimada sobrepostas em um ambiente gráfico.

4.1.3 Validação dos modelos

A acurácia dos modelos obtidos (FOPDT e SOPDT), foi avaliada pelo método do coeficiente de Theil e decomposições.

O coeficiente padrão U , proposto por (H. THEIL, 1961), consiste no somatório dos erros de predição ao quadrado. Dessa forma, sendo o erro de predição a diferença entre os valores observados e valores medidos, tem-se o coeficiente U expresso pela Equação 22.

$$U = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (\hat{y}(t) - y(t))^2}}{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \hat{y}^2(t) + \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N y^2(t)}} \quad \text{EQUAÇÃO (22)}$$

onde: \hat{y} é o valor estimado, y é o valor medido e N é o número de medições.

Este coeficiente pertence ao intervalo $[0,1]$, sendo o valor ideal $U = 0$.

O coeficiente também pode ser decomposto em três proporções: U_b , U_v e U_c .

1. Coeficiente U_b

O coeficiente U_b representa o desvio, ou seja, a diferença entre os valores médios, conforme Equação 23.

$$U_b = \frac{(\bar{\hat{y}} - \bar{y})^2}{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (\hat{y}(t) - y(t))^2} \quad \text{EQUAÇÃO (23)}$$

onde: $\bar{\hat{y}}$ é o valor médio dos valores estimados e \bar{y} é o valor médio dos valores medidos.

Análogo ao coeficiente U , este também pertence ao intervalo $[0,1]$, com valor ideal $U_b = 0$.

2. Coeficiente U_v

O coeficiente U_v representa a variância entre os valores estimados e medidos, conforme apresentado na Equação 24.

$$U_v = \frac{(\sigma_{\hat{y}} - \sigma_y)^2}{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (\hat{y}(t) - y(t))^2} \quad \text{EQUAÇÃO (24)}$$

onde: $\sigma_{\hat{y}}$ é o desvio padrão para os valores estimados e σ_y é o desvio padrão para os valores medidos.

Análogo aos coeficientes U e U_b , este também pertence ao intervalo $[0,1]$, com valor ideal $U_v = 0$.

3. Coeficiente U_c

O coeficiente U_c representa a covariância entre os valores estimados e medidos, conforme a Equação 25.

$$U_c = \frac{2(1-\rho)\sigma_{\hat{y}}\sigma_y}{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (\hat{y}(t) - y(t))^2} \quad \text{EQUAÇÃO (25)}$$

onde: ρ é o coeficiente de correlação.

Análogo aos demais, o coeficiente U_c também pertence ao intervalo $[0,1]$, porém com valor ideal $U_c = 1$. Portanto, a soma dos coeficientes U_b , U_v e U_c é sempre igual a 1.

4.2 CRITÉRIOS DE EMPARELHAMENTO DE MALHA

No desenvolvimento de um estudo do sistema de controle multivariável, a etapa seguinte é o uso de critérios para escolher o melhor emparelhamento da malha. Deve-se selecionar as melhores combinações saída-entrada do sistema de controle, de forma a obter o menor esforço do controlador e evitando a instabilidade em malha fechada, que é causada pela existência do acoplamento.

4.2.1 Matriz RGA

Para a obtenção da matriz *Relative Gain Array* (RGA), como propõe Bristol [44], o ganho relativo λ_{ij} entre a variável de processo y_i e a variável manipulada u_j é definido de acordo com a Equação 26.

$$\lambda_{ij} = \frac{\left(\frac{\partial y_i}{\partial u_j}\right)_{u_k, k \neq j}}{\left(\frac{\partial y_i}{\partial u_j}\right)_{y_k, k \neq i}} = \frac{\text{ganho de malha aberta}}{\text{ganho de malha fecha}} \quad \text{EQUAÇÃO (26)}$$

Dessa forma, a matriz RGA, é representada por $\Lambda = \{\lambda_{ij}\}_{i=1, \dots, n, j=1, \dots, n}$, pode ser escrita em termos de ganhos de estado estacionário da planta, ou seja $G_p(j0) = K = \{K_{ij}\}$ e a transposta da sua inversa $[K^{-1}]^T = \{K'_{ij}\}$.

Logo, o comportamento em regime permanente da planta pode ser analisado através da Equação 27.

$$\Lambda = \{K_{ij} \cdot K'_{ij}\}_{i=1, \dots, n, j=1, \dots, n} = K \otimes [K^{-1}]^T \quad \text{EQUAÇÃO (27)}$$

onde: o símbolo \otimes denota a multiplicação elemento por elemento.

Para um sistema TITO, as matrizes K e Λ são expressas pelas Equações 28 e Equação 29, respectivamente.

$$K = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \quad \text{EQUAÇÃO (28)}$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & 1 - \lambda_{11} \\ 1 - \lambda_{11} & \lambda_{11} \end{bmatrix} \quad \text{EQUAÇÃO (29)}$$

Neste caso, o elemento λ_{11} é obtido conforme Equação 30.

$$\lambda_{11} = \frac{1}{1-k} \quad \text{EQUAÇÃO (30)}$$

onde: k é o quociente de interação, que pode ser calculado de acordo com a Equação 31.

$$k = \frac{K_{12}K_{21}}{K_{11}K_{22}} \quad \text{EQUAÇÃO (31)}$$

O melhor emparelhamento entrada-saída, se dará por aquele em que os ganhos relativos presentes na diagonal principal ou secundária da matriz RGA sejam próximos de 1, com valor positivo. Caso os ganhos relativos sejam muito elevados, o grau de interação aumenta consideravelmente, dificultando o controle de ambas as saídas independentemente (SEBORG; THOMAS F. EDGAR, 2011).

4.2.2 Matriz RNGA

O emparelhamento de malhas de controle pode ser analisado pelo desempenho dinâmico da planta, como as constantes de tempo e atrasos inerentes. Esta análise pode ser feita por meio da matriz *Relative Normalized Gain Array* RNGA.

O ganho normalizado $k_{N,ij}$ para uma dada função de transferência $G_{p_{ij}}(s)$ da planta é definida de acordo com (M.-J. HE, W.-J. CAI, W. NI, 2009), pela Equação 32.

$$k_{N,ij} = \frac{G_{p_{ij}}(j0)}{\tau_{ar,ij}} \quad \text{EQUAÇÃO (32)}$$

onde: $G_{p_{ij}}(j0)$ é o ganho de estado estacionário e $\tau_{ar,ij}$ é o tempo de residência médio, o qual é um indicador da velocidade da resposta do y_i dada a ação u_j .

Estendendo para todos os elementos da matriz da planta $\mathbf{G}_p(s)$, que pode ser obtido pela matriz de ganho normalizado $\mathbf{K}_N = [k_{N,ij}]_{i=1,\dots,n,j=1,\dots,n}$, conforme Equação 33.

$$\mathbf{K}_N = \mathbf{G}_p(j0) \odot \mathbf{T}_{ar} \quad \text{EQUAÇÃO (33)}$$

onde: a matriz \mathbf{T}_{ar} é igual a $\{\tau_{ar,ij}\}_{i=1,\dots,n,j=1,\dots,n}$ e o símbolo \odot indica a divisão elemento por elemento.

Quando os ganhos normalizados são calculados para todos os elementos entrada-saída de um sistema multivariável, o resultado é a matriz RNGA representada por $\Phi = [\phi_{ij}]_{i=1,\dots,n,j=1,\dots,n}$ e obtida através da Equação 34.

$$\Phi = \mathbf{K}_N \otimes \mathbf{K}_N^{-T} \quad \text{EQUAÇÃO (34)}$$

Análoga à análise da matriz RGA, onde o melhor emparelhamento entre a entrada-saída será aquele cujos ganhos normalizados relativos presentes na diagonal principal ou secundária seja mais próximo de 1, com valor positivo.

5 PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR

5.1 PROJETO DE CONTROLADORES E DE DESEMPENHO

A formulação de um controlador descentralizado $G_{c_i}(s)$ do tipo PID é expressa pela seguinte função de transferência, apresentada na Equação 35:

$$G_{c_i}(s) = K_{c_i} \left(1 + \frac{1}{T_{I_i}s} + T_{D_i}s \right) \quad \text{EQUAÇÃO (35)}$$

onde: K_{c_i} é o ganho proporcional do controlador descentralizado [*adimensional*]; T_{I_i} é a constante de tempo integral do controlador descentralizado [*segundos*]; T_{D_i} é a constante de tempo derivativa do controlador descentralizado [*segundos*].

Nesse contexto, as etapas seguintes deste trabalho sobre o módulo experimental, foi a aplicação das técnicas de sintonia do controlador MIMO, e o cálculo dos índices de desempenho, para a obtenção dos melhores parâmetros para o controlador descentralizado.

5.1.1 Técnicas de sintonia multivariável sem desacoplamento

Dentre as várias técnicas disponíveis de sintonia para modelos FOPDT sem desacoplamento, duas técnicas foram adotadas:

- método IMC Generalizado, proposto por (M. LEE, K. LEE, C. KIM, 2004)
- método baseado em ITAE-s, proposto por (ROVIRA, A., MURRILL, P.W., AND SMITH, 1969);

5.1.1.1 Método IMC Generalizado

Lee *et al.* [51] sugeriram a generalização do método do Controle pelo Modelo Interno, do inglês *Internal Model Control* (IMC), para sistemas multivariáveis.

Assim o controlador multivariável ideal $K_i(s)$ para a i -ésima malha no método IMC Generalizado é dado pela Equação 36.

$$K_i(s) = \frac{C_{IMC_i}(s)}{1 - G_{p_{ii}}(s)C_i(s)} \quad \text{EQUAÇÃO (36)}$$

onde: $C_{IMC_i}(s)$ é o controlador IMC da malha, $G_{p_{ii}}(s)$ é o processo que compõe a matriz da planta $G_p(s)$, respectivamente.

A partir do modelo da Equação 37, ao invés de utilizarmos a expansão em séries de Taylor, para substituir o atraso, para o modelo de primeira ordem com atraso e sem zeros no semiplano direito, utilizaremos a aproximação de Padé de primeira ordem. Por Padé, o elemento de atraso é aproximado da seguinte forma:

$$e^{-Ls} \approx \frac{1 - \frac{Ls}{2}}{1 + \frac{Ls}{2}} \quad \text{EQUAÇÃO (37)}$$

Assim o controlador clássico resultante é dado pela Equação 38:

$$C = \frac{L+2\tau}{2K(L+\lambda)} \left(1 + \frac{1}{\left(\frac{L+2\tau}{2}\right)s} + \frac{L\tau}{L+2\tau} s \right) \quad \text{EQUAÇÃO (38)}$$

Nesse caso, para a determinação dos parâmetros, é calculado conforme apresentado na Tabela 3, abaixo.

TABELA 3 - REGRA DE SINTONIA PARA O MÉTODO IMC PRIMEIRA ORDEM COM ATRASO

Controlador $G_{c_i}(s)$	K_p	T_i	T_D
PID	$\frac{L+2\tau}{2K(L+\lambda)}$	$\frac{L+2\tau}{2}$	$\frac{L\tau}{L+2\tau}$

FONTE: Adaptado (2023).

5.1.1.2 Método baseado em ITAE-s

Na década de 60, pesquisadores de uma universidade americana desenvolveram uma metodologia de ajuste baseado na otimização da resposta em malha fechada. Em (LÓPEZ, A.M., MILLER, J.A., SMITH, C.L., AND MURRILL, 1967) são apresentados os resultados obtidos para característica regulatória, e em (ROVIRA, A., MURRILL, P.W., AND SMITH, 1969) são mostrados os resultados para a característica servo. A técnica minimiza o IAE e o ISE, que em outras palavras é a integral do produto do tempo pelo valor absoluto do erro entre a variável e o *setpoint* em um horizonte de análise.

A vantagem deste sistema, está em considerar toda a curva de resposta do sistema, ao invés de apenas dois pontos, como no da razão de decaimento de um quarto.

As regras de sintonia foram obtidas para diferentes conjuntos de parâmetros para um modelo FOPDT. Na Tabela 4 são encontrados os valores para a sintonia baseados na característica servo (mudança de *setpoint*).

TABELA 4 – PARÂMETROS PELO MÉTODO ITAE.

	K	T_i	T_d
$ITAE - s$	$\frac{0,965}{k_p} \left(\frac{\tau}{L}\right)^{0,85}$	$\frac{\tau}{0,842 - 0,1465 \left(\frac{L}{\tau}\right)}$	$0,308\tau \left(\frac{L}{\tau}\right)^{0,929}$

FONTE: Adaptado de Campos e Teixeira, 2006.

5.1.2 Índices de desempenho

Pela definição de índice de desempenho, deve ser um número maior ou igual a zero, de forma que o melhor sistema projetado, será aquele em que o valor satisfaça essa condição (CAMPOS, M.C.M.M., TEIXEIRA, 2006).

Nesta dissertação, optou-se por medir o desempenho dos sistemas projetados para o controle do sistema multivariável descentralizado, utilizando os índices IAE e ISE, levando em consideração que estes dois índices são os mais utilizados na literatura.

5.1.2.1 Índice IAE

Na avaliação do desempenho em malha fechada, pode-se considerar como entrada, um sinal unitário, para o sinal de referência do sistema.

O resultado do desempenho na saída é dado pela Integral do Erro Absoluto, do inglês *Integral Absolute Error* (IAE), qual se baseia no módulo do erro do sistema (S. SKOGESTAD, 2003), de acordo com a Equação 39.

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt \quad \text{EQUAÇÃO (39)}$$

onde: $e(t)$ é o erro do sistema; T é um tempo finito escolhido de modo que a integral se aproxime de um valor em regime permanente. É conveniente escolher T igual ao tempo de acomodação t_s .

5.1.2.2 Índice ISE

No intuito de se considerar ponderações no erro do sistema, o índice Integral do Erro Quadrático, do inglês *Integral Square Error* (ISE), é utilizado de acordo com a Equação 40.

$$ISE = \int_0^T e^2(t)dt \quad \text{EQUAÇÃO (40)}$$

Entretanto, o ISE apresenta baixa seletividade devido as variações no controlador corroborarem com pequenas variações nesse índice.

5.2 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE

O projeto dos controladores pode ser testado e validado, a partir da implementação do sistema de controle multivariável. Foi utilizado no módulo experimental, um microcontrolador da família ESP32 para o processamento das informações e atuação na planta, e todo o código fonte foi desenvolvido na plataforma *Arduino-IDE*. A execução dos comandos no controlador do módulo experimental, se deu através do *Serial Monitor* da própria plataforma de programação.

O programa desenvolvido em linguagem C, para o módulo experimental, foi dividido em duas partes: o programa principal e as sub-rotinas.

No programa principal, foi definido um intervalo de tempo entre cada medição, que podemos considerar como um tempo de amostragem, de 5 segundos entre cada leitura e comando. Dentro do programa principal, foi implementado a estratégia de controle para lidar com o erro da temperatura e umidade.

No *loop* principal, também está implementado a rotina para comunicação *Serial* entre o computador e o microcontrolador principal, e as rotinas de envio de informação para os controladores do *Dimmer* e *Servo Motor*.

Nas sub-rotinas, estão implementados o tratamento da variável temperatura, já que o sensor AM1011a é composto por um termistor NTC, onde a resistência é calculada indiretamente pela equação de *Steinhart-Hart*, utilizando a *Equação de Parâmetro β* .

6 RESULTADO E DISCUSSÃO

Após trilharmos o caminho para o desenvolvimento dos métodos de identificação e sintonia de um sistema de controle multivariável, para o módulo experimental, neste capítulo está reunido os resultados obtidos em simulação e nos testes experimentais.

6.1 IDENTIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS MODELOS FOPDT

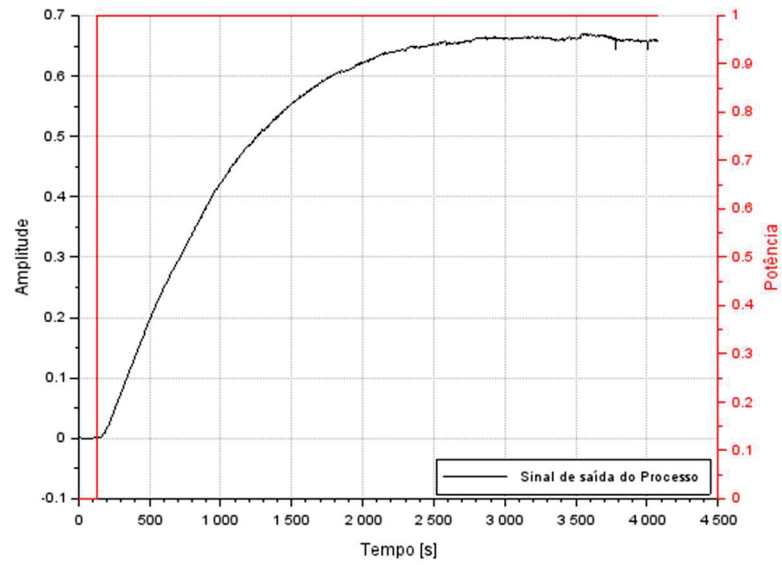
A partir dos testes e dos métodos de identificação abordados nos capítulos anteriores, foi possível obter os parâmetros dos modelos do tipo FOPDT para o módulo experimental.

Nas Figuras 20 a Figura 27, podemos observar a resposta ao degrau para o processo *Temperatura-Temperatura*, *Temperatura-Umidade*, *Umidade-Temperatura* e *Umidade-Umidade* e a curva estimada com o modelo FOPDT obtido pelo método de otimização de *Nelder-Mead*, para encontrar o valor ótimo da função, com os parâmetros estimados e as incertezas expandidas com 95% de probabilidade.

Os sensores utilizados para fazer a identificação da planta foram o sensor de temperatura TAM01 e RH01, que são os sensores localizados na parede do módulo experimental.

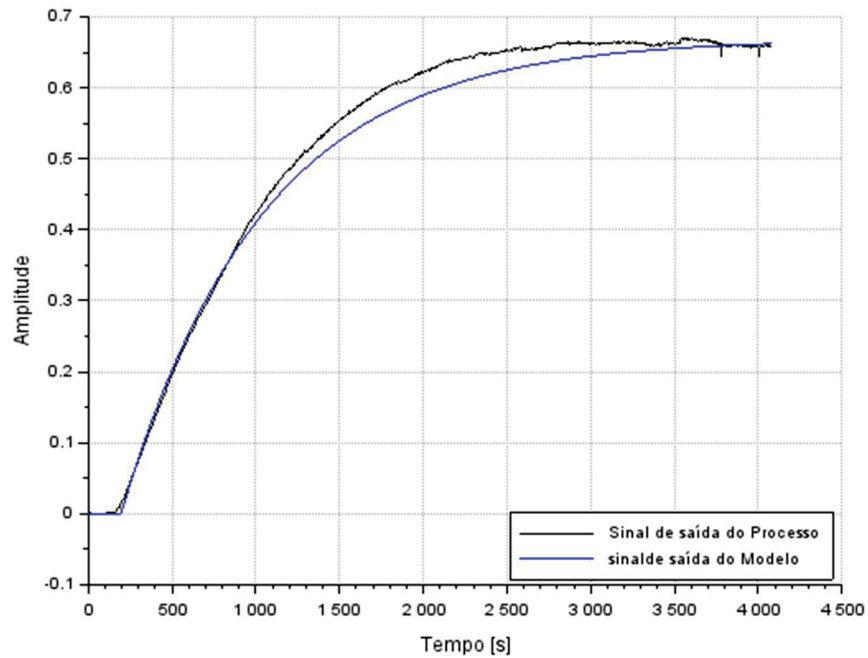
Para a FIGURA 27, foi considerado o sistema de primeira ordem pois para o início da resposta, o comportamento tende a ser de primeira ordem, mas foi simulado uma função linear, que representou bem o sistema, e que está na FIGURA 39 do Anexo.

FIGURA 20 - RESPOSTA AO DEGRAU DO PROCESSO TEMPERATURA-TEMPERATURA



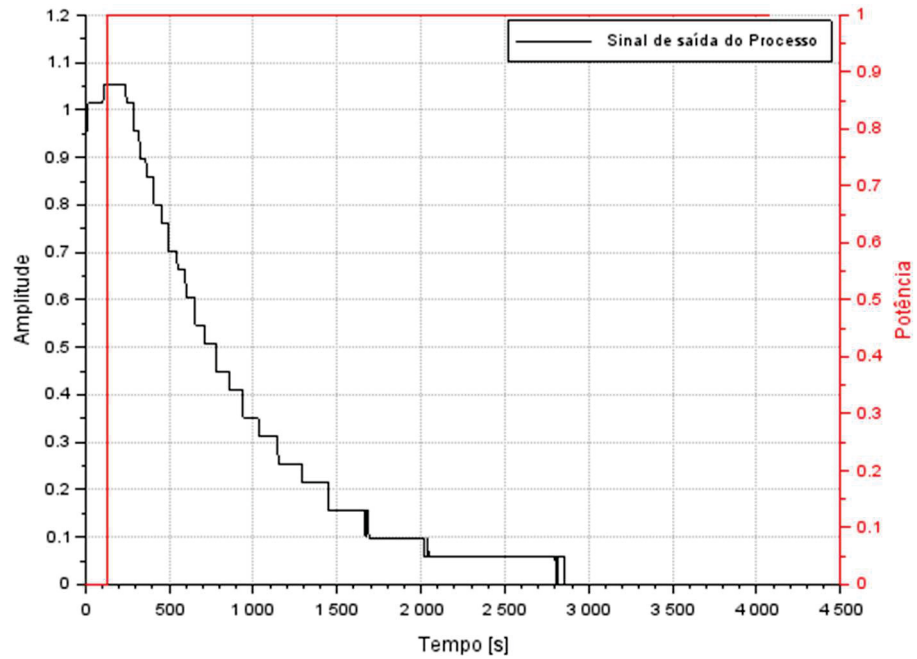
FONTE: O autor (2023).

FIGURA 21 - RESPOSTA DO MODELO FOPDT OBTIDO DO PROCESSO TEMPERATURA-TEMPERATURA



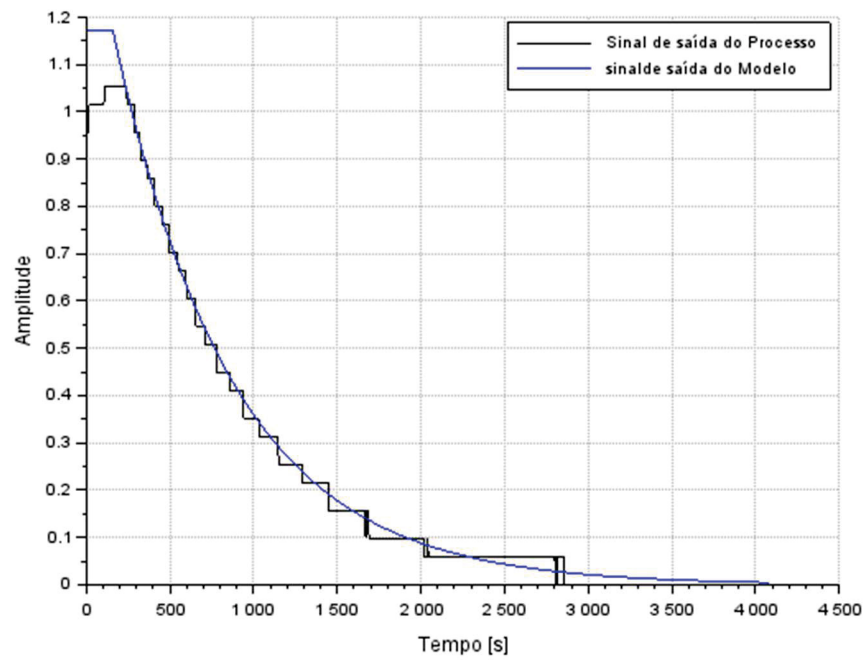
FONTE: O autor (2023).

FIGURA 22 - RESPOSTA AO DEGRAU DO PROCESSO TEMPERATURA-UMIDADE



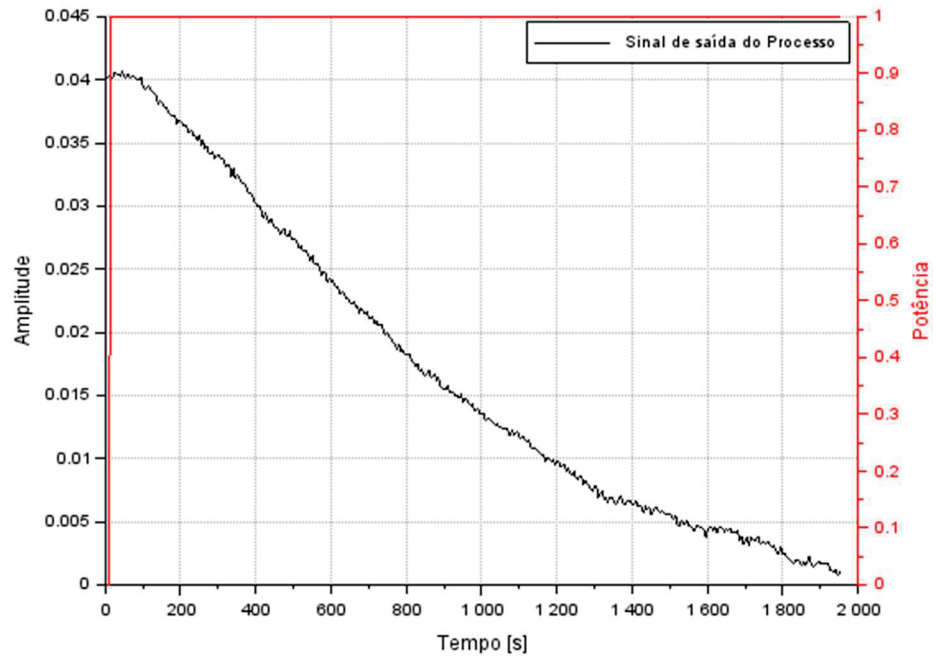
FONTE: O autor (2023).

FIGURA 23 - RESPOSTA DO MODELO FOPDT OBTIDO DO PROCESSO TEMPERATURA-UMIDADE



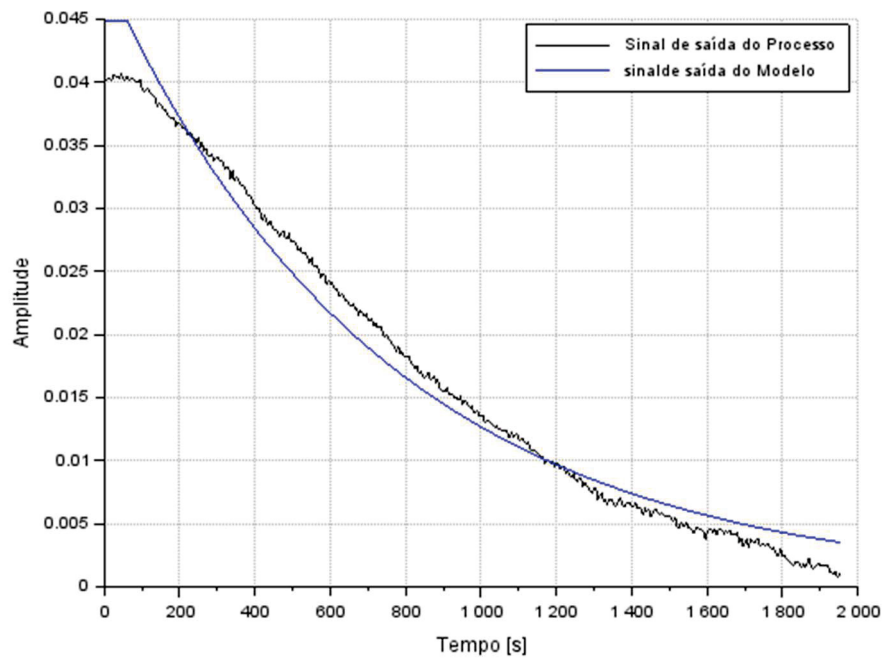
FONTE: O autor (2023).

FIGURA 24 - RESPOSTA AO DEGRAU DO PROCESSO UMIDADE-TEMPERATURA



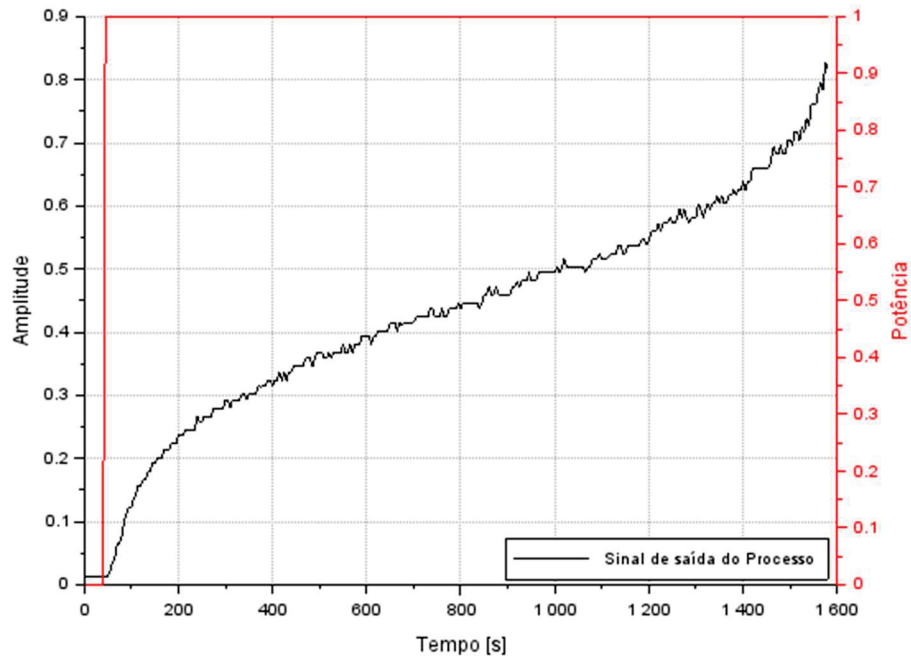
FONTE: O autor (2023).

FIGURA 25 - RESPOSTA DO MODELO FOPDT OBTIDO DO PROCESSO UMIDADE-TEMPERATURA



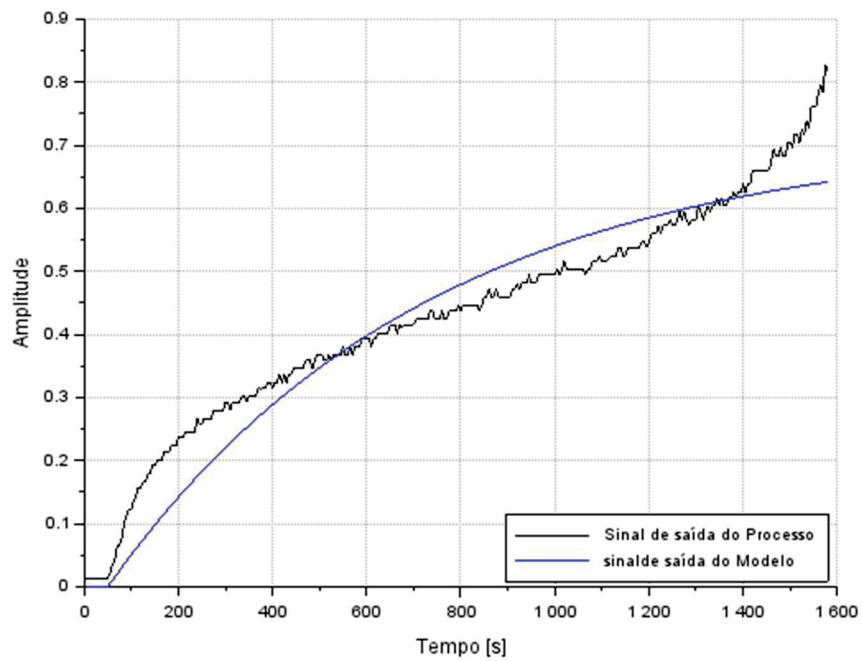
FONTE: O autor (2023).

FIGURA 26 - RESPOSTA AO DEGRAU DO PROCESSO UMIDADE-UMIDADE



FONTE: O autor (2023).

FIGURA 27 - RESPOSTA DO MODELO FOPDT OBTIDO DO PROCESSO UMIDADE-UMIDADE



FONTE: O autor (2023).

Os parâmetros dos modelos FOPDT para os quatro processos da matriz da planta, foram obtidos através do método do degrau em malha aberta, e aplicando o método da curva de reação para obtenção do tempo de retardo L_{ij} . O coeficiente de Theil, apresentados nas Subseção 4.1.3, também foram calculados e o melhor resultado dentre os três experimentos foram destacados em negrito.

TABELA 5 - PARÂMETROS DO MODELO FOPDT OBTIDOS PARA O PROCESSO $G_{p1}(S)$ (*TEMPERATURA – TEMPERATURA*) PELA RESPOSTA AO DEGRAU E ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS PELO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO DE NELDER-MEAD

Experimento	K	τ_1	L	U	U_b	U_v	U_c
1	0,696±0,003	1025,869±13,496	50	0,01140	0,14400	0,06670	0,79070
2	0,762±0,001	1093,408±7,204	69	0,00869	0,37743	0,00043	0,62288
3	0,669±0,001	847,158±7,882	65	0,01848	0,54348	0,12627	0,33082

FONTE: O autor (2023).

TABELA 6 - PARÂMETROS DO MODELO FOPDT OBTIDOS PARA O PROCESSO $G_{p1}(S)$ (*TEMPERATURA – UMIDADE*) PELA RESPOSTA AO DEGRAU E ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS PELO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO DE NELDER-MEAD

Experimento	K	τ_1	L	U	U_b	U_v	U_c
1	-1,115±0,009	798,194±9,732	75	0,05314	0,14268	0,14180	0,71705
2	-1,121±0,007	1181,16±11,033	210	0,04177	0,45151	0,21494	0,33418
3	-1,171±0,006	712,292±5,242	160	0,04282	0,11451	0,21472	0,67184

FONTE: O autor (2023).

TABELA 7 - PARÂMETROS DO MODELO FOPDT OBTIDOS PARA O PROCESSO $G_{p21}(S)$ (*UMIDADE – TEMPERATURA*) PELA RESPOSTA AO DEGRAU E ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS PELO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO DE NELDER-MEAD

Experimento	K	τ_1	L	U	U_b	U_v	U_c
1	-0,044±0,0005	743,149±12,031	60	0,04274	0,00052	0,01838	0,98365
2	-0,051±0,0001	520,676±14,500	26	0,06145	0,39266	0,00093	0,60892
3	-0,049±0,0004	567,141±7,4138	20	0,03272	0,13927	0,08677	0,77753

FONTE: O autor (2023).

TABELA 8 - PARÂMETROS DO MODELO FOPDT OBTIDOS PARA O PROCESSO $G_{p22}(S)$ (*UMIDADE – UMIDADE*) PELA RESPOSTA AO DEGRAU E ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS PELO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO DE NELDER- MEAD

Experimento	K	τ_1	L	U	U_b	U_v	U_c
1	0,718±0,038	680,687±79,643	18	0,05599	0,04083	0,09791	0,86429
2	0,764±0,048	233,289±36,690	20	0,05122	0,01301	0,01557	0,97906
3	0,670±0,030	149,451±21,894	15	0,04633	0,01492	0,00316	0,99019

FONTE: O autor (2023).

Por meio dos resultados apresentados nas Tabelas 07 a 08, pode-se notar que os coeficientes U , U_b , U_v e U_c , foram suficientes para a escolha do melhor modelo FOPDT, pois houve convergência destes para um experimento em específico em todo os 4 processos da planta modelada. Assim por ordem de precedência desses coeficientes, os experimentos com menor U_b foram analisados pelos critérios de emparelhamento de malha abordados na Subseção 4.2.

6.2 CÁLCULO DAS MATRIZES RGA, RNGA

Após pré-seleção dos parâmetros dos modelos FOPDT obtidos para cada processo, pode-se calcular as matrizes RGA e RNGA, que foram expressas nas Equações 42 e 43, respectivamente.

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 1,1063 & -0,1063 \\ -0,1063 & 1,1063 \end{bmatrix} \quad \text{EQUAÇÃO 41}$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1,0271 & -0,0271 \\ -0,0271 & 1,0271 \end{bmatrix} \quad \text{EQUAÇÃO 42}$$

A partir das matrizes RGA, e RNGA calculadas, podemos verificar que o emparelhamento da malha sugerido foi o caso 1-1/2-2 (temperatura controlada por temperatura e umidade controlada por umidade), uma vez que o elemento da diagonal principal foi mais próximo de 1, com valor positivo.

Logo, as funções de transferência que representam os processos presentes no módulo experimental, são definidas pela função de transferência dada pela Equação 44.

$$G_p = \begin{bmatrix} \frac{0,762e^{-69*s}}{1093,408*s+1} & \frac{-1,115e^{-75*s}}{798,194*s+1} \\ \frac{-0,044e^{-60*s}}{743,149*s+1} & \frac{0,670e^{-15*s}}{149,451*s+1} \end{bmatrix} \quad \text{EQUAÇÃO 43}$$

6.3 PROJETO E ANÁLISE DOS CONTROLADORES

Utilizando as técnicas de sintonia sem desacoplamento e dos índices de desempenho apresentados nas Subseções 5.1.1.1 e 5.1.1.2, foi possível realizar o projeto e análise dos controladores descentralizados do tipo PID, descrito na Tabela 9 abaixo.

TABELA 9 - PARÂMETROS DOS CONTROLADORES PID DESCENTRALIZADOS E ÍNDICES IAE E ISE OBTIDOS (SEM DESACOPLAMENTO)

Método de Sintonia	Controlador $G_{c_i}(s)$	K_{c_i}	T_{I_i}	T_{D_i}	IAE	ISE
IMC Generalizado	$G_{c_1}(s)$	18,97	581,2	33,44	50,615	25,956
	$G_{c_2}(s)$	9,76	82,22	7,14	14,144	8,66
ITAE-s	$G_{c_1}(s)$	13,259	1389,8	25,85	116,92	46,09
	$G_{c_2}(s)$	10,164	191,29	7,09	25,127	9,759

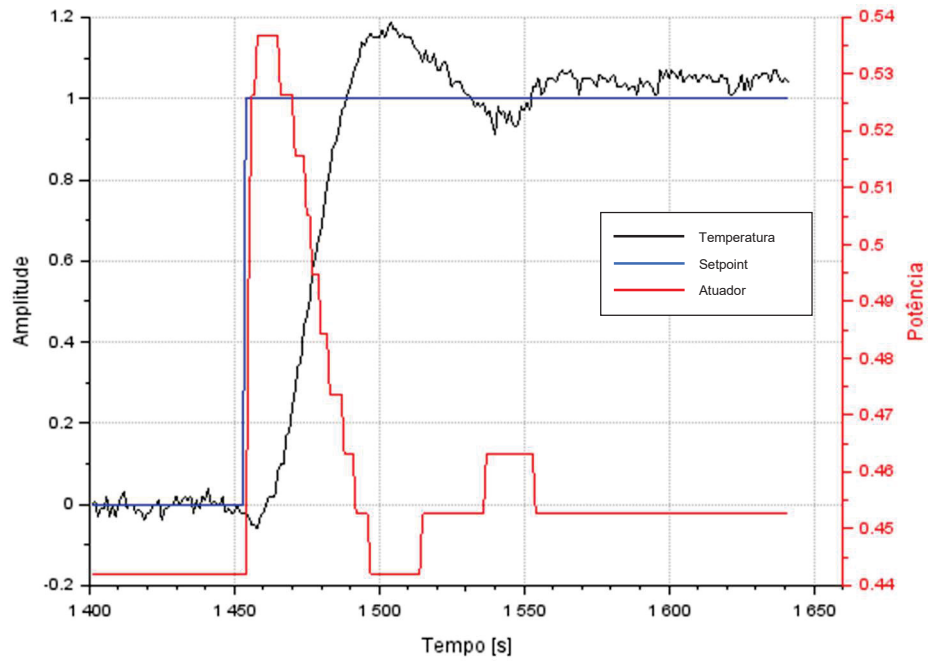
FONTE: O autor (2023).

Os índices IAE e ISE apresentados na Tabela 9 indicam a presença de interação no controle de ambas as variáveis de processo da matriz da planta. Por exemplo, no que se refere aos valores obtidos para o controlador $G_{c_1}(s)$, o índice IAE teve uma diminuição na ordem de 4 vezes da técnica do IMC para a ITAE-s, enquanto os valores obtidos para o controlador $G_{c_2}(s)$ se mantiveram na ordem de 1,5 vezes.

6.4 SIMULAÇÃO DO SISTEMA APÓS SINTONIA DOS CONTROLADORES

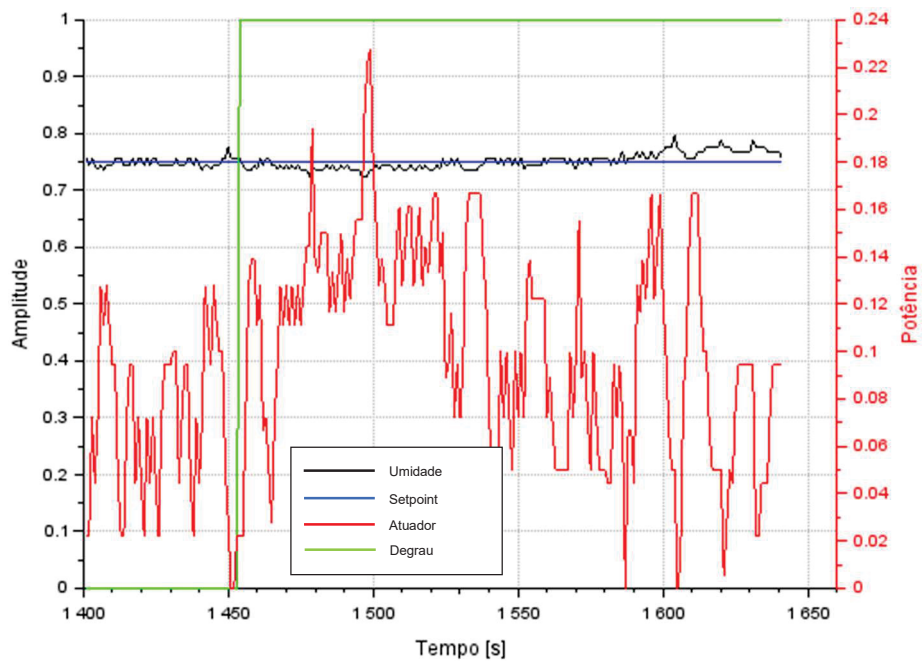
Na simulação da estrutura de controle descentralizada, podemos obter os gabaritos temporais com os controladores descentralizados sem desacoplamento para o método escolhido, IMC, projetados do tipo PID, que podem ser observados na Figura 28 a 31.

FIGURA 28 - RESPOSTA DA TEMPERATURA AO CONTROLADOR IMC NA MALHA TEMPERATURA, PARA UM $\Delta T = 1^\circ\text{C}$



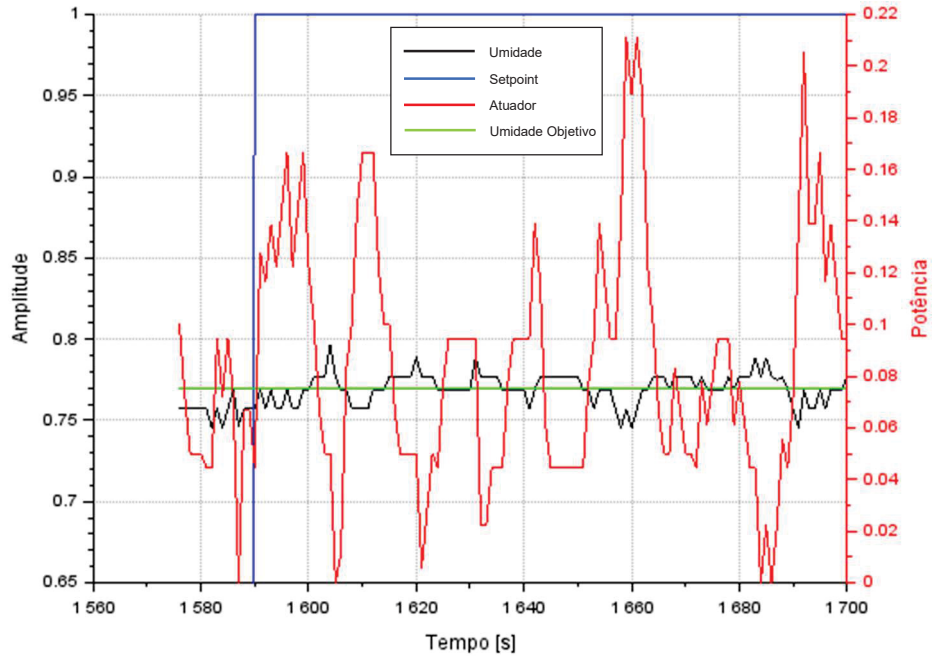
Fonte: O autor (2023).

FIGURA 29 - RESPOSTA DA UMIDADE AO CONTROLADOR IMC NA MALHA TEMPERATURA, PARA UM $\Delta T = 1^\circ\text{C}$



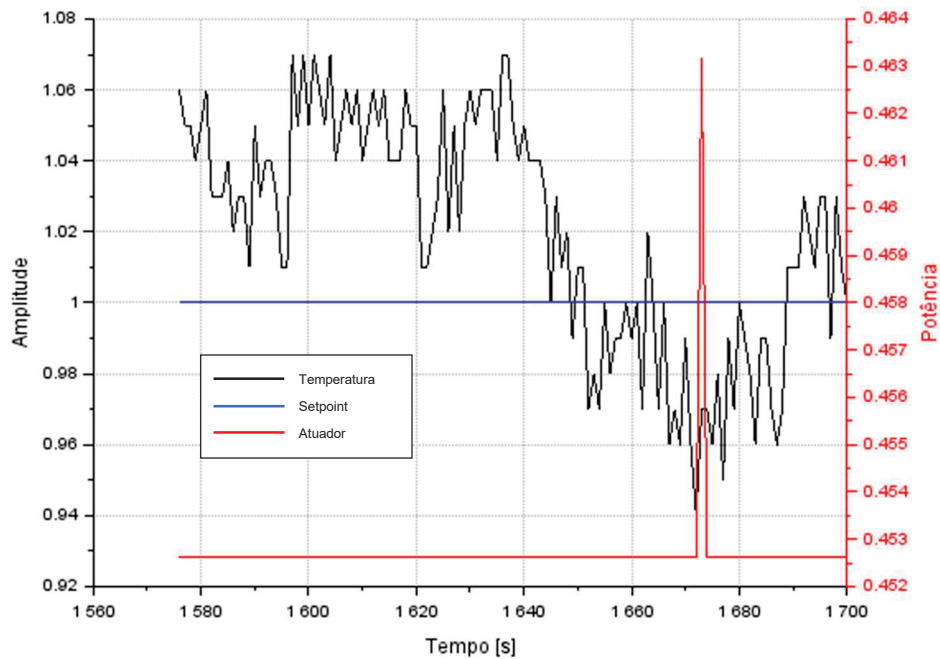
Fonte: O autor (2023).

FIGURA 30 - RESPOSTA DA UMIDADE AO CONTROLADOR IMC NA MALHA UMIDADE, PARA UM $\Delta U = 2\%$



Fonte: O autor (2023).

FIGURA 31 - RESPOSTA DA TEMPERATURA AO CONTROLADOR IMC NA MALHA UMIDADE, PARA UM $\Delta U = 2\%$



Fonte: O autor (2023).

A interação no processo *Temperatura x Umidade* foi do tipo fortemente acoplada durante os testes do módulo experimental, e o processo *Umidade x Temperatura* foi do tipo fracamente acoplada.

Podemos observar que os controladores projetados, conseguiram fazer o controle das duas malhas, sem problema de estabilidade e de saturação de algum atuador.

É observado uma dificuldade maior do controle da umidade relativa do ar, pois o controle da geração de névoa é feito pelo ângulo do servomotor, e a resposta desta malha é bem mais rápida do que a de temperatura, e considerando o tempo de amostragem de 5 s, ainda conseguiu ser eficiente em manter a variável manipulada dentro do *setpoint*.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesta dissertação de mestrado, o objetivo geral foi alcançado, uma vez que foi desenvolvido um sistema de controle multivariável para um módulo experimental dedicado ao estudo de um sistema *Temperatura x Umidade*, sendo possível monitorar e controlar as duas grandezas.

7.1 CONCLUSÕES

Na modelagem do módulo experimental, a matriz da planta (ordem 2 x 2) foi composta por um conjunto de funções de transferência aproximadas pelo modelo FOPDT a partir do teste em malha aberta, com parâmetros estimados por meio de método de otimização de *Nelder-Mead*. Os coeficientes de Theil obtidos auxiliam na pré-seleção dos parâmetros de cada modelo, que foram escolhidos em definitivo com os critérios de emparelhamento da malha.

No projeto dos controladores descentralizados, as técnicas de sintonia sem desacoplamento foram verificadas, sendo a técnica IMC aquela que apresentou uma melhor resposta, tanto no gabarito temporal simulado para o sistema em malha fechada, quanto para os índices de desempenho avaliados.

Com a implementação do sistema de controle proposto, observou uma interação entre as malhas do tipo fortemente acoplada, principalmente em relação a mudanças de temperaturas mais altas, em que o controlador da malha de umidade é mais exigido, chegando ao limite de geração de névoa em alguns casos, saturando o atuador.

7.2 TRABALHOS FUTUROS

As sugestões para trabalhos futuros nessa linha de pesquisa, e utilizando o módulo experimental são:

- aplicação da teoria de controle centralizado, para verificar se a matriz e controladores cheia apresenta um melhor desempenho, quando comparado com aquele obtido na estrutura de controle descentralizada;

- utilização do método relé-impulso para a determinação das funções de transferência da planta;
- projeto de um desacoplador para mitigar a interação entre as malhas;
- utilização de técnicas de projeto de controlador mais avançadas, como por exemplo as que utilizam otimização;
- utilização de ferramentas computacionais para a simulação da dinâmica do ar para obter mais informações do sistema;

REFERÊNCIAS

- ALBERTOS, P.; SALA, A. *Multivariable Control Systems*. London: Springer-Verlag, 2004. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/b97506>>. (Advanced Textbooks in Control and Signal Processing).
- BARROS, G. H. M. de Arruda e P. R. Estimação da função de sensibilidade baseada em experimento com relé em malha fechada. *Sba Controle & Automação*, v. 14, n. 3, 2003.
- BRAGA, Juliana. *Objetos de Aprendizagem, volume 1: introdução e fundamentos*. Santo André: [s.n.], 2014. v. 1.
- CAMPOS, M.C.M.M., TEIXEIRA, H.C.G. Controles Típicos de Equipamento e Processos Industriais, Editora Edgard Blucher. *Editora Edgard Blucher*, 2006.
- CRIPA, Camila Raquel Betin. Aplicação de controle Fuzzy a sistemas térmicos. 2020.
- H. THEIL. Economic forecasts and policy. *Amsterdam, North-Holland Publishing Co.*, v. 64, p. 32–35, 1961.
- JÖNSSON, Ida Synnøve. System identification for control of temperature and humidity in buildings. p. 84, 2015.
- K. J. ÅSTRÖM E T. HÄGGLUND. Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins. *Automatica*, v. 14, n. 3, 1984.
- L. A. G. CHÍA. No TitleAplicação e Melhorias do Método de Controle VRFT para Sistemas Multivariáveis. 2015.
- LJUNG, L. *System Identification: Theory for the User*. [S.l: s.n.], 1987.
- LÓPEZ, A.M., MILLER, J.A., SMITH, C.L., AND MURRILL, P.W. Tuning Controllers with Error-Integral Criteria. v. 14, p. 57–62, 1967.
- M.-J. HE, W.-J. CAI, W. NI, E L.-H. Xie. Rnga based control system configuration for multivariable processes. *Journal of Process Control*, v. 19, p. 1036–1042, 2009.
- M. G. M. S. E. SILVA. Achievable performance bounds for tall mimo systems. *IET Control Theory and Applications*, p. 736–743, 2010.
- M. LEE, K. LEE, C. KIM, E J. Lee. Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, v. 50, n. 7, p. 1631–1635, 2004.
- MATAMOROS, Manuel e colab. Temperature and humidity pid controller for a

bioprinter atmospheric enclosure system. *Micromachines*, v. 11, n. 11, 2020.

MOLLENKAMP, Robert A. *Controle Automático de Processos*. [S.l: s.n.], 1988.

NISE, NORMAN S. *Engenharia de Sistemas de Controle*. [S.l: s.n.], 2012.

NOVICKI, Rubens Eduardo Hauser et al. Open and Closed Loop Identification and Control of a Thermal System. *International Review of Chemical Engineering (IRECHE)*, v. 11, p. 10–17, 2019. Disponível em:

<<https://www.praiseworthyprize.org/jsm/index.php?journal=ireche&page=article&op=view&path%5B%5D=23724>>.

OGATA, Katsuhiko. *Engenharia de Controle Moderno*. [S.l: s.n.], 2011.

QI, Qi; DENG, Shiming. Multivariable control of indoor air temperature and humidity in a direct expansion (DX) air conditioning (A/C) system. *Building and Environment*, v. 44, n. 8, p. 1659–1667, 2009. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.11.001>>.

QUADROS, Thiago Dalgalo. IDENTIFICAÇÃO E CONTROLE DE SISTEMA TÉRMICO MULTIVARIÁVEL EXPERIMENTAL. 2019.

R. S. VARGA. Gersgorin and his circles. *Springer series in computational mathematics*, v. 36, p. 220–226, 2004.

ROVIRA, A., MURRILL, P.W., AND SMITH, C.L. Tuning Controllers for Setpoint Changes. *Instrumentation & Control Systems*, v. 42, n. 67–69, 1969.

S. OBERMANN. Process automation: Measuring multivariable controller performance. 2015. Disponível em: <<https://www.isa.org/intech/20150602/>>.

S. SKOGESTAD. Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning. *Journal of Process Control*, v. 13, p. 291–309, 2003.

S. SKOGESTAD; I. POSTLETHWAITE. *Multivariable Feedback Control: Analysis and Design*. 2. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2001.

SEBORG, Dale E.; THOMAS F. EDGAR. *Process Dynamics and Control Third Edition Dale*. [S.l: s.n.], 2011.

T. A. M. EUZÉBIO. Sintonia Ótima de Controlador PID Descentralizado para Processos MIMO. 2015.

WANG, Liheng; ZHU, Zhifeng. Research on Temperature and Humidity Decoupling Control of Constant Temperature and Humidity Test Chamber. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 711, n. 1, p. 012104, 1 Jan 2020. Disponível em:

<<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10021067.pdf>>.

APÊNDICE A – MODELAGEM DOS PROCESSOS FODPT DA MATRIZ DA PLANTA

A.1 Curvas experimentais (sinal de entrada e de saída no processo) obtidas a partir do teste com base na resposta ao degrau:

FIGURA 32 - TESTE 01 - RESPOSTA TEMPERATURA

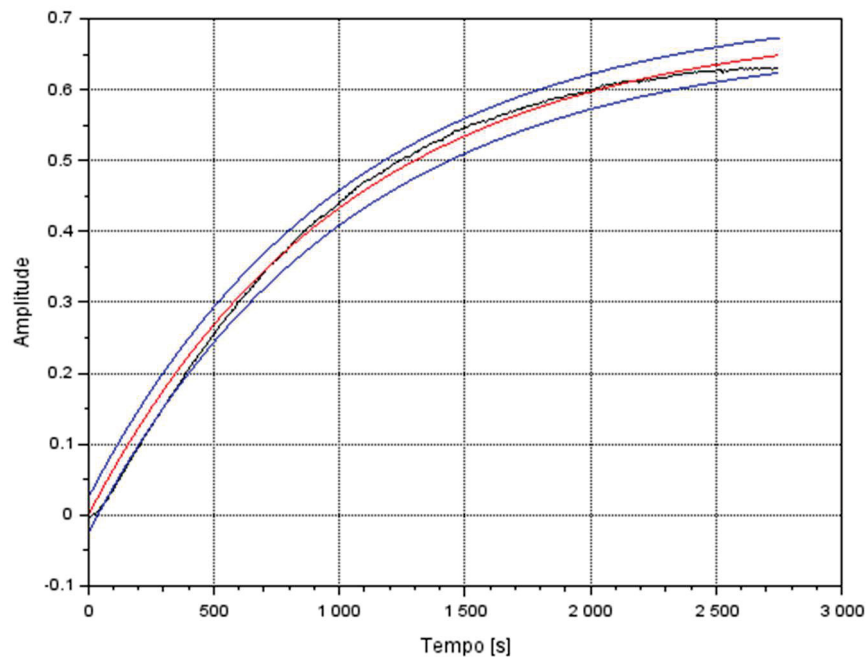


FIGURA 33 - TESTE 01 - RESPOSTA UMIDADE

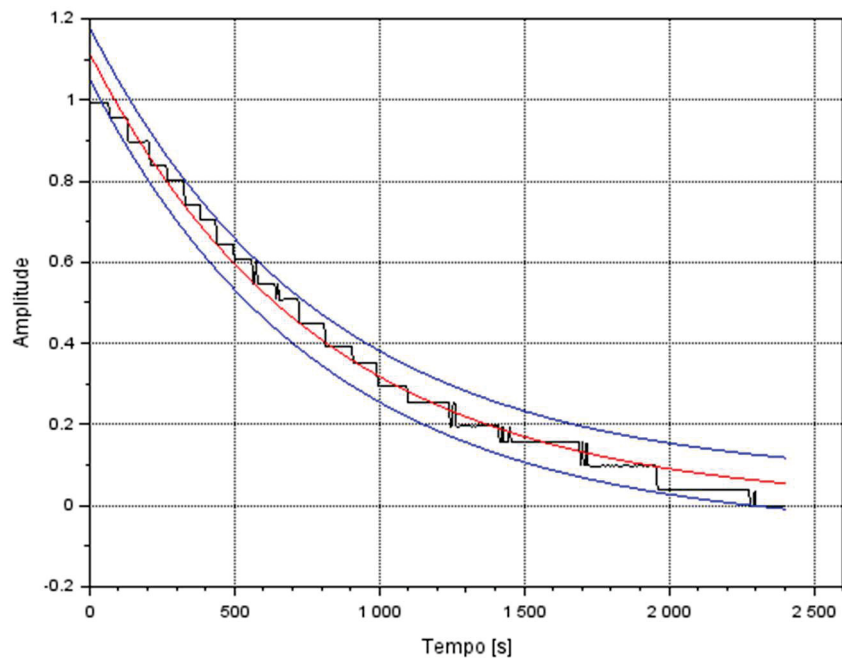


FIGURA 34 - TESTE 02 - RESPOSTA TEMPERATURA

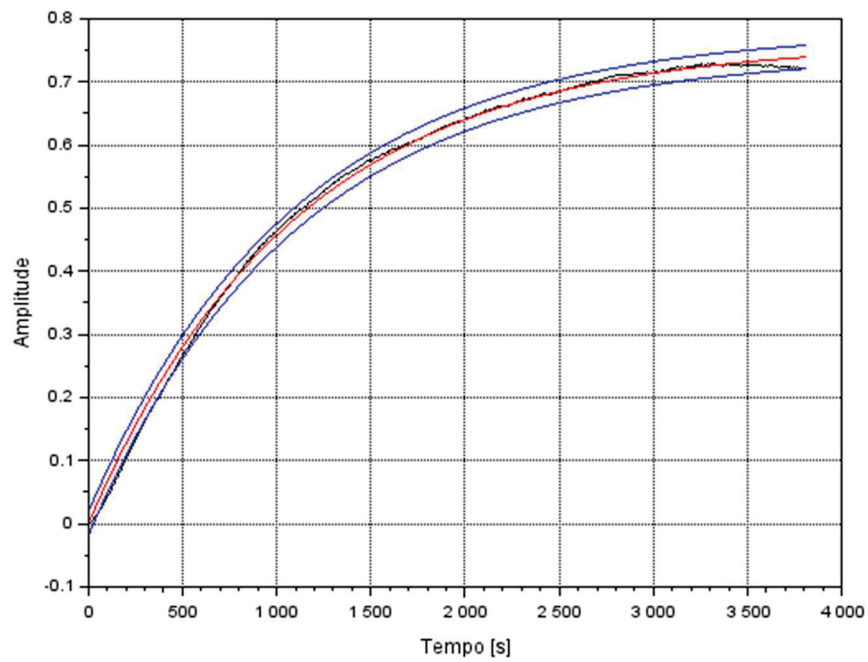


FIGURA 35 - TESTE 02 - RESPOSTA UMIDADE

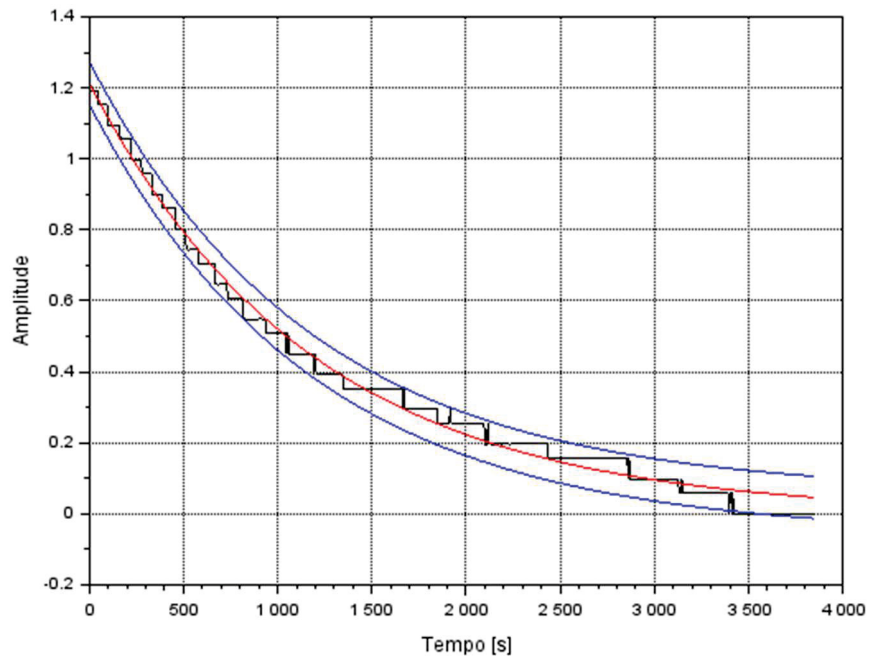


FIGURA 36 - TESTE 03 - RESPOSTA TEMPERATURA

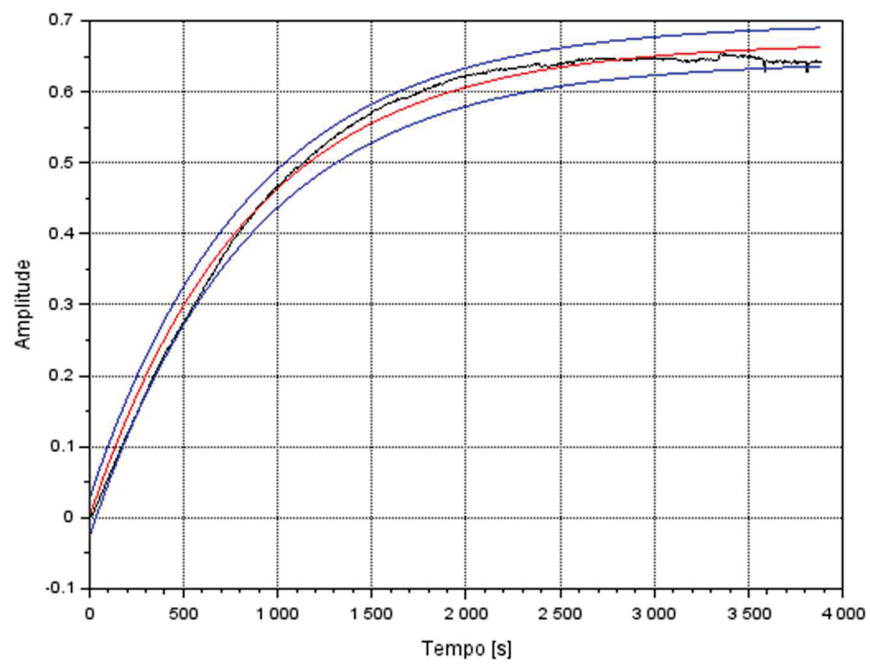


FIGURA 37 - TESTE 03 - RESPOSTA UMIDADE

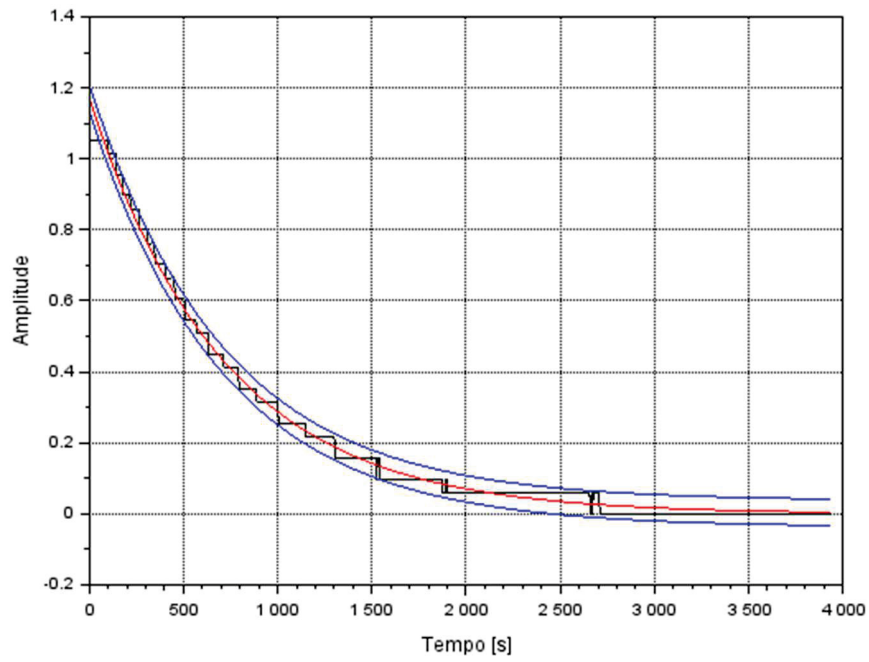


FIGURA 38 - TESTE 04 - RESPOSTA TEMPERATURA

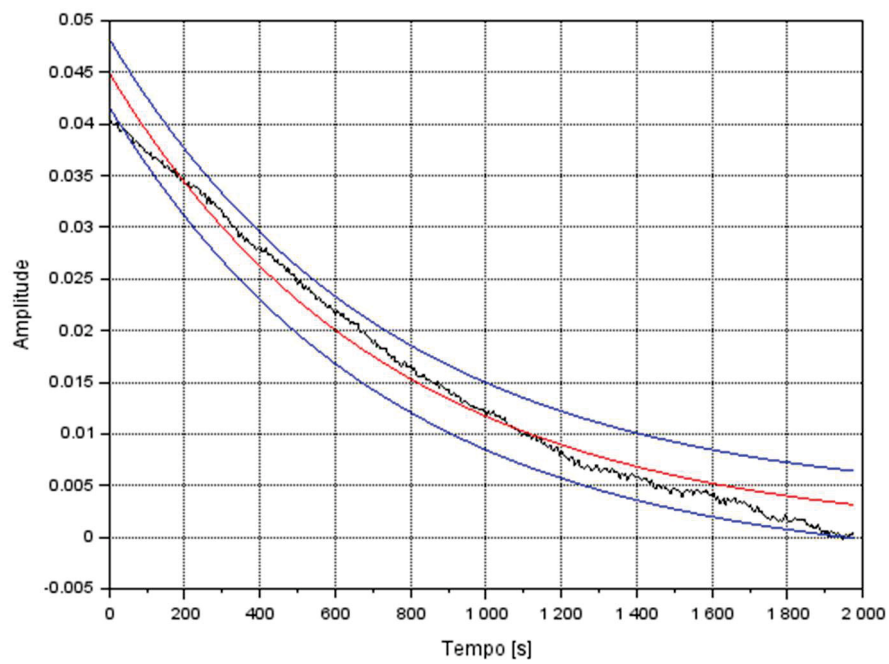


FIGURA 39 - TESTE 04 - RESPOSTA UMIDADE (LINEAR)

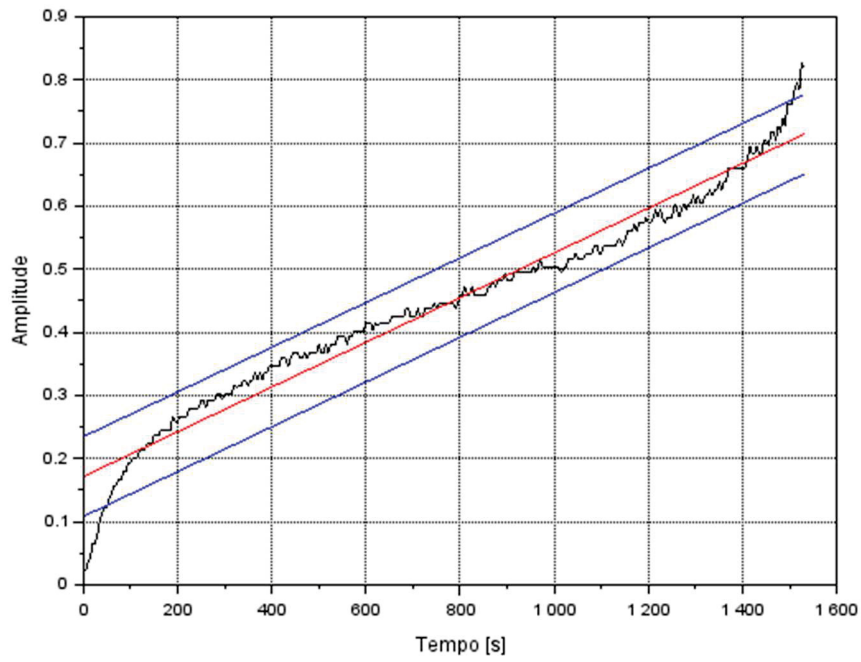


FIGURA 40 - TESTE 04 - RESPOSTA UMIDADE (EXPONENCIAL)

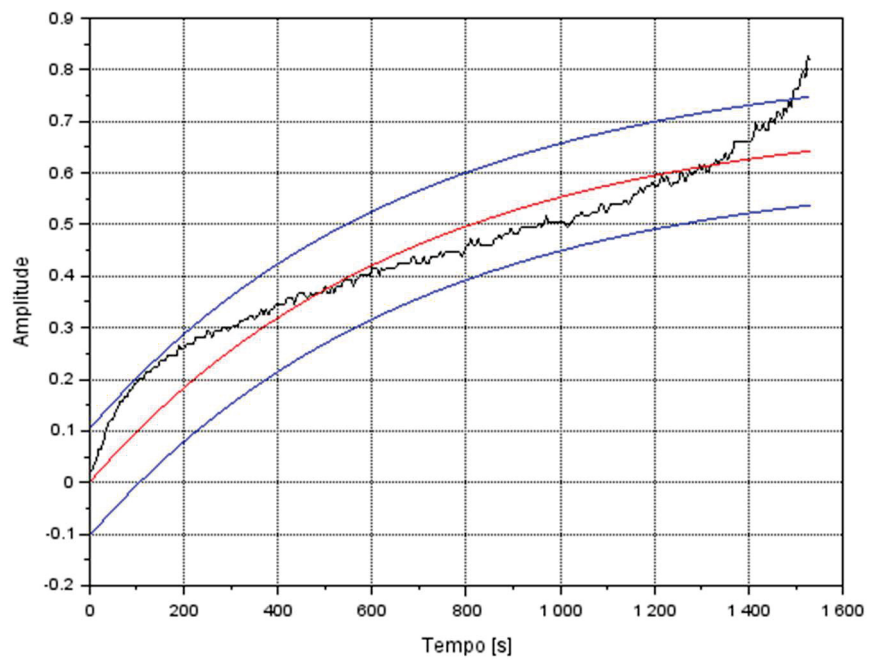


FIGURA 41 - TESTE 05 - RESPOSTA TEMPERATURA

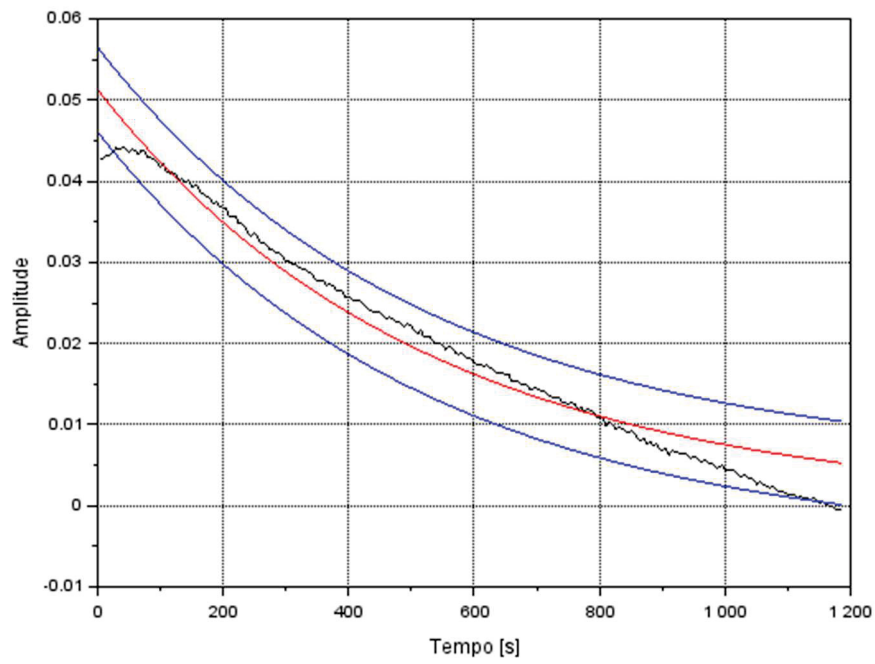


FIGURA 42 - TESTE 05 - RESPOSTA UMIDADE

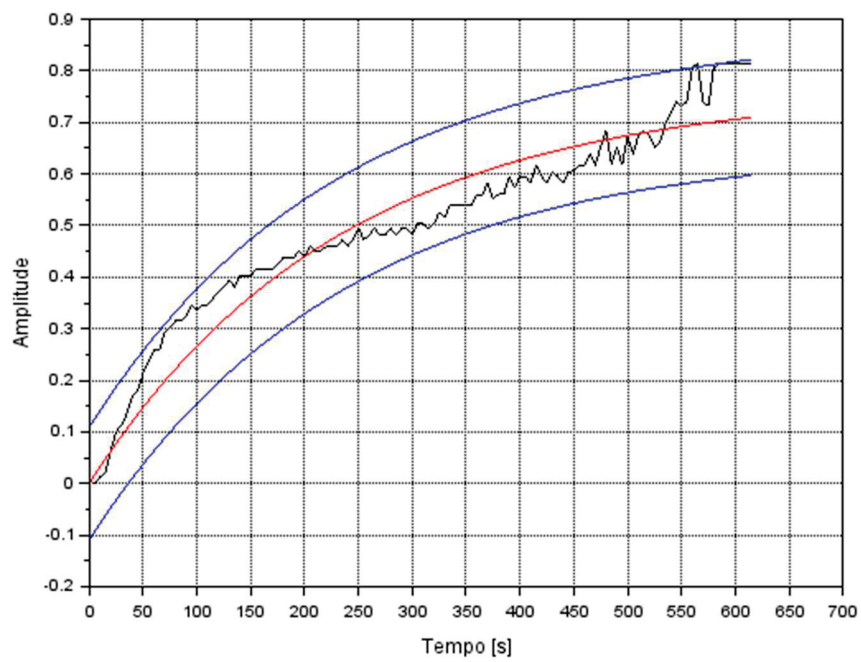


FIGURA 43 - TESTE 06 - RESPOSTA TEMPERATURA

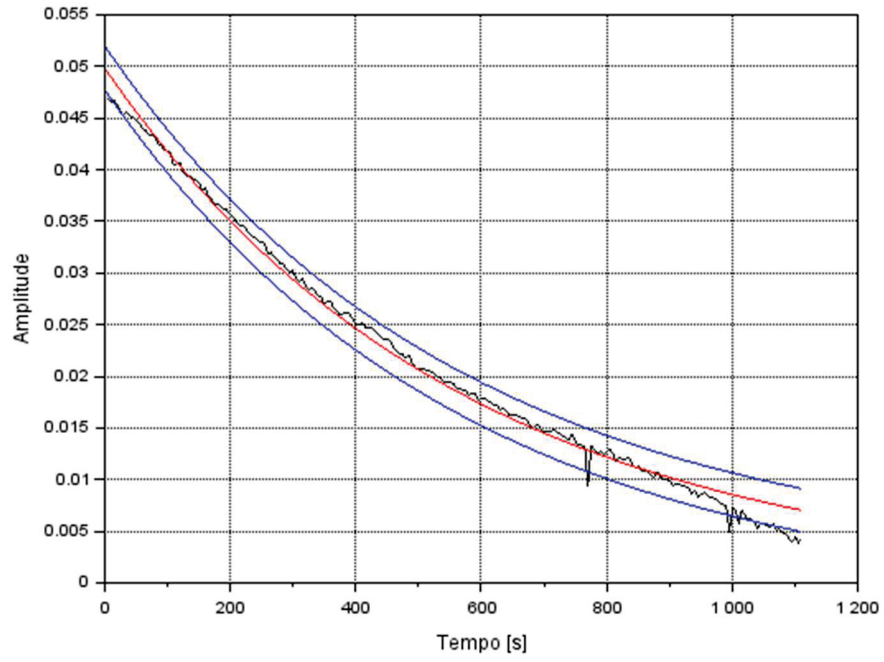


FIGURA 44 - TESTE 06 - RESPOSTA UMIDADE

