

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA**

**ANDRÉ LUIZ NUNES DO NASCIMENTO
SANDEY BASSO**

**CÂMARA CLIMÁTICA: DESENVOLVIMENTO DE UMA CÂMARA AUTOMATIZADA
PARA CONTROLE DE TEMPERATURA E UMIDADE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CURITIBA
2019**

ANDRÉ LUIZ NUNES DO NASCIMENTO

SANDEY BASSO

**CÂMARA CLIMÁTICA: DESENVOLVIMENTO DE UMA CÂMARA AUTOMATIZADA
PARA CONTROLE DE TEMPERATURA E UMIDADE**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação em Engenharia de Controle e Automação e Engenharia Eletrônica apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) e de Eletrônica (DAELN) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação e Engenheiro Eletrônico.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre J. Tuoto Silveira Mello

Coorientador: Eng. João Francisco Labres dos Santos

CURITIBA

2019

ANDRÉ LUIZ NUNES DO NASCIMENTO
SANDEY BASSO

CÂMARA CLIMÁTICA: DESENVOLVIMENTO DE UMA CÂMARA AUTOMATIZADA
PARA CONTROLE DE TEMPERATURA E UMIDADE

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro de Controle e Automação, do curso de Engenharia de Controle e Automação do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) para o aluno André Luiz Nunes do Nascimento, e para a obtenção do título de Engenheiro Eletrônico, do curso de Engenharia Eletrônica do Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) para o aluno Sandey Basso.

Curitiba, 9 de outubro de 2019.

Prof. Paulo Sérgio Walenia, Esp.
Coordenador de Curso
Engenharia de Controle e Automação

Prof. Robinson Vida Noronha, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Eletrônica

Prof^a. Annemarlen Gehrke Castagna, Ma.
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de
Curso de Engenharia Elétrica do DAELT

Prof^a. Carmen Caroline Rasera, Dr^a.
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de
Curso de Engenharia Eletrônica do DAELN

ORIENTAÇÃO

Prof. Alexandre J. Tuoto Silveira Mello, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

João Francisco Labres dos Santos, Eng.
Universidade Federal do Paraná
Co-Orientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Alexandre J. Tuoto Silveira Mello, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof^a. Carmen Caroline Rasera, Dr^a.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Luciano Scandelari, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

RESUMO

NASCIMENTO, André L. N. do; BASSO, Sandey. Câmara Climática: desenvolvimento de uma câmara automatizada para controle de temperatura e umidade. 2019. 97 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Curso de Engenharia Eletrônica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

Este trabalho de conclusão de curso apresenta o desenvolvimento de uma câmara climática, automatizada, para o controle em malha fechada da temperatura e umidade relativa do ar, a fim de auxiliar em pesquisas relativas ao teor de umidade em combustíveis florestais, no laboratório de incêndios florestais da Universidade Federal do Paraná. Seu constituinte principal é uma geladeira doméstica convencional, da qual seu sistema de refrigeração original servirá como atuador de refrigeração, adicionando outro sistema similar, à compressão, para a desumidificação do ar. Outros atuadores servirão para o aquecimento, uma resistência aletada; e para a umidificação do ar interno à câmara, objetivando um equipamento de baixo custo. Seus atuadores são controlados por um microcontrolador, o qual recebe informação do sensor, e terá componentes para a interface com o usuário, como teclado numérico e tela de caracteres; e interfaces de acionamento, como relés. São definidos os princípios e características dos componentes, assim como as técnicas utilizadas. Posteriormente são apresentadas as características do equipamento proposto, com seus subsistemas funcionando em conjunto. Por fim, como resultado de testes de funcionamento, são apresentados como operam as lógicas implementadas ao microcontrolador, o aspecto final da câmara e apresentadas graficamente curvas de funcionamentos das variáveis de interesse.

Palavras-chave: Temperatura. Umidade. Eletrônica. Controle.

ABSTRACT

NASCIMENTO, André L. N. do; BASSO, Sandey. Climatic Chamber: development of an automated climatic chamber to control temperature and humidity. 2019. 97 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação - Curso de Engenharia de Controle e Automação, Curso de Eletrônica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

This end of the course paper presents the development of an automated climatic chamber to control the closed loop temperature and humidity of the air, so as to provide support in research related to humidity levels in foresting fuels, at the Forest Fire Lab at Parana Federal University. Its main part consists of a regular domestic refrigerator, from which the original refrigeration system serves as a refrigeration agent, together with another similar system, for compression and dehumidification of the air. Other parts serve as heating agents, such as a fin resistance, as well as for the humidification of the air inside the chamber, resulting in an inexpensive piece of equipment. Its parts are controlled by a microcontroller, sensor equipped, with components for the user interface, such as a numeric keyboard and character pad; and an activating interface system using relays. The principles and characteristics of the components are defined, as well as the techniques employed. After that, the characteristics of the proposed equipment are presented, with its subsystems working as one. Finally, as a result of the operating tests, the logic implemented by the microcontroller is presented as well as the final layout of the chamber, through charts showing the working curves of the variables of interest.

Keywords: Temperature. Humidity. Electronic. Control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema de Refrigeração.....	18
Figura 2 – Compressor Alternativo Hermético.....	19
Figura 3 – Representação esquemática de uma serpentina de resfriamento e desumidificação de ar.....	20
Figura 4 – Evaporador do tipo placa e serpentina com aletas.....	21
Figura 5 – Resistência aletada.....	22
Figura 6 – Ponto de orvalho em relação à temperatura do ar e da umidade relativa do ar.....	23
Figura 7 – Temperaturas associadas a uma superfície aletada.....	24
Figura 8 – Esquemas para satisfazer condições de baixa umidade: operação a temperatura muito baixa na saída da serpentina (a); através do aquecimento do ar (b).....	25
Figura 9 – Umidificador Komeco, e atuador ultrassônico interno.....	26
Figura 10 – Relé Eletromecânico.....	27
Figura 11 – Relé de Estado Sólido.....	28
Figura 12 – Display LCD 20x4.....	29
Figura 13 – Exemplo de sistema de controle em malha aberta.....	30
Figura 14 – Exemplo de sistema de controle em malha fechada.....	31
Figura 15 – Exemplo de uma aplicação do controlador Liga-Desliga. Linha pontilhada a variável de controle, a pontilhada a de processo.....	33
Figura 16 – Controle Liga-Desliga de temperatura.....	34
Figura 17 – Diagrama de controle por matriz de ganho com a posição do controlador, matriz e planta.....	36
Figura 18 – Respostas ao degrau em malha aberta.....	38
Figura 19 – Resposta ao degrau da temperatura.....	39
Figura 20 – Controle realimentado usando PID.....	40
Figura 21 – Efeito da variação dos parâmetros na resposta de um sistema de primeira ordem.....	41
Figura 22 – Curva de resposta em forma de S.....	44
Figura 23 – Curva de resposta com oscilação sustentada com período P_{CR}	45
Figura 24 – Exemplos de câmaras para controle de temperatura e umidade.....	49
Figura 25 – Diagrama em blocos.....	50
Figura 26 – Imagem da placa EK-TM4C1294XL TM4C1294 Connected LaunchPad Board.....	51
Figura 27 – Representação física e dimensões do sensor DHT22.....	52
Figura 28 – Representação da pinagem do sensor DHT22.....	53
Figura 29 – Teclado matricial de membrana 12 teclas.....	54
Figura 30 – Circuito interno e pinagem do optoacoplador 4N25.....	55
Figura 31 – Módulo Relé 8 Canais.....	55
Figura 32 – Atuador de desumidificação.....	57
Figura 33 – Vista traseira dos condensadores dos sistemas de refrigeração e desumidificação.....	58
Figura 34 – Atuador de umidificação do ar.....	59
Figura 35 – Sistema de abastecimento do umidificador.....	60
Figura 36 – Atuador da refrigeração e do aquecimento da câmara.....	61
Figura 37 – Interface de comunicação e componentes.....	62
Figura 38 – Componentes eletrônicos e conexões.....	62

Figura 39 – Vista interna e traseira da câmara.	63
Figura 40 – Resposta ao degrau da temperatura.	64
Figura 41 – Resposta ao método de Ziegler-Nichols do Limiar de Oscilação.	65
Figura 42 – Controle de Temperatura Proporcional a 25%.	66
Figura 43 –IHM em funcionamento.	68
Figura 44 – Fluxograma da função principal implementada.	69
Figura 45 – Fluxograma da função de aquecimento.	70
Figura 46 – Fluxograma da função de refrigeração.	70
Figura 47 – Fluxograma da função de umidificação.	71
Figura 48 – Fluxograma da função de desumidificação.	71
Figura 49 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para um setpoint de 20 °C e 60 % UR.	73
Figura 50 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para um setpoint de 26.7 °C e 25 % UR.	74
Figura 51 – Temperatura e umidade do ar, em segundos, para um setpoint de 26.7 °C e 30 % UR.	75
Figura 52 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para um setpoint de 26.7 °C e 50 % UR.	75
Figura 53 – Temperatura e umidade do ar, em segundos, para uma mudança de setpoint de UR, a 26.7 °C, de 80 % para 95 % UR.	76
Figura 54 – Temperatura e umidade do ar, em segundos, para um setpoint de 21.1 °C e 30 % UR.	76
Figura 55 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para um setpoint de 12 °C e 95 % UR.	78
Figura 56 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para um setpoint de 21.1 °C e 95 % UR.	78
Figura 57 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para um setpoint de 34 °C e 95 % UR.	79
Figura 58 – Temperatura, pelo tempo em segundos, para um setpoint de 25 °C., com distúrbio (abertura de porta).	80
Figura 59 – Temperatura, pelo tempo em segundos, para um setpoint de 26.7 °C.	80
Figura 60 – Temperatura, pelo tempo em segundos, para um setpoint de 30 °C.	80
Figura 61 – Temperatura, pelo tempo em segundos, para um setpoint de 35 °C.	81
Figura 62 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para um setpoint de 26.7 °C e 40 % UR.	87
Figura 63 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para um setpoint de 26.7 °C e 50 % UR.	87
Figura 64 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de setpoint de UR, a 21.1 °C, de 80 % para 70 %.	88
Figura 65 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de setpoint de UR, a 21.1 °C, de 70 % para 50 %.	88
Figura 66 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de setpoint de UR, a 21.1 °C, de 50 % para 40 %.	89
Figura 67 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de setpoint de UR, a 21.1 °C, de 40 % para 30 %.	89
Figura 68 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de setpoint de UR, a 26.7 °C, de 30 % para 40 %.	90
Figura 69 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de setpoint de UR, a 26.7 °C, de 30 % para 40 %.	90

Figura 70 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de setpoint de UR, a 26.7 °C, de 40 % para 50 %.	91
Figura 71 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de setpoint de UR, a 26.7 °C, de 40 % para 50 %.	91
Figura 72 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de setpoint de UR, a 26.7 °C, de 70 % para 80 %.	92
Figura 73 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para um setpoint de 26.7 °C e 80 % UR.	92
Figura 74 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de setpoint de UR, a 26.7 °C, de 80 % para 90 %.	93
Figura 75 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de setpoint de UR, a 26.7 °C, de 60 % para 70 %.	93
Figura 76 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de setpoint de UR, a 26.7 °C, de 50 % para 70 % e de 70 % para 95 %.	94
Figura 77 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de setpoint de UR, a 12 °C, de 80 % para 70 %.	94
Figura 78 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de setpoint de UR, a 34 °C, de 95 % para 80 %.	95
Figura 79 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de setpoint de UR a 34 °C de 95 % para 70 %.	95
Figura 80 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de setpoint de UR a 34 °C de 70 % para 50 %.	95
Figura 81 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de setpoint de UR, a 34 °C, de 50 % para 30 %.	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada na resposta ao degrau.....	44
Tabela 2 – Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada no ganho crítico.	45
Tabela 3 – Parâmetros do controlador CHR obtidos da resposta à mudança de setpoint.	46
Tabela 4 – Parâmetros do controlador CHR obtidos da resposta a perturbações.....	46
Tabela 5 – Parâmetros do controlador do método Cohen-Coon.....	47
Tabela 6 – Pressão máxima de vapor d'água (E) em mmHg.....	97

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA	12
1.2 PROBLEMA E PREMISSAS	13
1.3 OBJETIVOS	14
1.3.1 Objetivo Geral	15
1.3.2 Objetivos Específicos	15
1.4 JUSTIFICATIVA	15
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	16
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 O SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO	18
2.2 O SISTEMA DE AQUECIMENTO	21
2.3 O SISTEMA DE UMIDIFICAÇÃO E DESUMIDIFICAÇÃO	22
2.3.1 O sistema de desumidificação	24
2.3.2 O sistema de umidificação	26
2.4 RELÉS	26
2.4.1 Relés de Estado Sólido	27
2.5 <i>LCD</i>	28
2.6 CONTROLE	29
2.6.1 Introdução	29
2.6.3 Controle Liga Desliga	32
2.6.4 O Controle Multivariável	34
2.7 PID	36
2.7.1 Introdução	36
2.7.1 Sintonia Ziegler e Nichols	43
2.7.2 Sintonia Chien, Hrones e Reswick	45
2.7.3 Sintonia Cohen-Coon	46
3 MODELO DE EQUIPAMENTO PROPOSTO	48
3.1 ELETRÔNICA	49
3.1.1 Microcontrolador	50
3.1.2 Sensor de temperatura e umidade	52
3.1.3 Interface	53
3.2 IMPLEMENTAÇÃO	56
3.1.3 Integração dos subsistemas	56
3.1.3 PID	63

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	68
4.1 CURVAS DE TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA	72
4.2 CURVAS AQUECIMENTO PID	79
5 CONCLUSÕES	82
REFERÊNCIAS	83
APÊNDICE A – Curvas de temperatura e umidade relativa do ar.	87
ANEXO A – Tabela de pressão máxima de vapor d'água (E) em mmHg.	97

1 INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, o condicionamento de ar pode ser dividido em duas categorias distintas de acordo com sua aplicação: para o conforto e industrial. O condicionamento de ar na indústria pode ser encontrado em aplicações tais como: na indústria de impressão, onde um rígido controle da umidade se faz necessário para uma fixação adequada das cores em impressão colorida; na área têxtil, que busca limitar o rompimento de fibras e reduzir a eletricidade estática; na produção de material fotográfico, onde o material fotográfico se deteriora rapidamente a altas temperaturas e umidades (MATOS, 2010); na fabricação de salames, onde nas fases de fermentação e desidratação, a sala de cura atua no controle de temperatura (de 20 a 25°C), na umidade relativa (90 a 95%) e na velocidade do ar climatizado (SHIMOKOMAKI *et al.*, 2006 *apud* FIEIRA, 2014); e nessa categoria podemos incluir também a aplicação em ensaios laboratoriais, onde, na indústria madeireira, avaliam-se as propriedades mecânicas da madeira, como a sua capacidade de absorver cargas e resistência a choques, que podem variar com a alteração do teor de umidade, Como exemplo de experimentos da influência da umidade na resistência de uma espécie de madeira, os corpos de prova (amostras de toras de árvores) são postos em condição variadas de umidade: na condição seca os corpos de prova são submetidos à secagem em estufa com circulação de ar a 103 °C; e na condição climatizada a temperatura ambiente é de 20 ± 2 °C e 65% de umidade relativa (PERTUZZATTI, 2017).

Para esse tipo de aplicação, é recorrente utilizar algum método de controle, tal como o *feedback control*, ou controle realimentado, que é uma estratégia bastante robusta, em que a saída de um sistema rastreia um sinal de referência, o mais próximo possível, comparando este continuamente com uma referência e aplicando uma ação corretiva (JANERT; K., P., 2014).

Segundo Ogata (2010), o controle automático é parte importante em vários campos da engenharia e da ciência, intrínseco em sistemas de veículos espaciais, sistemas robóticos, modernos sistemas de manufatura, incluindo operações industriais que envolvam o controle de temperatura e umidade. Nesse contexto, contempla-se uma natureza multi e interdisciplinar, que abrange áreas como sistemas microcontrolados, eletrônica, assim como formas de controle analógico e digital.

Sistemas de controle podem ser divididos em duas categorias: sistemas em malha aberta e sistemas em malha fechada. Em um sistema em malha aberta, o controlador calcula independentemente a exata tensão ou corrente necessária para realizar o trabalho, porém sem nunca saber se sua atuação foi precisa, por não haver uma realimentação (KILIAN, 2005).

Já a utilização de sistemas em *feedback* requer relativamente pouco conhecimento sobre o sistema controlado, e desde que se saiba em que direção “empurrar” o sistema quando ele tiver saído do caminho, pode-se criar uma malha de realimentação (JANERT; K., P., 2014). Segundo Skogestad e Postlethwaite (2005), as razões fundamentais para usar o controle em *feedback* são a presença de incerteza devido ao sinal de distúrbio desconhecido, do modelo, ou mesmo uma planta instável, e por último porque plantas instáveis só podem ser estabilizadas por malha fechada. Em um sistema em malha fechada a saída do processo (variável controlada) é constantemente monitorada por um sensor, o qual faz a amostragem da saída do sistema, comparando continuamente com um valor de referência, aplicando uma ação corretiva de modo que a saída rastreie este valor o mais próximo.

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Inserido entre as inúmeras aplicações do controle de temperatura e umidade relativa do ar, temos a aplicação onde se insere o caso de estudo deste trabalho, especificamente no Laboratório de Incêndios Florestais, do Departamento de Ciências Florestais da Madeira, no setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná. O Laboratório de Incêndios Florestais desenvolve pesquisas e, com instalações e equipamentos, realiza aulas práticas das disciplinas de graduação e pós-graduação em engenharia florestal, desenvolve pesquisas de iniciação científica, dissertações, teses e projetos financiados pelas instituições de fomento. No local são desenvolvidas pesquisas sobre o papel do fogo nos ecossistemas florestais, os efeitos produzidos nos ecossistemas, relação flora e fogo, fauna e fogo, pesquisas sobre prevenção e combate aos incêndios florestais (UFPR, 2019).

No escopo ambiental, o teor de umidade age no contexto de incêndios florestais. Em um combustível florestal, a incidência da umidade influencia no risco, na ignição, na ocorrência, na propagação, na intensidade e na extinção de um

incêndio florestal (LOPES, 2013). Ainda segundo Lopes (2013), um procedimento habitual de determinação laboratorial do teor de umidade de equilíbrio (*EMC* - “*equilibrium moisture content*”) de materiais higroscópicos, ou seja, capazes de absorver umidade do ar (DICIO, 2019), incluindo combustíveis florestais, envolve a colocação do combustível num ambiente com temperatura e umidade constantes, assim permanecendo até que o teor de umidade atinja um nível constante. Para uma câmara climática, curvas referentes aos processos de troca de vapor por absorção (incorporação de uma substância em um estado em outra substância em um estado diferente) e adsorção (adesão de moléculas de um fluido a uma superfície sólida), e teor de umidade de equilíbrio são efetuados variando-se apenas, ou temperatura ou umidade relativa do ar no interior da câmara.

Contemplando a aplicação de sistemas de controle e eletrônica em áreas relacionadas a sistemas microcontrolados, este trabalho visa solucionar o problema relacionado ao controle de temperatura do ar, simultaneamente com a sua umidade relativa, em uma câmara destinada para fins laboratoriais, com o desenvolvimento de um equipamento de baixo custo que consiga obter resultado satisfatório.

1.2 PROBLEMA E PREMISSAS

O problema que o equipamento visa solucionar, no laboratório citado na Seção 1.1, é o condicionamento do ar, em termos de sua temperatura e umidade relativa, em *ranges* satisfatórios considerando valores pré-determinados pelo usuário. Para tanto, utilizando como parte principal uma geladeira convencional, a compressor (componente básico de um sistema de compressão a vapor, o qual compreende também o condensador, dispositivo de expansão e o evaporador). Seu sistema de refrigeração, como na maior parte destes sistemas, opera com um controle liga-desliga comandado por um termostato (PROCEL, 2007 *apud* ÁVILA, 2011). O compressor funciona à velocidade fixa independente da condição externa, a qual terá influência minimizada o máximo possível com um abrigo longe de luz solar ou qualquer fonte de calor próxima, e com uma vedação eficiente própria do aparelho refrigerador. Além disso, o carregamento térmico devido à massa de material vegetal dos ensaios não oferecerá magnitude significativa, e compreende-se esse sistema como um processo lento, com um tempo médio tanto para a estabilização de temperatura,

quanto para a umidade, em torno de 30 minutos (MICROVOLT, 2018), para uma câmara com dimensões menores que a do equipamento utilizado nesse trabalho.

Na prática, uma das grandes dificuldades a ser resolvida é o controle da umidade do ar. Para isso, a possível solução técnica para remover o excesso de umidade do ar de forma eficaz é a desumidificação por condensação (TROTEC, 2018), que necessita, assim como para o sistema de refrigeração, de um sistema de compressão a vapor, em que o evaporador resfriado fará com que o vapor de água que ocorre no ar se condense em forma de água líquida. Quanto à umidade relativa do ar do ambiente exterior à uma estufa, a sua variação afeta a umidade relativa do ar no seu interior, efeito que é reduzido à medida que se aumenta a temperatura do ensaio, ou simplesmente garantindo uma boa isolamento (LOPES, 2011). Nota-se que a umidade externa do ar pode ser considerada uma perturbação no processo térmico, e nesse aspecto, há a necessidade de estudar técnicas específicas para tratar desse tipo de problema.

1.3 OBJETIVOS

Pretende-se, com esse trabalho, desenvolver um sistema de condicionamento e controle automatizado, formado por uma interface com o usuário, sensoriamento e atuadores como umidificador, desumidificador, aquecedores e resfriamento do ar interior à uma câmara, auxiliados por ventiladores. Aos sistemas envolvidos aplicam-se conceitos de eletrônica, eletricidade e sistemas de controle afim de desenvolver um sistema de relativo baixo custo, operacional, aplicável à sua finalidade qual seja responsável pelo controle térmico e de umidade relativa do ar do seu interior. Portanto, o objetivo do sistema será implementá-lo em uma câmara, adaptada de um refrigerador comum de uso residencial, e através de um dispositivo eletroeletrônico microcontrolado, com uma interface de interação com o usuário através de um *display LCD* (“*Liquid Crystal Display*” ou Display de Cristal Líquido) e um teclado numérico, conseguir o controle das variáveis de temperatura, tanto para aquecimento e refrigeração; e de umidade relativa do ar, através da umidificação como também da desumidificação.

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral da proposta é desenvolver um sistema, de baixo custo, responsável pelo controle da temperatura e da umidade do ar, em uma câmara climática automatizada.

1.3.2 Objetivos Específicos

Inicialmente para este trabalho, objetiva-se os seguintes tópicos:

- Realizar revisão bibliográfica sobre os conceitos de eletrônica e termodinâmica, sistemas de controle, sistemas microcontrolados, assim como sobre os dispositivos eletrônicos envolvidos para a obtenção e transmissão de temperatura e umidade;
- Verificar o funcionamento das estruturas similares aplicadas;
- Estudar os métodos de sistemas de controle aplicáveis existentes, assim como os componentes necessários a confecção da câmara, de seu sistema eletrônico, de potência e controle;
- Desenvolver o circuito eletrônico e o *firmware* para o microcontrolador, a interface com o usuário em um *display*, juntamente com botões para a inserção dos valores de referência;
- Integrar os subsistemas elétricos, eletrônicos, equipamentos e controlador para verificar sua funcionalidade e possíveis melhoras;

1.4 JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento desse sistema atende uma necessidade do Laboratório do Departamento de Ciências Florestais da Madeira, no setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná.

A partir da análise teórica e experimental, e do desenvolvimento de um dispositivo, pretende-se conseguir efetivamente um ambiente com temperatura e umidade relativa do ar controlados, com a aplicação de microcontroladores e sistemas de controle em malha fechada, sendo, portanto, o tema proposto uma oportunidade

de desenvolvimento prático de alguns temas estudados em variadas disciplinas, motivando o seu desenvolvimento.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Realizar a coleta e seleção de trabalhos e artigos específicos relacionados para uma consulta referencial, com o objetivo de adquirir o embasamento teórico para a realização deste projeto. Efetuar uma pesquisa geral da literatura relacionados aos sistemas em questão, os atuadores envolvidos, sensores, eletrônica e sistemas microcontrolados, para aplicar ao controlador o melhor método que atenda à necessidade do equipamento, e assim efetuar os ajustes necessários.

A seguir, visa-se realizar um estudo da viabilidade técnica e econômica do projeto para, assim, iniciar o processo de solução do problema, desenvolver os subsistemas necessários para a posterior montagem da câmara, conjuntamente com o levantamento dos materiais necessários para a execução da montagem integrada do equipamento.

Nas etapas finais, serão necessários testes de funcionamento; o levantamento de dados; análise dos resultados e conclusão.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

No primeiro capítulo, trata-se da apresentação da proposta já com uma breve revisão bibliográfica, os objetivos gerais e específicos, a apresentação dos problemas, justificativas, a metodologia empregada no desenvolvimento do trabalho e a motivação para a sua realização, estabelecendo uma ideia sobre a organização do trabalho final a ser apresentado.

No capítulo seguinte, apresenta-se uma revisão bibliográfica referente à teoria da tecnologia proposta, aspectos teóricos intrínsecos ao projeto como os sistemas de refrigeração, aquecimento, umidificação e desumidificação. Também são apresentados conceitos referentes ao sistema de controle

O Capítulo 3 é destinado a apresentação dos conhecimentos abordados, de maneira mais aplicada, de modo a definir uma proposta do equipamento. Pretende-se definir detalhes da eletrônica e mostrar o resultado da implementação da proposta,

com a integração dos subsistemas. Por fim, o resultado da implementação de um controle PID no atuador de aquecimento.

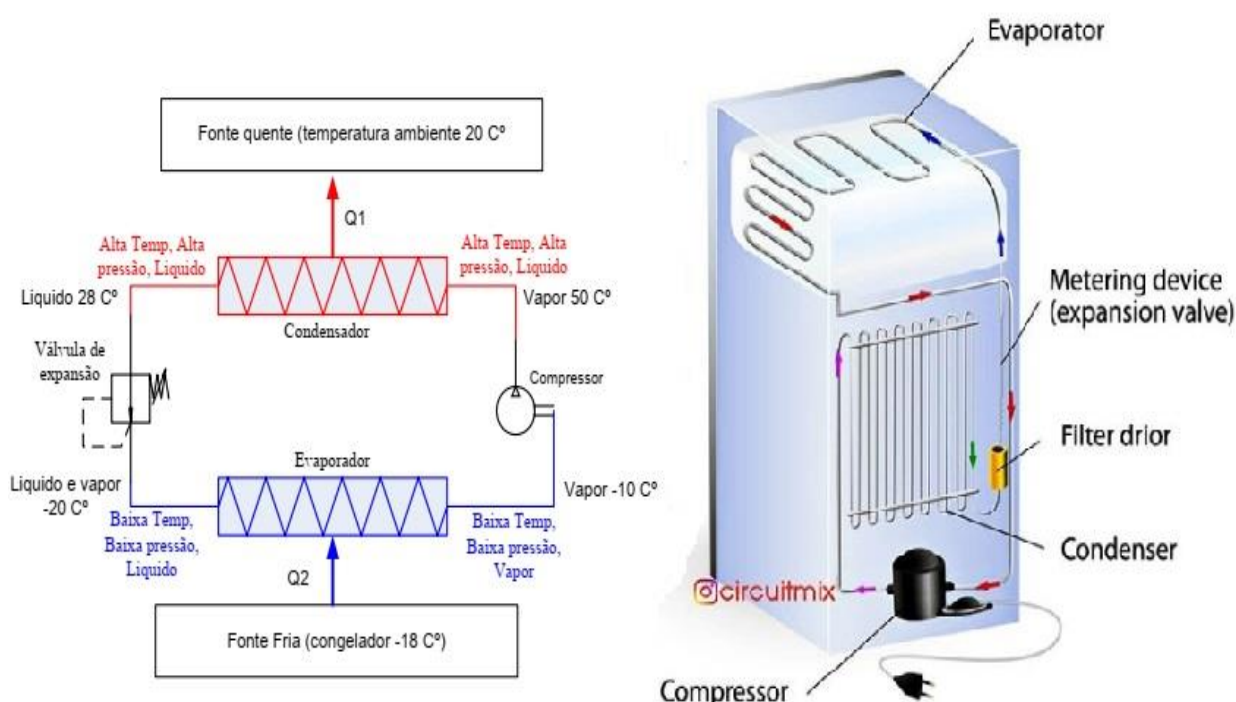
No Capítulo 4, pretende-se efetuar o levantamento dos resultados experimentais, análise dos dados e no Capítulo 5 a conclusão, verificando se o trabalho conseguiu cumprir seus objetivos de forma satisfatória.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

Nos sistemas de refrigeração (componente responsável pela redução da temperatura do ar interno à câmara), o sistema de compressão a vapor é o mais usado na prática. Neste sistema, o vapor é comprimido, condensado, tendo posteriormente sua pressão diminuída de modo que o fluido possa evaporar a baixa pressão (MATOS, 2010). O ciclo nesses sistemas, ilustrado na Figura 1, funciona basicamente com quatro componentes: compressor, condensador, válvula de expansão ou tubo capilar e evaporador.

Figura 1 – Sistema de Refrigeração.

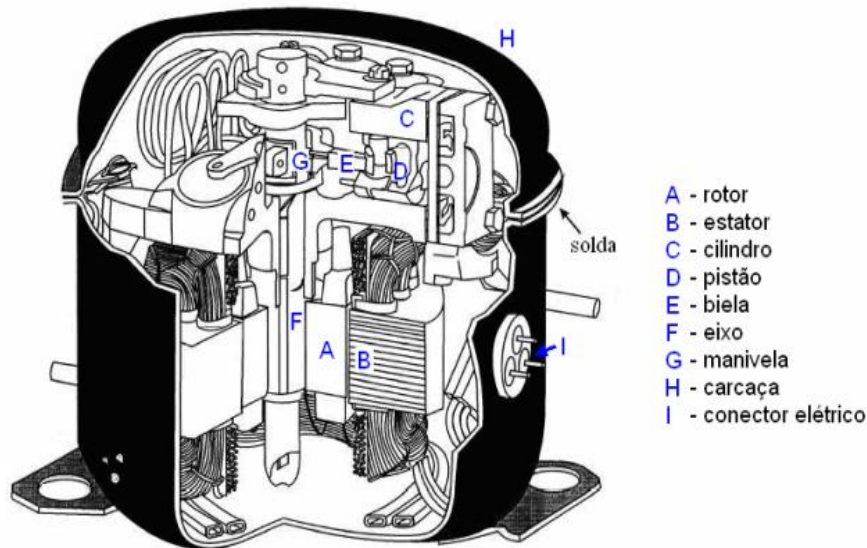


Fonte: Leandro (2006).

Considerado o coração do sistema de compressão à vapor, os compressores são divididos em dois tipos: nos quais o gás é comprimido por redução de volume, podendo ser alternativos (Figura 2) ou rotativos; e o compressor centrífugo, onde o gás é acelerado pelas pás de um rotor. Os utilizados na refrigeração residencial comum são os compressores alternativos herméticos (selado). O compressor hermético de refrigeração tem como função o aumento de pressão e temperatura do

fluido na fase de vapor, e consiste de um conjunto motorcompressor hermeticamente selado à uma carcaça de aço soldada, onde o motor e o conjunto de compressão estão encerrados num só corpo, o que resulta uma redução de tamanho e evita vazamentos, porém perdem um pouco de eficiência devido ao aquecimento do refrigerante (MATOS, 2010).

Figura 2 – Compressor Alternativo Hermético.



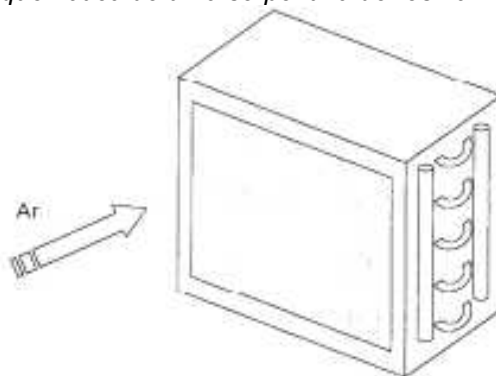
Fonte: HENKLEIN (2006).

A resposta de um sistema comandado por esses compressores, operando em regime permanente, a uma redução na carga térmica, é a diminuição da pressão e temperatura de evaporação, o que resulta numa redução da capacidade do compressor, que acaba por ser igual a uma nova carga de refrigeração, e pode implicar em temperaturas superiores à operação do motor. Um dos métodos empregados para a redução da capacidade do compressor referente a esse problema é o controle tudo ou nada, ou *on-off*. Adequado para sistemas de pequeno porte, onde normalmente as variações de temperatura no ambiente dão-se lentamente, evitando ciclos rápidos do compressor. Se este controle for aplicado a sistemas sujeitos a flutuações rápidas de carga, a máquina reciclará (paradas e partidas frequentes) causando esforços desnecessários no equipamento elétrico (MATOS, 2010).

Os condensadores (Figura 3) e evaporadores são trocadores de calor no sistema de refrigeração. Os condensadores basicamente são os trocadores de calor, através do qual o refrigerante que vem do compressor a alta pressão e temperatura,

troca calor com o ar, normalmente empregando aletas para uma melhor transferência de calor, passando o líquido refrigerante de vapor para líquido-condensado (MATOS, 2010).

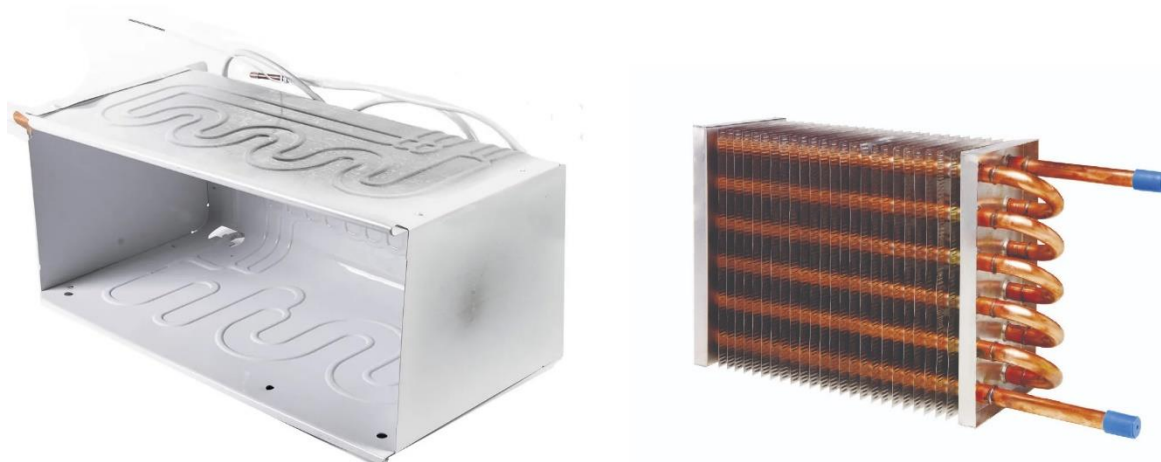
Figura 3 – Representação esquemática de uma serpentina de resfriamento e desumidificação de ar.



Fonte: Stoecker; Jabardo (2002).

O evaporador também é uma superfície de transferência de calor onde o líquido volátil é vaporizado, visando remover calor de determinado espaço ou objeto. Podem ser do tipo de tubo liso, de tubos aletados ou de placa (MATOS, 2010). O evaporador de placa, demonstrado na Figura 4, consiste em duas placas com sulcos por onde passa o fluido refrigerante, e é o que servirá para a refrigeração da câmara. Um evaporador de tubo aletado, representado na Figura 4, será empregado para o circuito de desumidificação. Sua escolha se deve pelo aumento da troca térmica, devido sua constituição composta por tubos que atravessam aletas, aumentando o contato com o ar. A convecção será forçada visando a maior capacidade de desumidificação, comparado a um evaporador de convecção natural, a considerar uma pequena carga térmica do atuador da ventilação.

Figura 4 – Evaporador do tipo placa e serpentina com aletas.



Fonte: FrioPeças (2019).

O funcionamento do sistema se dá com o fluido refrigerante entrando no compressor como vapor superaquecido e com baixa pressão, sendo comprimido para alta pressão pelo compressor, entrando então no condensador. Posteriormente, o refrigerante em mais alta temperatura e pressão que o ambiente, troca calor com o ar, normalmente ventilado através do condensador, de forma que o fluido condense. Em seguida, ao deixar o condensador como líquido sub-resfriado em alta pressão, o mesmo passa por um dispositivo de expansão (válvula de expansão). Na saída da válvula de expansão tem-se geralmente duas fases, mistura líquido vapor, à baixa pressão. Então, esta mistura entra no evaporador com pressão e temperatura mais baixa do que o ambiente a ser resfriado, o calor então é transferido para o fluido, que evapora. Por fim, o refrigerante deixa o evaporador como vapor superaquecido e entra novamente no compressor, completando um ciclo (LEANDRO, 2006).

2.2 O SISTEMA DE AQUECIMENTO

Para o aquecimento do ar, ou algum outro fluido, é comum a utilização de resistências (Figura 5) com alta capacidade de dissipação de potência, aplicado em chuveiros elétricos, processos industriais, aquecimento de líquidos e gases, entre outros. Basicamente um resistor é um dispositivo que dificulta a passagem de corrente

elétrica, o que gera um aquecimento do resistor devido à passagem de cargas elétricas, ao que se dá o nome de efeito Joule. Esse efeito é explicado em um nível atômico pelos choques internos causados por elétrons nos átomos do material (SILVA, 2017).

Figura 5 – Resistência aletada



Fonte: Nóbrega & Nóbrega (2019)

2.3 O SISTEMA DE UMIDIFICAÇÃO E DESUMIDIFICAÇÃO

O ar atmosférico pode ser considerado uma mistura de ar seco, vapor d'água e impurezas. Embora a composição do ar seco permaneça relativamente constante, a quantidade de vapor d'água no ar atmosférico varia consideravelmente por ser condensável a pressões e temperaturas usuais, razão pela qual as quantidades de ar úmido devem ser expressas de tal maneira que as quantidades relativas de vapor d'água e ar seco sejam sempre indicadas (MATOS, 2010).

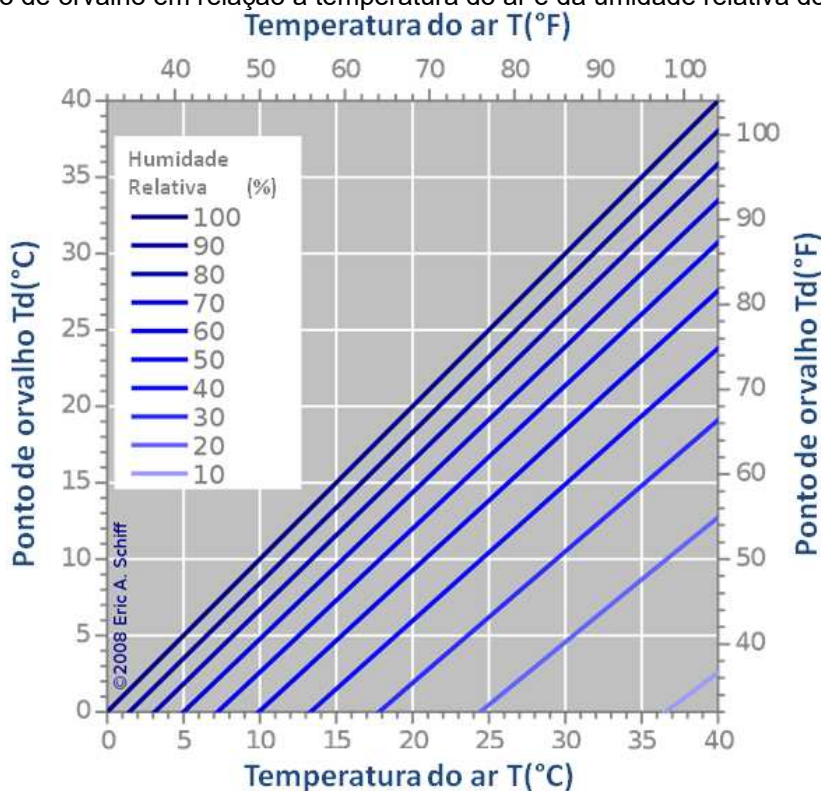
Existe, portanto, uma saturação do vapor de água no ar atmosférico (pressão máxima de vapor d'água " E " quando o ar está saturado), e o que determina o estado de saturação do vapor d'água é a temperatura, que, quanto maior, maior é a capacidade de suportar umidade e maior será a pressão exercida pelo vapor d'água. A chamada pressão real de vapor d'água (e) acontece quando o ar não está saturado, e para o seu cálculo é utilizado o psicrômetro, um aparelho constituído por um termômetro que mede a temperatura do ar (bulbo seco), e outro que mede a temperatura da água em processo de evaporação (bulbo úmido). A umidade relativa

do ar (UR), pode ser descrita então, conforme Equação 1, como a razão entre a quantidade de vapor d'água que o ar contém (pressão atual de vapor d'água) e a quantidade máxima que poderia conter (pressão máxima de vapor d'água), à mesma temperatura. (SOARES; BATISTA, 2004).

$$UR = \frac{e}{E} 100 \quad (\%) \quad (1)$$

O ponto de orvalho, um fator importante para a dinâmica de desumidificação do ar, é a temperatura na qual o ar, resfriado sob pressão constante, torna-se saturado de vapor d'água e esse passa ao estado líquido na forma de pequenas gotas por via da condensação. A quantidade de vapor necessária para saturar dado volume de ar aumenta com a temperatura, assim como quanto mais frio estiver o ar, menor essa quantidade. Pelo gráfico da Figura 6, podemos dizer que quanto mais próximas a temperatura real e o ponto de orvalho, maior o teor de umidade, o que refletirá na dificuldade em se obter baixos teores de umidade relativa à baixas temperaturas.

Figura 6 – Ponto de orvalho em relação à temperatura do ar e da umidade relativa do ar.



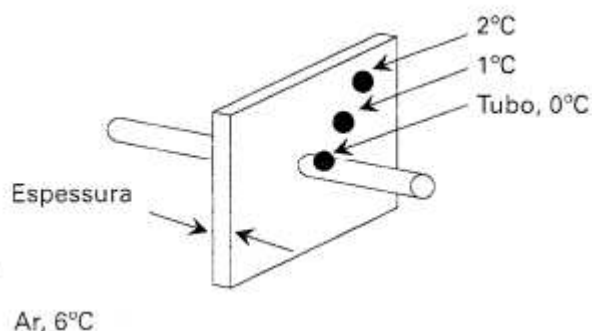
Fonte: Wikipédia (2019).

Portanto, se a temperatura for caindo, chegará um momento em que o vapor d'água será o máximo que a atmosfera poderá conter e começará a ocorrer a condensação desse vapor. Consequentemente, a temperatura de ponto de orvalho é o limite quando a pressão real de vapor d'água (e) passa a ser a pressão máxima de vapor d'água (E) (SOARES; BATISTA, 2004).

2.3.1 O sistema de desumidificação

Um processo que envolva resfriamento e desumidificação resulta em uma redução da temperatura de bulbo seco e da umidade absoluta. O equipamento que realiza esse processo é a serpentina de resfriamento e desumidificação, no caso proposto, um evaporador de tubos aletados que deve operar à uma temperatura inferior à da câmara, permitindo assim, por essa diferença, o controle da umidade dentro da câmara (ÁVILA, 2011). Um incremento na área de transferência de calor que as aletas proporcionam resulta em uma redução na temperatura da parede exposta ao ar, ocasionando uma diminuição da temperatura e da umidade. Assim, a temperatura e a umidade do ar na saída da serpentina se elevam com a vazão do ar, sendo valores típicos para a vazão uma velocidade de 2 a 4 m/s. (STOECKER; JONES, 1985). Em evaporadores, o calor é transmitido do fluido quente para o frio em um processo que pode ser associado a um circuito elétrico com resistências em série, as quais dizem respeito a mecanismos de transferência de calor. Para a redução da resistência do lado do ar, o procedimento é a elevação da área de troca de calor através de aletas, conforme Figura 7 (STOECKER; JABARDO, 2002).

Figura 7 – Temperaturas associadas a uma superfície aletada

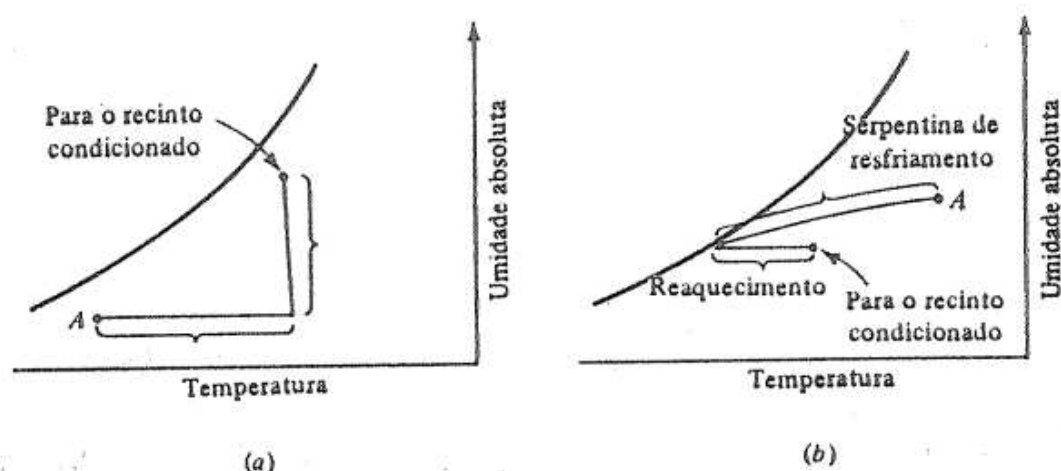


Fonte: Stoecker; Jabardo (2002).

Na Figura 8-a, ilustra-se um processo de aquecimento e umidificação em um gráfico de umidade absoluta pela temperatura, onde o ar a baixa temperatura e umidade (A) é aquecido e umidificado por introdução direta de vapor de água, o que acarreta uma variação desprezível da temperatura do ar. Na Figura 8-b, o ar é resfriado, ocorrendo desumidificação por condensação do vapor contido no ar, caso a temperatura superficial da serpentina seja menor que a temperatura do orvalho do ar. A combinação do reaquecimento com o processo de resfriamento e desumidificação é utilizada em algumas aplicações onde a umidade relativa deva ser mantida baixa.

Quanto ao sistema de ventilação, pode-se optar por sistemas do tipo extração ou sopramento. O sistema tipo sopramento é mais vantajoso do ponto de vista térmico, uma vez que o calor dissipado pelo conjunto ventilador-motor é cedido ao ar antes da entrada na serpentina; por outro lado o sistema de extração apresenta um melhor alcance.

Figura 8 – Esquemas para satisfazer condições de baixa umidade: operação a temperatura muito baixa na saída da serpentina (a); através do reaquecimento do ar (b).



Fonte: Stoecker; Jones (1985).

Um efeito natural e acoplado a um sistema de refrigeração do ar é a desumidificação. Em ambientes de baixa umidade, as serpentinas devem caracterizar-se por reduzida área de troca de calor e elevada diferença de temperaturas entre o ar e o refrigerante. Para temperaturas baixas, há uma diferença pequena entre a temperatura do refrigerante e a temperatura do ar na entrada da serpentina, o que prejudica a desumidificação. Uma solução alternativa seria operar com uma diferença de temperatura superior. (STOECKER; JONES, 1985).

2.3.2 O sistema de umidificação

O sistema de geração de umidade é composto por um aparelho umidificador (Figura 9) com gerador ultrassônico, que utiliza um cristal piezoelétrico, que imerso num reservatório de água vibra a uma frequência muito alta, que resulta na quebra das moléculas de água.

Proporcionando uma fina névoa de vapor frio, aumenta a umidade relativa do ambiente sem gerar aquecimento, com autonomia para até 16 horas em potência máxima.

Figura 9 – Umidificador Komeco, e atuador ultrassônico interno.



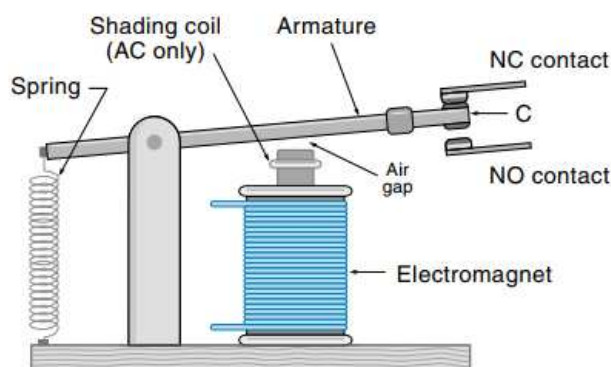
Fonte: Komeco (2019).

2.4 RELÉS

Para o acionamento e controle dos atuadores são utilizados componentes eletroeletrônicos chamados relés. O relé é semelhante a um interruptor, ou seja, um dispositivo capaz de acionar e interromper o fluxo de energia. O relé eletromecânico (*EMR - Electro-Mechanical Relays*) é um dispositivo que usa um eletroímã para fechar (ou abrir) os contatos, e utilizam uma combinação de uma parte elétrica e uma parte mecânica para o seu funcionamento, o que, devido à presença de dispositivos móveis, pode ocasionar problemas como desgastes e ruídos. Um diagrama de um relé eletromecânico simples é mostrado na Figura 10. Quando o eletroímã, chamado de

bobina, é energizado, ele puxa a armadura acionada por mola. Os contatos de relé são descritos como sendo de dois tipos: contatos normalmente abertos (NA), os quais estão abertos no estado não energizado, e contatos normalmente fechados (NF), que são fechados no estado não energizado (KILIAN, 2005).

Figura 10 – Relé Eletromecânico.



Fonte: Kilian (2005).

2.4.1 Relés de Estado Sólido

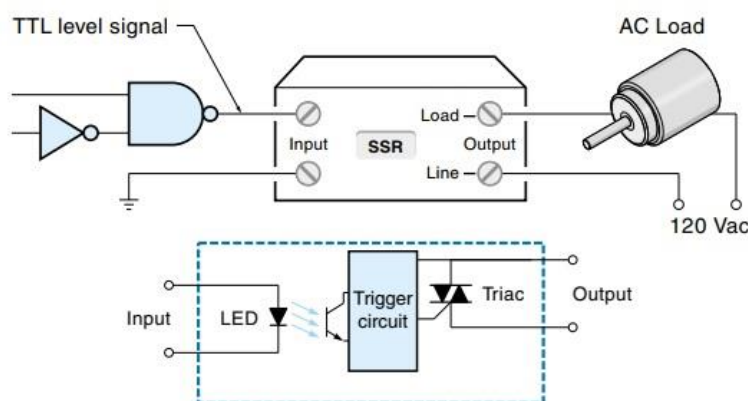
Um relé de estado sólido *SSR* (*Solid State Relay*) é um dispositivo semicondutor que substitui o relé eletromagnético em muitas aplicações, particularmente para ligar e desligar cargas *AC* (*alternative current*, corrente alternada). Fisicamente, o *SSR* é encapsulado aproximadamente do mesmo tamanho de um relé eletromagnético, com quatro terminais elétricos, como mostrado na Figura 11. Os dois terminais de entrada e os dois terminais de saída são análogos à bobina de um relé eletromagnético. A tensão de entrada (ou de controle) do *SSR* é tipicamente de 5 ou 24 Vcc, ou 127 Vca. Para a tensão de saída do *SSR*, verifica-se que a carga é colocada em série com a tensão de 127 ou 220 Vac, e limitada por correntes especificadas para cada modelo do relé. Muitos *SSRs* incorporam um recurso chamado chaveamento de tensão zero: a corrente é ligada no momento exato em que a tensão CA está cruzando 0 V. Isso elimina os altos tempos de aumento de tensão na saída e minimiza o ruído de interferência eletromagnética (*EMI*).

A Figura 11 mostra um diagrama de blocos do interior de um *SSR*. A tensão de entrada aciona um *LED* e sua luz aciona um foto transistor, que por sua vez ativa

o *TRIAC* (*Triode for Alternating Current*). Um *TRIAC* é um componente eletrônico equivalente a dois retificadores controlados de silício (tiristores) ligados em antiparalelo e com o terminal de disparo (gatilho ou *gate*) ligados juntos. O *LED* e o fototransistor isolam eletricamente as seções de entrada e saída do *SSR*, o que permite que a eletrônica de controle tenha um aterramento separado das linhas potência; e evita que picos de alta tensão no circuito de potência voltem para o circuito de comando.

Os relés de estado sólido têm várias vantagens importantes sobre os relés eletromecânicos. Não ter partes móveis significa que (teoricamente) elas nunca se desgastam e as tornam praticamente imunes a choques e vibrações, além de possibilitar velocidades de operação muito maiores. Além disso, por causa da eletrônica incorporada, eles podem ser acionados com uma fonte de baixa tensão, independentemente da capacidade de corrente de saída. Como desvantagens, as saídas podem ser falsamente acionadas por ruído elétrico; e mesmo quando ligado, a resistência de saída não é exatamente 0 ohm, portanto, há uma pequena queda de tensão e consequente perda de potência dentro do relé. Embora sejam duráveis, eles não falham de maneira previsível (KILIAN, 2005).

Figura 11 – Relé de Estado Sólido.



Fonte: Kilian (2019).

2.5 LCD

Para a interface de entrada e leitura de dados, a qual visa permitir a comunicação entre o homem e a máquina, são necessários componentes eletrônicos que permitam essa interação, os quais serão também expostos na Seção 3.1.

O *LCD* (*Liquid Crystal Display*, ou *Display* de Cristal Líquido) é um dispositivo gráfico muito útil e amplamente aplicado na criação de interfaces com o usuário. São formados por uma fina camada de cristal líquido entre duas placas de vidro, com uma fonte de luz fluorescente ou de *LEDs* por baixo de toda essa estrutura, o que possibilita o uso de pouca energia para o seu funcionamento, e permitem a comunicação digital, o que permite a utilização de poucos pinos do microcontrolador. A formação de caracteres e imagens ocorre devido ao fato do cristal líquido, naturalmente transparente, se tornar opaco ao receber uma carga elétrica, impedindo a passagem de luz. Podem ser do tipo caractere, que permite apenas a escrita de caracteres e pequenos símbolos; e gráficos. *Displays* de *LCD* (Figura 10) são fabricados em diferentes configurações padrões, com formatos mais comuns (número de colunas x número de linhas): 8×2, 16×2, 20×2 e 20×4 (PORTAL VIDA DE SILÍCIO, 2017).

Figura 12 – *Display LCD 20x4*.



Fonte: Portal Vida de Silício (2017).

2.6 CONTROLE

2.6.1 Introdução

Uma das suas definições nos diz que o Controle é o ato de exercer comando sobre uma variável de um sistema para que esta variável siga um determinado valor (CAMPOS, 2010). No nosso cotidiano aplicamos o conceito de controle mesmo sem

perceber. No chuveiro elétrico, por exemplo, ajusta-se a temperatura da água a uma determinada temperatura desejável, com o ajuste da posição da abertura da válvula do registro. Dessa forma, pode-se considerar esse um sistema de malha aberta, conforme ilustra a Figura 13. Nesse tipo de controle a saída não tem efeito sobre a ação de controle, para tanto o sistema não faz medições na saída.

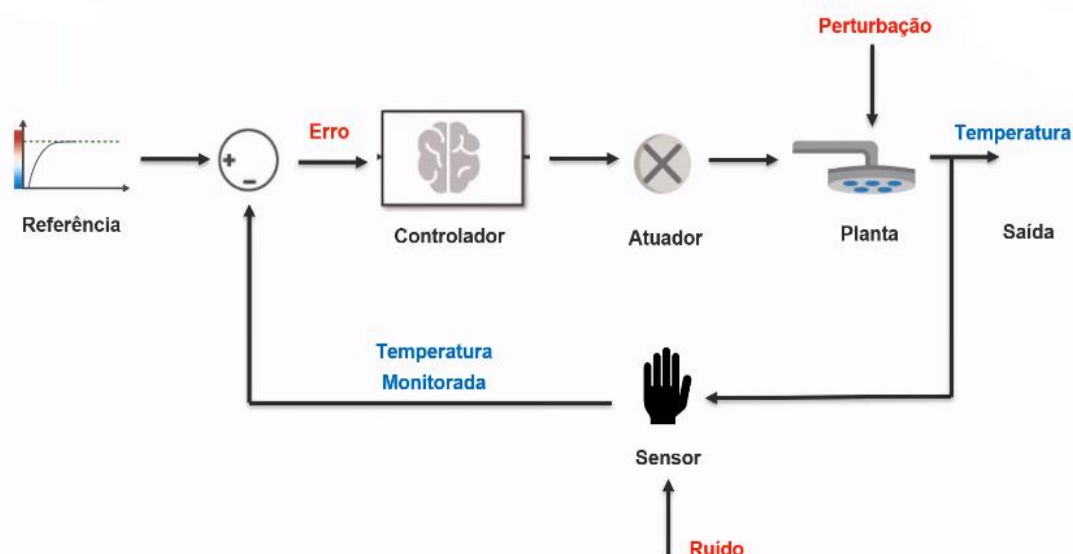
Figura 13 – Exemplo de sistema de controle em malha aberta



Fonte: Leandro Muniz (2019).

No caso do controle em malha fechada, demonstrada na Figura 14 aplicado ao exemplo, deseja-se monitorar a temperatura antes de ingressar ao banho, já com a temperatura desejada. Esse monitoramento se dá normalmente por algum sensor, no caso poderá ser a própria mão a ser utilizada para aferir a temperatura da água. É um sistema que mantém uma relação prescrita entre a saída e alguma entrada de referência, fazendo uma comparação entre elas, e utilizando a diferença como um meio de controle (CAMPOS, 2010).

Figura 14 – Exemplo de sistema de controle em malha fechada



Fonte: Leandro Muniz (2019).

Para Astrom (2009), as vantagens dos sistemas realimentados estão na redução dos efeitos de perturbações, poder fazer um sistema seja insensível a variações do processo e também que siga fielmente ao sinal de entrada. Campos (2010) cita aumento da largura de faixa, redução do efeito de não-linearidades e distorções e a capacidade de estabilizar sistemas que sejam instáveis em malha aberta. Sobre estabilidade, dizemos que o sistema será estável se a aplicação de um sinal de entrada limitado resultar em um sinal limitado na saída.

O acionamento de uma resistência de um chuveiro elétrico, assim como o acionamento do compressor do sistema de refrigeração de uma geladeira convencional, normalmente acontece através da comutação da saída do controlador comandado pelo termostato ou do relé, ou seja, acontece ou não acontece, liga ou desliga. Esse é o princípio do controlador liga – desliga, o qual brevemente especificaremos adiante. Geralmente é utilizado em sistemas em que a variável a ser controlada não impacta substancialmente o resultado esperado. Isso acontece devido à baixa precisão desse tipo de controlador, que, por atuar de forma binária em termos de acionado ou desacionado, gera uma oscilação que o torna pouco preciso. Uma forma que minimiza tal problema seria um controlador que aplique proporcionalmente uma ação de saída em função do valor presente do erro, dado pelo sensor através da realimentação.

A realimentação, para realizar ações de correção baseada na diferença entre o valor desejado e o valor atual, pode ser implementada de diferentes formas, como através do controle liga – desliga, do controle proporcional e do controlador PID (Proporcional Integral Derivativo), que segundo Astrom (2009), é uma implementação simples da ideia do controle, porque tem a capacidade de eliminar erros no estado estacionário mediante a ação integral, e pode antecipar o futuro com a ação derivativa. A citar também a capacidade de controladores somente P e PI de solucionar muitos dos problemas de controle.

2.6.3 Controle Liga Desliga

Um dos controladores mais adotados em sistemas de controle domésticos e industriais, é o controle Liga-Desliga, onde a variável de controle assume apenas dois valores, dependendo do valor do erro do sistema de realimentação, conforme é definido pela Equação 2. Desse modo, a variável de controle tem seu valor máximo, ou simplesmente o atuador é ligado, quando o erro é positivo; e 0, ou o atuador é desligado, quando o erro é negativo. São, portanto, simples e de natureza não linear, razão pela qual não podem ser analisados mediante funções de transferência (VISIOLI, 2006).

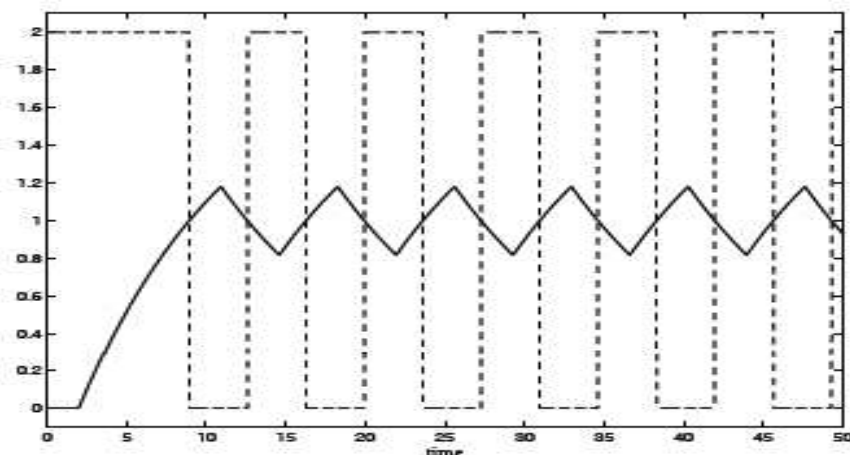
$$u = \begin{cases} u_{max} & \text{se } e > 0 \\ u_{min} & \text{se } e < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Os controladores de duas posições utilizados nesse caso normalmente são, como no caso do trabalho aqui proposto, dispositivos elétricos como relés, ou válvulas operadas por solenoides. Na prática, controladores Liga-Desliga apresentam a inserção de histerese, ou uma zona morta (VISIOLI, 2006), também chamado de intervalo diferencial.

A zona morta faz com que a variável de controle mantenha seu valor até que o erro tenha variado além do zero, dentro de um intervalo definido, a fim de prevenir uma ação muito frequente do atuador (OGATA, 2010). Se a zona morta é muito pequena pode-se entrar no caso do controle liga desliga ideal; se for muito ampla

pode-se perder exatidão. No funcionamento com histerese, o erro tem um intervalo em torno do zero em que se conserva a ação de controle até o limite desse intervalo.

Figura 15 – Exemplo de uma aplicação do controlador Liga-Desliga. Linha pontilhada a variável de controle, a pontilhada a de processo.

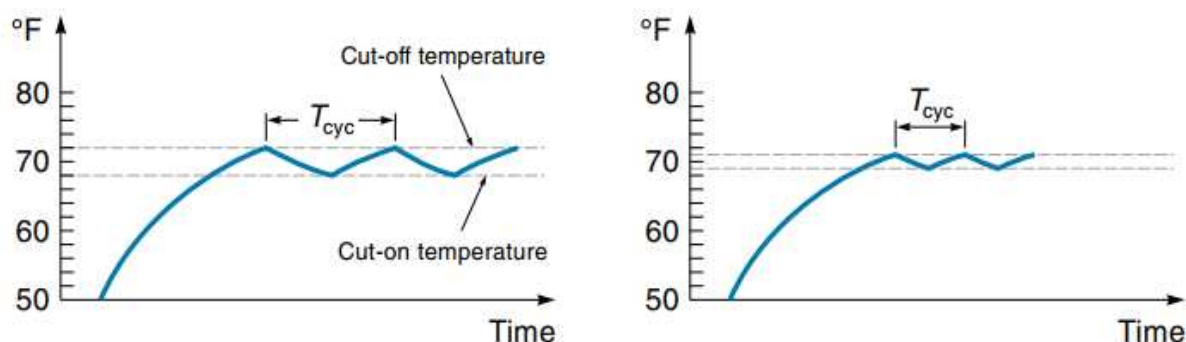


Fonte: Visioli (2006).

Para o exemplo da Figura 16, uma casa sendo aquecida, o termostato é ajustado para uma temperatura média de 70° F. O gráfico mostra a temperatura subindo rapidamente no início, e depois mais lentamente devido a perdas de calor. Quando a temperatura atinge o ponto de corte de 72° F, o aquecedor é desligado, então a temperatura têm a tendência de voltar ao estado de equilíbrio com o ambiente, porém, antes disso, atinge o ponto de corte de 68° F e o aquecimento volta a funcionar, de forma que o comportamento da curva é parecido com a carga e descarga de um capacitor. Um aquecedor mais potente aumentaria a curva de carga, e uma casa maior ou um isolamento mais ineficiente aumentariam a curva de descarga. Observa-se também um ciclo T_{cyc} associado ao controle de dois pontos, e é afetado pela capacidade de aquecimento e da casa, bem como pela diferença de temperatura entre os pontos de corte do sistema.

Se esses pontos forem aproximados, por exemplo para 69 e 71° F, a temperatura seria mantida mais próxima de 70° F, mas a frequência do ciclo aumentaria, o que é indesejável devido a desgastes de atuadores, motores e interruptores, o que torna esse tipo de controle indicado somente para sistemas lentos, onde é aceitável que a variável controlada varie entre dois pontos limites.

Figura 16 – Controle Liga-Desliga de temperatura



Fonte: Kilian (2005).

Sendo o tipo mais comum de controlador usado na indústria, devido a atuadores descontínuos, como relés e válvulas, o controle Liga-Desliga é, portanto, adequado quando a variável de controle muda lentamente, por exemplo temperatura, pressão ou nível de líquido em tanques industriais (RYNIECKI *et al.*, 2015) ou quando não há um desempenho de controle muito preciso, o que o torna atrativo economicamente, e por isso é muito comumente adotado (VISIOLI, 2006).

2.6.4 O Controle Multivariável

Um dos problemas para o proposto seria o controle multivariável, devido a interação entre as variáveis de temperatura e umidade relativa do ar. Segundo Skogestad e Postlethwaite (2005), um sistema multivariável tem a função de transferência $y = G.u$, mostrada na forma matricial na Equação 3. O exemplo citado na introdução do tema de controle, o chuveiro elétrico (e o a gás), é um caso multivariável.

$$\begin{bmatrix} y1 \\ y2 \\ y3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u1 \\ u2 \\ u3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

No caso do chuveiro elétrico, este apresenta 2 entradas: a abertura da torneira e a potência na resistência. Apresenta também duas saídas: a vazão e a temperatura. A representação fica conforme a Equação 4.

Quando a matriz G for diagonal, considera-se uma redução a vários sistemas SISO (controle diagonal), o que normalmente simplifica o projeto de controle e diminui

o esforço de modelagem, sendo compensado alguma simplificação na modelagem pela realimentação no controle do sistema *SISO*. Foram estudadas algumas técnicas para a obtenção desse sistema. No caso de exemplo, para obter essa simplificação, pode se considerar G_{21} como um distúrbio para o controle da temperatura.

$$\begin{bmatrix} q \\ T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & 0 \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A \\ P \end{bmatrix} \quad (4)$$

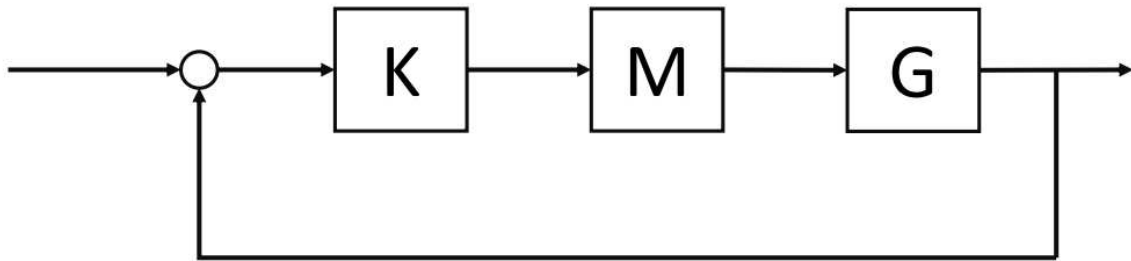
Outra estratégia para a redução de um sistema *MIMO* para um sistema *SISO* é o Controle Cascata. Bastante utilizado no controle industrial, esse controle é obtido através de uma separação temporal, sendo a saída de um controlador mais rápido a entrada do outro, mais lento.

O Controle Descentralizado para essa aplicação, consiste em um conjunto de malhas independentes, ou seja, separadas no espaço. Para essa técnica, é necessário um bom pareamento entre entradas e saídas a fim de que se minimizem os efeitos das interações, utilizando o controle diagonal. É analisado o comportamento do sistema em regime estacionário para a obtenção da matriz de Ganho Relativo *RGA* (Equação 5), onde G é a matriz multivariável em uma frequência específica (em estado estacionário $s = 0$); que tem a função de análise do comportamento das entradas e saídas, e então efetua o ajuste ideal do sistema através da realocação das entradas e saídas (SKOGESTAD; POSTLETHWAITE, 2005).

$$RGA(G) = v(G) = G \times (G^{-1})^T \quad (5)$$

No caso de o número de entradas ser diferente do número de saídas, ou caso as entradas e saídas sejam de mesmo número, mas em diferentes "espaços", o controle diagonal não pode ser implementado diretamente. Dessa forma é implementado um pré-compensador que faz um desacoplamento de estado estacionário, utilizando uma matriz de ganho M , que conforme o diagrama de controle ilustrado na Figura 17, pode ser posicionada antes ou depois do controlador K , ambos interagindo com a planta G .

Figura 17 – Diagrama de controle por matriz de ganho com a posição do controlador, matriz e planta.



Fonte: Autoria própria (2019).

A matriz de ganho reproduz como cada entrada afeta as saídas em estado estacionário, sendo obtida através de um degrau unitário na entrada, com o sistema funcionando em malha fechada, em simulações ou na própria planta. Posteriormente obtém-se a sua inversa, a qual dará a posição dos atuadores para a obtenção das saídas desejadas no estado estacionário. Para que um sistema desse tipo funcione bem, deve ter um número de entradas maior ou igual ao de saídas.

2.7 PID

2.7.1 Introdução

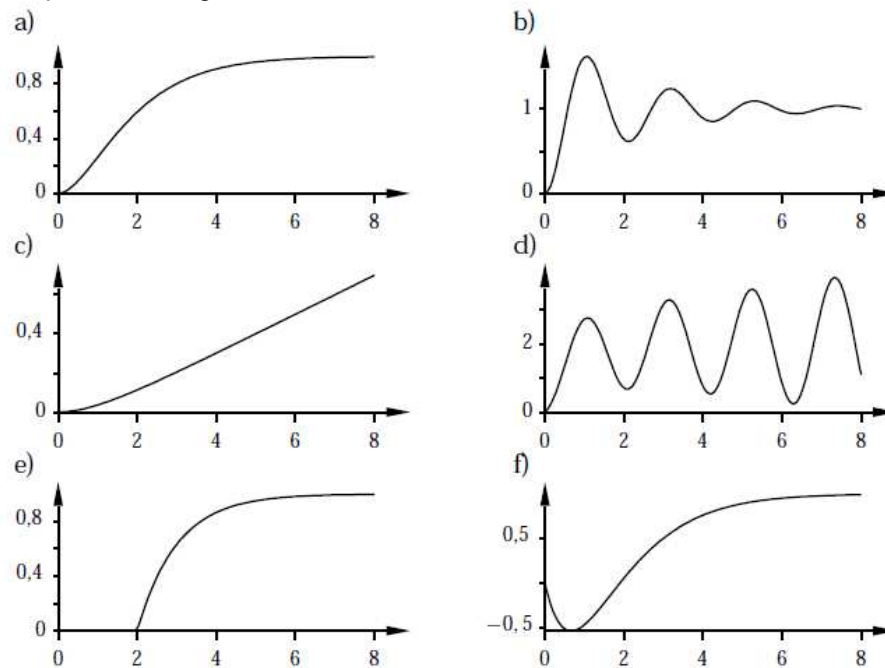
Para descrever como se comporta algum processo, normalmente se utiliza modelos matemáticos, que possibilitam tratar de uma única forma sistemas muito diferentes. São muito úteis também para o projeto de controle, possibilitando conhecer a dinâmica do processo (ASTRON, 2009). Modelos podem ser determinados pelas leis da física que o descrevem, assim como pelo conhecimento pormenorizado dos componentes do sistema, esses fazem parte da modelagem conceitual, natureza do processo, ou caixa branca. Alternativamente a esse método, temos a modelagem empírica, ou caixa preta, onde pouco ou nenhum conhecimento prévio do sistema é necessário, e servem para descrever as relações de causa e efeito entre as variáveis de entrada e saída. Usualmente são descritas pelas funções de transferência, que descrevem o comportamento dinâmico de um par entrada-saída. (AGUIRRE, 2015).

Modelos podem ser monovariáveis ou multivariáveis. Monovariáveis, ou *SISO* (*Single Input Single Output*) apresentam uma entrada, para uma saída. Modelos multivariáveis podem apresentar múltiplas entradas para múltiplas saídas, estes sendo nomeados como sistemas *MIMO* (*Multiple Input Multiple Output*). A maioria dos sistemas reais tem várias entradas e várias saídas, possivelmente até desconhecidas, não obstante que esses mesmos sistemas possam ser modelados da forma de sistemas monovariáveis (AGUIRRE, 2015).

Para a obtenção do modelo estático, existem algumas formas de fazê-lo, tal como manter a entrada em um valor constante e medir a saída em estado estacionário. A determinação do comportamento do processo no seu estado transitório denomina-se modelo dinâmico, e é descrito pela sua resposta a uma entrada degrau, exemplificadas graficamente na Figura 18, e da qual poderá se obter muitas propriedades.

A resposta ao degrau de um sistema estável leva a um valor constante, ao contrário do que deve acontecer em um sistema instável. As relações de entrada saída caracterizadas por funções de transferência são restringidas a sistemas lineares invariantes no tempo, e são obtidas ignorando não linearidades inerentes a alguns sistemas físicos reais, se esses forem pequenos o suficiente para uma boa aproximação entre os resultados da análise de um modelo matemático e os resultados do um experimento prático. Normalmente, na solução de um novo problema é conveniente construir um modelo simplificado para uma boa percepção geral visando a solução (OGATA, 2010).

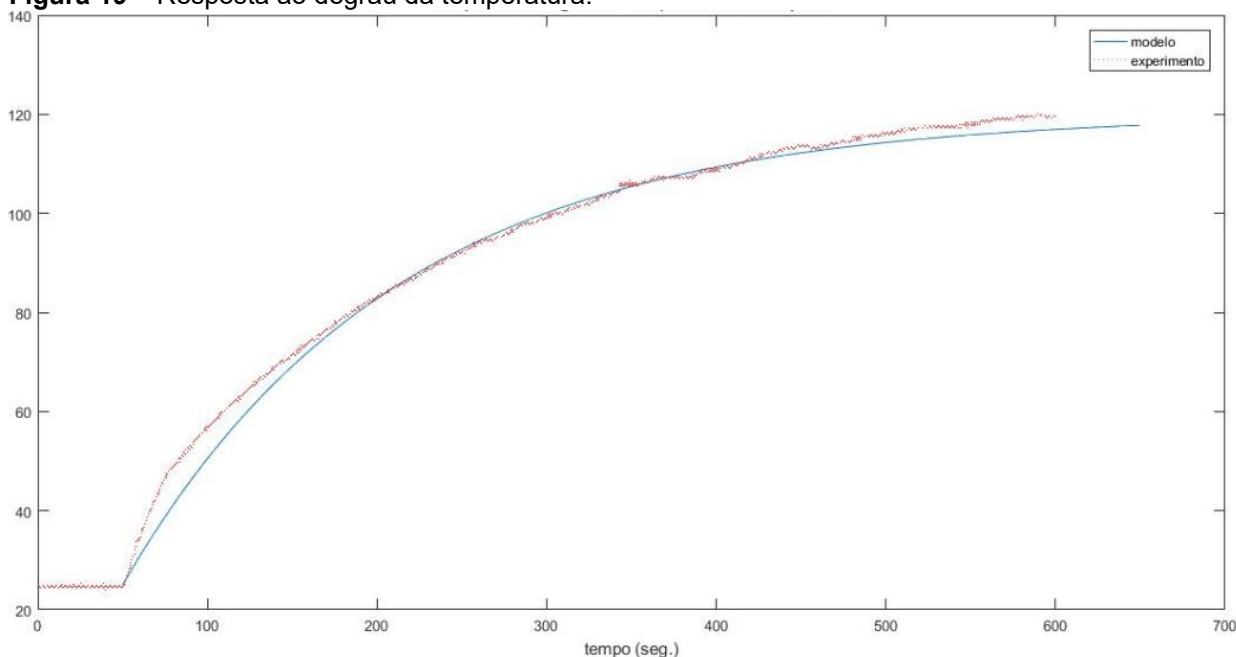
Figura 18 – Respostas ao degrau em malha aberta.



Fonte: Astrom (2009).

Comumente sistemas térmicos são representados por um sistema de primeira ordem com atraso de tempo, representada pela Equação 6 (BAYRAM; MOAMMED; KARA, 2016). Onde T_0 é a temperatura ambiente, K o ganho estático, t_1 o tempo de atraso e t_2 a constante de tempo. Uma aplicação prática dessa representação foi feita para o sistema de temperatura de uma lâmpada a qual é ilustrada na Figura 19. Para esse sistema, a modelagem serviu para o controle da temperatura através de um relê de estado sólido (SSR – *Solid State Relay*).

$$G(s) = T_0 + \frac{K}{t_2 s + 1} e^{-s t_1} \quad (6)$$

Figura 19 – Resposta ao degrau da temperatura.

Fonte: Autoria própria (2018).

Segundo Ogata (2010), sistemas térmicos são aqueles que envolvem transferência de calor de uma substância para outra, através principalmente da condução e convecção, sendo a radiação significativa somente se a temperatura do emissor for muito alta. Resumidamente, segundo Visioli (2006), a condução se dá quando o calor se transmite mediante contato físico, porém sem movimento de matéria. Na convecção a troca de calor acontece quando um corpo quente está submerso em um fluido, natural ou forçadamente. E na radiação, o calor é transmitido por radiação eletromagnética. São analisados em termos de resistência e capacitância, apesar da imprecisão da resistência e capacitância térmica das substâncias envolvidas.

Muito utilizado na indústria, o controlador PID (Proporcional Integral Diferencial) tem como característica sua simplicidade, facilidade na sintonia dos parâmetros e atendimento das diversas especificações (CAMPOS, 2010), o que o torna a forma mais comum de realimentação. Na forma que o conhecemos hoje, o controlador PID começou a ser aplicado de 1915 a 1940, sendo mais bem desenvolvido a partir desse período por indústrias de instrumentação. Em controle de processos industriais, mais de 95 por cento são do tipo PID, e a maioria dos laços são PI (Proporcional Integral). Foi desenvolvido durante um grande período e sobreviveu a muitas mudanças de tecnologia (Astrom, 2009).

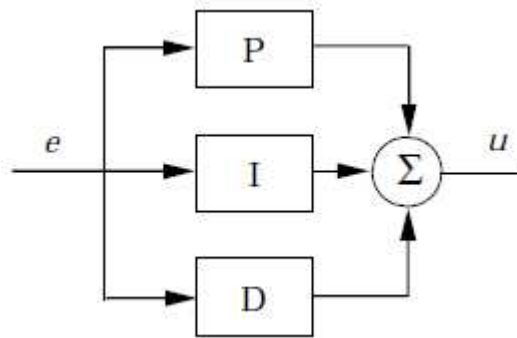
Quando comparado com o sistema Liga-Desliga, tem a vantagem de acompanhar o *setpoint* especificado independente das propriedades do processo, sendo que para isso é necessário ter sensores e atuadores apropriados que efetuem as ações de controle, o que na prática nem sempre é possível.

Segundo Skogestad (2001), o controlador PID tem três efeitos de controle principais: O proporcional (P), o Integral (I) e o Derivativo (D). Há muitas variações do algoritmo PID básico, uma das suas representações clássicas é dado pela forma de Paralelo Ideal, apresentado na Figura 20, como uma soma (Equação 7 em termos de tempo e Equação 8 na frequência), onde $u(U)$ é o sinal de controle, $e(E)$ é o erro de controle ($e = y_{sp}-y$). O termo P é proporcional ao erro, o termo I é proporcional a integral do erro e o termo D é proporcional à derivada do erro.

$$u(t) = K(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (7)$$

$$U(s) = (Kp + \frac{Ki}{s} + Kd \cdot s) \cdot E(s) \quad (8)$$

Figura 20 – Controle realimentado usando PID.

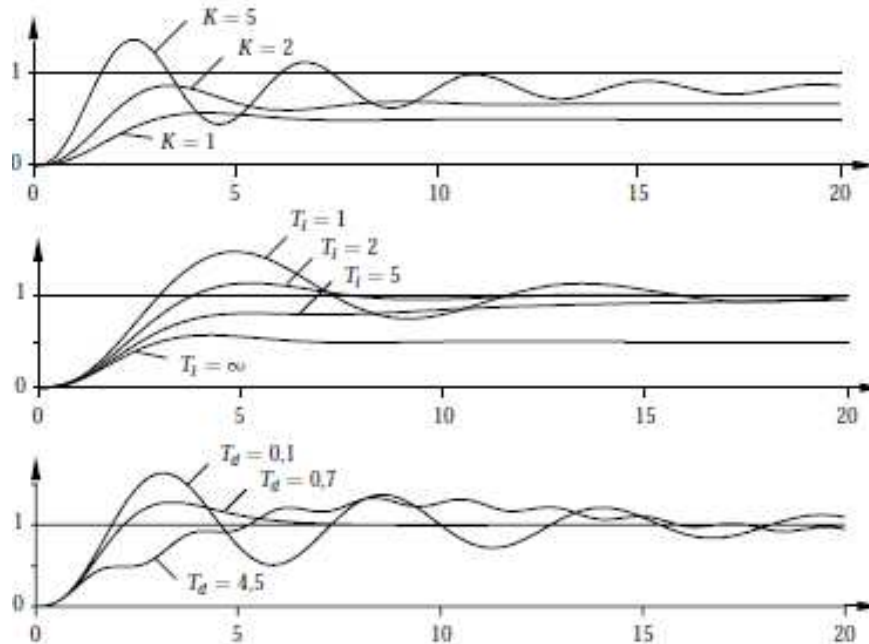


Fonte: Astrom (2009).

Os parâmetros do controlador são o ganho K , o tempo integral T_i e o tempo derivativo T_d (ASTROM, 2009), e os efeitos de suas variações no sistema podem afetar a resposta desejada, como ilustra a Figura 21.

O incremento do ganho de controle K e de T_i resulta em um processo mais rápido, podendo apresentar oscilação. Ao contrário, sua diminuição poderá tornar a resposta mais lenta, mais estável e menos sobressinal. O incremento de tempo T_d processo torna-se mais lento e com menos sobressinal. Sua diminuição pode tornar o processo mais rápido e com sobressinal.

Figura 21 – Efeito da variação dos parâmetros na resposta de um sistema de primeira ordem.



Fonte: Astrom (2009).

A ação proporcional é a primeira e a mais básica estratégia de controle. Ao contrário da estratégia Liga-Desliga, que atua quando um limite é atingido, esse controlador é projetado para responder à mudança antes que ela saia da faixa desejada. Ela aplica uma mudança (correção) na entrada no sistema (variável manipulada) diretamente proporcional ao erro de controle, o que evitaria o efeito indesejado de oscilação do controle Liga Desliga. Corresponde à parte proporcional da soma de elementos da Equação 7: $u(t) = K \cdot e(t)$, ou $C(s) = Kp$ com o erro $e = y_{sp} - y$. Como a saída do controlador é proporcional ao erro, é necessário que haja o erro para realizar o controle, porque com erro zero a saída seria nula. Um ganho em K resulta em um menor erro em regime, enquanto um ganho K baixo implica em uma ação de controle pequena (CAMPOS, 2010).

A ação Integral tem a função principal de garantir que a saída do processo acompanhe o *setpoint* em estado estacionário de forma a eliminá-lo, erro o qual é esperado com a aplicação somente do controle proporcional (ASTRON, 2009). Em contraponto, aumenta o tempo de acomodação e piora a estabilidade relativa (CAMPOS, 2010). Um controlador Integral, portanto, pode apresentar a forma da

equação $u(t) = K \cdot \left(\frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau\right)$ ou $C(s) = \frac{Ki}{s}$. A presença de um polo na origem do plano complexo permite a redução para zero do erro quando um degrau unitário é aplicado (VISIOLI, 2006).

A ação Derivativa complementa as ações anteriores, que no caso da ação proporcional é baseada no erro em tempo presente, e na ação Integral é baseada nos valores passados do erro de controle: a ação Derivativa baseia-se na predição futura do valor do erro, contribuindo para melhorar a estabilidade em malha fechada. Apesar de aparentemente apresentar uma potencial melhora na performance de controle antecipando uma tendência do erro, na prática ele não é comumente aplicado (VISIOLI, 2006). Sua representação se dá na forma $u(t) = T_d \frac{de(t)}{dt}$ ou $C(s) = Kd.s$.

Apesar da denominação PID ser a mais comum, temos também aplicações de controladores PI, PD, onde suas aplicações dependem dos requisitos do sistema a ser controlado.

O controlador PI gera uma saída que é proporcional a magnitude e duração do erro (MIRANDA, 2012), e apresenta a seguinte função de transferência: $C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)$. Sendo um compensador de atraso, tem como característica possuir ganho infinito na frequência nula, melhorando as características de regime permanente (OGATA, 2010). Um controlador I pode controlar um sistema estável com requisitos de comportamento modesto, e a ação proporcional melhora esse comportamento. Portanto o controlador PI é adequado para todos os processos com dinâmicas de primeira ordem, e em processos com dinâmicas com resposta ao degrau monótonas, frequentemente com atrasos de tempo, o que é demonstrado na prática industrial, onde muitos controladores são PI (ASTRON, 2009).

O controlador PD gera uma saída que é proporcional a magnitude e velocidade da variação do erro (MIRANDA, 2012), e apresenta a seguinte função de transferência: $C(s) = K_p(1 + Td.s)$. Tem a característica de um compensador de avanço, melhorando as características de resposta temporal, estabilidade e tempo de subida, com K_p determinando os requisitos de regime estacionário, sendo útil portanto, para acelerar a resposta de um controle de temperatura (ASTRON, 2009).

O controle PID sendo uma combinação dos controladores PI e PD, por sua vez, gera uma saída proporcional a magnitude, a duração e a variação do erro. Em um controle PID, no início, toda ação é D e no infinito toda ação é I (MIRANDA, 2012).

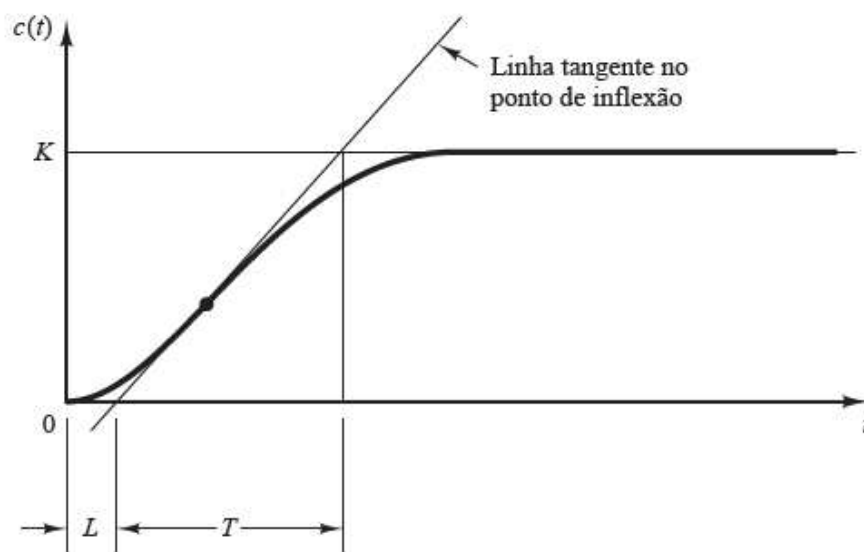
Segundo Astrom (2009), é suficiente para processos onde as dinâmicas são de segunda ordem. Para um controlador PID, o problema se reduz a calcular a quantidade da ação proporcional K_p , da ação integral T_i e da ação derivativa T_d . Esses valores podem ser considerados sugestões iniciais para uma operação estável do sistema, podendo a partir desses valores ser feita uma sintonia fina (OGATA, 2010). Dentre os inúmeros métodos de ajuste não existe nenhum que seja melhor, cada qual com vantagens e inconvenientes (MIRANDA, 2012).

2.7.1 Sintonia Ziegler e Nichols

Apresentados na década de 1940 por Ziegler e Nichols, dois métodos de sintonia, os quais são amplamente utilizados em sua forma original e com variações. Se baseia em obter a resposta do processo pela resposta ao degrau em malha aberta, caso a curva de resposta ao degrau possa ser gerada experimentalmente ou simulada, conforme ilustra a Figura 22 (ASTRON, 2009). A curva pode ser caracterizada pelas constantes: o atraso L e a constante de tempo T . São determinados desenhando-se uma linha tangente no ponto de inflexão da curva em S e determinando-se a intersecção da linha tangente com os eixos t e a linha $c(t) = K$. A função pode ser aproximada por um sistema de primeira ordem com atraso, conforme Equação 9, e então determinados os parâmetros de acordo com a Tabela 1 e 2 (OGATA, 2010).

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K.e^{-Ls}}{T.s+1} \quad (9)$$

Figura 22 – Curva de resposta em forma de S.



Fonte: Ogata (2010).

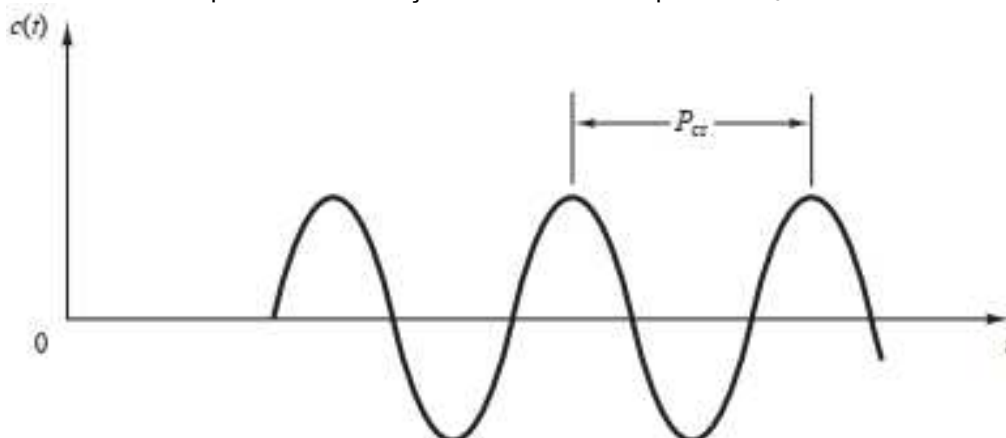
Tabela 1 – Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada na resposta ao degrau.

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9 \cdot \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \cdot \frac{T}{L}$	2.L	0,5.L

Fonte: Ogata (2010).

No segundo método definido por Ziegler e Nichols, o Método de Ziegler-Nichols do Limiar de Oscilação, se a saída apresentar uma oscilação sustentada (Figura 23) para um determinado valor de controle proporcional K_p , o qual se denominará K_{CR} , com um período de oscilação P_{CR} , então é sugerida a escolha dos parâmetros de acordo com a Tabela 2.

Figura 23 – Curva de resposta com oscilação sustentada com período P_{CR} .



Fonte: Ogata (2010).

Tabela 2 – Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada no ganho crítico.

Tipo de controlador	K_p	T_I	T_d
P	$0,5. K_{CR}$	∞	0
PI	$0,45. K_{CR}$	$\frac{1}{1,2} P_{CR}$	0
PID	$0,6. K_{CR}$	$0,5. P_{CR}$	$0,125. P_{CR}$

Fonte: Ogata (2010).

Para os coeficientes das Tabelas 1 e 2, existem outros métodos, muito aplicados por fabricantes de controladores, que utilizam as mesmas informações sobre o processo, assim como outros que também usam mais dados, os quais são principalmente baseados no processo aproximado de primeira ordem (ASTRON, 2009).

2.7.2 Sintonia Chien, Hrones e Reswick

Um dos métodos, denominado por CHR e desenvolvido por Chien, Hrones e Reswick, apresenta uma melhor robustez para o sistema em malha fechada, e os critérios de projeto utilizados são: uma resposta mais rápida, sem sobressinal; e com 20 por cento de sobressinal. Os parâmetros do modelo do processo a e L , dos quais são obtidos os parâmetros do controlador, determinam-se, a fim de sintonia, da mesma forma que para o método da resposta degrau de Ziegler-Nichols.

Hrones e Reswick descobriram que o ajuste para a resposta às mudanças no *setpoint* são diferentes da sintonia para distúrbio. Para tanto, a Tabela 4 mostra as

regras de ajuste priorizando a resposta a perturbações na carga, e a Tabela 3 priorizando mudanças no *setpoint*.

Tabela 3 – Parâmetros do controlador CHR obtidos da resposta à mudança de *setpoint*.

Tipo de controlador	Sem Sobressinal			20% Sobressinal		
	<i>aK</i>	<i>T_i/L</i>	<i>T_d/L</i>	<i>aK</i>	<i>T_i/L</i>	<i>T_d/L</i>
P	0,3			0,7		
PI	0,35	1,2		0,6	1,0	
PID	0,6	1,0	0,5	0,95	1,4	0,47

Fonte: Astrom (2009).

Tabela 4 – Parâmetros do controlador CHR obtidos da resposta a perturbações.

Tipo de controlador	Sem Sobressinal			20% Sobressinal		
	<i>aK</i>	<i>T_i/L</i>	<i>T_d/L</i>	<i>aK</i>	<i>T_i/L</i>	<i>T_d/L</i>
P	0,3			0,7		
PI	0,6	4,0		0,7	2,3	
PID	0,95	2,4	0,42	1,2	2,0	0,42

Fonte: Astrom (2009).

2.7.3 Sintonia Cohen-Coon

Outro método a ser exemplificado será o método de Cohen-Coon. Também baseado em um modelo de primeira ordem, com os mesmos parâmetros *T* e *L* e *K* em malha aberta. O principal critério de projeto é a rejeição a distúrbios. Para controladores P e PD, o valor de K_p é o máximo possível, assim como para PI e PID o ganho K_i também é maximizado de modo a minimizar o erro.

Os parâmetros $a = K_p L / T$ e $\tau = L / (L + T)$ são usados na Tabela 5 para facilitar a comparação com o ajuste de Ziegler-Nichols. Os parâmetros do controlador estão próximos daqueles obtidos pelo método de resposta ao degrau de Ziegler-Nichols para τ pequeno. O método sofre de uma taxa de decaimento muito grande, o que significa que o sistema de malha fechada obtido tem um amortecimento deficiente e uma alta sensibilidade

Tabela 5 – Parâmetros do controlador do método Cohen-Coon.

Tipo de controlador	aK	T_I/L	T_d/L
P	$1 + \frac{0,35\tau}{1 - \tau}$		
PI	$0,9(1 + \frac{0,092\tau}{1 - \tau})$	$\frac{3,3 - 3,0\tau}{1 + 1,2\tau}$	
PD	$1,24(1 + \frac{0,13\tau}{1 - \tau})$		$\frac{0,27 - 0,36\tau}{1 - 0,87\tau}$
PID	$1,35(1 + \frac{0,18\tau}{1 - \tau})$	$\frac{2,5 - 2,0\tau}{1 - 0,39\tau}$	$\frac{0,37 - 0,37\tau}{1 - 0,81\tau}$

Fonte: Astrom (2009).

3 MODELO DE EQUIPAMENTO PROPOSTO

Visando o desenvolvimento de um equipamento com um menor custo, analisou-se exemplos aplicados disponíveis comercialmente, como por exemplo o modelo Microtemp-15/80, ilustrado pelo modelo da Figura 24; e outro empregado atualmente na própria Universidade Federal do Paraná, o qual utilizou-se uma geladeira comercial comum como base para o projeto da câmara. O exemplo comercial citado, assim como a maioria dos exemplares pesquisados, tem como sistema de refrigeração compressores herméticos selados (comuns em unidades refrigeradoras comerciais domésticas), ventilação forçada, sensores, resistências de aquecimento e controles microprocessados. Suas especificações técnicas apresentam tempo de estabilização de 30 minutos, faixa de uso entre 5°C a 60°C com a faixa de umidade entre 30% a 90 % UR (MICROVOLT, 2018).

Seu componente principal é o sistema de refrigeração, o qual é responsável não só pela diminuição da temperatura interna, como pelo processo de desumidificação. O controle de temperatura em refrigeradores de pequeno porte apresenta poucos trabalhos encontrados na literatura. Em sistemas de grande porte, a busca pela eficiência energética e a magnitude de custos dos sistemas leva a um contexto maior de trabalhos, principalmente pela variação da velocidade do compressor, o que requer equipamentos de controle com um custo maior, como inversores de frequência. Apesar disso, a variação da velocidade do compressor, para uma condição de baixo carregamento seria uma forma eficiente de controle nesses tipos de equipamentos (ÁVILA, 2011). A operação do sistema de refrigeração depende dos estados termodinâmicos do refrigerante, que incluem pressão no evaporador e no condensador, superaquecimento na saída do evaporador e subresfriamento na saída do condensador. Variáveis que geralmente não são reguladas no controle convencional em refrigeradores domésticos convencionais, os quais funcionam a velocidades fixas. O estado da arte em acionamento para eletrodomésticos baseia-se na substituição do motor de indução acionado por um conversor eletrônico monofásico por um trifásico, sem capacitor de partida e com velocidade variável. (LEANDRO, 2006).

Para a atuação no sistema de aquecimento, é proposto uma resistência aletada, comumente utilizada em dutos de aquecimento a ar, secadores, estufas. No

caso específico foi reutilizado uma originalmente empregada em um climatizador de ar, com tensão de alimentação de 127V e potência nominal de 1300 W.

Figura 24 – Exemplos de câmaras para controle de temperatura e umidade.

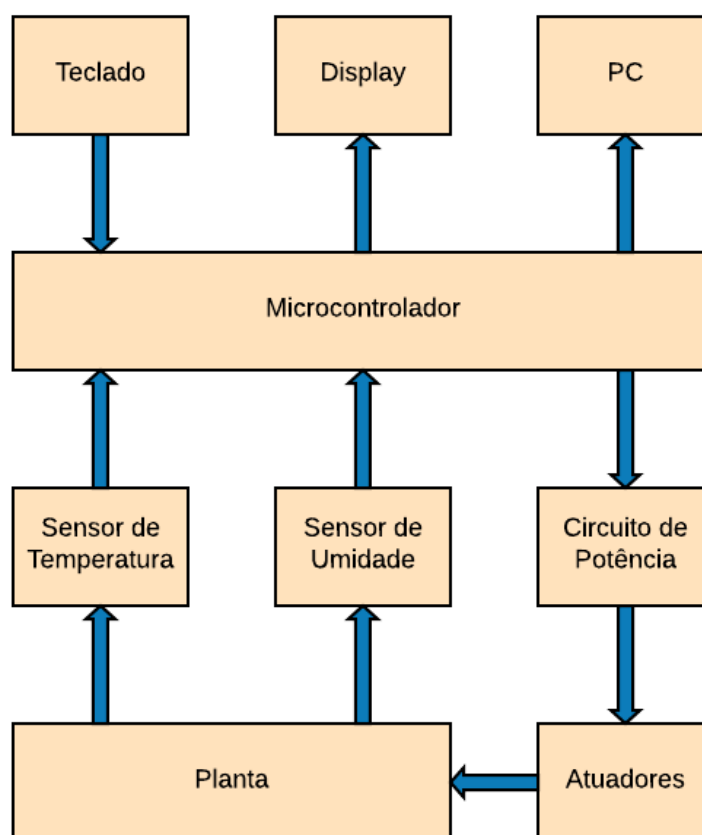


Fonte: Microvolt (2018).

3.1 ELETRÔNICA

A eletrônica tem como objetivo, além dos componentes de acionamento e controle, fazer o usuário ter a possibilidade de interagir com o sistema, mostrado no diagrama em blocos da Figura 25; inserindo os valores de temperatura e umidade desejáveis através do teclado numérico, e visualizar os principais parâmetros do sistema no *display LCD*, como valores mensurados e de referência, como também quais atuadores estão ativos naquele momento. As informações do sistema também podem ser monitoradas em um computador, através de comunicação serial.

Figura 25 – Diagrama em blocos.



Fonte: Autoria própria (2019).

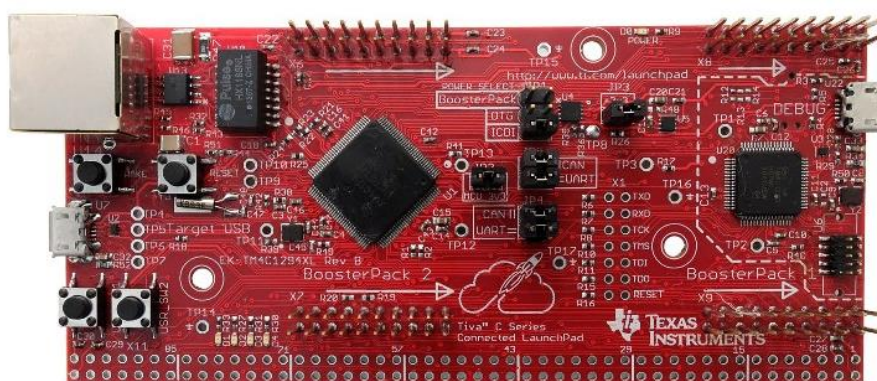
3.1.1 Microcontrolador

O equipamento é gerenciado por um microcontrolador, que será a parte central de um sistema de controle em malha fechada, garantindo que o processo opere dentro dos padrões, recebendo os valores de um sensor, e comandando os atuadores para alguma devida correção. É responsável também pela interface de entrada e saída de dados, a qual visa permitir a comunicação entre o homem e o equipamento.

Será utilizado para a aplicação proposta um exemplar dos microcontroladores das placas de desenvolvimento *TM4C1294 Connected LaunchPad Evaluation Kit* (Figura 26), da *Texas Instruments*, equipamentos de baixo custo baseados nos processadores ARM Cortex-M4. São placas desenvolvidas de forma a extrair e disponibilizar todos os recursos do microcontrolador e facilitar a programação. Possui

funções como conexão Ethernet, USB 2.0, módulo de hibernação, modulação por largura de pulso e conectividade serial simultânea. Como característica principal, apresenta o processador ARM Cortex-M4, *CPU's* conhecidas por serem encontrados em telefones celulares, calculadoras, periféricos de computadores, equipamentos eletrônicos em geral. Conta com uma frequência de 120 MHz e 32 bits, o que os torna de 5 a 7 vezes mais rápido do os microcontroladores do Arduino UNO, que são 16 MHz no ATMEGA328P. Apresenta 1 MB Flash, 256 SRAM e 6KB EEPROM, e são equipados com 80 pinos multifunções, ou seja, podem ser configurados como entradas ou saídas, digitais ou analógicas (TEXAS INSTRUMENTS, 2019).

Figura 26 – Imagem da placa EK-TM4C1294XL TM4C1294 *Connected LaunchPad Board*.



Fonte: Texas Instrument (2019).

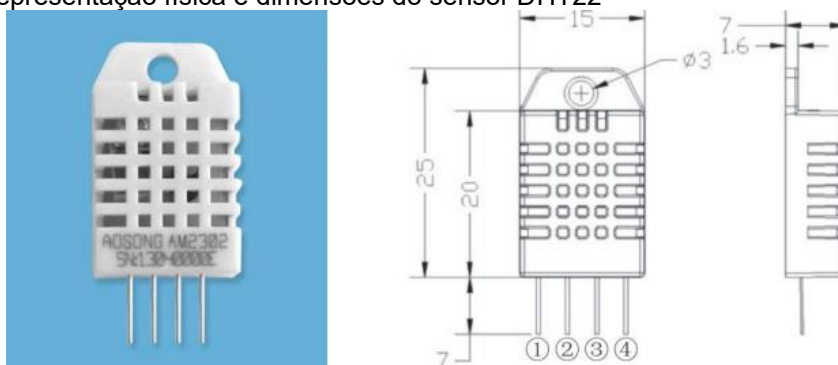
Ao compilador, é enviada a escrita dos códigos e enviado para a sua memória do processador, para a execução de comandos, sendo chamado, portanto, de *Integrated Development Environment* ou Ambiente de Desenvolvimento Integrado (*IDE*). Uma *IDE* é um programa de computador que possui as ferramentas necessárias para desenvolvimento de um *software*. Basicamente possui um editor de código fonte e compilador. Com a *IDE* pode-se desenvolver os programas, instalar bibliotecas adicionais e realizar a compilação e gravação dos programas na placa.

Como ferramenta de *software*, onde foi efetuada a lógica de programação do sistema proposto, será utilizado o editor de código Energia, que tem como característica a possibilidade da programação similar ao da *IDE* do popular Arduino, para a plataforma Tiva-C.

3.1.2 Sensor de temperatura e umidade

O sensor DHT22, Figura 27, (o qual tem também a nomenclatura AM2302) é capaz de mensurar temperatura e umidade relativa do ar através de um único dispositivo.

Figura 27 – Representação física e dimensões do sensor DHT22

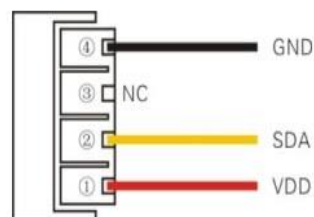


Fonte: Aosong (2019).

São sensores compostos por duas partes: um sensor capacitivo de umidade e um termistor para a aferição de temperatura. Fornece um sinal de saída digital, pré calibrado, via serial *single-bus*, possibilitando uma transmissão digital que pode ser realizada através de um cabo de até 20 metros. Como característica, apresenta baixo custo, alimentação de 3 a 5 V, são pré calibrados e compensados. Têm um *range* de 0-100% de umidade relativa, com 2 a 5% de erro; e para a temperatura seu alcance varia de -40 a 80°C, com erro de 0,5°C para mais ou para menos. A taxa de amostragem para as variáveis de temperatura e umidade é de 0,5 Hz (uma vez a cada 2 segundos), e quatro vias de comunicação, como se pode visualizar na Figura 28 (AOSONG, 2019).

Figura 28 – Representação da pinagem do sensor DHT22.

Pin	Name	Description
①	VDD	Power (3.3V–5.5V)
②	SDA	Serial data, bidirectional port
③	NC	Empty
④	GND	Ground



Fonte: Aosong (2019).

3.1.3 Interface

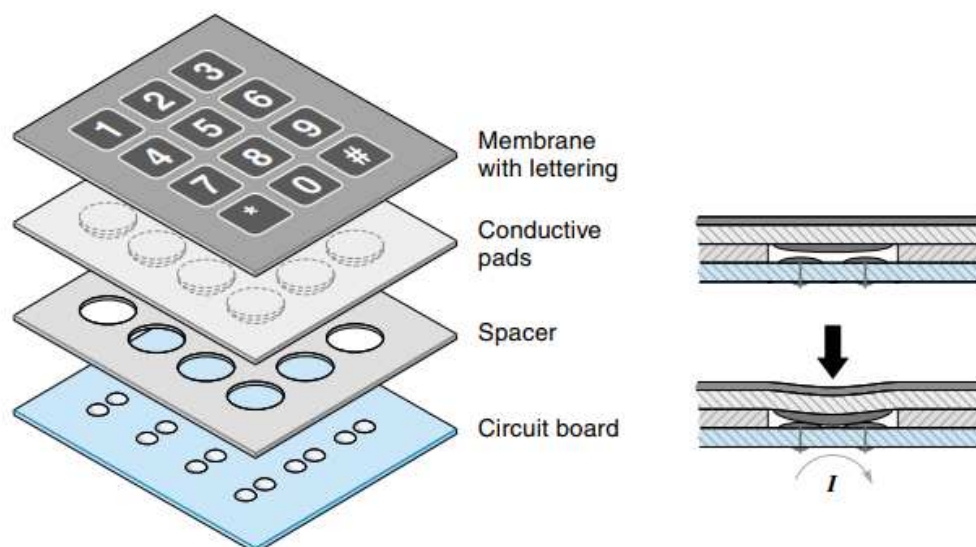
Normalmente, em sistemas automatizados, precisa-se coletar os dados ou interagir com esses sistemas. Portanto, busca-se de um caminho que torne essa interação possível. O nome desse caminho de comunicação chama-se IHM (Interface Homem Máquina), pelo qual o homem e o computador podem se comunicar e interagir, visando atingir um objetivo comum. Uma IHM é composta por algum tipo de saída com indicadores de velocidade, monitores, *displays*, entre outros; e algum tipo de entrada como botões, microfone, entre outros. A interface de comunicação com o usuário proposta é composta basicamente por um teclado matricial numérico 4x4, e um *display* 20x4.

Para a interface de entrada de dados, no caso proposto, para a seleção da referência de temperatura e umidade, é utilizado o teclado. Um dos tipos, o teclado de membrana (também chamado de matricial, devido ser uma matriz de teclas), são muito utilizados devido ao baixo custo, boa durabilidade e boa confiabilidade, comprovado pelos seus diversos usos como em celulares e teclados de microcomputadores.

Este tipo de teclado consiste em interruptores de botões construídos a partir de várias camadas, como mostrado na Figura 29. A camada inferior é geralmente uma placa de circuito impresso com duas conexões para cada tecla. Sobre a placa do circuito há uma camada espaçadora, com um orifício sobre cada tecla. A terceira camada é flexível e tem uma componente condutora sobre cada interruptor. A parte superior é uma membrana impermeável flexível, a qual contém os caracteres. Quando

uma tecla é pressionada, a parte condutora é forçada a entrar em contato com a placa de circuito e fornece um caminho para a corrente. (KILIAN, 2005).

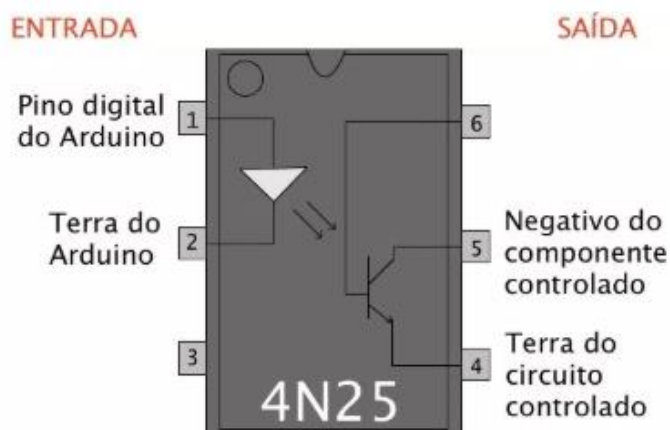
Figura 29 – Teclado matricial de membrana 12 teclas.



Fonte: Kilian (2005).

Para o acionamento dos vários componentes do sistema proposto, como ventiladores, compressores, umidificador e resistência, propõe-se a utilização de um módulo relé, o qual é composto por um conjunto de relés, além de todos os componentes eletrônicos necessários para acionar o relé com segurança e proteger as saídas do microcontrolador, como transistores, diodos, conectores e optoacopladores (Figura 30), os quais são capazes de isolar o circuito de comando do circuito de potência. Os optoacopladores funcionam com um diodo emissor de luz e um foto-transistor bipolar, que dessa forma irá acionar ou não o circuito, preservando componentes sensíveis de interfaces com circuitos de maior tensão ou corrente (NOGUEIRA, 2018).

Figura 30 – Circuito interno e pinagem do optoacoplador 4N25.



Pinagem do Optoacoplador 4N25

Fonte: Nogueira (2018).

O módulo relé (Figura 31) é composto por 8 relés, chamados também de canais, os quais, através de comandos acionados por sinais digitais de 5 V, aciona o circuito de potência na sua saída energizando as cargas, as quais o microcontrolador não é capaz de fornecer a potência em corrente alternada. Nas suas especificações, verifica-se um tempo de resposta até 10 ms e corrente de operação até 20 mA e capacidade de saída de até 10 A.

Figura 31 – Módulo Relé 8 Canais.



Fonte: Usinainfo (2019).

3.2 IMPLEMENTAÇÃO

3.1.3 Integração dos subsistemas

Para a implementação dos sistemas integrados, foi realizada a montagem e adaptação dos sistemas de aquecimento, umidificação, ventilação, desumidificação e o atuador de refrigeração, original da geladeira, sem seu sistema de controle a termostato. Para o controle dos atuadores e sensoriamento acrescentou-se ao seu funcionamento também os dispositivos capazes de atuar e controlar os componentes citados e suas variáveis, como por exemplo microcontrolador, dispositivos de interface com o usuário, relés e válvula solenoides, conforme foi representado no diagrama em blocos da Figura 25.

Sendo necessário uma fonte de refrigeração independente para a desumidificação do ar, foram pesquisados componentes como desumidificadores a pastilhas Peltier, que devido a sua baixa potência e capacidade de desumidificação, não apresentaram resultados satisfatórios. Portanto, incorporou-se à câmara outro circuito de refrigeração além do sistema original da geladeira, que foi adaptado de um bebedouro de água refrigerada, para a função de desumidificação do ar interno da câmara. A serpentina de desumidificação, mostrada na Figura 32, ficou localizada na parte inferior da câmara. Para a devida circulação e homogeneização do ar interno, foi acoplada a ela uma ventilação por sucção, pela qual por meio de um tubo de PVC, direciona o ar através da serpentina, para a parte superior da câmara.

Figura 32 – Atuador de desumidificação.



Fonte: Autoria própria (2019).

Conforme mostra a Figura 33, para a refrigeração dos compressores, foi inserido um ventilador à turbina, adaptado de um equipamento de condicionamento de ar portátil. Esse sistema de resfriamento (ventilador) é acionado; sendo controlado pelo microcontrolador e pelo relé; quando alguns dos sistemas, de desumidificação ou resfriamento, está em funcionamento.

Figura 33 – Vista traseira dos condensadores dos sistemas de refrigeração e desumidificação.



Fonte: Aatoria própria (2019).

Para o sistema de umidificação (Figura 34), foi desenvolvido um sistema de abastecimento de água para alimentar o atuador de umidificação do ar. Para evitar abrir a câmara e retirar o umidificador para seu abastecimento, o reservatório ficou na parte externa da câmara, de forma a facilitar o seu uso.

Figura 34 – Atuador de umidificação do ar.



Fonte: Autoria própria (2019).

O sistema de abastecimento (Figura 35) é gerenciado pelo microcontrolador, o qual aciona/desaciona uma válvula solenoide assim que um sensor de nível no umidificador identifica a falta de água, situação que também desaciona o próprio desumidificador caso não tenha água no reservatório externo, além de mostrar ao usuário a informação na interface *LCD*.

Figura 35 – Sistema de abastecimento do umidificador.



Fonte: Autoria própria (2019).

O atuador de refrigeração, original da geladeira, é um evaporador de placas, mostrado na Figura 36, junto com o atuador do aquecimento utilizado. Na mesma figura é mostrado o componente de ventilação, controlado pelo microcontrolador e acionado quando o sistema de refrigeração ou o sistema de aquecimento está em operação, atuando para homogeneizar o ar ambiente interno à câmara.

Figura 36 – Atuador da refrigeração e do aquecimento da câmara.



Fonte: Autoria própria (2019).

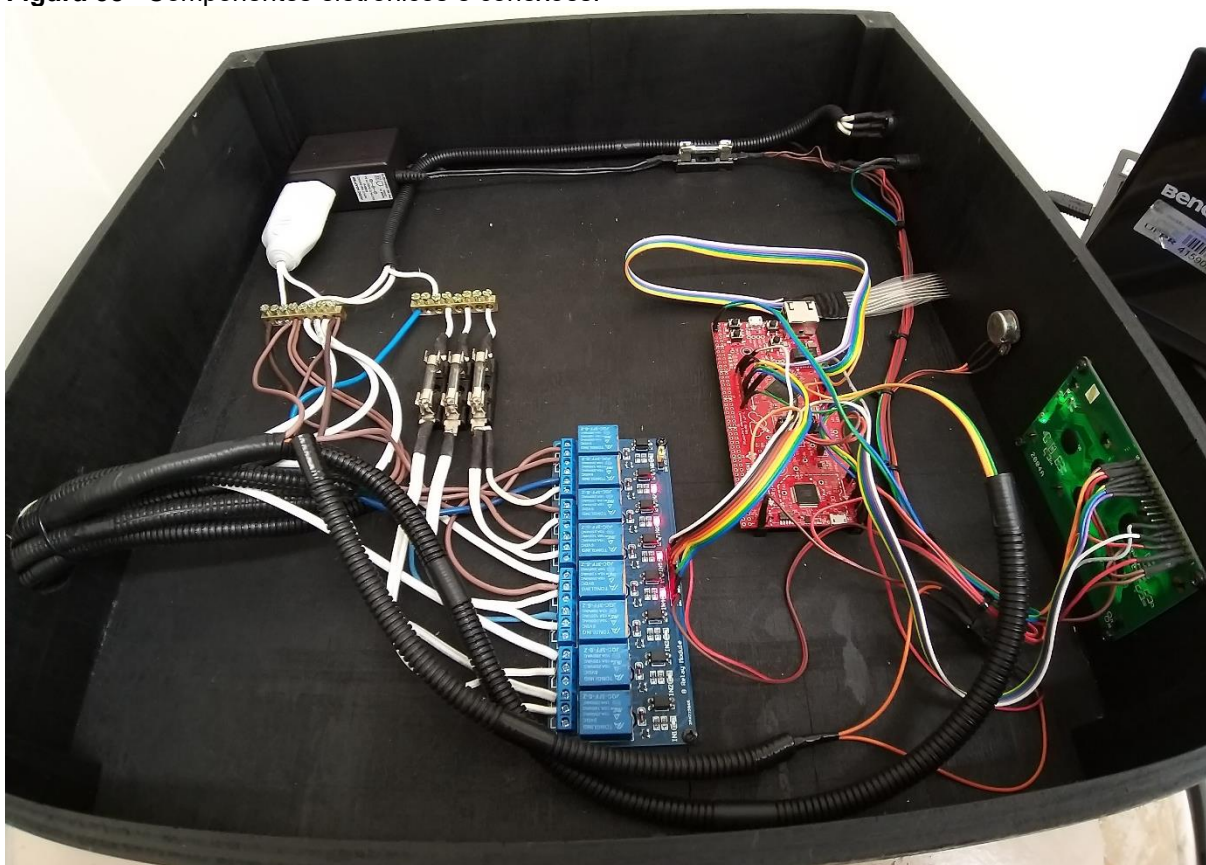
A interface de comunicação dos sistemas, através dos componentes eletrônicos, é mostrada na Figura 37. É composta pelo display de *LCD*, botão liga/desliga, ajuste de contraste do *display*, botão de *reset* do microcontrolador e teclado numérico. Na Figura 38 é ilustrado o aspecto interior da caixa que contém os componentes tais como microcontrolador, módulo de relés, fonte de alimentação e barramento de tensão 127 V, e suas devidas conexões elétricas.

Figura 37 – Interface de comunicação e componentes.



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 38 –Componentes eletrônicos e conexões.



Fonte: Autoria própria (2019).

Com os subsistemas montados, o aspecto final da câmara é mostrado na Figura 39. Foram efetuados testes de comportamento e elaborada a melhor estratégia para a implementação das lógicas de controle para um resultado satisfatório, sendo essas implementadas conforme fluxogramas de funcionamento detalhadas no Capítulo 4.

Figura 39 – Vista interna e traseira da câmara.



Fonte: Autoria própria (2019).

3.1.3 PID

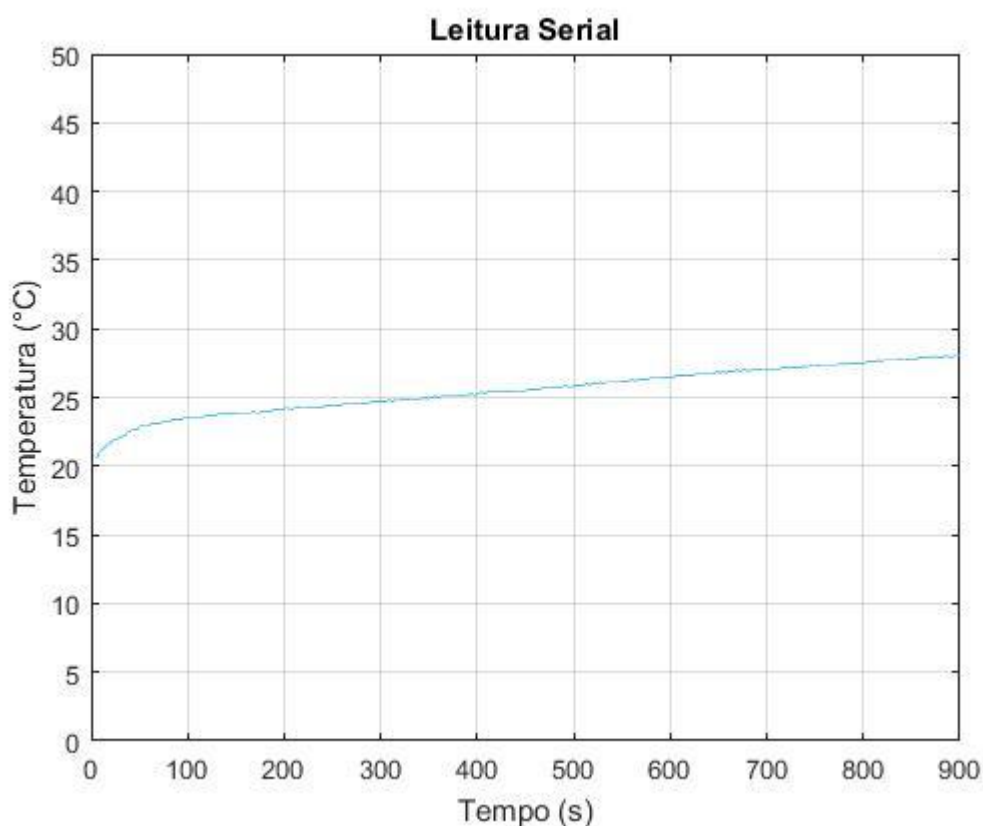
Um dos métodos de controle que foi considerado aplicável ao aquecimento da câmara foi o PI (Proporcional Integral). Tendo como requisito principal do sistema de aquecimento apenas o acompanhamento do *setpoint*, de temperatura, o controle PI se adapta a esse tipo de sistema com requisitos de comportamento modestos.

Para a sintonia do controlador optou-se pela sintonia Ziegler e Nichols, considerando seus dois métodos: o que se baseia em obter a resposta do processo pela resposta ao degrau em malha aberta, na qual o processo deveria se comportar conforme uma curva de resposta em forma de S, e o método do Limiar de Oscilação.

Conforme mostra a resposta do sistema na Figura 40, o método de resposta ao degrau em malha aberta apresentou um comportamento integrativo, de modo que

a temperatura de certa forma se acumula dentro do gabinete refrigerador através da emissão do calor da resistência de aquecimento. Deste modo, inviabilizou-se a utilização por esta técnica. Foi utilizado, portanto, o método de Ziegler-Nichols do Limiar de Oscilação.

Figura 40 – Resposta ao degrau da temperatura.

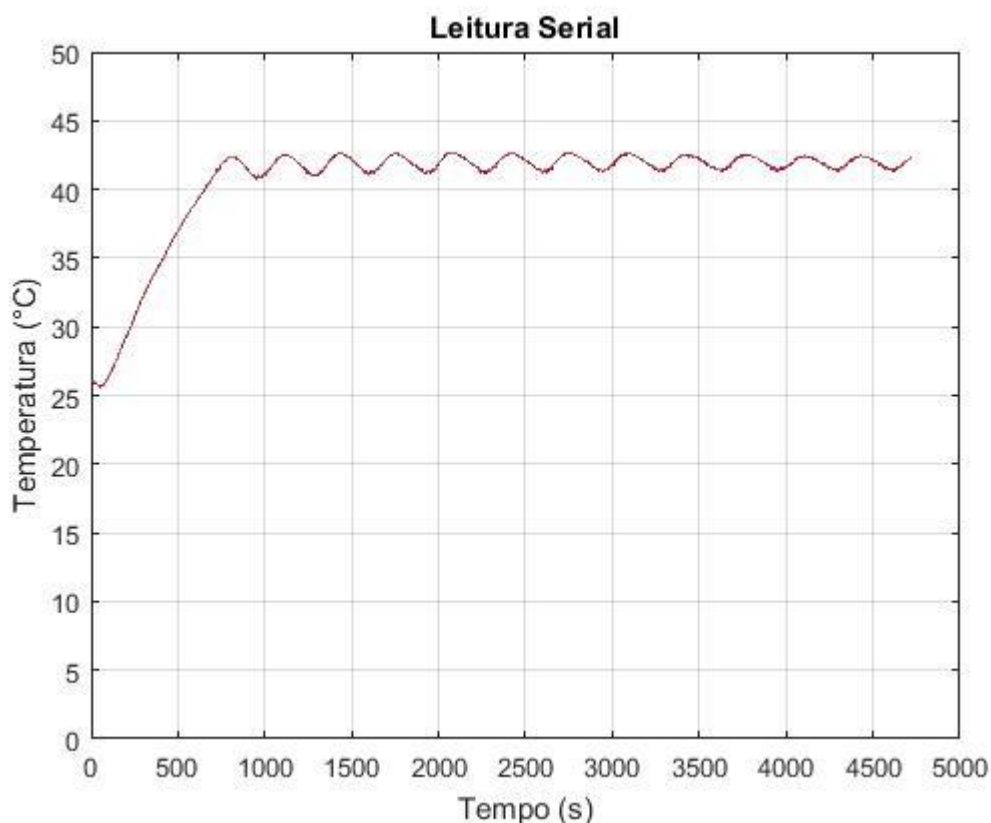


Fonte: Autoria própria (2018).

Pelo método de Ziegler-Nichols do Limiar de Oscilação para um sistema em malha fechada, os valores dos ganhos integral e derivativo foram fixados em zero, e aumentou-se o ganho até o limite de estabilidade, onde o processo começa a oscilar, de onde pode-se obter os valores do ganho crítico e do período de oscilação.

Utilizando esse método, obteve-se o gráfico da Figura 41, no qual mostra um comportamento oscilatório sustentado da temperatura do ar dentro da câmara ($K_{CR} = 180$ e $P_{CR} = 350$), podendo a partir dele extrair-se os dados de sintonia do controlador.

Figura 41 – Resposta ao método de Ziegler-Nichols do Limiar de Oscilação.

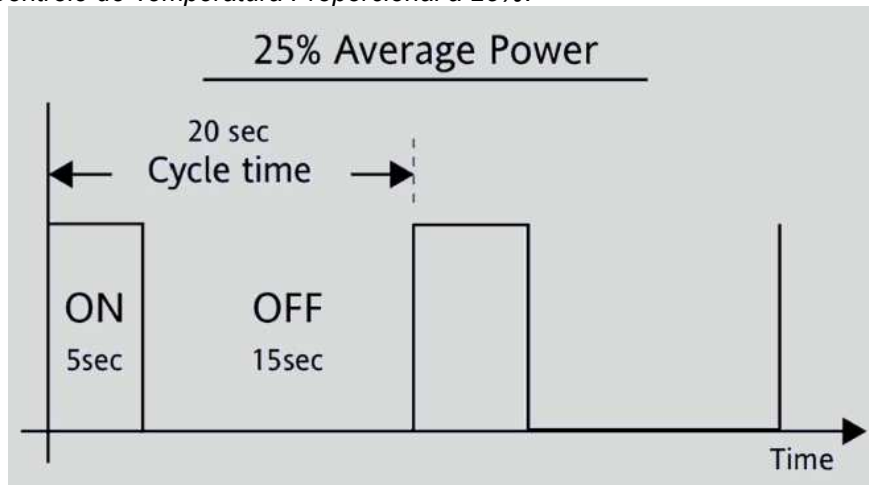


Fonte: Autoria própria, (2019).

A interface de potência para o atuador foi o relé *SSR*, o qual devido à sua característica de rápida resposta, pôde acompanhar proporcionalmente a saída *PWM* do controlador.

Das portas analógicas utilizou-se modulação por largura de pulso, ou *PWM*, que é uma técnica para obter resultados analógicos com meios digitais. O controle digital é usado para criar uma onda quadrada, ou seja, um sinal alternado entre ligado e desligado. Esse padrão liga/desliga pode simular tensões entre ligado (5 volts) e desligado (0 volts), alterando a parte do tempo em que o sinal passa em nível alto *versus* o tempo que o sinal passa desligado, em nível baixo. Essa duração é chamada de largura do pulso, que pode ser alterada para obter valores analógicos variados. A variação do tempo de disparo do *SSR* resulta em uma porcentagem da carga em relação à saída, conforme podemos verificar na Figura 42. Por exemplo, ligando a saída por 5 segundos e deixando desligada por mais 15 segundos até a sua religação, o sistema regula a energia de forma que a carga na saída se mantenha a 25% (SILVEIRA, 2017).

Figura 42 – Controle de Temperatura Proporcional a 25%.



Fonte: Silveira (2017).

Para a implementação da sintonia Ziegler-Nichols em malha fechada, foram removidos os componentes integral e derivativo do controlador PID, e observado o comportamento do atuador de aquecimento em várias faixas de ganho até se conseguir observar um ganho K_{CR} em que se pode ter uma curva de resposta sustentadamente oscilatória, com período P_{CR} . Obtido esses valores, os mesmos são aplicados nas fórmulas da Tabela 2 para a obtenção de K_p , K_i e T_i , conforme Equações 10, 11 e 12:

$$K_p = 0.45. K_p \quad (10)$$

$$K_i = \frac{K_p T}{T_i} \quad (11)$$

$$T_i = \frac{P_{CR}}{1.2} \quad (12)$$

O controlador PI implementado no microcontrolador apresentou na forma $e(t_{k+1})$ o erro atualizado do algoritmo, e $e(t_k)$ o erro no período da amostra anterior. O erro, portanto, é dado pela diferença da temperatura escolhida (*setpoint*) e da temperatura medida pelo sensor (*temperatura*).

$$erro[e(k)] = setpoint - temperatura \quad (13)$$

A componente proporcional é ilustrada conforme Equação 14.

$$P(t_k) = K. (e(k)) \quad (14)$$

Utilizando a forma da aproximação de Tustin, pela Equação 15 representou-se a componente integral do controlador PI.

$$I(t_{k+1}) = I(t_k) + \frac{K \cdot h}{T_i} \frac{(e(t_{k+1}) + e(t_k))}{2} \quad (15)$$

O termo h é o período de amostra (2 segundos), ajustado conforme o período de amostra recomendado do sensor DHT22. Por fim, a saída de controle é composta pela soma das componentes PI, como mostra a Equação 16.

$$\text{sinaldecontrole} = I(t_{k+1}) + P(t_k) \quad (16)$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como resultado dos testes para o melhor funcionamento geral da câmara, a implementação das lógicas mais bem adaptadas é ilustrado pela Figura 44, que mostra o fluxograma do *software* na câmara, implementada ao microcontrolador. Através da função principal, as subfunções controlam junto aos atuadores, conforme a necessidade verificada pela leitura do sensor, e tem seus fluxogramas para o funcionamento dos sistemas de aquecimento, refrigeração, umidificação e desumidificação mostrados nas Figuras 45, 46, 47 e 48 respectivamente.

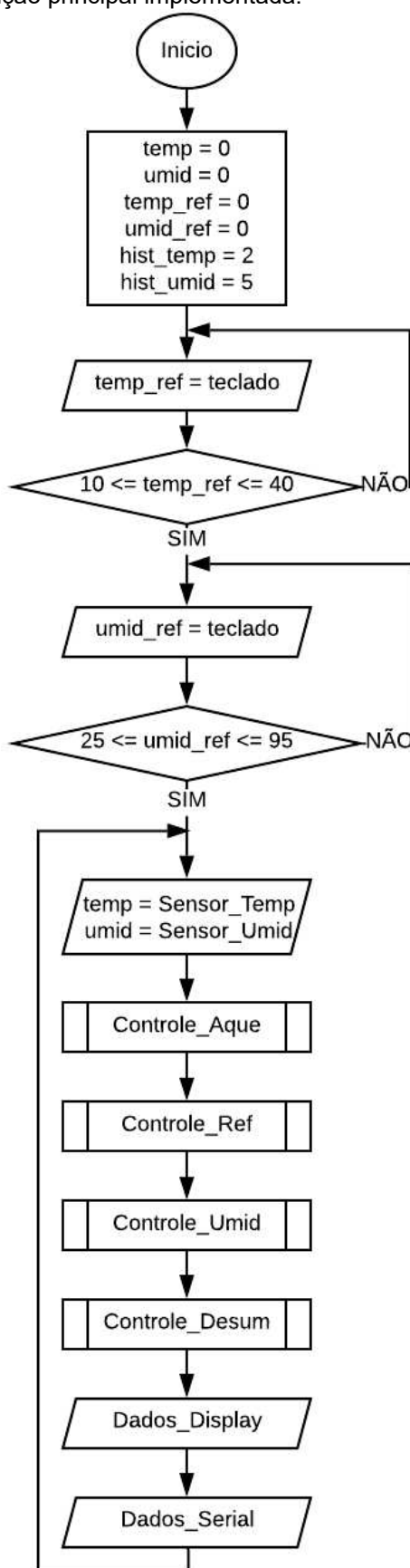
Ao energizar a câmara, é informado temperatura e umidade relativa do ar ambiente pela interface *LCD*. Então é solicitado ao usuário os valores de referência desejados, devendo serem inseridos através do teclado numérico, colocadas em um intervalo de 10 a 40°C de temperatura e de 25 a 95 % de umidade relativa. O sistema de controle em malha fechada é então acionado e, conforme ilustra a Figura 43 com o atuador de desumidificador acionado, é informado no *LCD* qual atuador está ativo no momento (“DES”). Conforme a lógica do *software* implementada, buscando seguir os valores de referência, é informado os valores atuais das variáveis de temperatura e umidade do ar da câmara no *LCD*, assim como o valor corrente dos valores de referência.

Figura 43 – IHM em funcionamento.

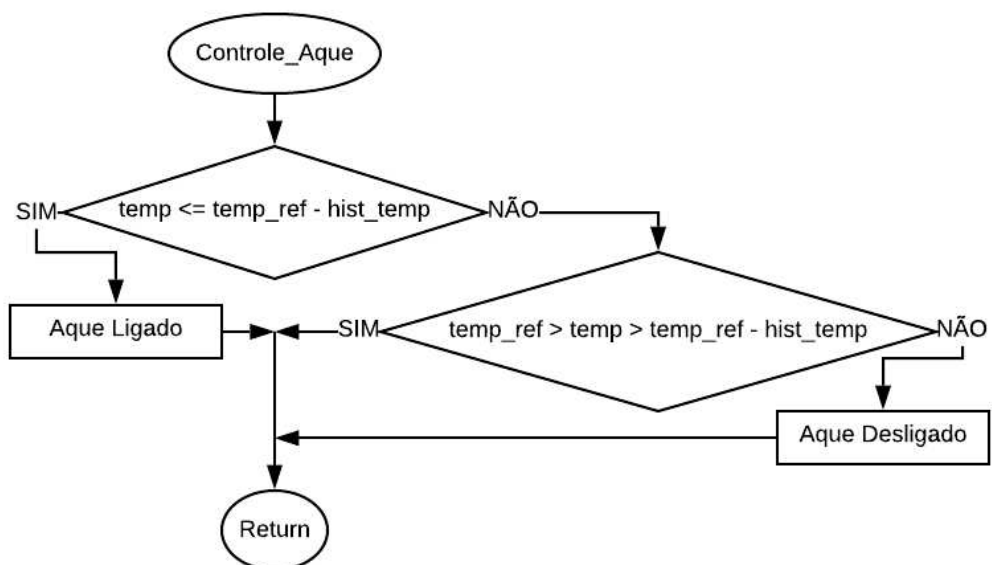


Fonte: Autoria própria (2019).

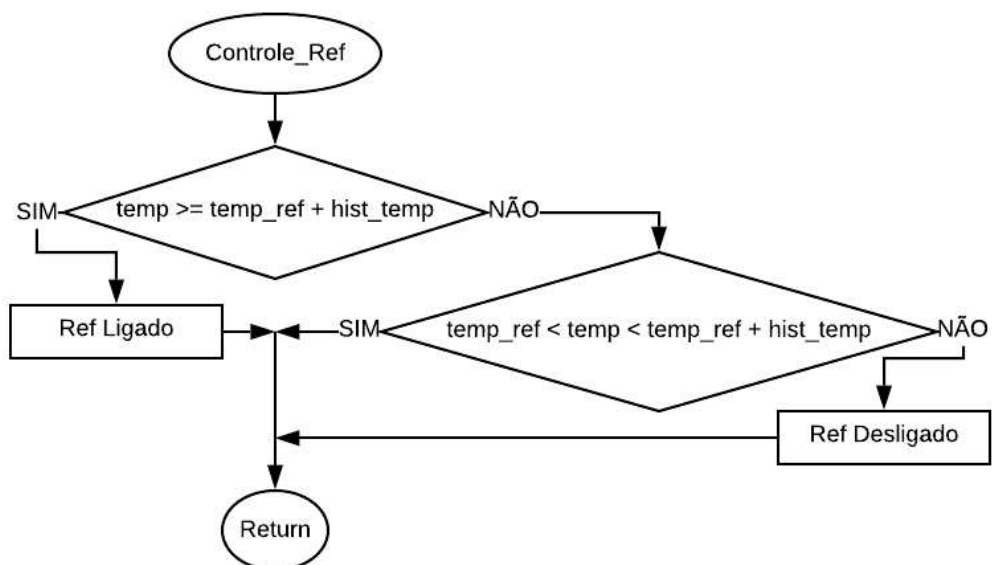
Figura 44 – Fluxograma da função principal implementada.



Fonte: Autoria própria (2019).

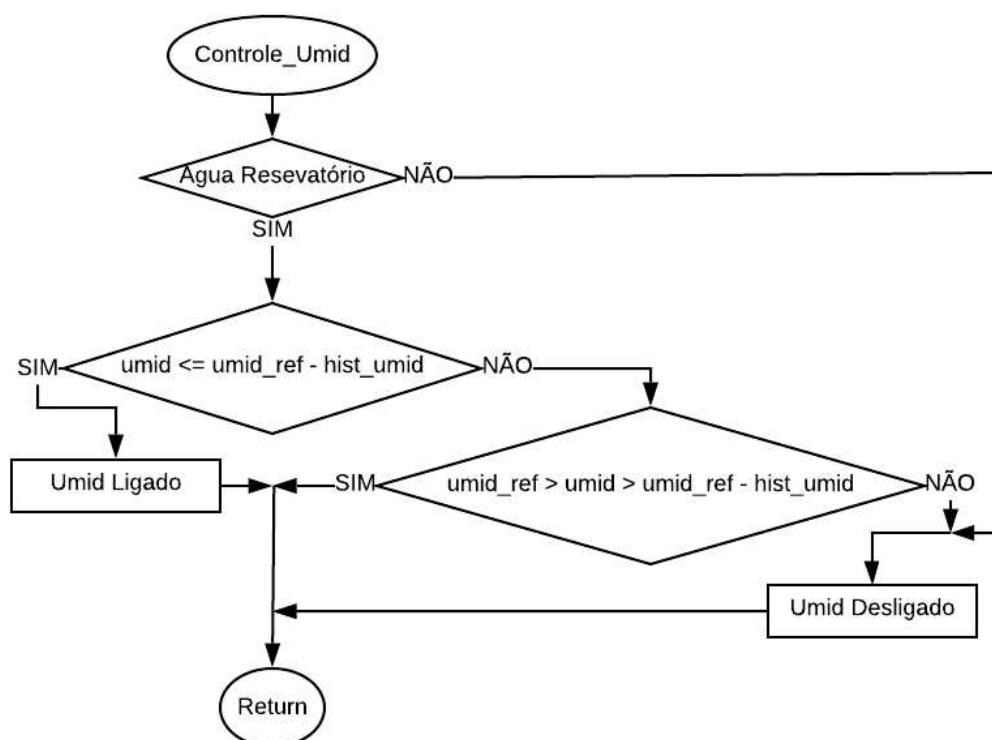
Figura 45 – Fluxograma da função de aquecimento.

Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 46 – Fluxograma da função de refrigeração.

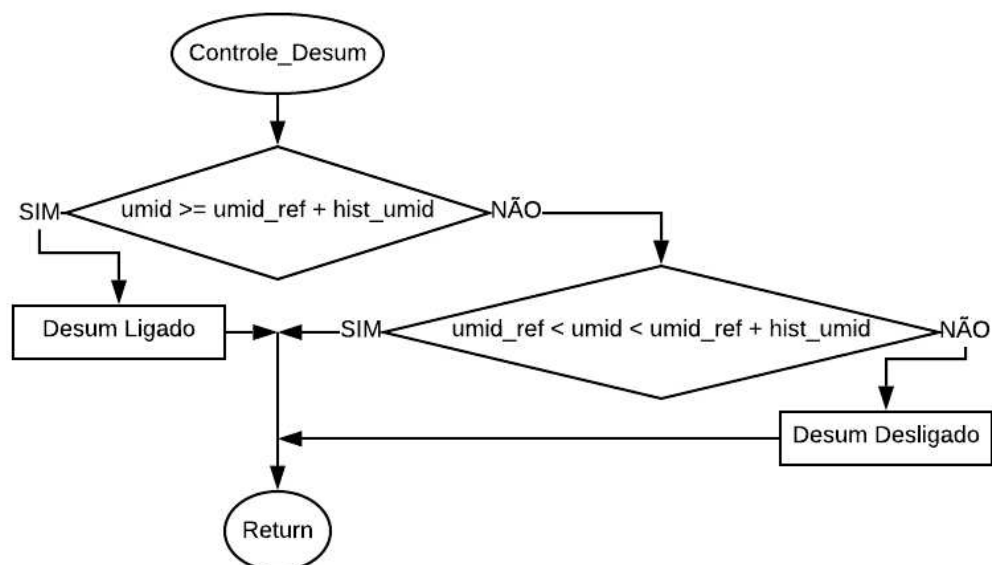
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 47 – Fluxograma da função de umidificação.



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 48 – Fluxograma da função de desumidificação.



Fonte: Autoria própria (2019).

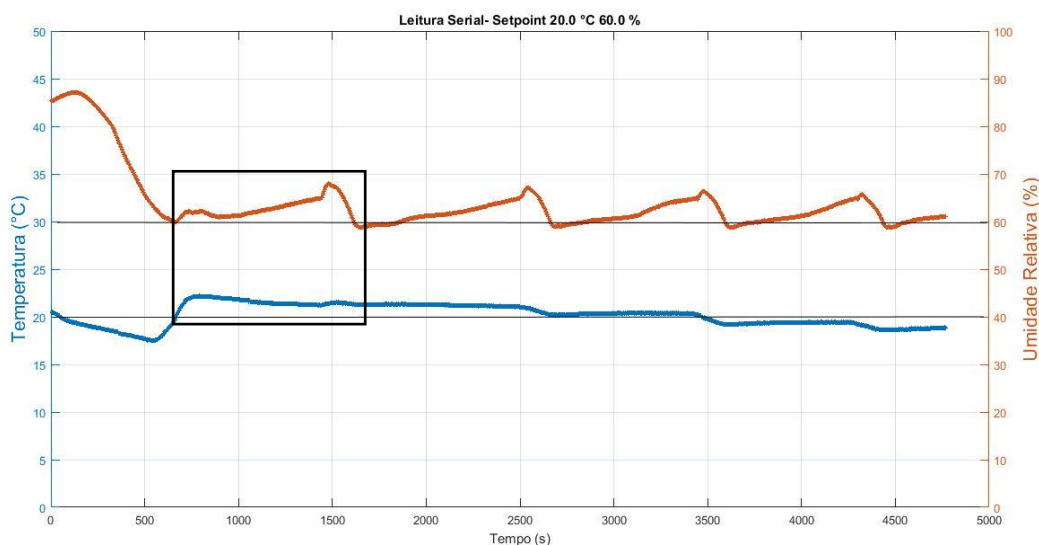
4.1 CURVAS DE TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA

O comportamento das variáveis de interesse, temperatura e umidade relativa do ar, foram acompanhadas através de ensaios em diferentes patamares no interior da câmara. Os ensaios se dão selecionando uma temperatura de referência e variando a umidade relativa. Para melhor leitura e interpretação, os resultados foram plotados em tempo real no *software* Matlab, através de comunicação serial com o microcontrolador, mostrando no eixo esquerdo das ordenadas a temperatura, em azul; e no eixo direito a umidade relativa, pelo tempo em segundos.

No gráfico da Figura 49, na parte destacada, percebe-se um ciclo no comportamento da umidade relativa (UR) que ocorre periodicamente. Ele acontece devido à tendência de o ar interno à câmara equilibrar ao nível de UR externo, mais alto. Quando isso ocorre além dos intervalos pré-definidos em relação ao *setpoint* estipulado, o atuador de desumidificação é acionado. Como o ciclo de refrigeração leva um certo tempo até a serpentina estar no seu nível mínimo de temperatura, a fim de realizar a desumidificação do ar, em temperaturas maiores a água já condensada é liberada ao ambiente pelo ventilador, ocasionando um pequeno pico de umidade, para então ser efetivada a desumidificação até o nível estipulado.

Nota-se também uma pequena variação da temperatura do ar a cada acionamento dos atuadores de desumidificação, que atuam através da refrigeração do ar, porém ainda dentro do intervalo referente à meta de temperatura estipulada.

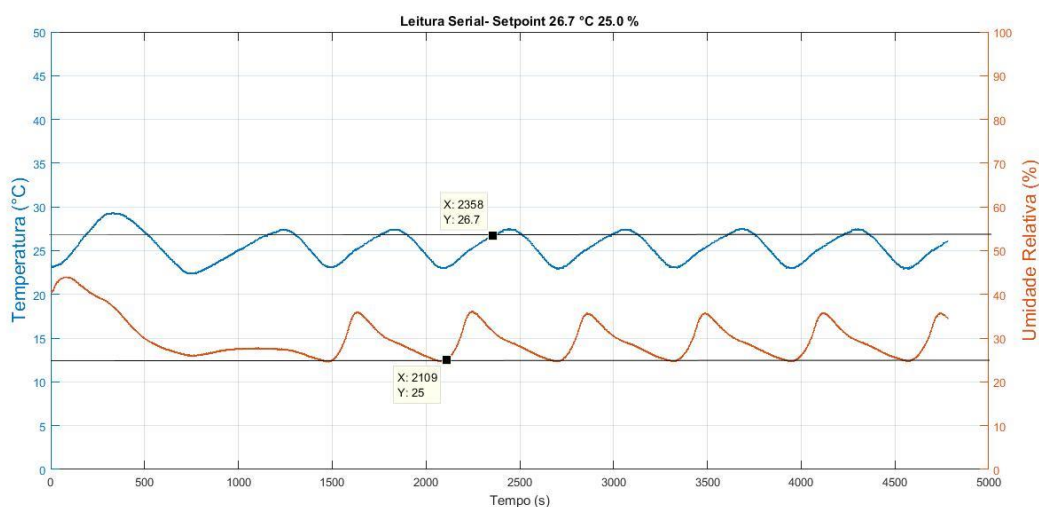
Figura 49 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para um *setpoint* de 20 °C e 60 % UR.



Fonte: Autoria própria (2019).

No gráfico da Figura 50, para um *setpoint* de 25 % para UR, configurando a situação mais crítica referente à dinâmica de atuação dos componentes do sistema, em relação à meta mínima definida de umidade relativa. Para essa obtenção de dados, o atuador de refrigeração, para um *setpoint* abaixo de 40 % de UR seria acionado junto com o atuador de desumidificação. Isso porque o atuador de refrigeração potencializa a desumidificação, porém interfere fortemente junto à temperatura. Verifica-se na figura um ciclo, em que ao se atingir a meta de UR através dos atuadores citados, que geram resfriamento do sistema, é acionado em seguida o atuador de aquecimento, que por sua vez faz a UR subir rapidamente, acionando novamente os atuadores para a desumidificação.

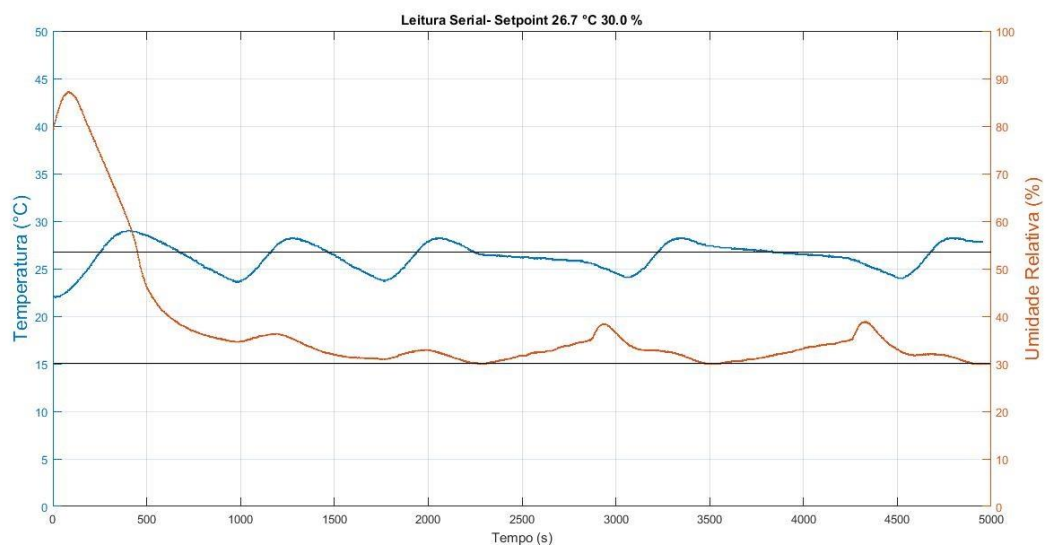
Figura 50 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para um *setpoint* de 26.7 °C e 25 % UR.



Fonte: Autoria própria (2019).

Para minimizar esse problema, a lógica implementada foi alterada de forma a não ocorrer a atuação conjunta do evaporador de refrigeração e o da desumidificação. Desta forma, acionando somente a atuador de desumidificação, a curva de 30 % de UR para uma temperatura de referência 26.7 °C fica demonstrada na Figura 51, a qual apresenta um comportamento mais suave, com ciclos mais demorados proporcionando uma atuação menos frequente dos atuadores.

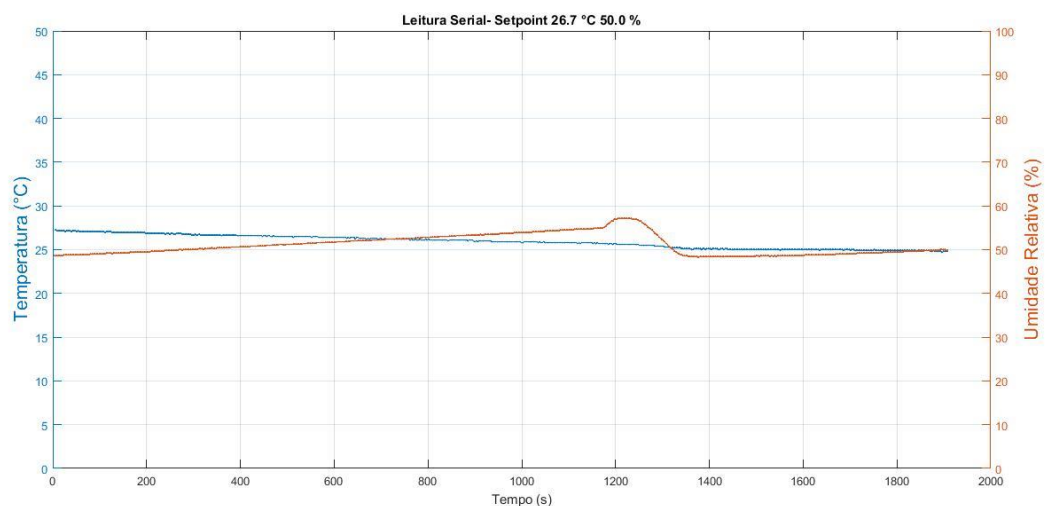
Figura 51 – Temperatura e umidade do ar, em segundos, para um *setpoint* de 26.7 °C e 30 % UR.



Fonte: Autoria própria (2019).

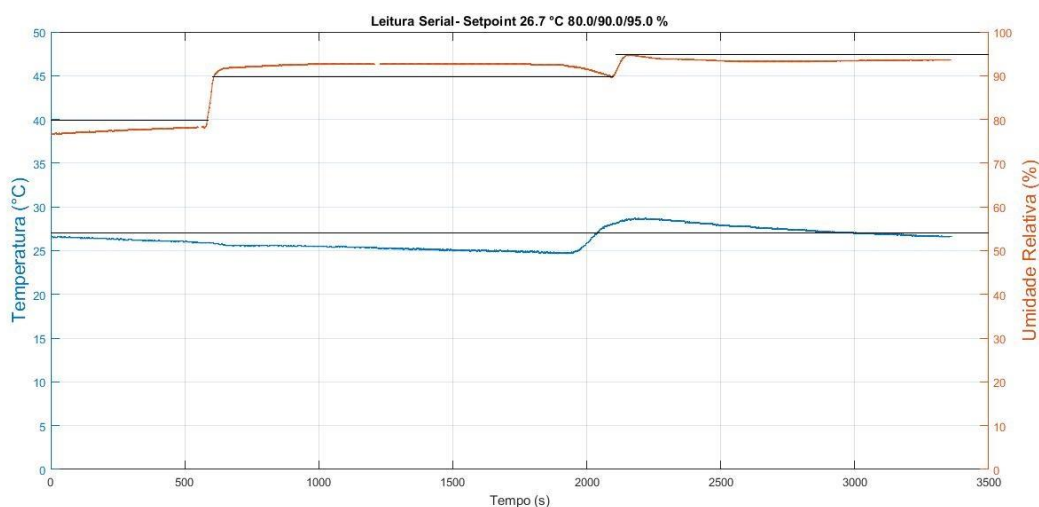
Para o mesmo patamar de 26.7 °C, a Figura 52 mostra o comportamento da temperatura e UR para o *setpoint* de 50 %. Para uma mudança do ponto de ajuste de UR a 26.7 °C, de 80 % para 95 %, o gráfico é ilustrado pela Figura 53.

Figura 52 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para um *setpoint* de 26.7 °C e 50 % UR.



Fonte: Autoria própria (2019).

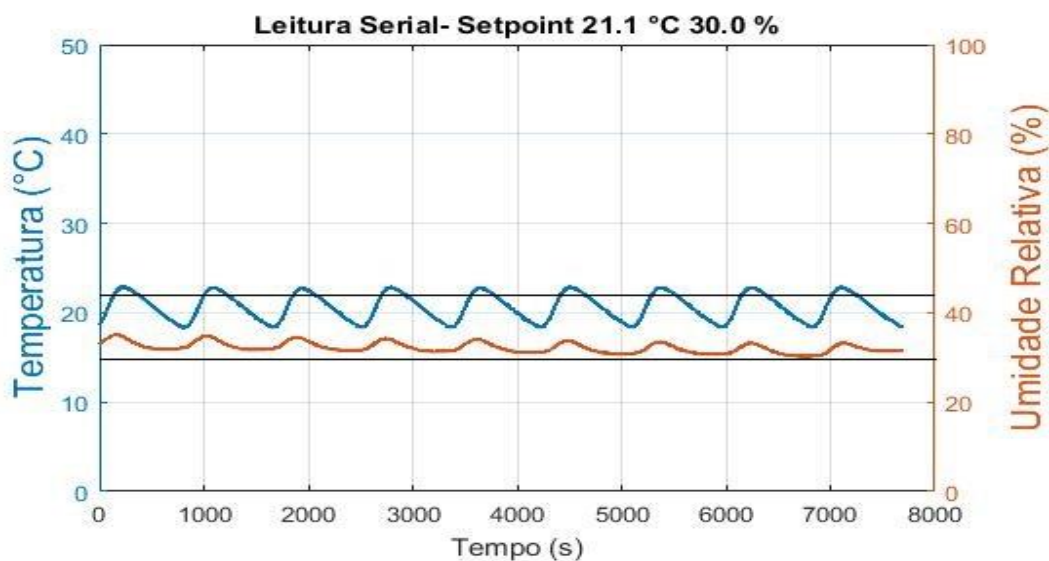
Figura 53 – Temperatura e umidade do ar, em segundos, para uma mudança de *setpoint* de UR, a 26.7 °C, de 80 % para 95 % UR.



Fonte: Autoria própria (2019).

A Figura 54 mostra os dados adquiridos para uma situação onde a temperatura de *setpoint* foi diminuída para 21.1 °C, para uma UR estipulada em 30 %. Verifica-se uma dificuldade de a umidade relativa atingir um patamar de 30 %, ou abaixo. Isso se deve a capacidade de refrigeração do atuador de desumidificação, o qual apresenta uma temperatura, aferida com um termômetro, entre 5 °C (direto na serpentina) a 10 °C (nas aletas de passagem de ar) em regime de funcionamento.

Figura 54 – Temperatura e umidade do ar, em segundos, para um *setpoint* de 21.1 °C e 30 % UR.



Fonte: Autoria própria (2019).

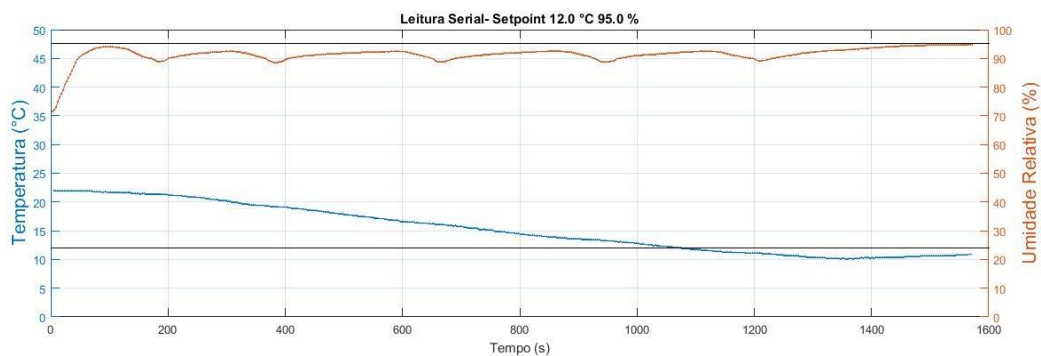
Para a umidade e temperatura pretendidas, de 30.0 % e 21.1 °C de UR, utilizando a Equação 1 e a Tabela 6 no Anexo A, encontra-se um valor da pressão máxima de vapor d'água $E = 18,47$ para a temperatura aproximada de 21°C, valor utilizado no desenvolvimento seguinte para obtenção do valor da pressão real de vapor d'água (e) :

$$UR = \frac{e}{E} 100$$
$$30 \% = \frac{e}{18.47} 100$$
$$e = 5,54$$

Esse valor de e tem sua temperatura correspondente na própria Tabela 6, retornando o valor aproximado entre 2 e 3°C, que é referente à pressão máxima de vapor d'água a tal temperatura, denominada também temperatura de ponto de orvalho. Essa é a temperatura abaixo da qual a umidade do ar começa a se condensar, e assim abaixar o nível de UR do sistema. Por essa temperatura a qual o atuador de desumidificação não chega a obter de forma contínua e, portanto, não consegue desumidificar o ar para tais patamares de referência.

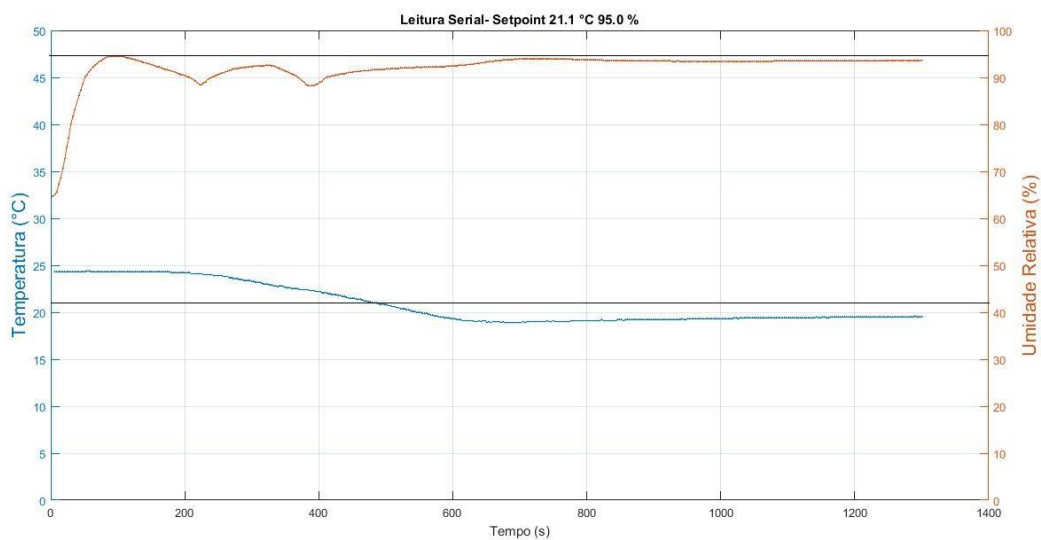
Para níveis intermediários, maiores que 40 % de UR, e no limite superior, em 95 % de UR, o comportamento e a resposta das variáveis se mostram mais estáveis, conforme ilustramos pelas Figuras 55, 56 e 57, partindo da temperatura e UR do ar ambiente para pontos de ajuste em 12 °C, 21 °C e 34 °C respectivamente. No Apêndice A estão contidos os gráficos dos ensaios, com a obtenção de curvas para outros diferentes níveis.

Figura 55 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para um *setpoint* de 12 °C e 95 % UR.



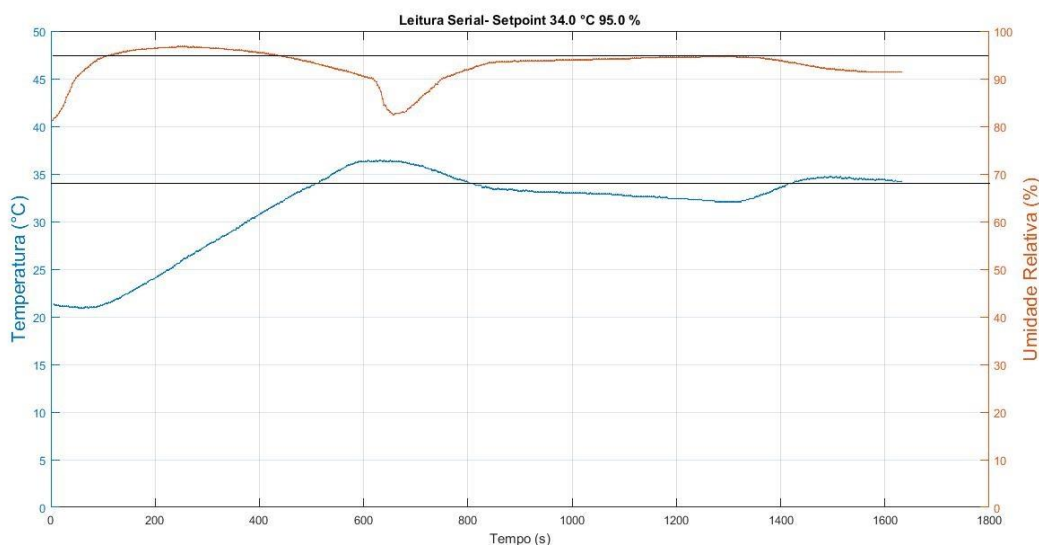
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 56 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para um *setpoint* de 21.1 °C e 95 % UR.



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 57 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para um *setpoint* de 34 °C e 95 % UR.



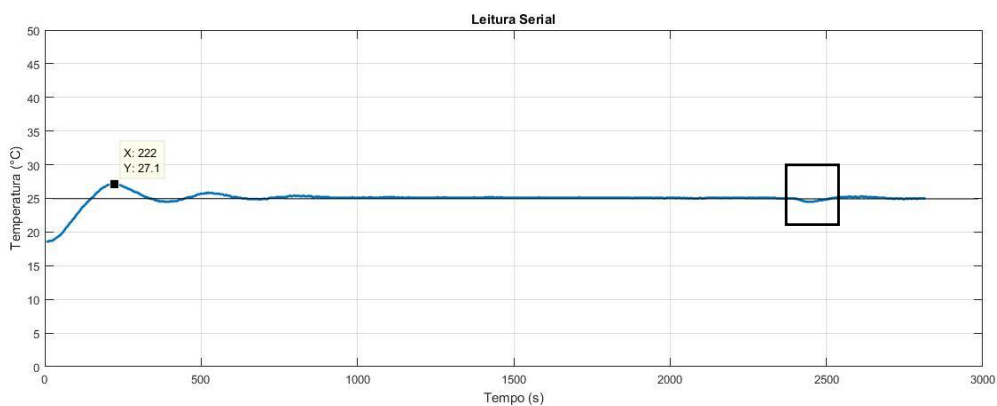
Fonte: Autoria própria (2019).

4.2 CURVAS AQUECIMENTO PID

Com os valores de K_{CR} e P_{CR} obtidos (Seção 3.1.3) para um controlador PI, desenvolvido e aplicado ao microcontrolador, obteve-se as seguintes respostas, satisfatórias a vários níveis de *setpoint* estipulados para o aquecimento do ar interno na câmara, conforme Figuras 58, 59, 60 e 61.

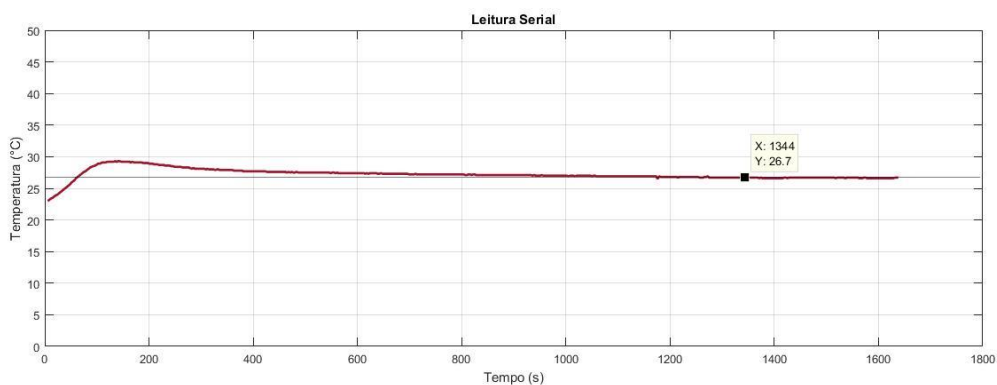
Os ensaios começaram em temperatura ambiente e tiveram os pontos de ajuste em 25 °C, 26,7, 30 °C e 35 °C. Atendendo, portanto, a necessidade do processo de acompanhar com grande precisão, em regime, aos diversos níveis de temperatura estipulados, verificou-se um tempo de resposta relativamente grande, com um pequeno *overshoot*.

Figura 58 – Temperatura, pelo tempo em segundos, para um *setpoint* de 25 °C., com distúrbio (abertura de porta).



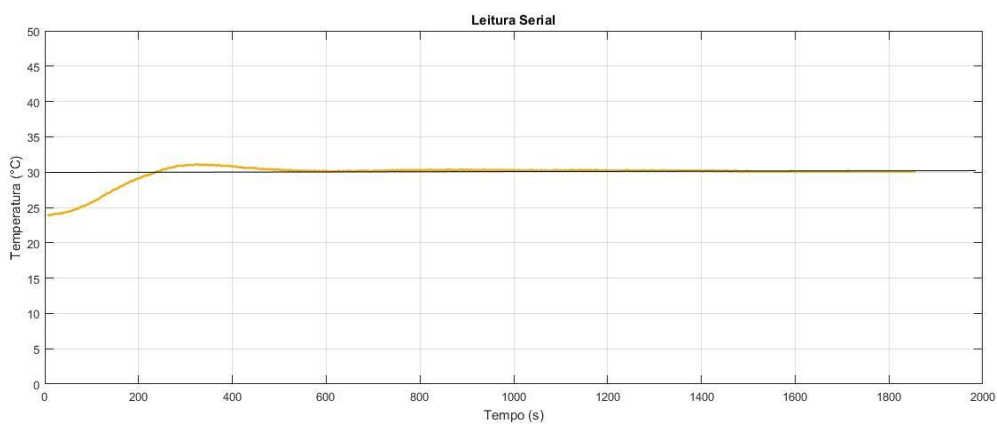
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 59 – Temperatura, pelo tempo em segundos, para um *setpoint* de 26.7 °C.



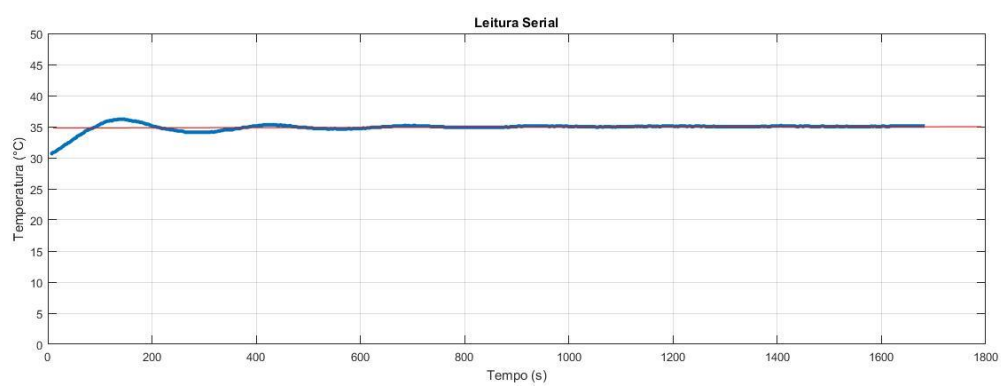
Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 60 – Temperatura, pelo tempo em segundos, para um *setpoint* de 30 °C.



Fonte: Autoria própria (2019).

Figura 61 – Temperatura, pelo tempo em segundos, para um *setpoint* de 35 °C.



Fonte: Autoria própria (2019).

5 CONCLUSÕES

O desenvolvimento deste trabalho, abrangendo conceitos de várias áreas relacionadas entre si, teve como objetivo principal obter de forma automatizada, em uma câmara, o controle de seu ambiente interno em termos de temperatura e umidade do ar. Buscou-se apresentar de forma clara os princípios e componentes eletroeletrônicos, assim como as técnicas e metodologias utilizadas, além de conceitos e propriedades referentes as variáveis controladas.

Foi possível verificar a grande influência entre as variáveis de estudo deste trabalho e seus atuadores. Como também se observou fundamentos de controle em malha fechada, inicialmente aplicáveis em todos os atuadores e variáveis de interesse, como o controle PID, implementado com sucesso isoladamente no atuador de aquecimento, e as dificuldades de ser aplicado esse método em todos, na prática, devido as características dos atuadores e à custos para uma implementação multivariável, a considerar o esforço de reaproveitamento de equipamentos subutilizados a fim de adequação ao baixo orçamento. Desenvolveu-se, portanto, métodos mais aplicáveis à proposta dos diversos tipos de atuadores controlados por um único microcontrolador. Apesar do sistema de controle implementado ser baseado pelo método liga-desliga, verificou-se resultados aceitáveis ao equipamento proposto, comprovando também a grande potencialidade de utilização de microcontroladores e periféricos necessários para a automatização, sensoriamento e monitoramento dos subsistemas do equipamento.

Portanto, esta estratégia mostrou-se viável de ser explorada no equipamento para o uso em pesquisas laboratoriais acadêmicas em nível de pós-graduação, especificamente sendo utilizado no Laboratório de Incêndios Florestais do Departamento de Ciências Florestais da Madeira na UFPR; como também potencial para aplicações industriais e comerciais. Melhorias possíveis nesse trabalho podem envolver o uso de atuadores verdadeiramente analógicos, que podem conduzir a um controle mais preciso. Neste trabalho utilizou-se um controle diagonal descentralizado, mas técnicas verdadeiramente multivariáveis poderiam reduzir a interação entre as variáveis, e dessa forma melhorar o controle.

REFERÊNCIAS

AGUIRRE, Luis Antonio. **Introdução à Identificação de Sistemas**: Técnicas Lineares e Não Lineares: Teoria e Aplicação. 4. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2015. 776 p.

Aosong Eletronics CO. **Temperature and humidity module**: AM2302 Product Manual. 2019. Disponível em: <https://akizukidenshi.com/download/ds/aosong/AM2302.pdf>. Acesso em: 07 jan. 2019.

ARDUINO. **Arduino Uno Rev3**. 2019. Disponível em: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>. Acesso em: 04 jun. 2019.

ÁVILA, Álvaro Flávio Santos de. **Monitoramento e Controle de Câmaras de Refrigeração via Velocidade Variável do Compressor**. 2011. 133 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/BUOS-8ZRP4S>. Acesso em: 02 ago. 2018.

ÁSTRÖM, Karl J.; HÄGGLUND, Tore. **Control PID Avanzado**. Madrid: Pearson Educación S. A., 2009. 488 p.

BAYRAM, Atila; MOAMMED, Sulaiman Abdullah; KARA, Frat. **Design of Heating System Controlled by Arduino**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN ENGINEERING AND SCIENCE, 4., 2016, Antalya. AAnais. Antalya: Si, 2016. v. 100000, p. 0 - 9. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/Design-of-Heating-System-Controlled-by-Arduino-Bayram-Mohammed/c1b2adba4ec55d7ba8907397d732f247a746300f>. Acesso em: 08 jul. 2018.

CAMPOS, Paulo Roberto Brero de. **Apostila de Controle I**. Curitiba: [s.i.], 2010. 110 p.

DICIO: Dicionário Online de Português. 2018. Disponível em: <https://www.dicio.com.br>. Acesso em: 07 nov. 2018.

FIEIRA, Claudia. **Interferência de diferentes sais sobre a cultura starter de salame tipo italiano** 2014. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia de Alimentos, Câmpus Francisco Beltrão, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2014.

FRIOVIX COMÉRCIO DE REFRIGERAÇÃO LTDA (Minas Gerais). **Evaporador Referigerador Consul**. Disponível em: <https://www.friopecas.com.br/evaporador-referigerador-crp38a-326003377/p>. Acesso em: 21 fev. 2019.

GASPAR REFRIGERAÇÃO (São Paulo). Gaspar Refrigeração. 2019. Disponível em: <https://www.refrigeracaogaspar.com.br/evaporador/1635>. Acesso em: 21 fev. 2019.

HENKLEIN, Pedro. **Análise de Ensaio de Desempenho de Compressores Herméticos Durante o Transitório**. 2006. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Metrologia, Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/88551>. Acesso em: 14 abr. 2019.

LEANDRO MUNIZ. Opencadd Advanced Technology (Org.). **Introdução a Sistemas de Controle**. 2019. Disponível em: <https://www.opencadd.com.br>. Acesso em: 27 jan. 2019.

LEANDRO, Eduardo. **Um Novo Sistema de Refrigeração com Controle de Temperatura, Compressor Aberto, Máquina de Indução Trifásica com Velocidade Variável e Correção Ativa do Fator de Potência do Estágio de Entrada**. 2006. 166 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/87222/leandro_e_me_ilha.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 17 abr. 2019.

LOPES, Sérgio Miguel Gomes. **Modelos de previsão do teor de humidade de combustíveis florestais**. 2013. 150 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Riscos Naturais e Tecnológicos, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2013.

MATOS, Rudmar Serafim. **Refrigeração e Climatização**: Universidade Federal do Paraná. 2010. Disponível em: <https://docs.ufpr.br/~rudmar/refri/material/>. Acesso em: 03 out. 2018.

MICROVOLT (Santa Catarina). **Câmara Climática Microtemp-15/80**. Joinville, 2018. 1 p. Disponível em: www.microvolt.com.br. Acesso em: 08 nov. 2018.

MIRANDA, Carlos Valdivia. **Sistemas de Controle Contínuos e Discretos**. Madri: Paraninfo, 2012. 404 p.

NÓBREGA & NÓBREGA LTDA (Ribeirão Preto). **Resistência Aletada 450mm 1500W**. 2018. Disponível em: <https://loja.nobrebrasil.com>. Acesso em: 21 jan. 2019.

NOGUEIRA, Danilo. **Como utilizar o optoacoplador 4N25 com Arduino**. 2018. Disponível em: <https://autocorerobotica.blog.br/como-utilizar-o-optoacoplador-4n25-com-arduino/>. Acesso em: 05 jun. 2019.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2010. 822 p.

PERTUZZATTI, Anderson et al. **Influência da Umidade na Resistência da Madeira de Eucalipto a Impactos**. Floresta e Ambiente, [s.l.], v. 24, p.1-6, 3 ago. 2017. FapUNIFESP (SciELO). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.092514>. Acesso em: 05 ago. 2018.

JANERT e K., P., **Controle de Feedback para Sistemas de Computação**. 1. ed. LTC, 2017. Disponível em: Minha Biblioteca (Portal do Aluno UTFPR).

KILIAN, Christopher T. **Modern Control Technology: Components and Systems**. 2. ed. Universidade de Michigan: Delmar Thomson Learning, 2005. 644 p.

PORTAL VIDA DE SILÍCIO. **Display LCD 16x2 com Arduino**. 2017. Ronan Largura. Disponível em: <https://portal.vidadesilicio.com.br/display-lcd-16x2-com-arduino/>. Acesso em: 12 mar. 2019.

RYNIECKI, Antoni; PILARSKA, Agnieszka; WAWRZYNIAK, Jolanta. **Basics of Process Control: the On-Off Control System**. Przemysl Spozywczy, Poznan, v. 1, n. 11, p.28-31, 28 dez. 2015. Wydawnictwo SIGMA-NOT, sp. z.o.o. <http://dx.doi.org/10.15199/65.2015.11.6>.

SILVA, Guilherme Diniz. **Projeto e Desenvolvimento de Sistema de Controle de Temperatura do Processo de Brassagem**. 2017. 97 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

SILVEIRA, Cristiano Bertulucci. **Como Funciona o Controle de Temperatura?** 2017. Disponível em: <https://www.citisystems.com.br/controle-de-temperatura/>. Acesso em: 02 dez. 2018.

SKOGESTAD, Sigurd. Probably the best simple PID tuning rules in the world. **Journal Of Process Control**. Trondheim Norway. 03 set. 2001. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Ali_Arshad3/post/Tuning_PID_without_process_transfer_function/attachment/59d61db679197b8077979869/AS:272443459997696@1441966990886/download/-InstellingenRegelaars_ExtraStof.pdf. Acesso em: 02 jul. 2018.

SKOGESTAD, Sigurd; POSTLETHWAITE, Ian. **Multivariable Feedback Control: Analysis and Design**. 2. ed. John Wiley And Sons, 2005. 574 p.

SOARES, Ronaldo Viana; BATISTA, Antonio Carlos. **Meteorologia e Climatologia Florestal**. Curitiba: UFPR, 2004. 195 p.

STOECKER, Wilbert F.; JONES, Jerold W. **Refrigeração e Ar-Condicionado**. São Paulo: Mcgraw-hill, 1985. 252 p.

STOECKER, W. F.; JABARDO, J. M. Saiz. **Refrigeração Industrial**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blücher Ltda, 2002.

TEXAS INSTRUMENTS (Estados Unidos). **ARM® Cortex®-M4F-Based MCU TM4C1294 Connected LaunchPad™ Evaluation Kit. 2019**. Disponível em: <http://www.ti.com/tool/EK-TM4C1294XL>. Acesso em: 15 mar. 2019.

TROTEC (Portugal). **Conhecimento Prático de Desumidificadores**. 2018. Disponível em: <https://pt.trotec.com/produtos-e-servicos/maquinas-homecomfort/desumidificacao/conhecimento-pratico->. Acesso em: 20 dez. 2018.

UFPR (Paraná). **Laboratórios**. 2019. Disponível em: <http://www.agrarias.ufpr.br/portal/linhas-de-pesquisa>. Acesso em: 05 jun. 2019.

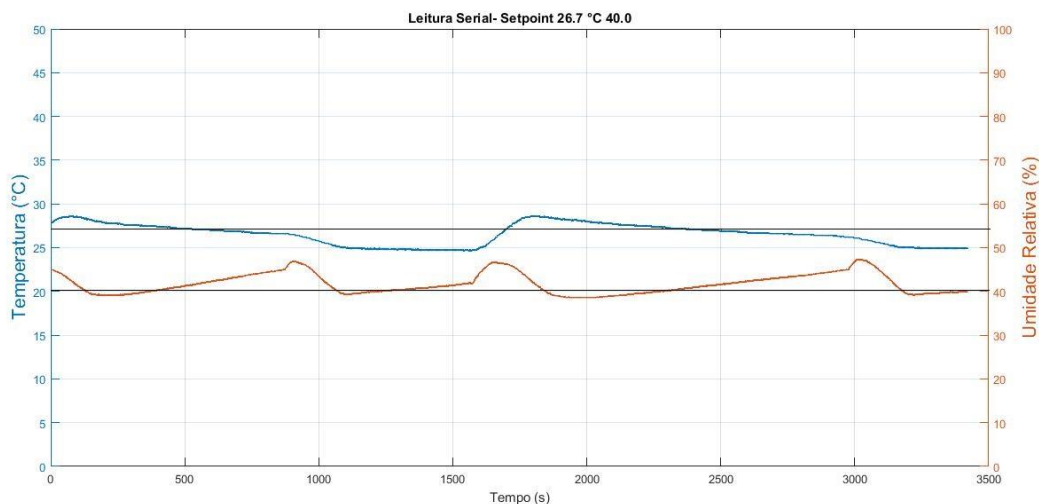
USINA INDUSTRIA COMÉRCIO E IMPORTAÇÃO (Rio Grande do Sul). **Módulo Relé 5V 10A 8 Canais com Optocopladores**. 2019. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/reles/modulo-rele-5v-10a-8-canais-com-optocopladores-3111.html>. Acesso em: 02 maio 2019.

VISIOLI, Antonio. **Practical PID Control: Advances in industrial control**. Brescia: Springer, 2006. 322 p.

WIKIPÉDIA (Brasil) (Comp.). **Ponto de orvalho**. 2019. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Ponto_de_orvalho. Acesso em: 10 fev. 2019.

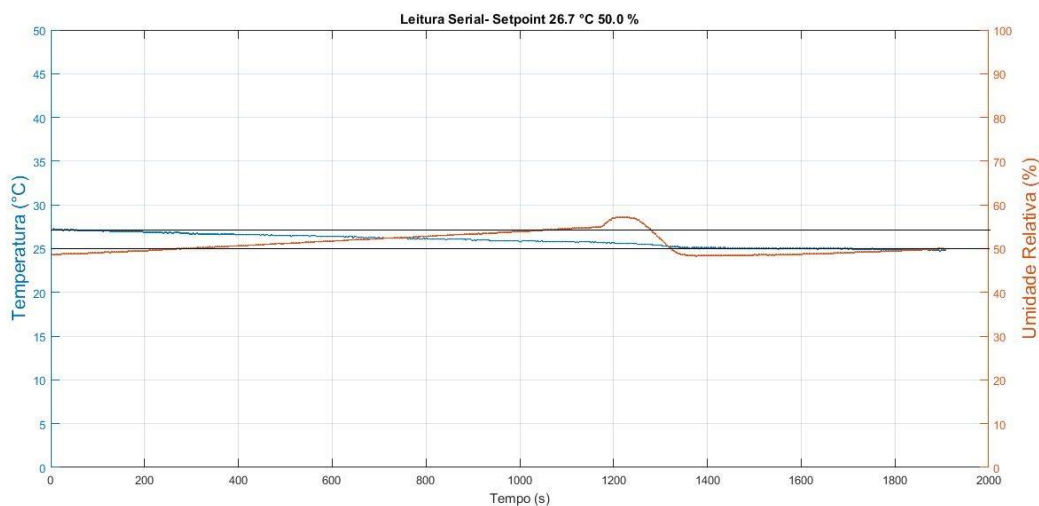
APÊNDICE A – CURVAS DE TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR.

Figura 62 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para um *setpoint* de 26.7 °C e 40 % UR.



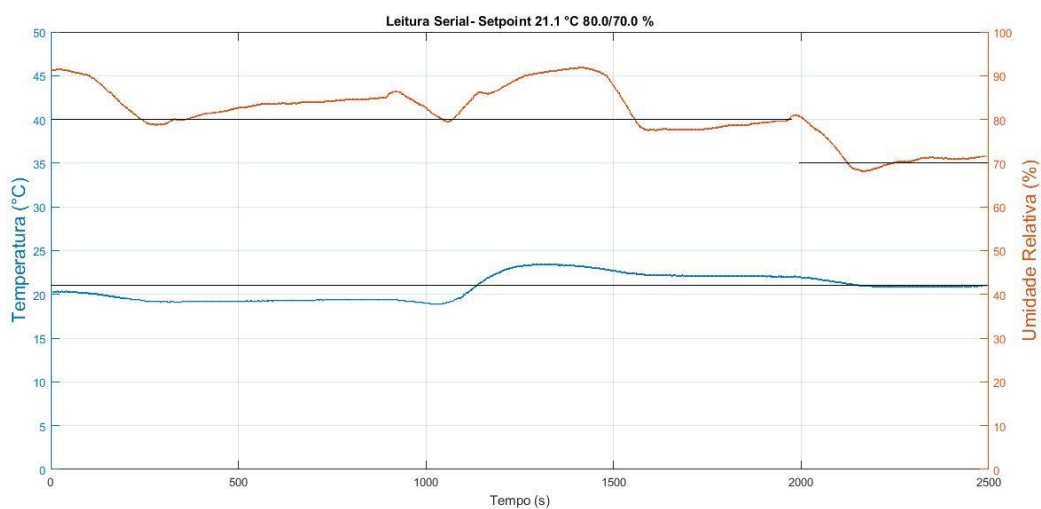
Fonte: Autoria própria, (2019).

Figura 63 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para um *setpoint* de 26.7 °C e 50 % UR.



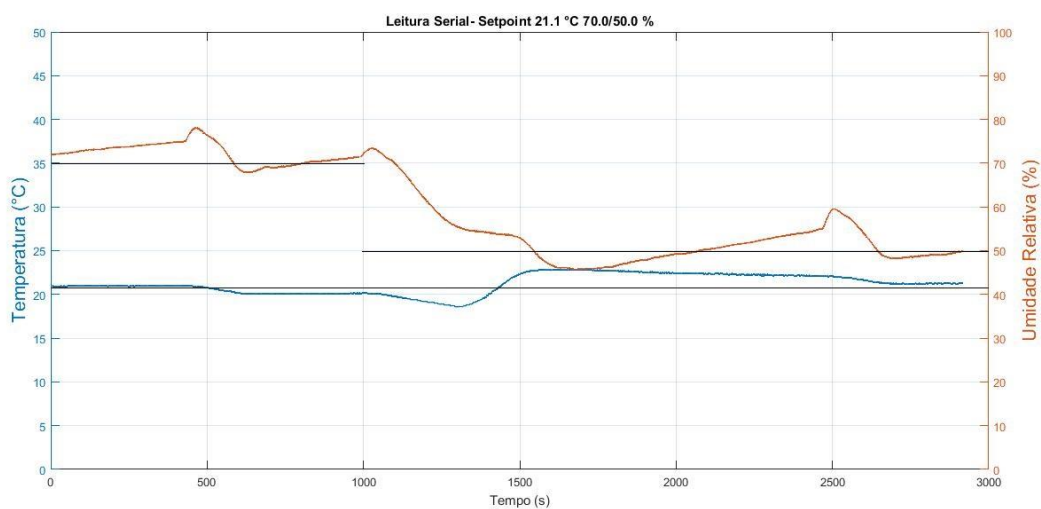
Fonte: Autoria própria, (2019).

Figura 64 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de *setpoint* de UR, a 21.1 °C, de 80 % para 70 %.



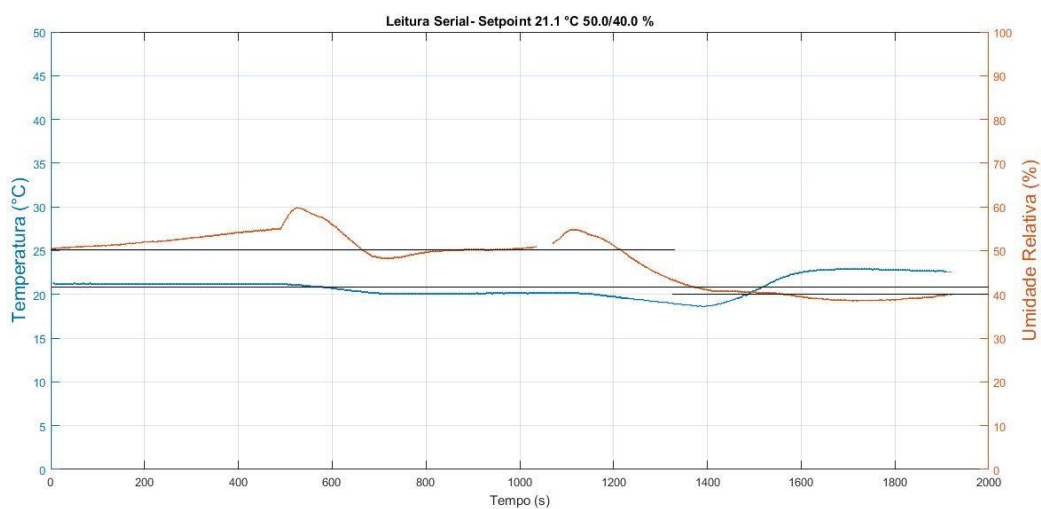
Fonte: Autoria própria, (2019).

Figura 65 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de *setpoint* de UR, a 21.1 °C, de 70 % para 50 %.



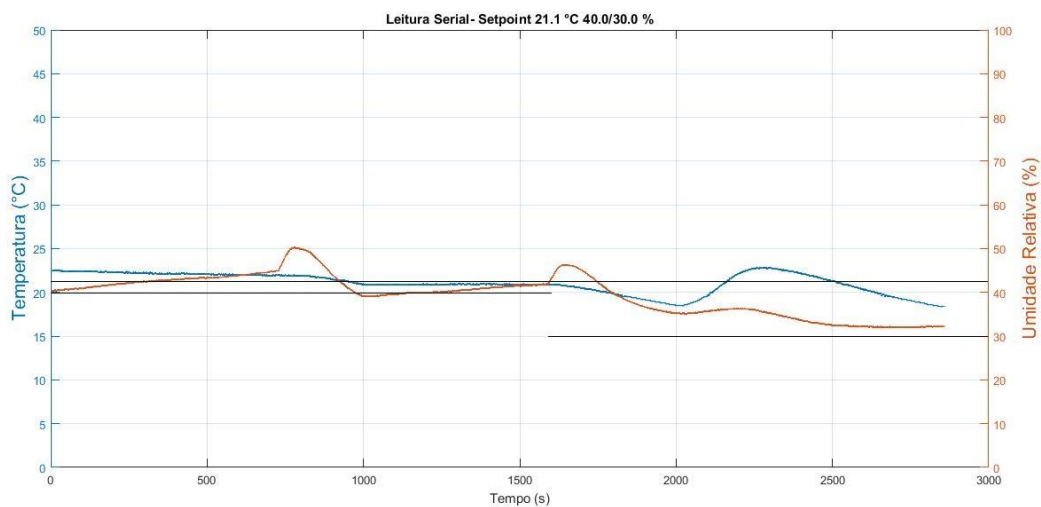
Fonte: Autoria própria, (2019).

Figura 66 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de *setpoint* de UR, a 21.1 °C, de 50 % para 40 %.



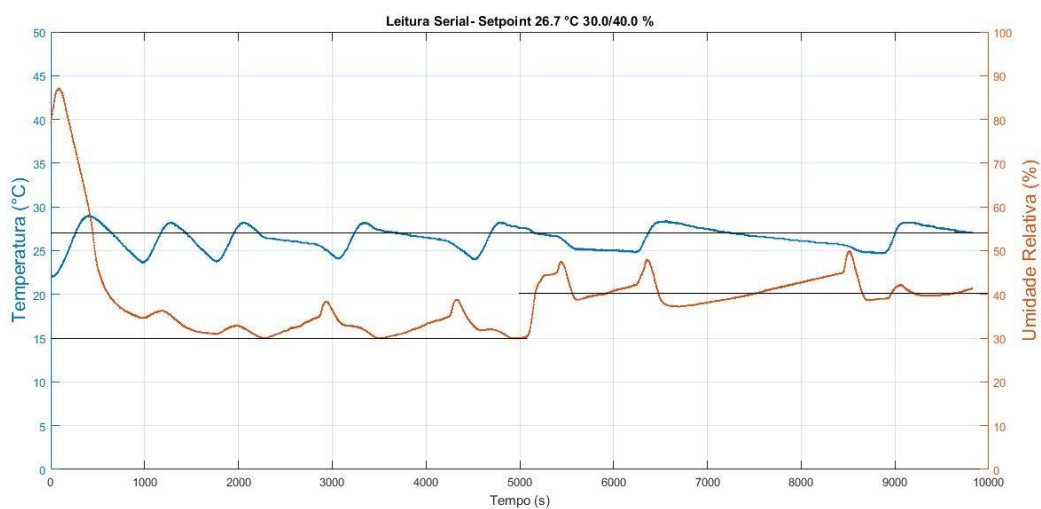
Fonte: Autoria própria, (2019).

Figura 67 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de *setpoint* de UR, a 21.1 °C, de 40 % para 30 %.



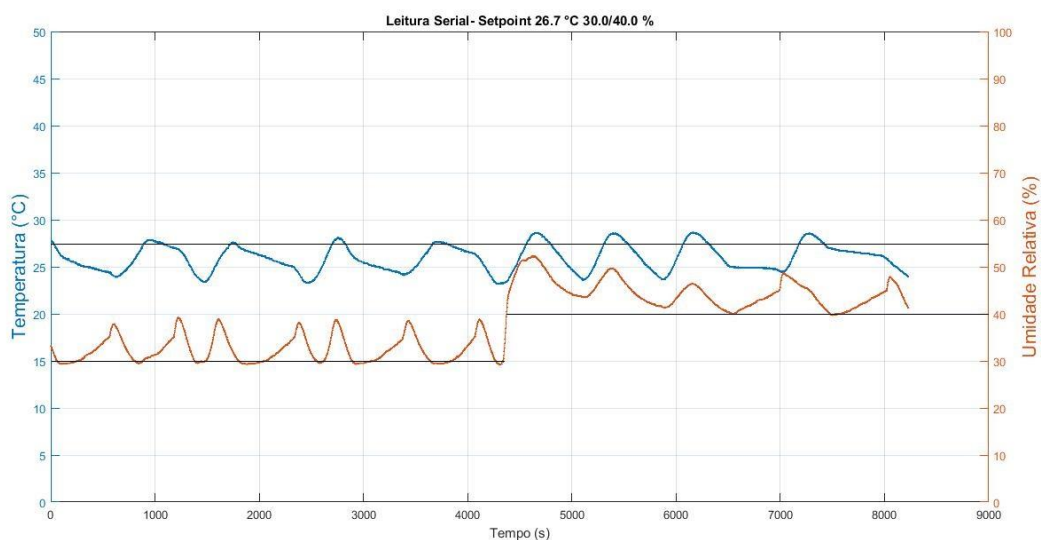
Fonte: Autoria própria, (2019).

Figura 68 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de *setpoint* de UR, a 26.7 °C, de 30 % para 40 %.



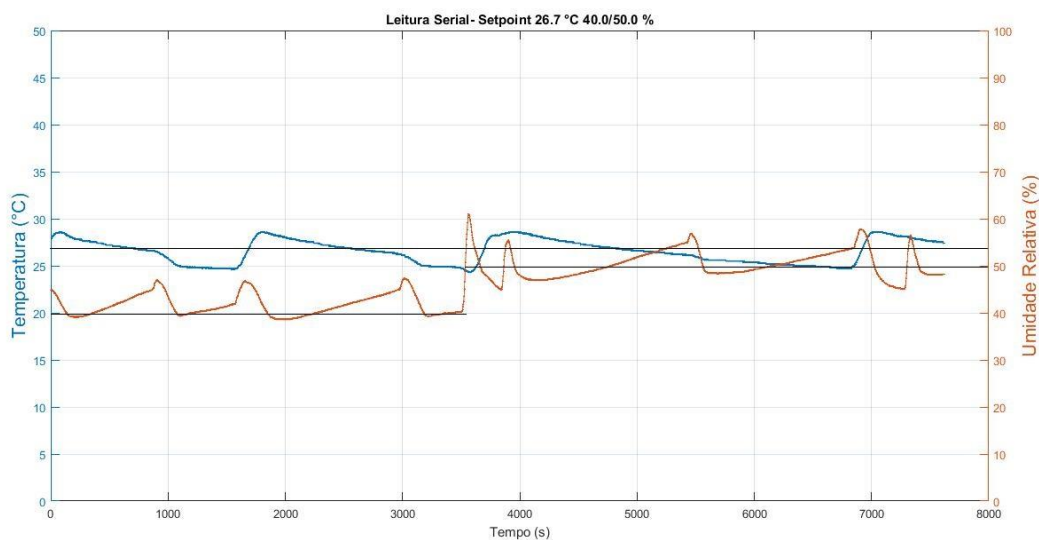
Fonte: Autoria própria, (2019).

Figura 69 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de *setpoint* de UR, a 26.7 °C, de 30 % para 40 %.



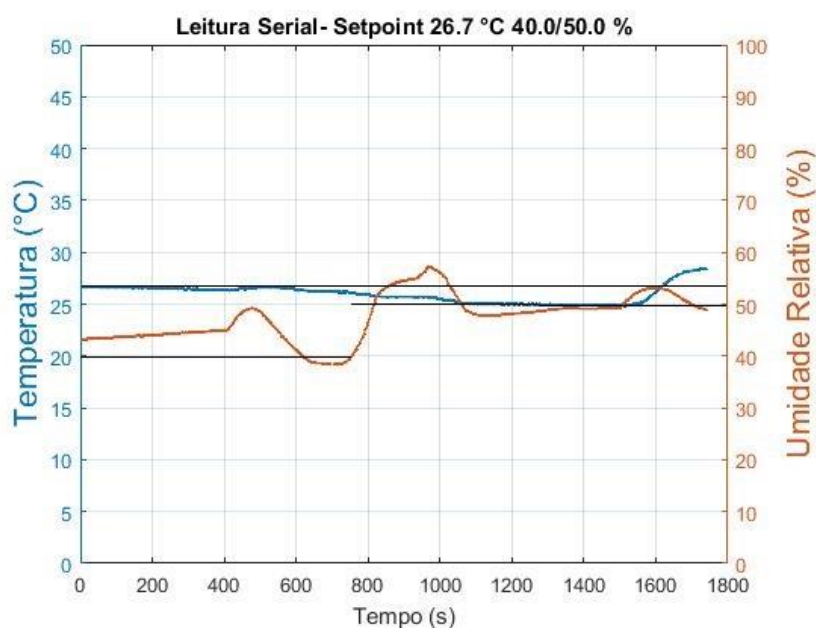
Fonte: Autoria própria, (2019).

Figura 70 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de *setpoint* de UR, a 26.7 °C, de 40 % para 50 %.



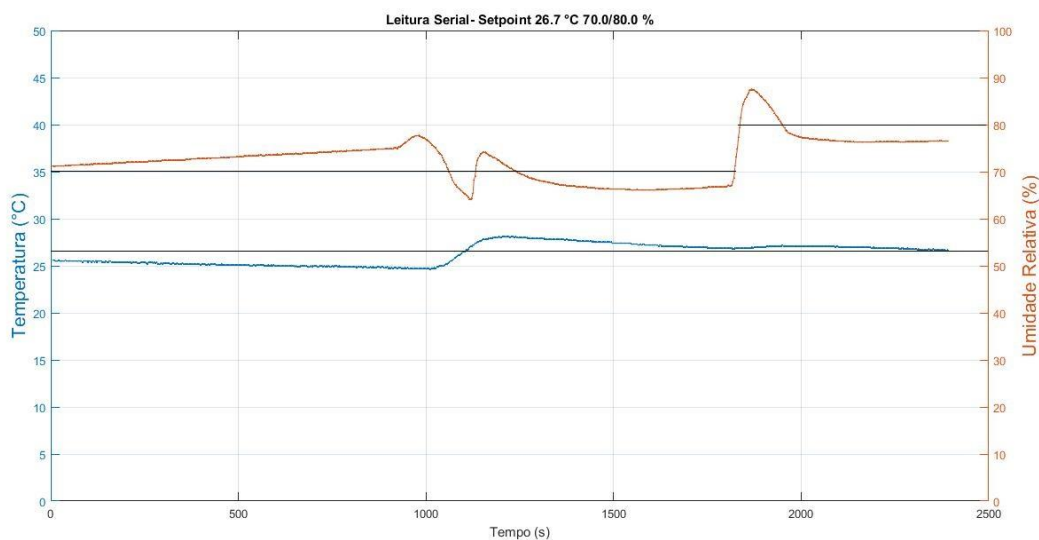
Fonte: Autoria própria, (2019).

Figura 71 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de *setpoint* de UR, a 26.7 °C, de 40 % para 50 %.



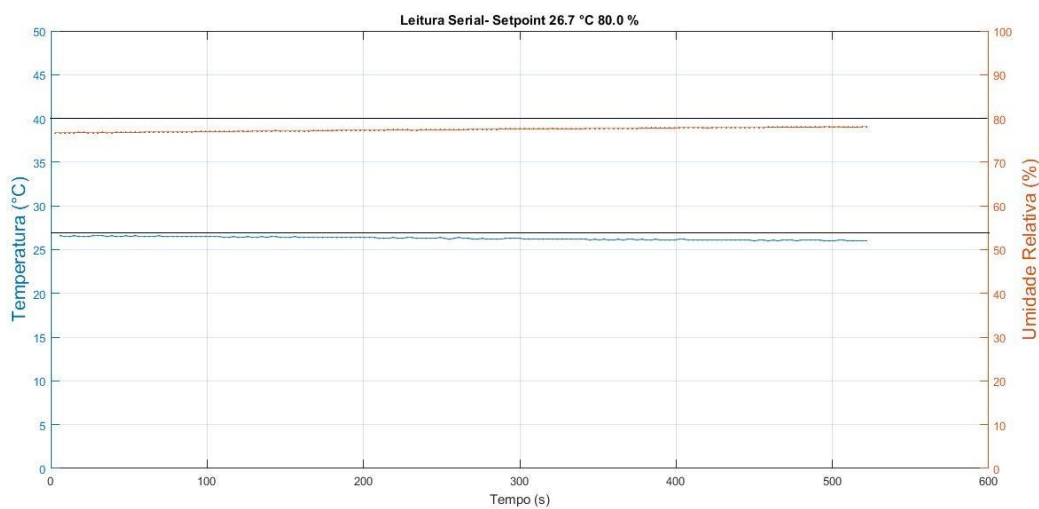
Fonte: Autoria própria, (2019).

Figura 72 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de *setpoint* de UR, a 26.7 °C, de 70 % para 80 %.



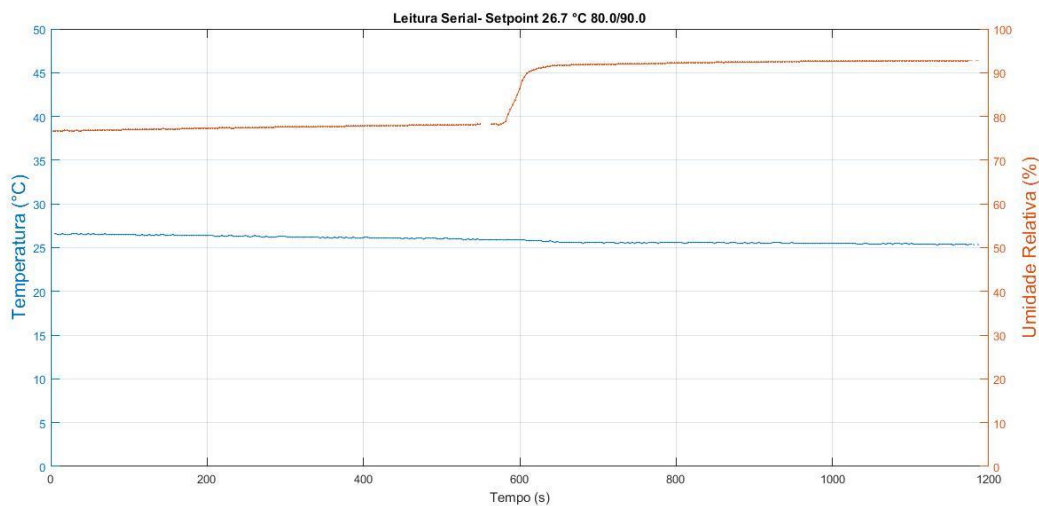
Fonte: Autoria própria, (2019).

Figura 73 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para um *setpoint* de 26.7 °C e 80 % UR.



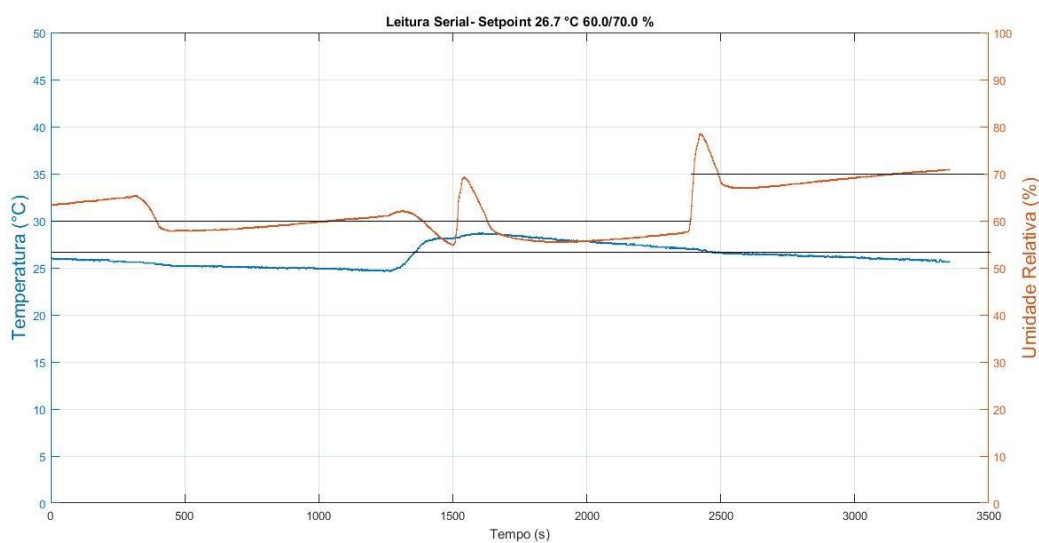
Fonte: Autoria própria, (2019).

Figura 74 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de *setpoint* de UR, a 26.7 °C, de 80 % para 90 %.



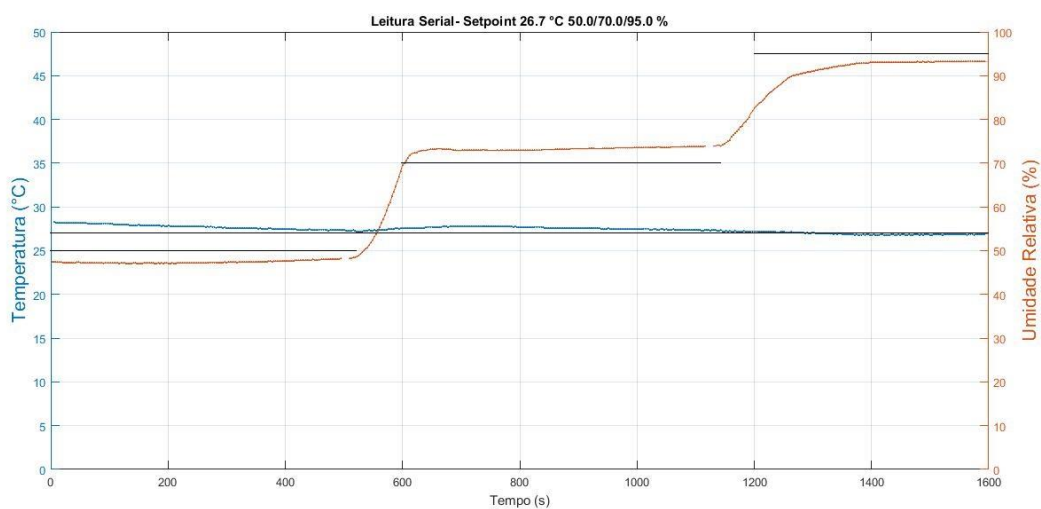
Fonte: Autoria própria, (2019).

Figura 75 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de *setpoint* de UR, a 26.7 °C, de 60 % para 70 %.



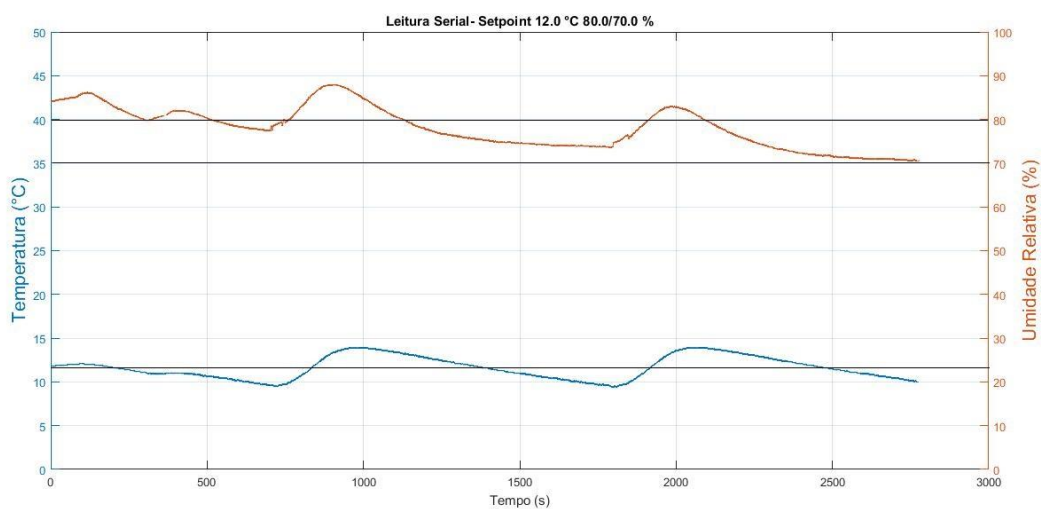
Fonte: Autoria própria, (2019).

Figura 76 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de *setpoint* de UR, a 26.7 °C, de 50 % para 70 % e de 70 % para 95 %.



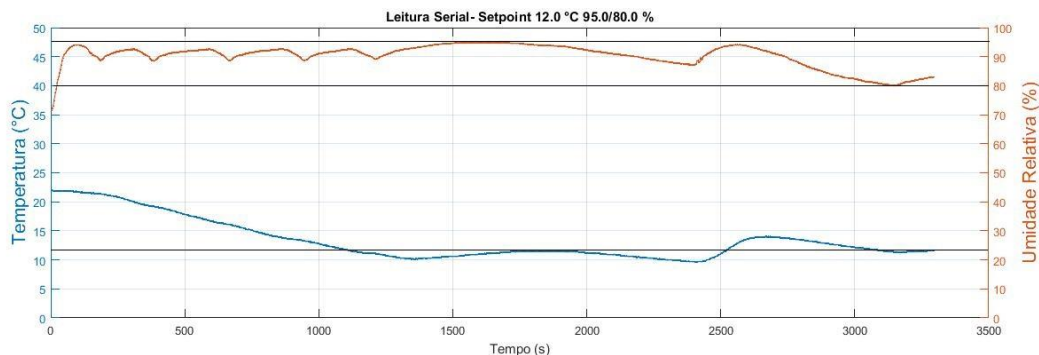
Fonte: Autoria própria, (2019).

Figura 77 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de *setpoint* de UR, a 12 °C, de 80 % para 70 %.



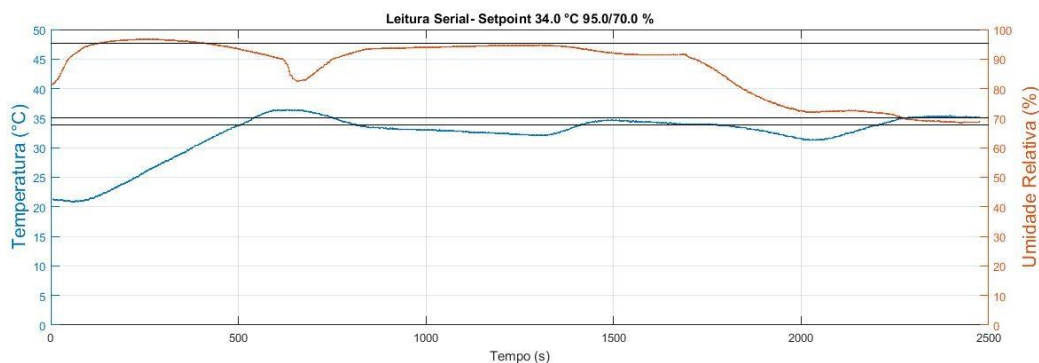
Fonte: Autoria própria, (2019).

Figura 78 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de *setpoint* de UR, a 34 °C, de 95 % para 80 %.



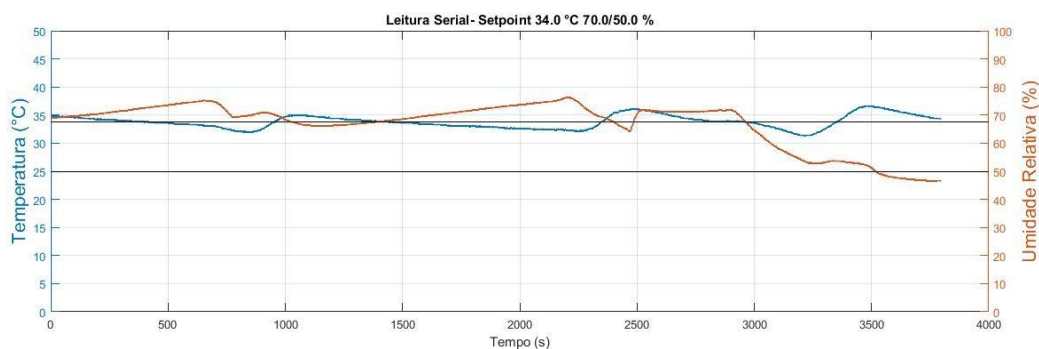
Fonte: Autoria própria, (2019).

Figura 79 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de *setpoint* de UR a 34 °C de 95 % para 70 %.



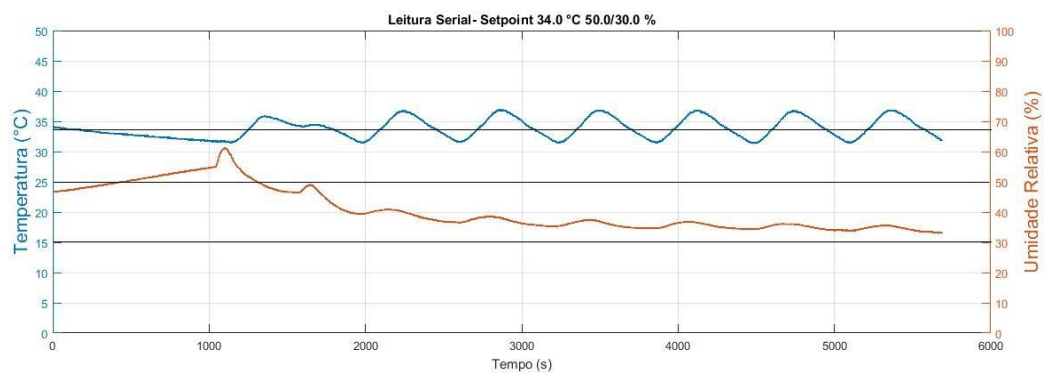
Fonte: Autoria própria, (2019).

Figura 80 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de *setpoint* de UR a 34 °C de 70 % para 50 %.



Fonte: Autoria própria, (2019).

Figura 81 – Temperatura e umidade do ar, pelo tempo em segundos, para uma mudança de *setpoint* de UR, a 34 °C, de 50 % para 30 %.



Fonte: Autoria própria, (2019).

ANEXO A – TABELA DE PRESSÃO MÁXIMA DE VAPOR D'ÁGUA (E) EM MMHG.

Tabela 6 – Pressão máxima de vapor d'água (E) em mmHg.

Temp. (°C)	Décimos de grau		
	1	2	3
-5	3,16	3,14	3,11
-4	3,41	3,38	3,36
-3	3,67	3,64	3,62
-2	3,95	3,92	3,89
-1	4,25	4,22	4,19
-0	4,57	4,54	4,50
+0	4,57	4,60	4,64
1	4,91	4,94	4,98
2	5,27	5,31	5,35
3	5,66	5,70	5,74
4	6,07	6,11	6,15
5	6,51	6,55	6,60
6	6,97	7,02	7,07
7	7,47	7,52	7,57
8	7,99	8,05	8,10
9	8,55	8,61	8,66
10	9,14	9,20	9,26
11	9,77	9,83	9,90
12	10,43	10,50	10,57
13	11,14	11,21	11,28
14	11,88	11,96	12,04
15	12,67	12,76	12,84
16	13,51	13,60	13,68
17	14,40	14,49	14,58
18	15,33	15,43	15,52
19	16,32	16,42	16,52
20	17,36	17,47	17,58
21	18,47	18,58	18,69

Fonte: Adapto de Batista; Soares (2004).