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

ÉLITON PROBST

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SENSOR DE PONTO DE ORVALHO, COM PASTILHAS PELTIER, PARA MEDIÇÃO DE UMIDADE RELATIVA DO AR

Florianópolis,25 DE JUNHO DE 2018

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

ÉLITON PROBST

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SENSOR DE PONTO DE ORVALHO, COM PASTILHAS PELTIER, PARA MEDIÇÃO DE UMIDADE RELATIVA DO AR

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica

Professor Orientador: Adriano Regis, Me Eng.

Probst, Eliton

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SENSOR DE PONTO DE ORVALHO, COM PASTILHAS PELTIER, PARA MEDIÇÃO DE UMIDADE RELATIVA DO AR / Eliton Probst; orientador, Adriano Regis – Florianópolis, SC, 2018.

98p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecatrônica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Inclui referencias.

1. Sensor de umidade, 2. Umidade relativa, 3. Ponto de orvalho, 4. Pastilha Peltier. I. Regis, Adriano. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. III. DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SENSOR DE PONTO DE ORVALHO, COM PASTILHAS PELTIER, PARA MEDIÇÃO DE UMIDADE RELATIVA DO AR

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SENSOR DE PONTO DE ORVALHO, COM PASTILHAS PELTIER, PARA MEDIÇÃO DE UMIDADE RELATIVA DO AR

ELITON PROBST

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Superior de Graduação em Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina

Florianópolis, 4 de julho de 2018

Banca examinadora:

_____

Adriano Regis, Mestre Eng.

(Orientador)

_____

André Roberto de Souza, Dr. Eng.

(Membro da Banca)

_____

Francisco Edson Nogueira de Melo, Mestre Eng.

(Membro da Banca)

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

INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

DECLARAÇÃO DE FINALIZAÇÃO DE TRABALHO DE CURSO

Declaro que o(a) estudante **ELITON PROBST**, matrícula n° **141000246-2**, do Curso de Engenharia Mecatrônica, defendeu o trabalho intitulado **DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM SENSOR DE PONTO DE ORVALHO, COM PASTILHAS PELTIER, PARA MEDIÇÃO DE UMIDADE RELATIVA DO AR**, o qual está apto a fazer parte do banco de dados da Biblioteca Hercílio Luz do Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.

Florianópolis, 04 de julho de 2018.

Prof. Orientador do TCC: Adriano Regis

À minha família, por sua capacidade de acreditar em mim e investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que deram, em alguns momentos, a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada. À Marina, pessoa com quem amo partilhar a vida. Com você tenho me sentido mais vivo de verdade. Obrigado pelo carinho, a paciência e por sua capacidade de me trazer paz na correria de cada semestre. Aos amigos e colegas, pelo incentivo e pelo apoio constantes, pelas alegrias, tristezas e dores compartilhas. Com vocês, as pausas entre um parágrafo e outro de produção melhora tudo o que tenho produzido na vida.

Epigrafe

O sucesso nada mais é que ir de fracasso em fracasso sem que se perca o entusiasmo.
(Winston Churchill).

RESUMO

Sensores de umidade relativa do ar são utilizados em sistemas de controle e aquisição de dados. Estes sensores são facilmente encontrados em estufas, automóveis, refrigeradores, equipamentos médicos, eletrodomésticos, instrumentos de precisão e outros. Mais recentemente, com o crescimento do mercado agrícola no Brasil, a demanda por transdutores de umidade relativa do ar vem crescendo substancialmente em estações meteorológicas para agricultura de precisão, estocagem e transporte de grãos, entre outros produtos. Esta proposta trata do desenvolvimento de um sensor de umidade relativa do ar por detecção de ponto de orvalho utilizando espelho resfriado, (higrômetro de espelho resfriado) automatizado. Utilizando uma pastilha Peltier para atingir a temperatura de saturação do vapor d'água presente no ar, e um fotoresistor para detecção da condensação sobre o espelho, indicando ao micro controlador o instante para a aquisição das temperaturas de ponto de orvalho e do ambiente e assim realizando o cálculo da umidade relativa do ar.

Palavras-chave: Sensor de umidade. Ponto de orvalho. Umidade relativa. Pastilha Peltier.

Abstract

Relative humidity sensors are used in control and data acquisition systems. These sensors are easily found in greenhouses, automobiles, refrigerators, medical equipment, appliances, precision instruments and others. More recently, with the growth of the agricultural market in Brazil, the demand for air humidity transducers has been growing substantially in meteorological stations for precision agriculture, storage and transportation of grains, among other products. This proposal deals with the development of an automated relative humidity sensor by dew point detection using a cooled mirror (automated mirror hygrometer). Using a Peltier pellet to reach the saturation temperature of the water vapor present in the air, and a photoresistor to detect the condensation on the mirror, indicating to the microcontroller the instant for the acquisition of the temperatures of dew point and of the environment and thus calculating the relative humidity of the air.

Key words: Humidity sensor. Dew point. Relative humidity. Peltier tablet.

Lista de figuras

Figura 1 – Psicrômetro de Assmann. 23
Figura 2 - Higrômetro mecânico 25
Figura 3 – Higrômetro por impedância elétrica 26
Figura 4 - Sensor de umidade capacitivo com fino filme: (A) eletrodos interdigitados formam o capacitor; (B) secção transversal do sensor 27
Figura 5 - Composição de um sensor de umidade resistivo 27
Figura 6 - Sensor de ponto de orvalho óptico 30
Figura 7 - Gráfico temperatura por pressão 33
Figura 8 - Gráfico temperatura por pressão 34
Figura 9 - Modelo do higrômetro 36
Figura 10 – Esquemático de ligações eletro eletrônicas 37
Figura 11 - Ligação em serie pastilhas Peltier 38
Figura 12 - Construção pastilha Peltier 39
Figura 13 - Dissipador 39
Figura 14 - Cooler. 40
Figura 15 – Ligação elétrica cooler 40
Figura 16 – Chapa de inox 41
Figura 17 - Arduino uno 41
Figura 18 – Driver com L298 44
Figura 19 - Ligações do driver L298 45
Figura 20 - Ligação Pt-100 46
Figura 21 – Estrutura funcional CI MAX 31865 47
Figura 22 - Ligação placa MAX31865. 48
Figura 23 - Ligação LDR. 48
Figura 24 – Câmara de acrílico 49
Figura 25 – A – Modelo flange dos sensores e das pastilhas 50
Figura 26 - A – Modelo flange do cooler 50
Figura 27 - Vista superior com explosão dos componentes 52
Figura 28 - Vista lateral com explosão dos componentes 52
Figura 29 - Vista isométrica com explosão dos componentes 53
Figura 30 – Fluxo de ar no dissipador 53
Figura 31 - Resposta do sensor no tempo 54

Figura 32 – Modelo de identificação de processo por ZN. 55
Figura 33 - Modelo de identificação de processo por SM 56
Figura 34 - Modelo de identificação de processo por SK 58
Figura 35 – Analize dos modelamentos 59
Figura 36 – Gráfico de resposta com Kp=6,2 e Ki=1,4 61
Figura 37 – Interface do usuário 64
Figura 38 – Resposta da planta para Kp=3 65
Figura 39 – Resposta da planta para Kp=5 66
Figura 40 – Resposta da planta para Kp=5 e Ki=5 67
Figura 41 – Resposta da planta para Kp=5 e Ki=10 67
Figura 42 – Resposta da planta para Kp=5, Ki=10 e Kd=10 68
Figura 43 – Resposta da planta para Kp=5, Ki=10 e Kd=16 69
Figura 44 – Controle aplicado a planta 69
Figura 45 – Gráfico de temperaturas com controle aplicado 70
Figura 46 – Medidas realizadas com a câmara aberta 72
Figura 47 – Medidas realizadas com a câmara fechada 74
Figura 48 - Medidas realizadas com a câmara fechada e coberta 75
Figura 49 - Comparação laser 77
Figura 50 - Estabilização do laser 77
Figura 51 - Ponte de Wheatstone 79

Sumário

1 INTRODUÇÃO 14

1.1 OBJETIVOS 15

1.1.1 Objetivo principal 15

1.1.2 Objetivos específicos 15

1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA 15

1.3 ANÁLISE DAS CONDIÇÕES PRÁTICAS E DE FACTIBILIDADE DA PESQUISA 16

1.3.1 Recursos 16

1.4 CRONOGRAMA PREVISTO PARA O DESENVOLVIMENTO DO TCC. 17

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 18

2.1 UMIDADE 18

2.2 PSICROMETRIA 18

2.2.1 Propriedades do ar úmido 18

2.2.2 O ar seco 19

2.2.3. O ar úmido. 19

2.2.4 Pressão de vapor 20

2.2.5 Umidade absoluta 20

2.2.6 Umidade relativa 21

2.2.7 Ponto de orvalho 22

2.3 TIPOS SENSORES DE UMIDADE RELATIVA DO AR 22

2.3.1 Psicrômetro de bulbo seco e úmido ou psicrômetro de Assmann 23

2.3.2 Medidores de umidade por mudança de cor 24

2.3.3 Higrômetro gravimétrico 24

2.3.4 Higrômetro mecânico 24

2.3.5 Higrômetros por impedância elétrica 25

2.3.6 Sensores capacitivos 26
2.3.7 Sensores resistivos 27
2.3.8 Eletrolítico 28
2.4 SENSORES DE PONTO DE ORVALHO 28
2.4.1 Sensores de ponto de orvalho por impedância 29
2.4.2 Higrômetro de cloreto de lítio saturado 29
2.4.3 Higrômetro por condensação 29
2.5 SENSORES DE UMIDADE BASEADOS EM MEMS 31
2.6 CALCULO DA UR A PARTIR DA TEMPERATURA DE PONTO DE ORVALHO 32
2.6.1 Usando gráficos de temperatura por pressão 32
2.6.2 Formula Magnus 34
3 MATERIAIS E MÉTODOS 36
3.1 ESQUEMA DE LIGAÇÕES 37
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS 37
3.2.1 Pastilha Peltier 37
3.2.2 Dissipador 39
3.2.3 Cooler 40
3.2.4. Elemento refletor 41
3.2.5 Arduino 41
3.2.6 L298 43
3.2.7 Sensores de temperatura 45
3.2.8 Placa Max31865 46
3.2.9 Ldr 48
3.2.10 Laser 49
.2.11 Câmara 49
3.2.12 Flanges 49

3.3 DESENVOLVIMENTO MECÂNICO 51
3.4 PID DO PONTO DE ORVALHO 53
3.4.1 Identificação do processo 54
3.5 AQUISIÇÃO UMIDADE DE COMPARAÇÃO 61
3.6 PROGRAMAÇÃO 62
3.7 DESENVOLVIMENTO DA INTERFACE 63
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 65
4.1 AJUSTE PID 65
4.2 CÁLCULO DA UMIDADE 70
4.2.1 Propagação de incertezas 70
4.3 TESTES 72
5 CONCLUSÃO E PROJETOS FUTUROS 76
REFERENCIAS 80
APÊNDICE A – PROGRAMAÇÃO DO MICROCONTROLADOR 83
APÊNDICE B – FLUXOGRAMA 89
APÊNDICE C – MEMORIAL DE CALCULOS MATHCAD 93
ANEXO A – RECOMENDAÇÕES PARA DESENVOLVIMENTO E UTILIZAÇÃO DE UM HIGRÔMETRO DE PONTO DE ORVALHO. 95
ANEXO B – PELTIER DEW POINT HYGROMETER PATENTED 3 DE DEZEMBRO DE 1963 98

1 INTRODUÇÃO

O índice mais conhecido para descrever o conteúdo de vapor d'água presente no ar é a umidade relativa (U.R.), definida como a razão entre a quantidade de vapor d'água presente no ar (umidade absoluta) e a máxima quantidade de vapor d'água que poderia haver para a mesma temperatura (ponto de saturação), essa razão é convencionalmente dada em porcentagem (AYOADE, 2001, apud COSTA JUNIOR, 2011).

Higrômetros, também conhecidos como sensores de umidade, são transdutores utilizados para medir o percentual de umidade de gases ou do ar, sendo baseados em princípios de medição como psicrometria, variação da condutividade de soluções salinas, entre outros. Sensores eletrônicos, baseados na variação da capacitância ou resistência elétrica têm sido amplamente utilizados em aplicações de monitoramento, devido ao baixo custo destas soluções.

Em muitos processos a umidade relativa é um fator crítico que precisa ser monitorado e controlado. Sensores de umidade por ponto de orvalho são a principal tecnologia de medição de umidade nos laboratórios nacionais de normalização em nível mundial, devido a sua precisão.

Dentre os diversos princípios de medição de ponto de orvalho, considera-se a medição por espelho resfriado uma das mais precisas, por sua excelente repetitividade em uma grande faixa de medição. A temperatura em que se forma a condensação sobre o espelho é medida diretamente diminuindo o desvio e a histerese.

Devido a sua necessidade de atuação (aquecimento/resfriamento) seu uso é praticamente restrito a calibradores de transdutores de outros princípios de funcionamento e avaliação de câmaras climáticas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo principal

Desenvolver um higrômetro baseado no ponto de orvalho, com supervisório para automatizar o processo de levantamento de curvas de calibração.

1.1.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um higrômetro de baixo custo, com precisão que possa ser utilizado para calibração de outros higrômetros;

- Desenvolver um sistema de acionamento e controle para placa Peltier;

- Desenvolver sistema supervisório baseado em Labview;

- Comparar o desempenho do higrômetro de ponto de orvalho desenvolvido com o resultado da medição de transdutores de outros princípios de medição.

1.2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

A medição da umidade na superfície da Terra é necessária para a análise e revisão meteorológica, para estudos climáticos, e para aplicações em hidrologia, agricultura, aeronáutica e estudos ambientais, em geral. Principalmente por sua importância para as mudanças de estado da água na atmosfera (FRADEN 2003).

O controle da umidade é importante em ambientes onde a mesma influencia, nas atividades realizadas no local. Como no armazenamento de grãos e cereais, em certas condições de umidade e temperatura pode comprometer a sua conservação do mesmo modo com diversos alimentos e outros produtos (cimento, cal), (MARGARIDO,2014).

Em laboratórios a umidade pode alterar os resultados de exames, ensaios e medidas, em laboratórios de metrologia, por exemplo, afeta no comportamento e na conservação dos materiais que compõem os instrumentos, os padrões e as peças.

A elevada incerteza de medição dos sensores eletrônicos nas faixas de umidade inferiores à 10% e superiores à 90%, fazem com que os mesmos sejam inadequados para aplicações de monitoramento ambiental. Desse modo, justifica-se a importância de um método de calibração de baixo custo para estes sensores, a fim de determinar os erros sistemático e aleatório dos mesmos.

Considerando-se que a medição de temperatura é geralmente mais precisa que a umidade, um equipamento gerador de ponto de orvalho atua na temperatura de uma superfície a fim de estimular a condensação da água e determinando-se assim a umidade de maneira indireta.

1.3 ANÁLISE DAS CONDIÇÕES PRÁTICAS E DE FACTIBILIDADE DA PESQUISA

O trabalho proposto trata do desenvolvimento e testes de um higrômetro baseado no ponto de orvalho para a medição da humidade relativa do ar.

1.3.1 Recursos

Os recursos materiais (hardware) necessários para o desenvolvimento do aparato, já disponíveis na instituição (por parte do orientador) são:

- Kits de desenvolvimento (Arduino DUE);

- Módulos Peltier;

- Sensores de temperatura;

- Sensores de umidade relativa diversos;

- Computador pessoal;

- Computadores da instituição.

Os recursos de software necessários para o desenvolvimento do aparato são:

- Planilha eletrônica;

- PLXDaq;

- Arduino IDE.

1.4 CRONOGRAMA PREVISTO PARA O DESENVOLVIMENTO DO TCC.

O Quadro 1 apresenta o gráfico de Gantt com o cronograma proposto para a execução do trabalho, dividido nas principais atividades necessárias para seu desenvolvimento, e subdividido nas semanas de cada mês do semestre letivo baseado no calendário acadêmico da instituição.

Quadro 1 - Gráfico de Gantt

		Fevereiro		Março				Abril					Maio				Junho				Julho
		3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	1
	Atividades	15/02 a 21/02	22/02 a 28/02	01/03 a 07/03	08/03 a 14/03	15/03 a 21/03	21/03 a 28/03	29/03 a 04/04	05/04 a 11/04	12/04 a 18/04	19/04 a 25/04	26/04 a 02/05	03/05 a 09/05	10/05 a 16/05	17/05 a 23/05	24/05 a 30/05	31/05 a 06/06	07/06 a 13/06	14/06 a 20/06	21/06 a 27/06	28/06 a 06/07
1	Elaboração PTCC																				
2	Revisao bibliografica																				
3	Desenvolvimento do hardware																				
4	Desenvolvimento e implementação controle digital																				
5	Estudo do ambiente labview																				
6	Desenvolvimento da interface em labview																				
7	Ensaios, testes e análise de resultados com sensores																				
8	Redação da Monografia																				
9	Entrega da Monografia para a banca																				
10	Defesa do TCC																				
11	Revisão do documento final																				

Fonte: Elaboração própria.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os conceitos básicos e definições relacionados à umidade relativa do ar, ponto de orvalho e também apresenta sensores de U.R. e seus princípios de funcionamento, facilitando a compreensão de alguns fenômenos envolvidos no desenvolvimento do protótipo.

2.1 UMIDADE

Pode-se definir a umidade como a quantidade de água contida em um líquido, sólido ou gás, que pode ser removida sem alterar suas propriedades químicas (FRADEN, 2003 p.394). A umidade pode ser expressa de diferentes maneiras, dependendo do ambiente que utiliza essa informação (indústria, laboratórios, agropecuária, meteorologia, etc.), em sólidos é comum ser expressa em porcentagem de agua pela massa total, em líquidos de baixa miscibilidade pode ser demonstrada em partes por milhão em peso e em gases pode ser expressa pela massa de vapor d'água para um dado volume. (FRADEN, 2003, p. 393).

2.2 PSICROMETRIA

A origem da palavra psicrometria que vem do "grego", *psicro* = água fria e *metria*= medida, e estuda as propriedades termodinâmicas do ar úmido e seu uso na análise das condições e processos que envolvem o ar úmido (ASHRAE apud SCHNEIDER, 2000).

2.2.1 Propriedades do ar úmido

Embora o vapor d'água represente somente 2% da massa total da atmosfera e 4% de seu volume, ele é o componente atmosférico mais importante na determinação do tempo e do clima (AYOADE, 1996, p.128). A quantidade de vapor d'água contido na atmosfera varia de lugar para lugar e ao longo do tempo, em determinada localidade. Podendo variar de quase zero, em áreas quentes e áridas, até um máximo de 3% nas latitudes medias e 4% nos trópicos úmidos (AYOADE, 1996).

Umidade atmosférica é o termo utilizado para descrever a quantidade de vapor d'água contido na atmosfera. Ele não inclui outras formas nas quais a água pode estar presente na atmosfera, como na forma liquida (gotículas de água) e na forma solida (gelo), (AYOADE, 1996, p.128).

2.2.2 O ar seco

O ar seco é composto por uma mistura de nitrogênio (78%), oxigênio (21%), argônio (0,9%) e outros gases em menor concentração (0,1%). Essa mistura se mantém homogênea na fase gasosa para uma grande faixa de temperaturas e pressões. O ar seco pode ser modelado como um gás ideal para a faixa de temperatura entre -10ºC a 50ºC, obedecendo a Equação de Clapeyron mostrada na Equação 1.

$$Pv = nRT \tag{1}$$

Onde:

P = a pressão do gás

v = volume do recipiente

R = constante universal dos gases perfeitos

T = temperatura do gás

n = número de mols

Pela da Lei de Dalton das pressões parciais, sabe-se que numa mistura gasosa cada gás exerce uma pressão parcial independente da presença dos demais gases como mostra a Equação 2.

$$P_T = P_{1+}P_2 + \cdots + P_n \tag{2}$$

2.2.3. O ar úmido.

É aquele que além da mistura anterior apresenta vapor d'água, proveniente da evaporação de lagoas, mares e rios.

O vapor d'água presente no ar também pode ser considerado um gás ideal, sendo aplicáveis as regras relativas às Leis de Dalton utilizando a Equação 2. Assim a pressão padrão do ar atmosférico (aproximadamente 101,3 kPa), é a soma das pressões parciais do nitrogênio, do oxigênio, dos outros gases e também do vapor d'água (POTTER; SCOTT, 2007, p. 250).

$$P_{ar} = P_N + P_O + P_{Ar} + P_{H_2O} + P_{outros}$$

O ar seco tende a absorver a água de qualquer elemento que contenha um nível de umidade superior ao seu. Esta troca de umidade enriquece ao ar e seca os elementos expostos. A situação inversa também é verdadeira, se o ar possui uma porcentagem alta de umidade (ar úmido) tendera a doar água aos elementos que estão mais secos.

2.2.4 Pressão de vapor

A quantidade de vapor d'água que pode haver no ar é determinada por sua temperatura. Quanto maior a temperatura de um certo volume de ar, maior a capacidade de retenção de vapor d'água para o mesmo volume de ar. Se o ar contiver a máxima concentração de vapor d'água permitida para uma determinada temperatura, diz-se que o ar está saturado, (isto é, se tem a condensação do vapor d'água presente no ar) e se tem a pressão de vapor de saturação (P_{vs}). Para uma quantidade de vapor insuficiente para a saturação do ar se tem a pressão parcial de vapor (P_v).

Portanto se pode dizer que o ar funciona como um "reservatório" que se expande ou contrai com a variação de sua temperatura, variando também a pressão de saturação (COSTA JUNIOR, 2011, p.6).

2.2.5 Umidade absoluta

Umidade absoluta é a massa de vapor d'água por unidade de volume de um gás úmido. Em outras palavras, é a densidade de vapor d'água, que pode ser medido, por exemplo, passando uma quantidade medida de ar através de uma substancia absorvedora de umidade como gel de sílica que é pesada antes e depois da absorção. A umidade absoluta é expressa em gramas por metro cúbico (g/m^3).

Como esta medida também é em função da pressão atmosférica, não é geralmente utilizada para a engenharia (FRADEN, 2003, p394).

2.2.6 Umidade relativa

Comumente expressa em porcentagem a umidade relativa do ar é a razão entre a pressão parcial do vapor (P_v) e sua pressão de saturação (P_{vs}) para uma mesma temperatura dada pela Equação 3.

$$UR = 100\frac{P_v}{P_{vs}} \tag{3}$$

P_v = pressão parcial do vapor (mBar)

P_{vs} = pressão de saturação (mBar)

Ou seja, é a razão entre valor real de umidade de uma amostra de ar, e a máxima quantidade de vapor que o mesmo volume de ar pode conservar para a mesma temperatura. A umidade relativa é a medida de umidade do ar mais popular, pois é facilmente obtida e também indica o nível de saturação do ar.

Devido à influência que a temperatura tem sobre os valores de umidade relativa, por exemplo, para uma amostra de ar se mantendo a mesma umidade absoluta (razão entre massa de vapor d'água por volume de ar) a umidade relativa varia inversamente proporcional a variação da temperatura, não sendo possível a comparação entre dados provindos de diferentes estações.

Em temperaturas acima do ponto de ebulição, a pressão do vapor d'água pode deslocar todos os outros gases do ambiente. Assim atmosfera seria, então, inteiramente de vapor d'água. E umidade relativa seria uma medida enganosa pois P_{vs} jamais poderá ser alcançada pois a pressão de saturação será sempre maior que a pressão atmosférica (WMO, 2008).

Também é importante lembrar que a umidade relativa não oferece informações da quantidade de umidade no ar, mas quão próximo está da saturação.

2.2.7 Ponto de orvalho

Conforme já mencionado, o ar atmosférico serve como um reservatório de água capaz de retê-la na forma de vapor, sendo que essa quantidade varia de acordo com a temperatura do ar. Resfriando essa mistura gasosa, chega-se a um estado que fará com que a água contida no ar, em forma de vapor, torne-se líquida durante um processo de condensação. A temperatura em que ocorre esse fenômeno é chamada de "temperatura de saturação", ou "temperatura de ponto de orvalho", (MARGARIDO, 2014, p.26).

A temperatura de ponto de orvalho pode ser definida como: “a temperatura para o qual o ar úmido deve ser resfriado para induzir a condensação”. O ponto de orvalho é a temperatura a que a umidade relativa é de 100%. Em outras palavras, o orvalho ponto é a temperatura que o ar deve atingir para manter o máximo de umidade que pode. Quando a temperatura esfria ao ponto de orvalho, o ar fica saturado e pode ocorrer neblina, orvalho ou geada.

Se a temperatura do ponto de orvalho estiver abaixo de 0 °C, então usa-se o termo “temperatura do ponto de congelamento”, já que nessas condições o fenômeno promoveria a formação de gelo ao invés de água, (WMO, 2008)

Quando a umidade relativa é igual a 100%, significa que a temperatura do gás é igual à temperatura do ponto de orvalho, assim quanto menor a temperatura do ponto de orvalho comparada à temperatura do gás, mais seco está o gás. As medições do ponto de orvalho são comuns nos processos de secagem (ar seco e secagem de ar comprimido), bem como nos estudos de meteorologia, com a previsão de formação de neblinas e geadas.

2.3 TIPOS SENSORES DE UMIDADE RELATIVA DO AR

Conforme apresenta o relatório da Organização Mundial de Meteorologia (World Meteorological Organization WMO, 2008) existem três principais grupos de sistemas de medição de humidade relativa, temperatura de bulbo úmido (Psicrômetros), umidade relativa (Higrômetro) e temperatura do ponto de orvalho.

Para detectar umidade, o sensor em um higrômetro deve ser sensível a água, e suas propriedades internas devem variar de acordo com a concentração de água.

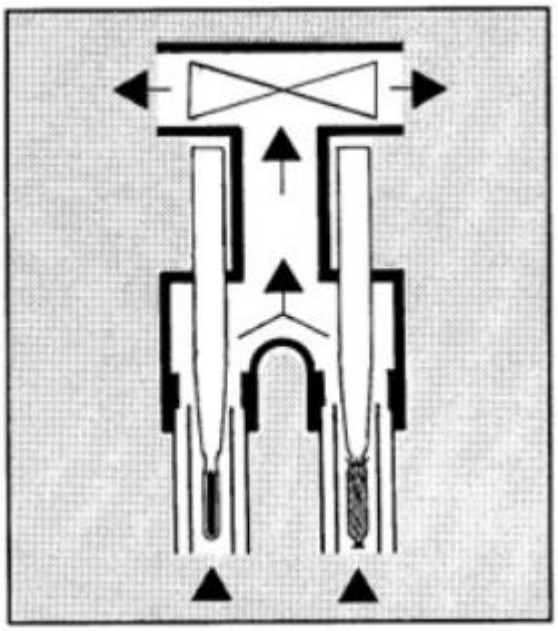
A umidade influencia em diversos processos físicos, químicos e biológicos. Em consequência disto, existem diversos efeitos relacionados com a umidade usados para a indicação das variações de umidade.

2.3.1 Psicrômetro de bulbo seco e úmido ou psicrômetro de Assmann

Um psicrômetro de bulbos seco e úmido é formado por um par de sensores de temperatura, sendo que o bulbo de um deles é coberto por um tecido que é mantido úmido por capilaridade a partir de um reservatório com agua (Figura 1). Quando o bulbo úmido é colocado em uma corrente de ar, a água evapora do tecido, existindo uma temperatura de equilíbrio chamada temperatura de bulbo úmido, (SCHNEIDER, 2000, p.21).

Com as temperaturas de bulbo seco e bulbo molhado, se pode determinar a umidade relativa do ar por cálculo, gráficos ou tabelas.

Figura 1 – Psicrômetro de Assmann.



Fonte: Adaptado de PCE.

2.3.2 Medidores de umidade por mudança de cor

Existem métodos de se medir umidade por meio de alterações na cor de uma tira de papel ou de outro material. O material sensor é impregnado com cloreto de cobalto, e a mudança de cor ocorre como resultado de uma reação química da umidade com esta substância. Outras técnicas de medição baseadas na alteração de cor envolvem o bombeamento do gás através de uma pequena garrafa recheada com cristais que mudam de cor de acordo com a umidade do gás (SCHNEIDER, 2000, p.24).

2.3.3 Higrômetro gravimétrico

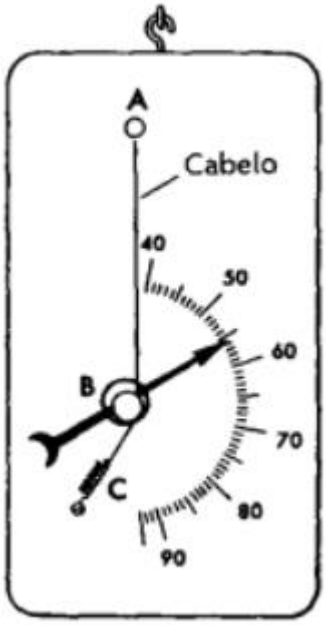
Este método usa a absorção de vapor d'água dessecando um volume de ar conhecido. O método gravimétrico produz uma medida absoluta do teor de vapor d'água de uma amostra de ar. Isto é obtido removendo o vapor d'água da amostra de ar. A massa do vapor d'água é determinada pesando o agente de secagem antes e depois de absorver o vapor d'água. O método é restrito a fornecer um padrão de referência de calibração, e tal aparelho é encontrado principalmente em laboratórios nacionais de padrões e calibração (WMO, 2008).

2.3.4 Higrômetro mecânico

Higrômetros mecânicos exploram a capacidade que certos materiais têm de expandir e contrair com a variação da U.R., o elemento sensor pode ser feito a partir de cabelo humano, tecidos, plásticos e catgut (material obtido a partir da torção de intestinos de ovelha e outros animais, também usado em cordas de violino e raquetes de tênis), (SILVA, et al., 2008).

O cabelo humano livre de gorduras tem a propriedade de aumentar seu comprimento ao absorber umidade e de diminuir quando a perde. Essa variação é convenientemente ampliada e transmitida a um ponteiro, sobre um mostrador, que indicara diretamente a umidade relativa do ar (Figura 2).

Figura 2 - Higrômetro mecânico



Fonte: Adaptado de sobiologia.

Higrômetros mecânicos são instrumentos de resposta lenta que apresentam histerese e são facilmente alterados devido à vibração.

2.3.5 Higrômetros por impedância elétrica

O sensor utilizado neste tipo de medidor é fabricado a partir de um material higroscópico, cujas propriedades elétricas se alteram na medida em que o mesmo absorve as moléculas de água. As mudanças na umidade são medidas em termos de alterações na capacitância, na resistência elétrica, ou mesmo na combinação das duas. A maioria dos sensores de impedância modernos utiliza a tecnologia de filmes finos. Os higrômetros elétricos (Figura 3) são normalmente portáteis e compactos (MARTINELLI, p.31).

Figura 3 – Higrômetro por impedância elétrica

Fonte: Adaptado de ASKO.

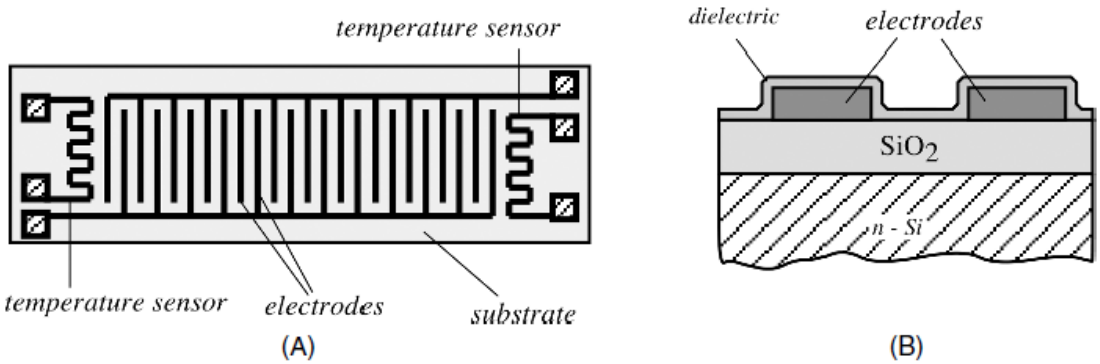
O elemento sensor normalmente é protegido por um filtro para evitar contaminações, mesmo que esta proteção possa prejudicar o tempo de resposta do sensor. As leituras são fornecidas diretamente em um visor, e podendo inclusive dispor de uma saída na forma de um sinal elétrico proporcional.

2.3.6 Sensores capacitivos

Um capacitor que utiliza ar como dielétrico pode servir como um sensor de umidade relativa pois a umidade presente no ar altera a permissividade elétrica do ar e, portanto, a capacitância se torna proporcional a umidade relativa (FRADEN, 2003, p.396).

O dielétrico do capacitor também pode ser substituído com um material cuja constante dielétrica mude significativamente com a variação da umidade relativa como por exemplo um polímero higroscópico, a Figura 4 mostra um modelo típico deste tipo de sensor.

Figura 4 - Sensor de umidade capacitivo com fino filme: (A) eletrodos interdigitados formam o capacitor; (B) secção transversal do sensor



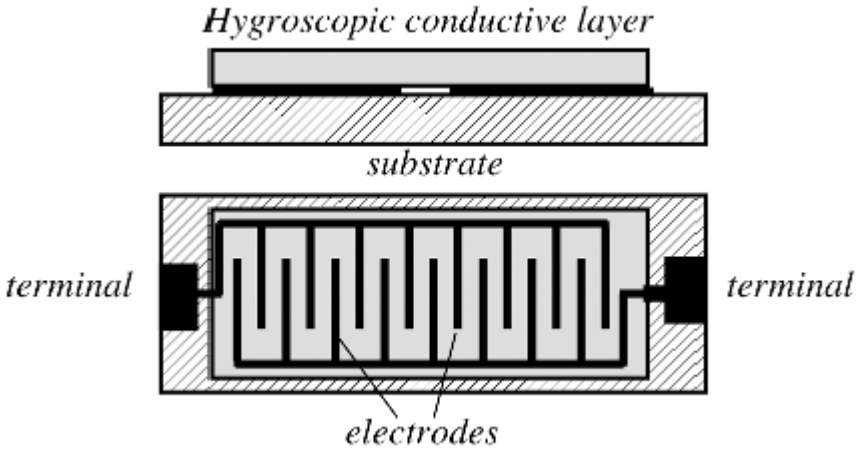
Fonte: Adaptado de FRADEN (2003).

Este tipo de sensor responde melhor à umidade relativa, apresentando uma melhor linearidade em baixas umidades relativas. Em geral os sensores capacitivos não sofrem danos pela condensação (100% de umidade relativa), contudo, se isto ocorrer, a calibração pode apresentar um desvio.

2.3.7 Sensores resistivos

A resistência de determinados condutores não metálicos depende do seu teor de agua, esse fenômeno é a base de um sensor de umidade resistivo. O sensor possui um material com uma resistência relativamente baixa que muda significativamente com a variação da umidade. A Figura 5 mostra o princípio de construção deste tipo de sensor.

Figura 5 - Composição de um sensor de umidade resistivo



Fonte: Adaptado de FRADEN (2003).

Assim como nos sensores capacitivos, este sensor responde melhor à umidade relativa. Entretanto, apresentam uma melhor linearidade em umidades relativas elevadas. A maioria dos sensores resistivos não tolera a condensação sobre o elemento sensor. Porém, existem modelos que possuem dispositivos de proteção que evitam a condensação, por exemplo, utilizando um aquecimento automático do sensor (FRADEN, 2003, p.400)

2.3.8 Eletrolítico

Este sensor consiste de um filme de um poderoso secante, pentóxido fosforoso (P_20_5), que absorve fortemente o vapor d'água contido no gás ao seu redor. Uma tensão elétrica é aplicada através do P_20_5, o que provoca a eletrólise, dissociando a água em seus constituintes - hidrogênio e oxigênio. A corrente aplicada é relacionada, pela Lei de Faraday, à quantidade de água eletrolisada (MARTINELLI, 2003).

Assim, o valor da corrente é utilizado como indicador da umidade do gás que está sendo medido. Estes sensores são indicados para a medição de umidades bastante baixas, e necessitam que a vazão do gás seja definida e constante. Este instrumento mede a concentração de água por unidade de volume, e o valor de umidade pode ser apresentada em partes por milhão por volume ou pressão de vapor. Eles são normalmente utilizados na configuração de amostragem do gás por meio de um tubo.

2.4 SENSORES DE PONTO DE ORVALHO

A maioria dos sensores de umidade possuem problemas de repetitividade e histerese com valores típicos de 0.5% a 1% de HR, o que para controle de processos de precisão pode ser um fator limitante, justificando assim o uso de métodos indiretos para medição da umidade relativa, (FRADEN, 2003, p.402).

O método mais eficiente para o cálculo da umidade absoluta ou relativa é utilizando a temperatura do ponto de orvalho, (FRADEN, 2003, p.402).

2.4.1 Sensores de ponto de orvalho por impedância

É um caso especial dos higrômetros de impedância, seu uso mais comum é para a medição de unidades absolutas do que em termos da umidade relativa. Seguindo um princípio geral similar, o sensor pode ser composto de óxido de alumínio ou de outros metais ou mesmo uma base de silicone para o elemento ativo. Este tipo de sensor responde à pressão parcial do vapor. Normalmente, o sinal é convertido em outras unidades absolutas, resultando em valores apresentados pelo instrumento como ponto de orvalho ou ppmv (parte por milhão em volume). Estes medidores podem apresentar uma ampla faixa de medição, incluindo-se gases muito secos.

2.4.2 Higrômetro de cloreto de lítio saturado

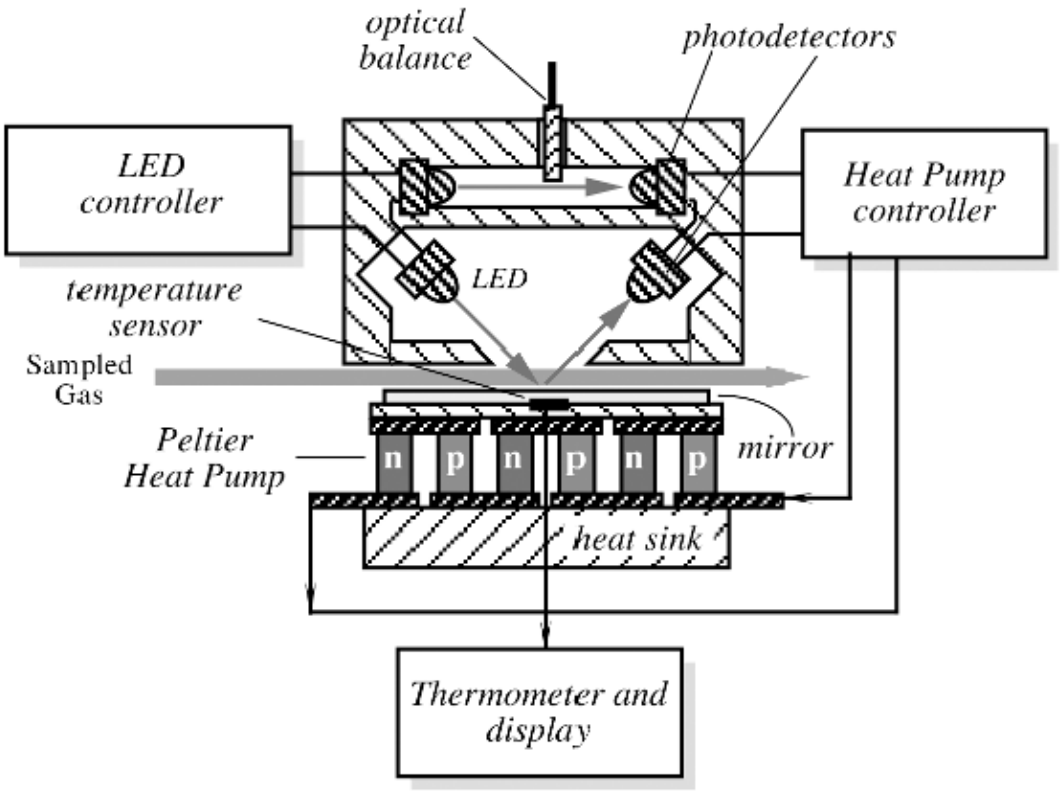
Neste higrômetro o elemento sensor, é um sal higroscópico, que absorve o vapor d'água do ar. Uma tensão elétrica é aplicada através do sal e uma corrente elétrica proporcional atravessa o mesmo de acordo com a quantidade de vapor d'água que foi absorvida. No mesmo instante, a corrente elétrica também aquece o sal. Ao final, é alcançado um equilíbrio entre a absorção e o aquecimento. A temperatura em que este equilíbrio ocorre está relacionada com a pressão de vapor d'água. O instrumento é normalmente disponível na forma de uma sonda, e as leituras apresentadas na forma de ponto de orvalho, (WMO, 2008).

2.4.3 Higrômetro por condensação

Dentre os higrômetros que utilizam o ponto de orvalho para determinar a umidade relativa o que possui os efeitos mínimos de histerese requer o uso de um sistema óptico. O custo de um higrômetro óptico é consideravelmente alto, porem o aumento do rendimento e a qualidade do produto justificam facilmente investimento.

O princípio de funcionamento deste tipo de sensor utiliza um espelho cuja a temperatura é regulada com precisão por uma bomba de calor termoelétrica. A temperatura é mantida no limiar da formação do orvalho, fazendo com que o ar em contato com o espelho libere umidade na forma de gotículas de agua. Mudando assim as propriedades reflexivas do espelho, dispersando os raios de luz, o que pode ser detectado por um fotodetector conforme mostra o esquema simplificado (Figura 6).

Figura 6 - Sensor de ponto de orvalho óptico



Fonte: Adaptado de FRADEN (2003).

No momento que ocorre a condensação da agua a refletividade do espelho diminui o que causa a redução da corrente no fotodetector.

A leitura pode ser registrada no instante da condensação, ou o espelho pode ser mantido na temperatura possibilitando a captura de uma série de leituras. As leituras são apresentadas na forma de temperatura de ponto de orvalho, do qual podem ser obtidos todos os parâmetros de umidade, como %U.R., pressão de vapor entre outros.

Este método de medição possui certos problemas, como a contaminação do espelho e o possível consumo excessivo de energia pela bomba de calor. Como solução para a contaminação é comum adotar o uso de filtros de partículas para o ar e outra técnica utilizada para a limpeza do espelho é o resfriamento do espelho além do ponto de orvalho causando condensação excessiva e em seguida um rápido aquecimento do espelho. O Anexo A apresenta as recomendações sugeridas por (WMO, 2008), para o desenvolvimento e utilização de um higrômetro de ponte de orvalho.

O Quadro 2 mostra a comparação entre os tipos de sensores mais utilizados.

Quadro 2 - Comparação entre os tipos de sensores

Tipo do sensor	Umidade absoluta ou relativa	Faixas tipicas de operação		Unidade tipica de indicação	Tolerancia a contaminação(2)	Configuração, tipo de amostragem	Melhor incerteza tipica de amostragem(2)
		Umidade	Temperatura(1)				
Mecânico	Relativa	20% a 80% UR	Proxima a temperatura ambiente	%UR	3	Totalmente imerso	5 - 15% UR
Psicrometroaspirado de bulbos seco e umido	Relativa	5% a 100% UR	0°C a 100°C	%UR (calculada a partir das temperaturas lidas)	1	Totalmente imerso ou por amostragem	2 - 5% UR
Resistivo	Relativa	5% a 95% UR	-30°C a 60°C	%UR	2	Sonda ou totalmente imerso	2 - 3% UR
Capacitivo	Relativa	5% a 100% UR	-30°C a 60°C	%UR	2	Sonda ou totalmente imerso	2 - 3% UR
Ponto de orvalho por impedância	Absoluta	Ponto de orvalho de 85°C a 60°C	Até 60°C evitando a saturação	Ponto de orvalho, pressão de vapor	2	Sonda	2 - 5% UR
Ponto de orvalho por condensação	Absoluta	Ponto de orvalho de 85°C a 100°C	-85°C a 100°C	Ponto de orvalho	1	Amostragem de gas ou sonda	0,2 - 1,0°C
Ponto de orvalho por Cloreto de Litio	Absoluta	Ponto de orvalho de 45°C a 60°C	-20°C a 60°C	Ponto de orvalho	1	Sonda	2 - 4°C
Eletrolitico Pentoxido de Fosforo	Absoluta	Menos que 1 ppmv a 1000ppmv	Proxima a temperatura ambiente	ppmv ou pressão de vapor	1	Amostragem de gas	3 - 10% da leitura
Espectroscópico	Absoluta	Faixa extremamente ampla, dependendo do tipo	Proxima a temperatura ambiente	ppmv	3	Amostragem de gas	3 - 10% da leitura em altas umidades muito maior em baixas umidade
Variação de cor	Relativa	20% a 80% UR	Proxima a temperatura ambiente	%UR	2	cartão de teste em papel ou gas bombeado em garrafa de vidro	10 - 20% UR

Fonte: Adaptado de SCHNEIDER, 2000.

.

2.5 SENSORES DE UMIDADE BASEADOS EM MEMS

Nas últimas décadas, a miniaturização tem se destacado no desenvolvimento tecnológico. Um dos principais campos de atuação tem sido a microeletrônica, onde se destacam os circuitos integrados (CIs). Circuitos integrados permitem sistemas rápidos, confiáveis, baratos e capazes de incorporar funções complexas (DUFFY, 1998.). Desde 1970, processos similares ao de fabricação de CIs tem sido utilizado na fabricação de sensores, permitindo a redução do tamanho e o consumo de potência destes sensores facilitando sua portabilidade (VICKERS et al., 2006). A produção em alta escala de sensores microeletrônicos tem ótima relação custo benefício (LEBERGHE, 2000).

A tecnologia microeletrônica está suficientemente desenvolvida ao ponto de gerar desmembramentos no campo dos sistemas micro-eletro-mecânicos (MEMS) que envolvem materiais além do silício, (COSTA JUNIOR, 2011, p.16).

Capacitores MEMS com dielétricos de poliamida são amplamente utilizados como sensores de umidade, proporcionando alta sensibilidade, linearidade e baixo consumo de potência. Contudo, os sensores de umidade capacitivos apresentam baixo tempo de resposta e baixa estabilidade principalmente quando exposto a contaminantes. E ainda, estes sensores são vulneráveis a condensação na superfície do dielétrico higroscópico (ANDERSON, 2000) e apresentam um tempo de vida relativamente curto.

2.6 CÁLCULO DA UR A PARTIR DA TEMPERATURA DE PONTO DE ORVALHO

Os métodos mais comuns para a determinação da umidade relativa do ar por meio das temperaturas de ponto de orvalho e do ambiente são, utilizando gráficos de temperatura por pressão ou por meio de cálculos.

2.6.1 Utilizando gráficos de temperatura por pressão

Uma maneira simples de se calcular a UR a partir das temperaturas de ponto de orvalho e do ambiente é utilizando gráficos de temperatura por pressão de vapor. Após determinada a temperatura do ponto de orvalho traça-se uma reta vertical ao valor correspondente até a intersecção com a curva do gráfico, em seguida traça-se uma reta horizontal determinando a P_v = 28 mBar, (Figura 7), o mesmo se faz para a temperatura do gás para determinar a P_{vs} = 51 mBar (Figura 8). Em seguida se substitui os valores encontrados na equação 3:

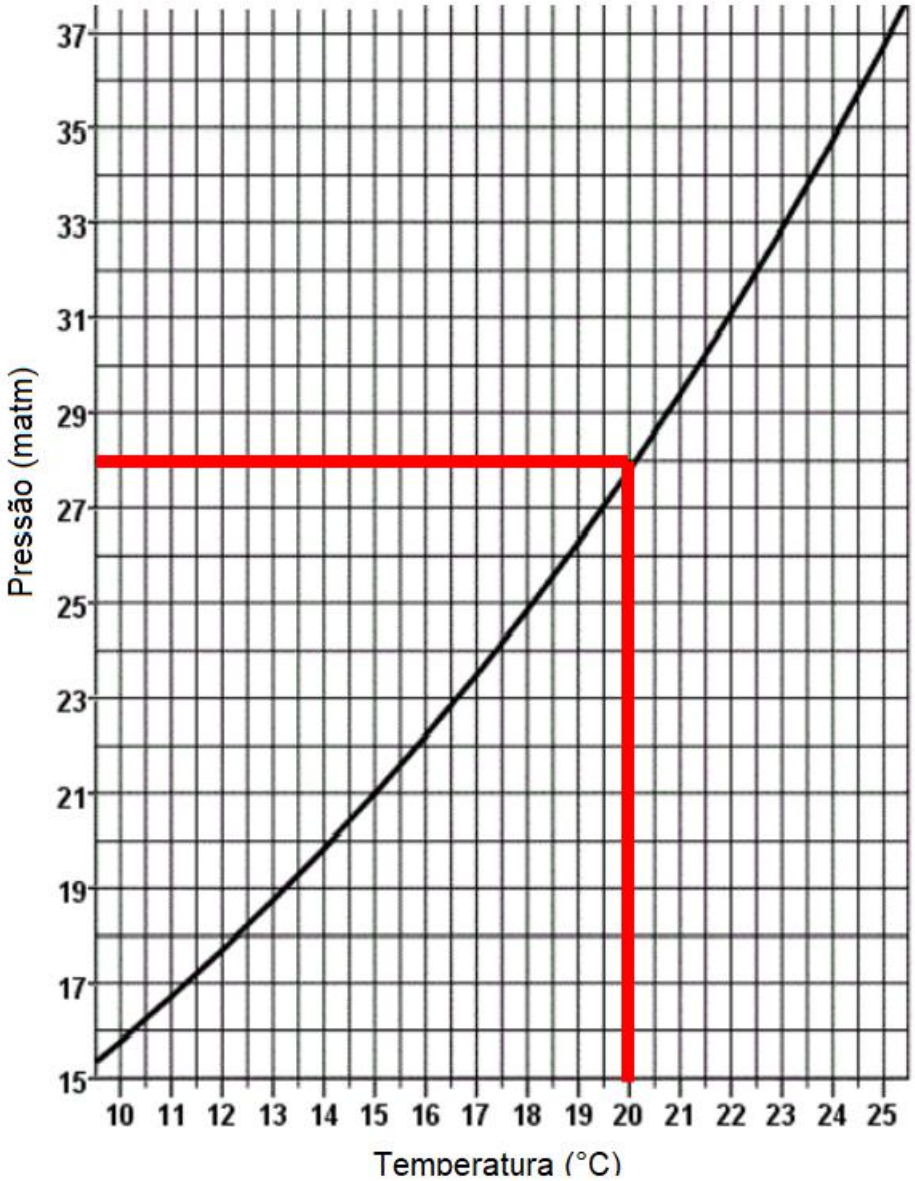
$$\mathrm{UR} = 100\frac{P_v}{P_{vs}}$$

Substituindo na formula temos:

$$\mathrm{UR} = 100\frac{28}{51}$$

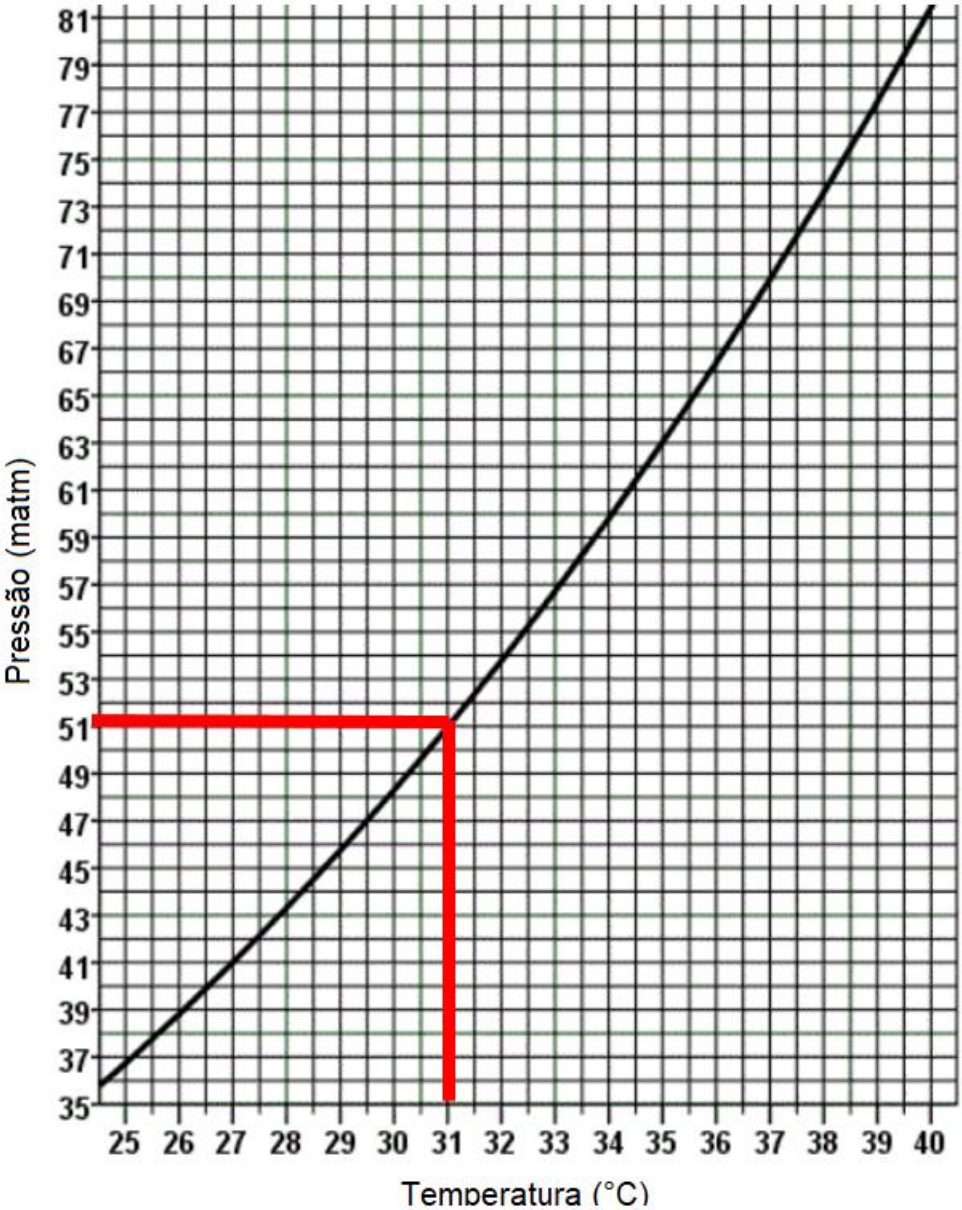
$$\mathrm{UR} = 54.9\%$$

Figura 7 - Gráfico temperatura por pressão



Fonte: Adaptado de UFRGS (2014).

Figura 8 - Gráfico temperatura por pressão



Fonte: Adaptado de UFRGS (2014).

2.6.2 Formula Magnus

Segundo (EQUATIONS FOR THE DETERMINATION OF HUMUDITY FROM DEWPOINT AND PSYCHROMETRIC DATA, 1977, p.6) usando a formula Magnus (Equação 4) como base, se pode determinar uma equação simplificada para o calcula da P_{vs} do ar (Equação 5):

$$log\, P_{vs} = a * log \frac{T+b}{T+c} \tag{4}$$

$$P_{vs} = 10^{\{c+\left[\frac{b}{(T_e+d)}\right]\}} * (T_e + d)^a \quad (5)$$

Devido a definição do ponto de orvalho a P_v é uma função direta de P_{vs} e pode ser calculada substituindo T_e por T_a como mostra a Equação 6.

$$P_v = 10^{\{c+\left[\frac{b}{(T_e+d)}\right]\}} * (T_e + d)^a \quad (6)$$

A expressão geral para cálculo da umidade relativa em função da temperatura de ponto de orvalho e da temperatura do gás é obtida substituindo as Equações 5 e 6 na Equação 3, obtendo-se a Equação 7 que retorna à umidade relativa do ar em função da temperatura do gás e da temperatura de ponto de orvalho.

$$UR = 100 * [\frac{T_e+d}{T_a+d}]^a * 10^{b[(T_e+d)^{-1}-(T_a+d)^{-1}]} \quad (7)$$

Onde:

a = - 4,9283

b = - 2937,4

c = 23,5518

d = 273

T_a = Temperatura do gás (°C)

T_e = Temperatura de ponto de orvalho (°C)

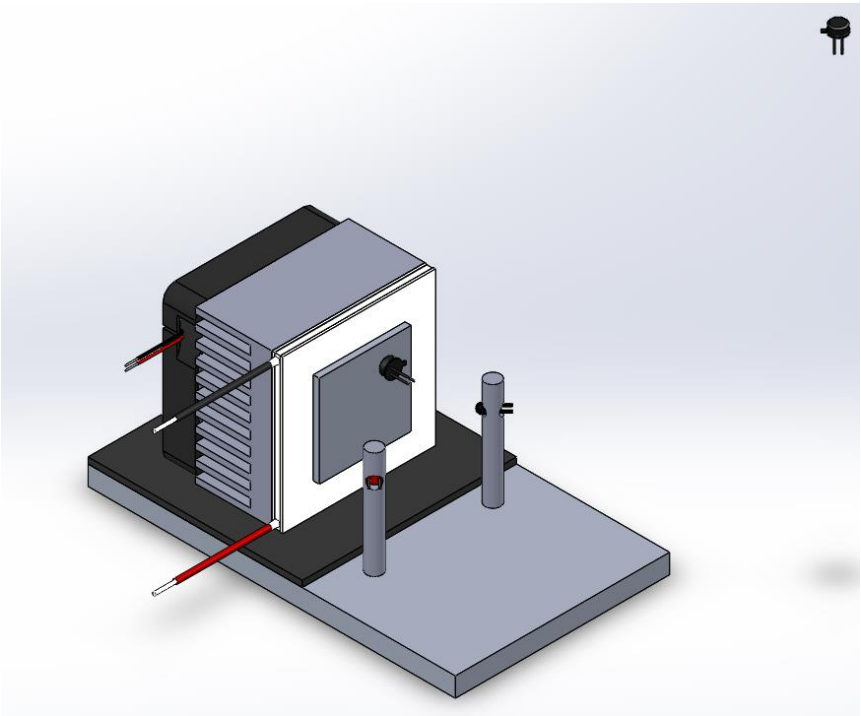
3 MATERIAIS E MÉTODOS

O higrômetro de ponto de orvalho com pastilhas Peltier proposto no presente trabalho trata-se de um modelo clássico, já bem estudado o qual sua patente já expirada (Anexo B) data de dezembro de 1963 por George A. Dulk e Emmett J. Pybus.

O sensor utiliza pastilhas Peltier como unidade de resfriamento, na qual foi adicionado um dissipador juntamente com um cooler na face quente, para melhorar a troca de calor com o ambiente. Na face fria da pastilha foi alocado um espelho que serve como elemento sensor do aparato, que quando resfriado torna evidente a condensação do vapor d'água presente no ar, ao atingir a temperatura de ponto de orvalho.

Foi posicionado um fotoemissor de modo que sua luz seja redirecionada pelo espelho para um fotoresistor, assim quando houver condensação do vapor d'água presente no ar sobre o espelho haverá uma variação da luz recebida pelo fotoresistor, podendo-se detectar a condensação. A Figura 9 mostra o projeto conceitual do aparato.

Figura 9 - Modelo do higrômetro

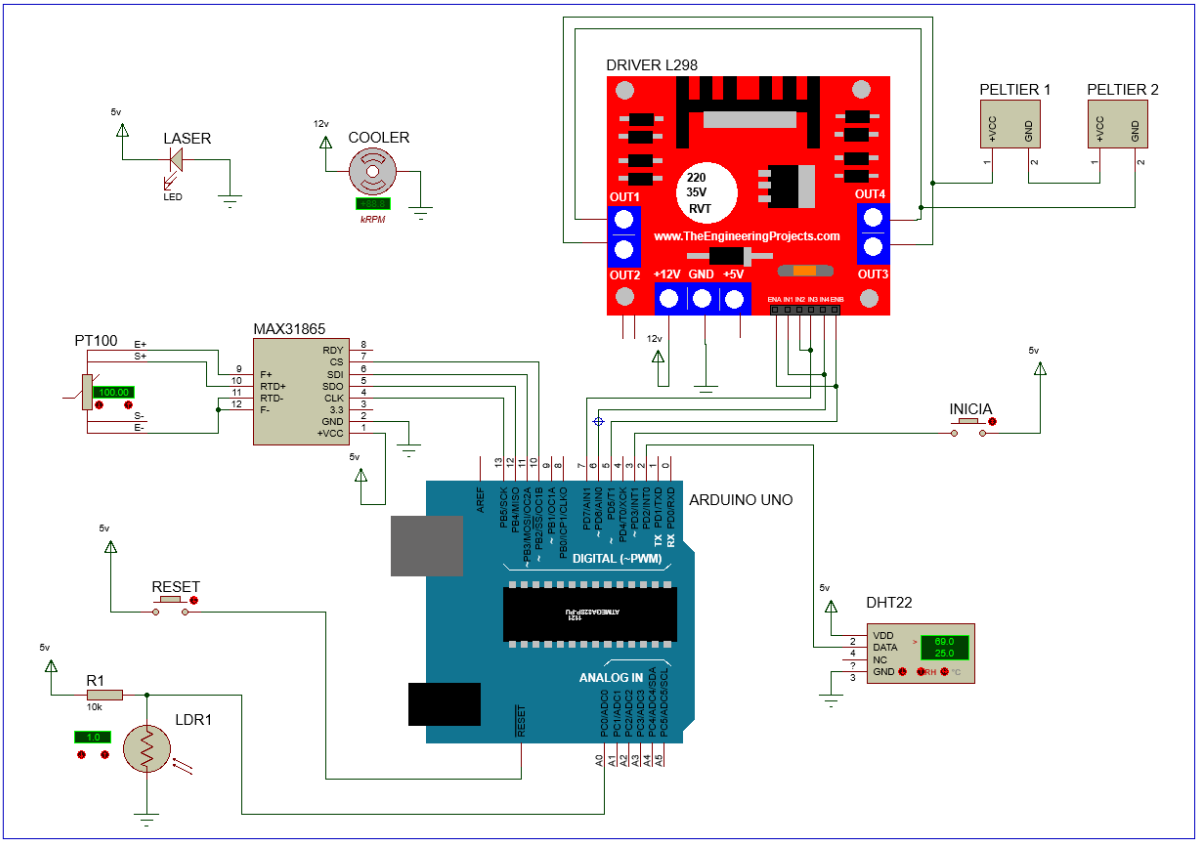


Fonte: Elaboração própria.

3.1 ESQUEMA DE LIGAÇÕES

O planejamento dos circuitos eletro-eletrônicas foi realizado no software Proteus como mostrada na Figura 10 que está detalhado de acordo com cada componente.

Figura 10 – Esquemático de ligações eletro eletrônicas



Fonte: Elaboração própria.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

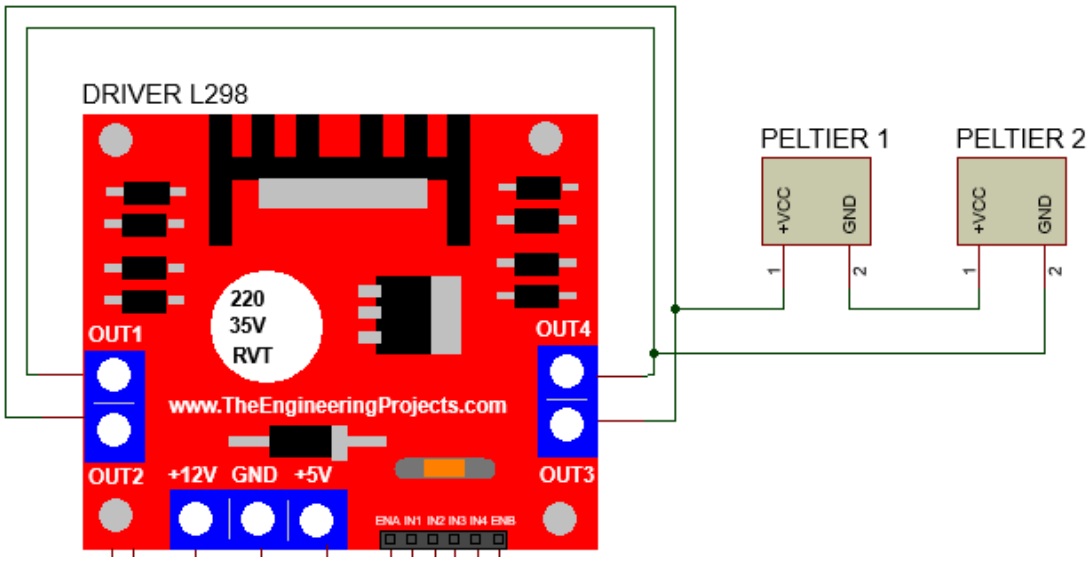
Para o desenvolvimento do sensor de umidade relativa do ar utilizou-se os seguintes materiais.

3.2.1 Pastilha Peltier

O resfriamento do elemento refletor realizou-se utilizando como bomba de calor, pastilhas Peltier TEC1-12706, cujas características estão descritas no Quadro 3. Inicialmente foram feitos testes utilizando uma pastilha, porém constatou-se que em baixos níveis de umidade relativa do ar não era possível atingir a temperatura de

saturação dentro do tempo previsto, para solucionar este problema optou-se por utilizar-se duas pastilhas em série, como mostra a Figura 11, aumentando a eficiência térmica do sistema:

Figura 11 - Ligação em serie pastilhas Peltier



Fonte: Elaboração própria.

Quadro 3 - Características Pastilha Peltier.

Modelo	TEC1-12706
Faixa de temperatura	-30 a 70 °C
Tensão de operação	0 a 15,2VDC
Corrente de operação	0 a 6A
Potência máxima	60W
Dimensões	40 x 40 x 5mm

Fonte: Elaboração própria.

Estes módulos são compostos por placas cerâmicas “recheadas” com pequenos cubos de Bi_2Te_3 (telureno de bismuto).

Seu princípio de funcionamento é baseado no efeito Peltier (também conhecido como força eletromotriz de Peltier), que é a produção de um gradiente de temperatura na junção de dois materiais condutores (ou semicondutores) de materiais diferentes quando aplicada uma tensão elétrica em um circuito fechado.

Cada pastilha é constituída de duas chapas formadas por uma cerâmica especial - que tem como principais características, ser isolante elétrica e condutora

térmica -, com uma malha de material condutor na superfície interna de cada chapa. Entre as duas malhas de condutores, estão localizados diversos pares de semicondutores de tipo *"n"* e *"p"*, que dão início ao efeito Peltier, transformando energia elétrica, em energia térmica e, graças ao posicionamento e ordenação dos pares, absorvendo calor em uma chapa e dissipando calor em outra (Figura 12).

Figura 12 - Construção pastilha Peltier

Fonte: Adaptado de VASCONCELOS (2017).

3.2.2 Dissipador

Para realizar a dissipação de calor do lado quente da pastilha, utilizou-se um dissipador de alumínio com 90x67x35mm com 17 aletas como mostra a Figura 13.

Figura 13 - Dissipador

Fonte: Elaboração própria.

Segundo o catalogo de dissipadores do fabricante HS a resistência térmica do dissipador utilizado é de 1,65 °C/W

3.2.3 Cooler

Para auxiliar a dissipação do calor gerado pelo lado quente da pastilha Peltier adicionou-se um cooler 12V com 80x80mm (Figura 14) ao dissipador forçando a passagem de ar pelo mesmo. E reduzindo a resistência térmica do sistema de dissipação para 0,6°C/W.

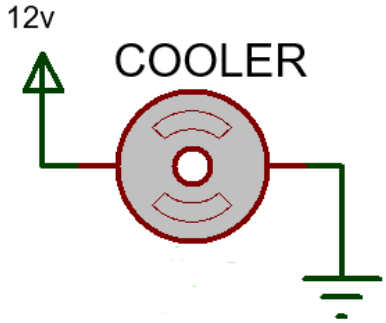
Figura 14 - Cooler.

Fonte: Adaptado de ADDA.

A de ligação elétrica do cooler.

Figura 15 mostra a o esquema de ligação elétrica do cooler.

Figura 15 – Ligação elétrica cooler

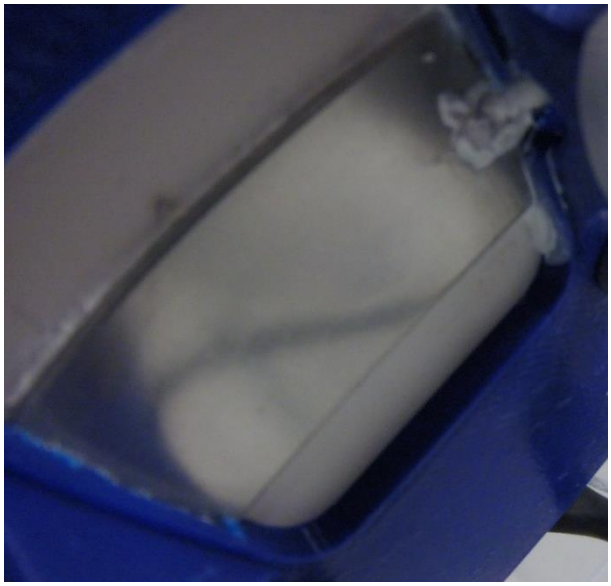


Fonte: Elaboração própria.

3.2.4. Elemento refletor

Inicialmente como elemento refletor foi empregado um espelho, porem com testes preliminares notou-se a dificuldade de resfriar a parte de vidro do espelho assim como a pouca variação de sua refletância com o início da condensação. Assim optou-se por utilizar uma chapa de inox com 45x20x1mm (Figura 16), devido à sua melhor condutibilidade térmica e sua resistência a corrosão, já que durante os processos de medição há deposito de agua sobre este elemento, que foi polido para melhorar sua refletância.

Figura 16 – Chapa de inox

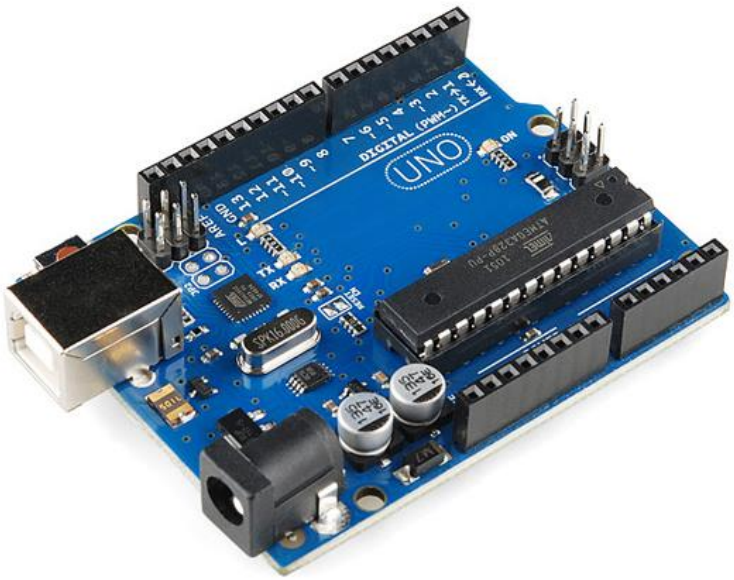


Fonte: Elaboração própria.

3.2.5 Arduino

Para a aquisição dos sinais dos sensores, o controle de temperatura do elemento refletor e a comunicação com o sistema supervisório foi utilizado uma placa de prototipagem do tipo Arduino, modelo UNO (Figura 17).

Figura 17 - Arduino uno



Fonte: Adaptado de Arduino.

Esta placa possui hardware livre, projetada com um microcontrolador Atmel AVR com suporte de entrada/saída embutido, cujas características estão detalhadas no Quadro 4 utiliza uma linguagem de programação padrão, a qual tem origem em Wiring, e é essencialmente C/C++. Com o objetivo de criar ferramentas que são acessíveis, com baixo custo, flexíveis e fáceis de usar tanto por amadores quanto por profissionais.

Quadro 4 – Características Arduino Uno

Modelo	**Arduino UNO**
Comunicação	Serial / SPI / I2C
Pinos digitais	14 e 6 podem suportam PWM
Entradas analogias	6
Corrente contínua por pino de I/O	40 mA
Memória Flash	32 KB (ATmega328) dos quais 0.5 KB são usados pelo bootloader
Memória SRAM	2 KB (ATmega328)
EEPROM	1 KB (ATmega328)
Velocidade do Clock	16 MHz

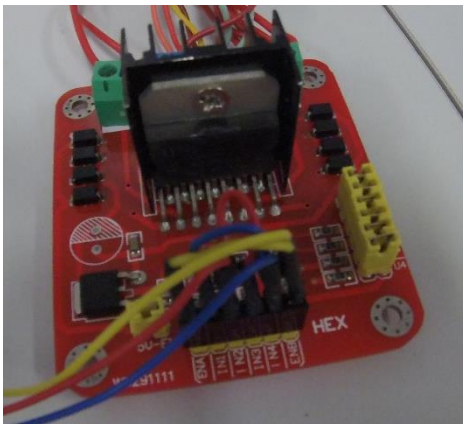
Fonte: Elaboração própria.

3.2.6 L298

Pelo fato do Arduino trabalhar apenas com tensões de até 5V com correntes de até 40mA e a pastilha Peltier pode utilizar tensões de até 14V e correntes de até 6A foi necessário a utilização de um dispositivo para fazer interface entre o sistema de controle e o sistema de potência.

O dispositivo utilizado foi um driver com ponte H L298 (Figura 18) que permite fazer o controle da tensão aplicada nas placas por meio do PWM (pulse width modulation – modulação de largura de pulso) e inversão de sentido.

Figura 18 – Driver com L298



Fonte: Elaboração própria.

Esta placa já estava disponível na instituição e possui as características descritas no Quadro 5:

Quadro 5 - Características do Driver L298

Modelo	**L298**
Tensão de operação	4 a 35V
Corrente de operação	2A por canal ou 4A máximo
Tensão logica	5V
Corrente logica	0 a 36mA
Limites de temperatura	-20 a 135°C

Fonte: Elaboração própria.

Para alimentação do driver foi utilizada uma fonte chaveada de 12V e 5A. Para o acionamento do driver L298 foram necessários três sinais, EN que habilita o driver, nesta entrada colocou-se o sinal de PWM (pino 5 do Arduino) para chavear a saída do driver, IN 1 e IN 2 (pino 6 e 7 do Arduino respectivamente) os quais quando alterados seu estado logico é possível variar a direção da corrente na saída conforme Quadro 6 alterando assim o sentido do fluxo de calor nas pastilhas Peltier.

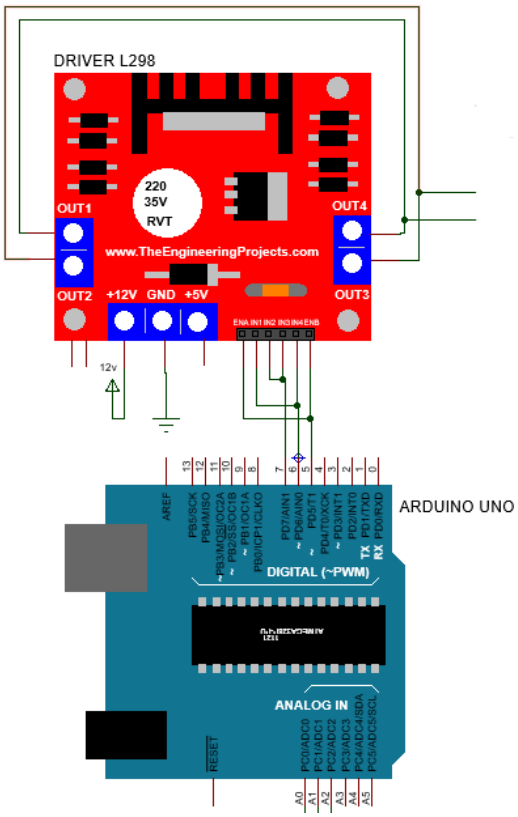
Quadro 6 - Saídas do driver L298 de acordo com IN1 e IN2

IN1	**IN 2**	**Saída**
0	0	Sem corrente na saída
0	1	Aquece o elemento refletivo
1	0	Resfria o elemento refletivo
1	1	Sem corrente na saída

Fonte: Elaboração própria.

Para suprir a necessidade de corrente exigida pelas placas Peltier ligou-se as duas saídas do L298 em paralelo ligando o pino OUT1 ao OUT4 e o pino OUT2 ao OUT3, para utilização do driver com as saídas em paralelo também foi necessário fazer a ligação em paralelo das entradas do driver, ligando o pino EN A ao EN B, o pino IN1 ao IN4 e o pino IN2 ao IN3 como mostra a Figura 19.

Figura 19 - Ligações do driver L298



Fonte: Elaboração própria.

3.2.7 Sensores de temperatura

Para a medição da temperatura do elemento refletor utilizou-se um sensor de temperatura do tipo termorresitencia de platina (PT-100), que a 0°C possui 100Ω e sua resistência varia de acordo com a temperatura conforme o Quadro 7. O PT-100 é utilizado há muitos anos para medir temperatura em processos industriais e laboratoriais, e possui uma reputação de precisão, repetibilidade e estabilidade.

Para melhorar a tempo de resposta do sensor retirou-se o encapsulamento do mesmo que foi colocado diretamente em contato com o elemento refletivo.

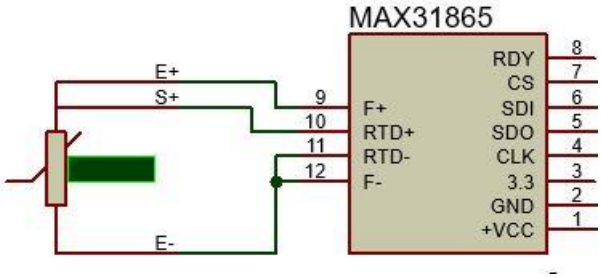
Quadro 7 - Relação resistência temperatura PT100

°C ITS-90	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	°C ITS-90
						RESISTÊNCIA EM Ohms						
-40	84.27	83.87	83.48	83.08	82.69	82.29	81.89	81.50	81.10	80.70	80.31	-40
-30	88.22	87.83	87.43	87.04	86.64	86.25	85.85	85.46	85.06	84.67	84.27	-30
-20	92.16	91.77	91.37	90.98	90.59	90.19	89.80	89.40	89.01	88.62	88.22	-20
-10	96.09	95.69	95.30	94.91	94.52	94.12	93.73	93.34	92.95	92.55	92.16	-10
0	100.00	99.61	99.22	98.83	98.44	98.04	97.65	97.26	96.87	96.48	96.09	0
0	100.00	100.39	100.78	101.17	101.56	101.95	102.34	102.73	103.12	103.51	103.90	0
10	103.90	104.29	104.68	105.07	105.46	105.85	106.24	106.63	107.02	107.40	107.79	10
20	107.79	108.18	108.57	108.96	109.35	109.73	110.12	110.51	110.90	111.29	111.67	20
30	111.67	112.06	112.45	112.83	113.22	113.61	114.00	114.38	114.77	115.15	115.54	30
40	115.54	115.93	116.31	116.70	117.08	117.47	117.86	118.24	118.63	119.01	119.40	40

Fonte: Adaptado de ECIL.

Para obter esta precisão e exatidão do PT-100, deve-se utilizar um amplificador que leia baixas resistências e que possa ajustar e compensar automaticamente a resistência dos fios de conexão. Assim optou-se por utilizar como amplificador de sinal a placa Max31856. A Figura 20 mostra as ligações entre o PT-100 e a placa Max31856.

Figura 20 - Ligação Pt-100 a três fios



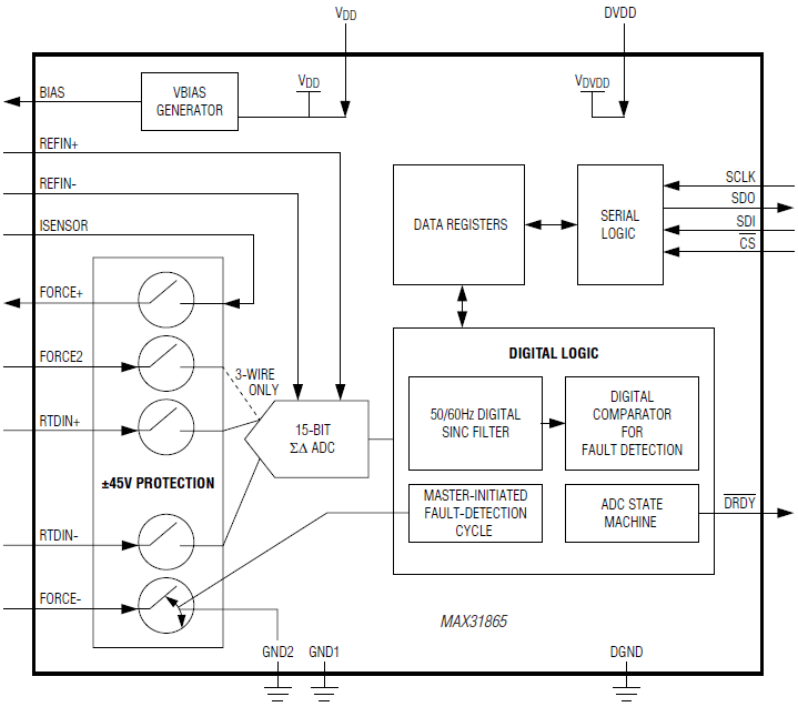
Fonte: Elaboração própria.

Para medição da temperatura do gás utilizou-se a informação de temperatura disponível no sensor de umidade DHT 22 utilizado para a comparação da umidade.

3.2.8 Placa Max31865

Desenvolvida pela empresa Adafruit a placa Max31856 cujas características estão descritas no Quadro 8, utiliza um microprocessador Max31856, desenvolvido especialmente para a leitura de termoresistencias de platina, utilizando uma resistência como referência e um conversor analógico-digital (ADC), transformando a relação entre a resistência do PT100 e a resistência de referência em um formato digital (Figura 21).

Figura 21 – Estrutura funcional CI MAX 31865



Fonte: Datasheet Max 31865.

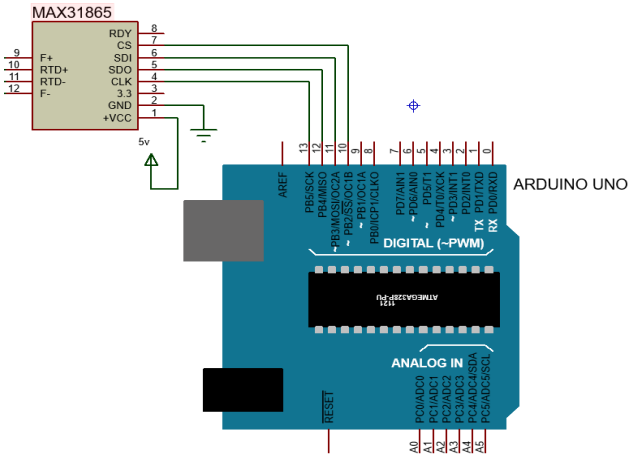
Quadro 8 - Características amplificador MAX31856.

Modelo	Max31856
Termoresistencias suportadas	PT100 a PT1000
Modelos de termoresistencias	2, 3 e 4 fios
Interface de comunicação	SPI
Resolução ADC	15 bits
Resolução nominal da temperatura	0,03125 ° C*
Tempo de conversão	21 ms (max)
Proteção de entrada	± 45V
* Varia devido à não linearidade da termoresistencia	

Fonte: Elaboração própria.

A Figura 22 mostra as ligações feitas entre a placa Max31856 e o Arduino.

Figura 22 - Ligação placa MAX31865.



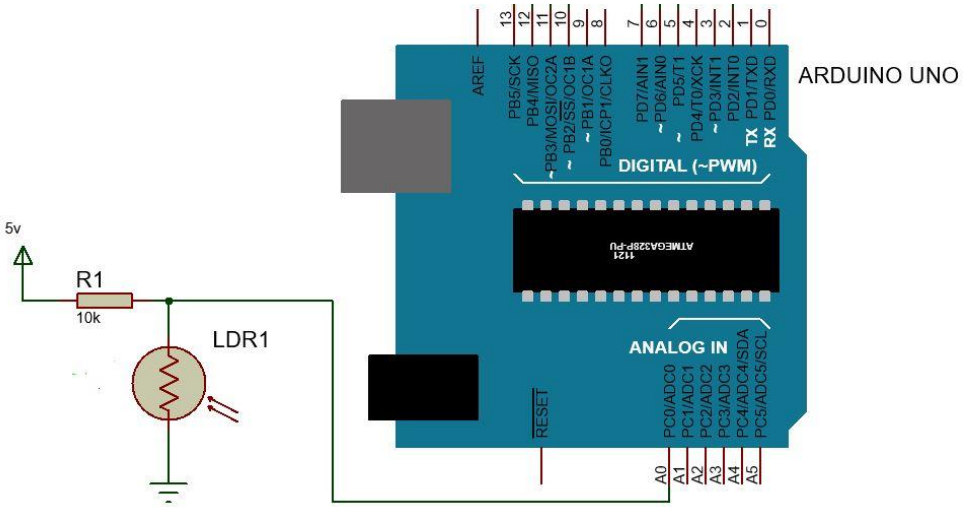
Fonte: Elaboração própria.

3.2.9 LDR

Para a detecção da formação de orvalho sobre a chapa de inox utilizou-se um LDR (light dependente resistor – resistor dependente de luz), que consiste em um componente eletrônico passivo, do tipo resistor variável, cuja resistência varia conforme a intensidade da luz que incide sobre o mesmo.

Em um dos terminais do LDR colocou-se um resistor de pull-up para 5V e ligou-se a entrada analógica A0 do Arduino e o outro terminal conectou-se ao GND (Figura 23)

Figura 23 - Ligação LDR.



Fonte: Elaboração própria.

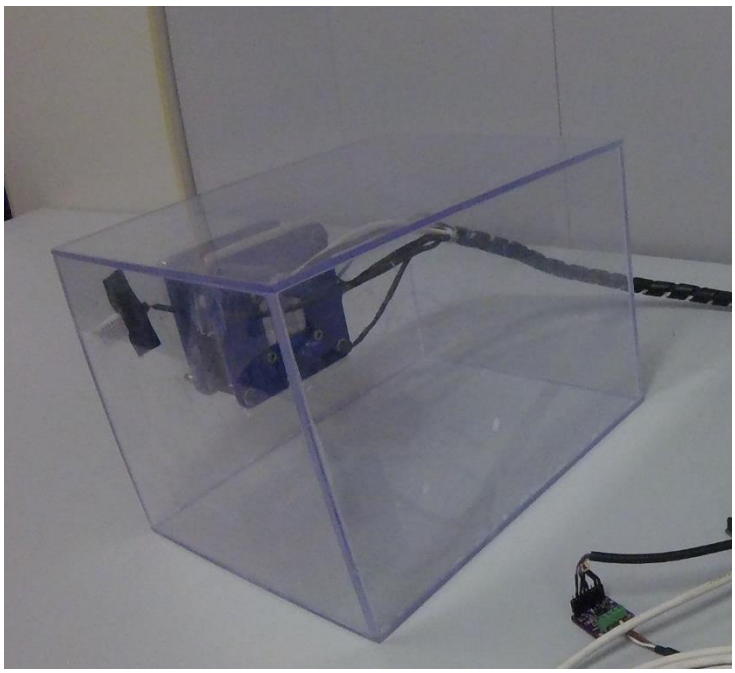
3.2.10 Laser

Como elemento sensibilizador para o ldr foi utilizado o led de um laser pointer alimentado com 5V e posicionado de maneira a incidir sobre a chapa de inox e refletir sobre o LDR assim quando atingido o ponto de orvalho e iniciada a condensação a incidência da luz do laser sobre o LDR diminui devido à refração causada pelas gotículas de agua condessadas sobre a chapa de inox e se percebe a variação de resistência.

3.2.11 Câmara climática

Com alguns retalhos de acrílico 4mm que estavam disponíveis na instituição foi confeccionada uma caixa com dimensões internas de 232x292x200mm totalizando um volume de 13.58l (Figura 24). Para que se pudesse isolar os sensores e controlar a umidade relativa, possibilitando assim, efetuar medidas em diferentes níveis de umidade.

Figura 24 – Câmara de acrílico



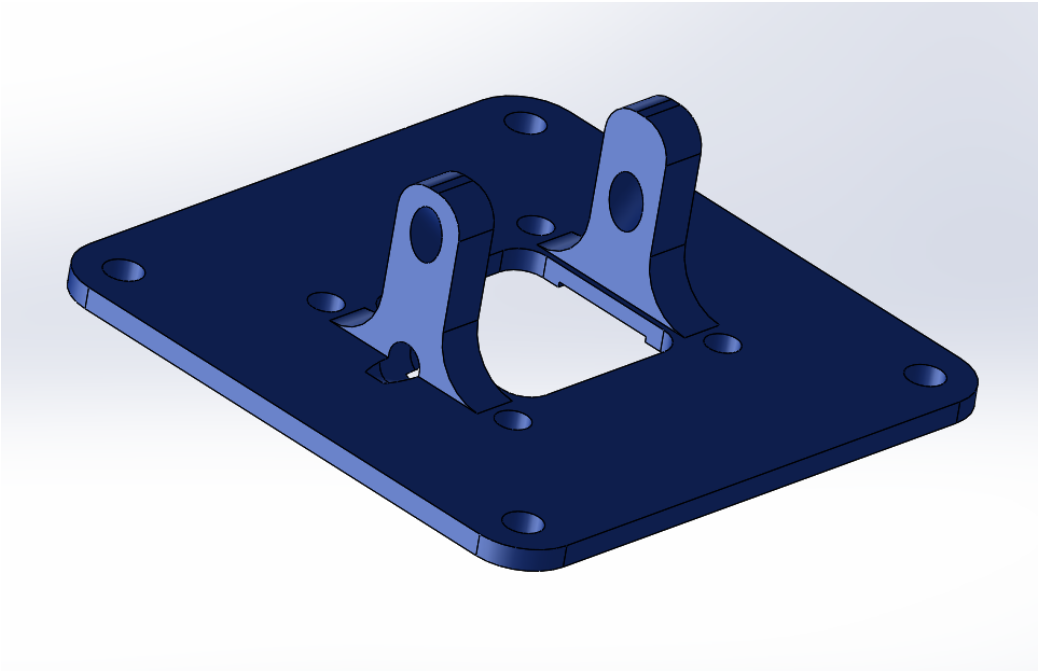
Fonte: Elaboração própria.

3.2.12 Flanges de fixação

Foram projetados duas flanges, uma para fixação das pastilhas e do elemento refletor ao dissipador que também possui uma estrutura para o

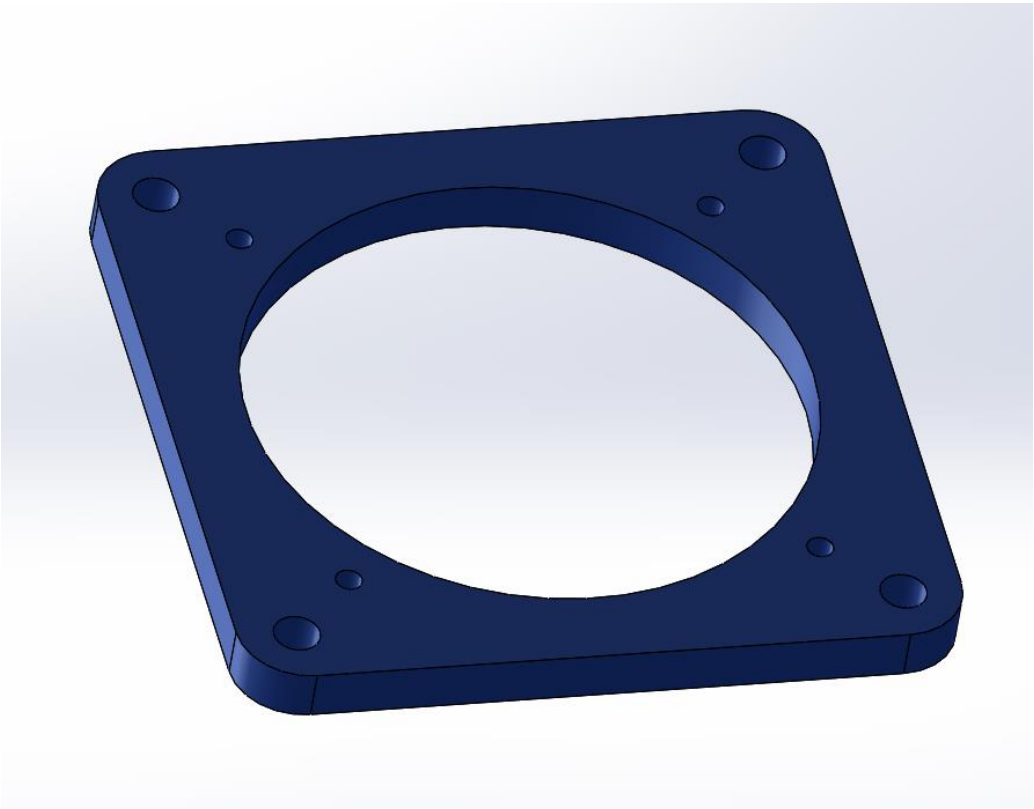
posicionamento dos sensores, LDR e PT-100 além do laser (Figura 25), e outra para a fixação do cooler (Figura 26).

Figura 25 – A – Modelo flange dos sensores e das pastilhas



Fonte: Elaboração própria.

Figura 26 - A – Modelo flange do cooler



Fonte: Elaboração própria.

Para evitar o fluxo térmico do dissipador para o lado frio da pastilha e o elemento refletor, o material escolhido para desenvolver a flange que suporte dos sensores necessitava ser isolante térmico. Para isso optou-se pelo PLA pela facilidade de construção utilizando manufatura aditiva (impressão 3D).

3.3 DESENVOLVIMENTO MECÂNICO

A montagem do aparato para medição de umidade iniciou-se pela montagem da caixa. Com as peças de acrílico devidamente cortadas com as dimensões descritas no Quadro 9, posicionou-se uma das laterais e se adicionou clorofórmio a junta a ser colada com auxílio de uma seringa após o tempo de cura de 1min se repetiu o processo para as demais laterais.

Quadro 9 – Dimensões e quantidades das partes da câmara

Descrição	Tamanho	Quantidade
Tampa/Base	300x240	2
Laterais maiores	300x200	2
Laterais menores	232x200	2

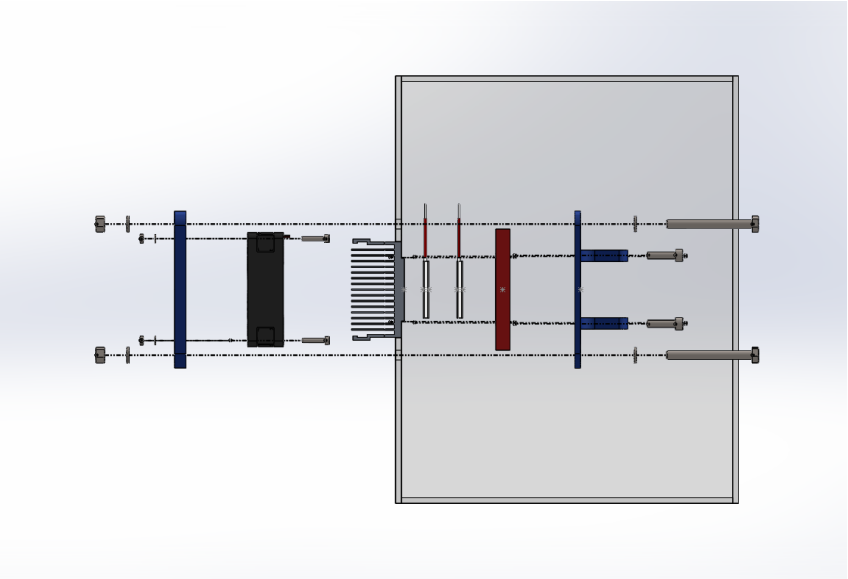
Fonte: Elaboração própria.

Para a montagem do sensor desenvolvido posicionou-se o dissipador na abertura lateral da caixa, e então fez-se o posicionamento das pastilhas Peltier com o lado quente voltado para o dissipador, depositando pasta térmica em cada etapa da montagem. Após o posicionamento das pastilhas introduziu-se a camada de isolamento (feita em EVA) que minimiza a troca de calor entre o lado quente e o lado frio da pastilha, aumentando sua eficiência térmica, e também auxilia na vedação entre a caixa e o dissipador evitando a troca de calor do interior da caixa com o meio ambiente.

Em seguida instalou-se a chapa de aço inox polido, utilizada como elemento refletor, sobre a placa Peltier com o auxílio de pasta térmica. Para fixar as pastilhas, o elemento refletor e a camada isolante, montou-se a flange de suporte dos sensores, aparafusando-a ao dissipador com quatro parafusos M5x25. As Figura 27, 28 e 29 ajudam a compreender o processo de montagem.

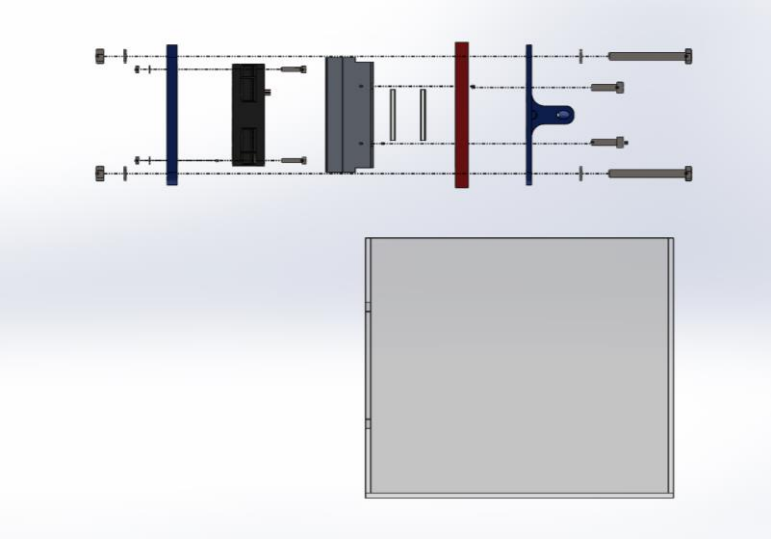
Então prendeu-se o cooler a sua flange, de modo que o sentido do fluxo de ar coincidisse com a Figura 30, em seguida fixou-se o sensor a caixa com quatro parafusos M6x90 através da flange de suporte dos sensores.

Figura 27 - Vista superior com explosão dos componentes



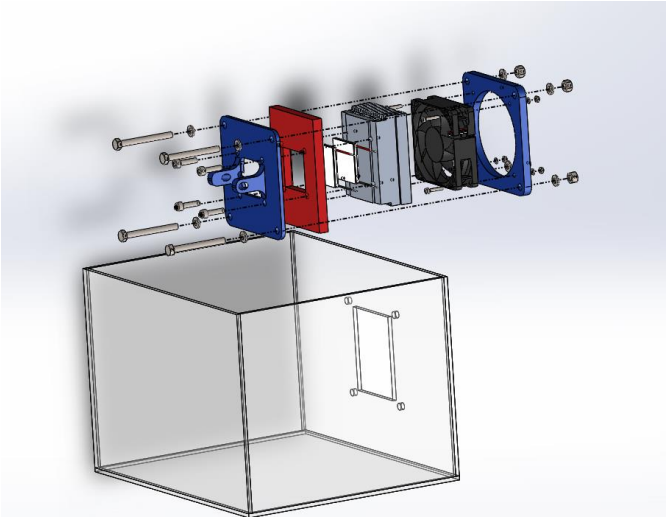
Fonte: Elaboração própria.

Figura 28 - Vista lateral com explosão dos componentes



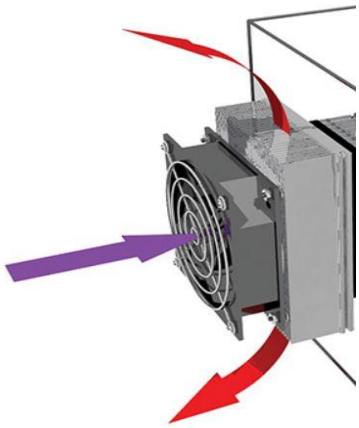
Fonte: Elaboração própria.

Figura 29 - Vista isométrica com explosão dos componentes



Fonte: Elaboração própria.

Figura 30 – Fluxo de ar no dissipador



Fonte: Elaboração própria.

3.4 PID DO PONTO DE ORVALHO

Para o controle do nível de condensação sobre o elemento refletor é necessário controlar a temperatura do mesmo. Para isso utilizou-se a biblioteca PID do Arduino.

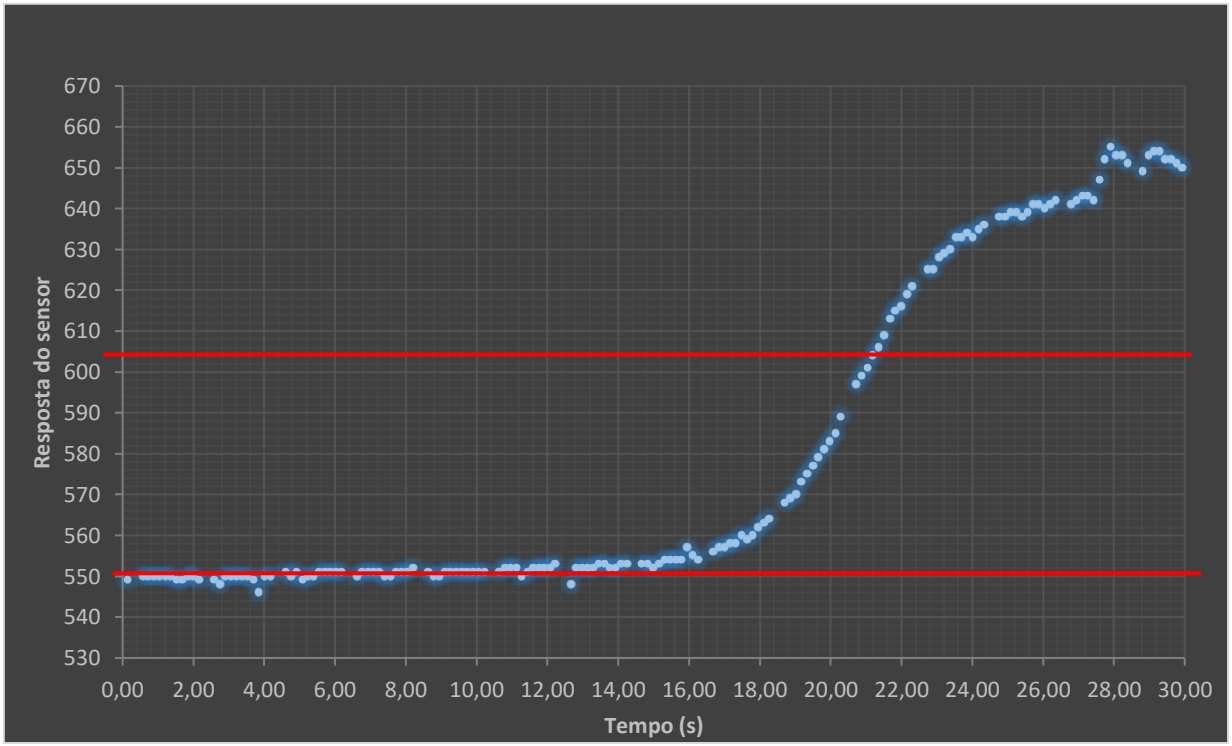
3.4.1 Identificação do processo

Para o modelamento do sistema optou-se por utilizar uma aproximação com um modelo simplificado de primeira ordem (Equação 8). Com frequência estes modelos simples são suficientes para realizar um primeiro projeto de controle.

$$G_{(s)} = \frac{Ke^{-\theta s}}{\tau s+1} \tag{8}$$

Primeiramente já com os sensores posicionados ligou-se as pastilhas a uma fonte de 12V 5A para determinar a curva de resposta do sensor fotoresistor em função do tempo. Após coletados os dados, criou-se uma tabela no software Excel, gerou-se o gráfico de resposta do sensor no tempo (Figura 31) e definiu-se uma linha de tendência para a determinação dos dados utilizados para a modelagem do sistema.

Figura 31 - Resposta do sensor no tempo

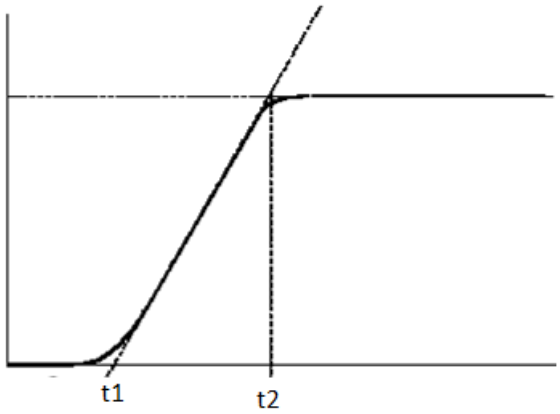


Fonte: Elaboração própria

Na literatura de controle de processos existe uma variedade de métodos baseado na resposta do processo ao degrau para identificação de K, τ e θ. Para o presente trabalho optou-se por utilizar Ziegler-Nichols, Smith e Sundaresan e Krishnaswamy

Calculando por Ziegler Nichols (ZN) traça-se uma reta tangente a inclinação da curva original conforme Figura 32.

Figura 32 – Modelo de identificação de processo por ZN.



Fonte – Adaptado de BOJORGE (2009).

A partir dessa reta obtiveram-se dois pontos importantes t_1=16,5s e t_2=21,5s e também pode-se determinar a variação em y Δy=55 já a variação de energia Δu=12 foi determinada pela tensão aplicada no sistema, para o cálculo de τ utilizou-se a Equação 9:

$$\tau = t_2 - t_1 \tag{9}$$

$$\tau = 21{,}5 - 16{,}5$$

$$\tau = 5$$

Para definição de θ utilizou-se a Equação 10:

$$\theta = t_1 \tag{10}$$

$$\theta = 16{,}5$$

E para o cálculo do valor de K utilizou-se a Equação 11:

$$K = \frac{\Delta Y}{\Delta U} \tag{11}$$

$$K = \frac{55}{12}$$

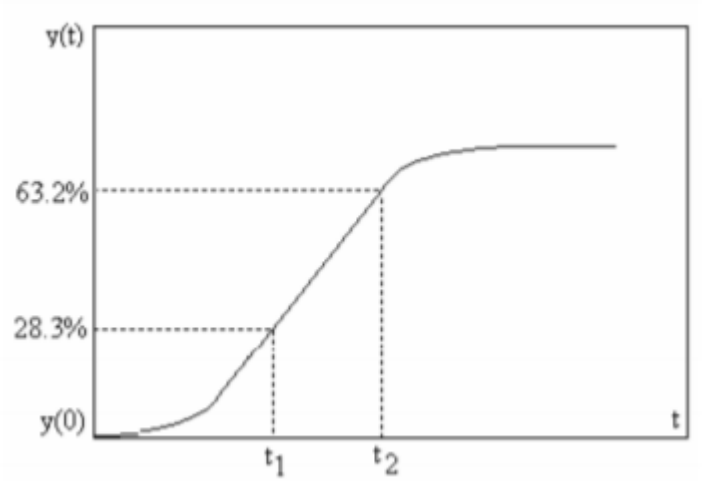
$$K = 4{,}58$$

Assim obteve-se uma função de transferência para a planta (Equação 12) utilizando o método de ZN:

$$G_{(ZN)} = \frac{4{,}58e^{16{,}5}}{5s+1} \tag{12}$$

Utilizando o método de modelagem de Smith (SM), calcula-se a yt_1 que equivale a 28,3 % do Δy e yt_2 que equivale a 28,3 % do Δy como mostra a Figura 33.

Figura 33 - Modelo de identificação de processo por SM



Fonte – Adaptado de BOJORGE (2009).

Para o cálculo de y_{t1} utilizou-se a Equação 13:

$$y_{t1} = \Delta y.\,0{,}283 + y_i \tag{13}$$

$$y_{t1} = 55.0{,}283 + 550$$

$$y_{t1} = 565{,}56$$

E para a definição de y_{t2} utilizou-se a Equação 14:

$$y_{t2} = \Delta y.\,0{,}632 + y_i \tag{14}$$

$$y_{t2} = 55.0{,}632 + 550$$

$y_{t2} = 584{,}76$

Após calculados os valores de yt_1 e yt_2 encontrou-se os valores de t_1 = 18,25s e t_2 =20,1s a partir do gráfico da Figura 31. Com estes valores foi possível calcular o valor de τ usando a Equação 15:

$$\tau = 1{,}5(t_2 - t_1) \tag{15}$$

$$\tau = 1{,}5(20{,}1 - 18{,}25)$$

$$\tau = 2{,}77$$

Com o valor de τ e t_2 calculou-se o valor de θ aplicando a Equação 16:

$$\theta = t_2 - \tau \tag{16}$$

$$\theta = 20{,}1 - 2{,}77$$

$$\theta = 17{,}33$$

E para o valor de K utilizou-se o calculado na Equação 11.

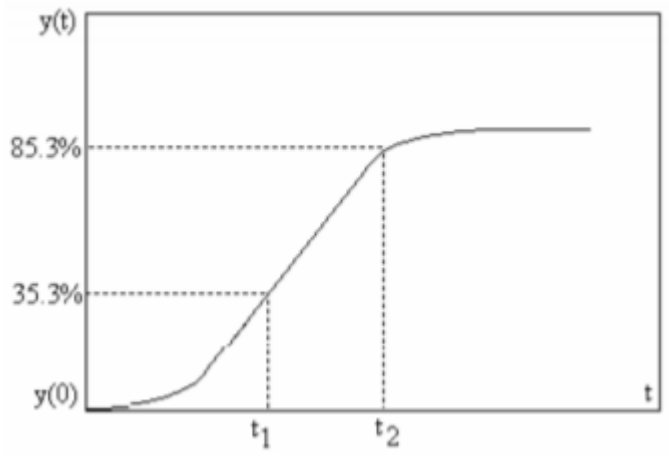
$$K = 4{,}58$$

Assim obteve-se a função de transferência para a planta (Equação 17) pelo método de SM:

$$G_{(SM)} = \frac{4{,}58e^{17{,}33}}{2{,}77s+1} \tag{17}$$

Para o cálculo por Sundaresan e Krishnaswamy (SK), calcula-se a yt_1 que equivale a 35,3 % do Δy e yt_2 que equivale a 85,3% do Δy como mostra a Figura 34.

Figura 34 - Modelo de identificação de processo por SK



Fonte:

Para o cálculo de y_{t1} utilizou-se a Equação 18:

$$y_{t1} = \Delta y.0{,}353 + y_i \tag{18}$$

$$y_{t1} = 55.0{,}353 + 550$$

$$y_{t1} = 569{,}41$$

E para a definição de y_{t2} utilizou-se a Equação 19:

$$y_{t2} = \Delta y.0{,}853 + y_i \tag{19}$$

$$y_{t2} = 55.0{,}853 + 550$$

$$y_{t2} = 596{,}91$$

Após calculados os valores de yt_1 e yt_2 encontrou-se os valores de t_1 = 19,0s e t_2 =20,7s no gráfico da Figura 31 e calculou-se o valor de τ aplicando a Equação 20:

$$\tau = 0{,}67(t_2 - t_1) \tag{20}$$

$$\tau = 0{,}67(20{,}7 - 19)$$

$$\tau = 1{,}14$$

E também o valor de θ utilizando a Equação 21.

$$\theta = 1{,}3t_1 - 0{,}29t_2 \tag{21}$$

$$\theta = 1{,}3.19 - 0{,}29.20{,}7$$

$$\theta = 18{,}7$$

E para o valor de K utilizou-se o calculado na Equação 11.

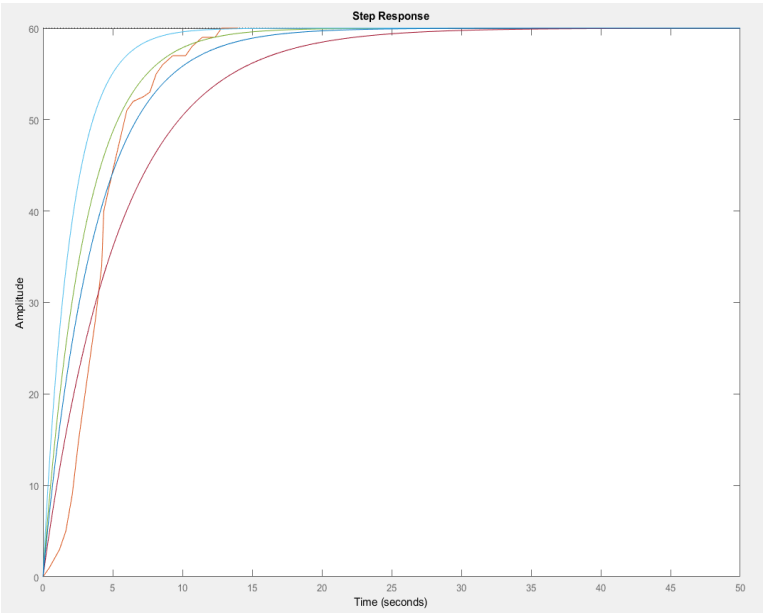
$$K = 4{,}58$$

Assim obteve-se a função de transferência para a planta pelo método de SK Equação 22:

$$G_{(SK)} = \frac{4{,}58e^{18{,}7}}{1{,}14s+1} \tag{22}$$

Após a definição matemáticas dos modelos colocou-se todos em um único gráfico (Figura 35) para analisar o que mais se assemelha a curva original.

Figura 35 – Analize dos modelamentos



Fonte: Elaboração própria.

Analisando o gráfico da Figura 35 optou-se por utilizar a função de transferência obtida pelo método de Smith para os cálculos de controle da planta, pois esta possui uma curva de resposta mais próxima a do aparato.

Optou-se por utilizar o modelo de Smith simplificado. Com base nestes dados foi realizada a análise de malha aberta da planta. E encontrou-se os seguintes dados.

Polo = - 0,36

Tempo de acomodação (Ta) = 11,1s

Tempo de subida (Ts) = 6,1s

Para controlador decidiu-se utilizar um proporcional integrativo (PI) (Equação 23).

$$G_{(SM)} = \frac{4{,}58}{2{,}77s + 1}$$

$$C_{(s)} = \frac{Kps+Ki}{s} \tag{23}$$

Aplicando o controlador (Equação 23) a função de transferência (Equação 17) e assim obteve-se a função de transferência da planta com controlador (Equação 24):

$$G_{(SMc)} = \frac{4{,}58Kps+4{,}58Ki}{2{,}77s^2+s} \tag{24}$$

Para fechar a malha utilizou-se a Equação 25:

$$G_{(fs)} = \frac{G_{(SMc)}}{G_{(SMc)}+1} \tag{25}$$

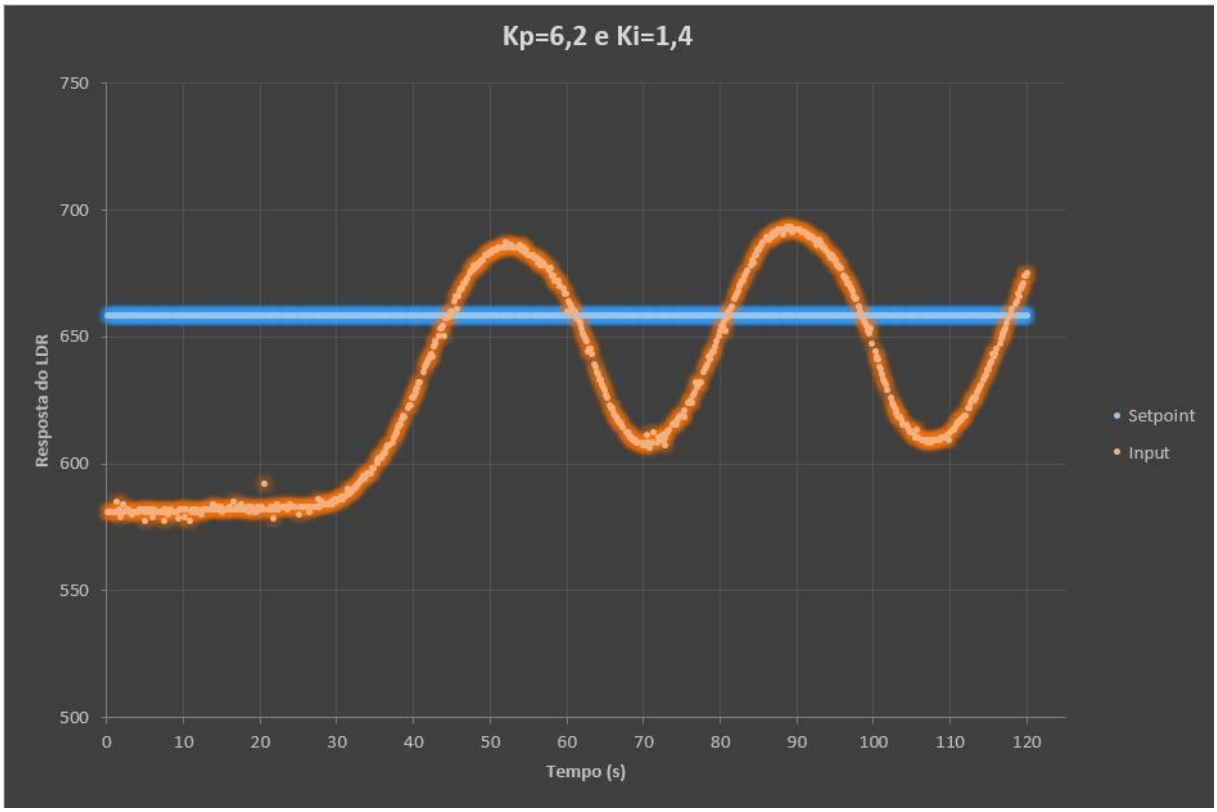
Assim obteve-se a função de transferência para o controle de malha fechada (Equação 26).

$$G(s) = \frac{4{,}58kps+4{,}58Ki}{2{,}77s^2+(1+4{,}58Kp)s+4{,}58Ki} \tag{26}$$

Como parâmetro para calcular os ganhos de kp e ki determinou-se o tempo de acomodação igual a 15s que resulta em um polo dominante em -0,26 e para o outro

polo escolheu-se o valor de -10. Assim encontrou-se Kp=6,2 e Ki=1,4 que quando aplicado a planta gerou a resposta mostrada no gráfico da Figura 36.

Figura 36 – Gráfico de resposta com Kp=6,2 e Ki=1,4



Fonte: Elaboração própria.

Porem para estes valores a planta não estabilizou, pois, o zero da função de transferência fica em 0,22 e anula o polo que deveria ser o dominante.

3.5 AQUISIÇÃO UMIDADE DE COMPARAÇÃO

Para fim de comparação das medidas realizadas pelo sensor desenvolvido utilizou-se um sensor de umidade comercial DHT 22, que possui precisão de ± 2% na leitura da umidade relativa e de ± 0,5°C e demais características descritas no Quadro 10.

Quadro 10 - Caracteristicas do sensor de umidade

Modelo	DHT22	
Tensão de operação	3,3 a 6 V DC	
Sinal de saída	Sinal digital single-bus	
Elemento sensor	Capacitor polímero	
Faixa de operação	Umidade 0 a 100%UR	Temperatura -40 a 80°C
Precisão	Umidade ± 2%UR	Temperatura < ± 0,5°C
Resolução	Umidade 0,1%UR	Temperatura 0,1°C
Repetibilidade	Umidade ± 1%UR	Temperatura ± 0,2°C
Umidade histerese	± 0,3%UR	
Dimensões	14x18x5,5mm	

Fonte: Elaboração prórpia

3.6 PROGRAMAÇÃO

A código utilizado no Arduino (Apêndice A) foi realizado utilizando como base o fluxograma (Apêndice B). Para isto foram utilizadas as seguintes bibliotecas.

PID_V1 utilizada para controla o driver de acionamento das pastilhas, esta biblioteca é definida com a seguinte função.

PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint,100,5,0,DIRECT);

INPUT variável controlada, que está sendo lida pelo sensor neste caso a reflexibilidade da chapa de inox.

OUTPUT variável controlada, a saída do controlador neste caso a largura de pulso do PWM

SETPOINT valor que a variável controlada deve atingir,

KP ganho proporcional do controlador calculado

KI ganho integrativo do controlador calculado

KD ganho derivativo do controlador calculado

DHT_U esta biblioteca é utilizada para a leitura do sensor de umidade DHT22 definida pela seguinte função.

DHT dht(2, DHT22);

Dois (2) é o pino do Arduino utilizado para a leitura do sensor e DHT22 é o modelo do sensor utilizado pois esta biblioteca pode ser utilizada para ler outros modelos de sensores de umidade como o DHT11.

Adafruit_MAX31865 esta biblioteca foi utilizada para a leitura da placa MAX31865 que faz a leitura do PT100 e é definida pela função.

Adafruit_MAX31865 max = Adafruit_MAX31865 (10, 11, 12, 13);

Os parâmetros 10, 11, 12, 13 define os pinos que serão utilizados para a comunicação entre o Arduino e a placa MAX 31865. São eles CS, SDI, SDO e CLK respectivamente.

Também é necessário utilizar #define RREF 430.0 para indicar que o sensor que está ligado a placa é o PT100, pois esta mesma placa pode ser utilizada para a leitura de um PT1000.

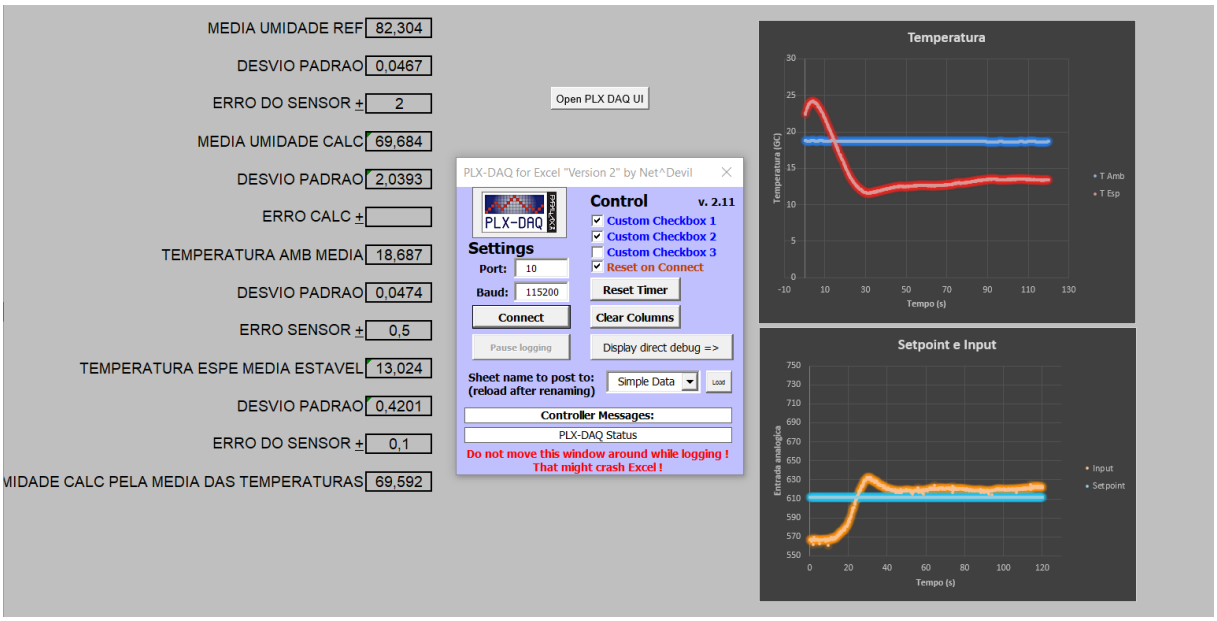
3.7 DESENVOLVIMENTO DA INTERFACE

Devido aos problemas em ajustar o PID não foi possível implementar o sistema supervisório em labview. Para a aquisição dos dados foi utilizado o plxdaq, uma planilha que recebe os dados vindos do Arduino via serial.

Esta planilha possui uma interface onde se define a porta COM que dever ser monitorada, o Baud Rate e um botão para ativar a conexão, após conectado imprime os valores mandados pela serial, em uma planilha do Excel como em um banco de dados.

Manipulando os valores do banco de dados criou-se uma interface (Figura 37) para o aparato desenvolvido, onde mostra-se as médias dos valores medidos seus desvios padrões e as precisões dos sensores utilizados, dois gráficos um com a temperatura do ambiente e a temperatura do elemento refletivo e outro com o setpoint e o valor da entrada do controlador.

Figura 37 – Interface do usuário



Fonte: Elaboração própria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

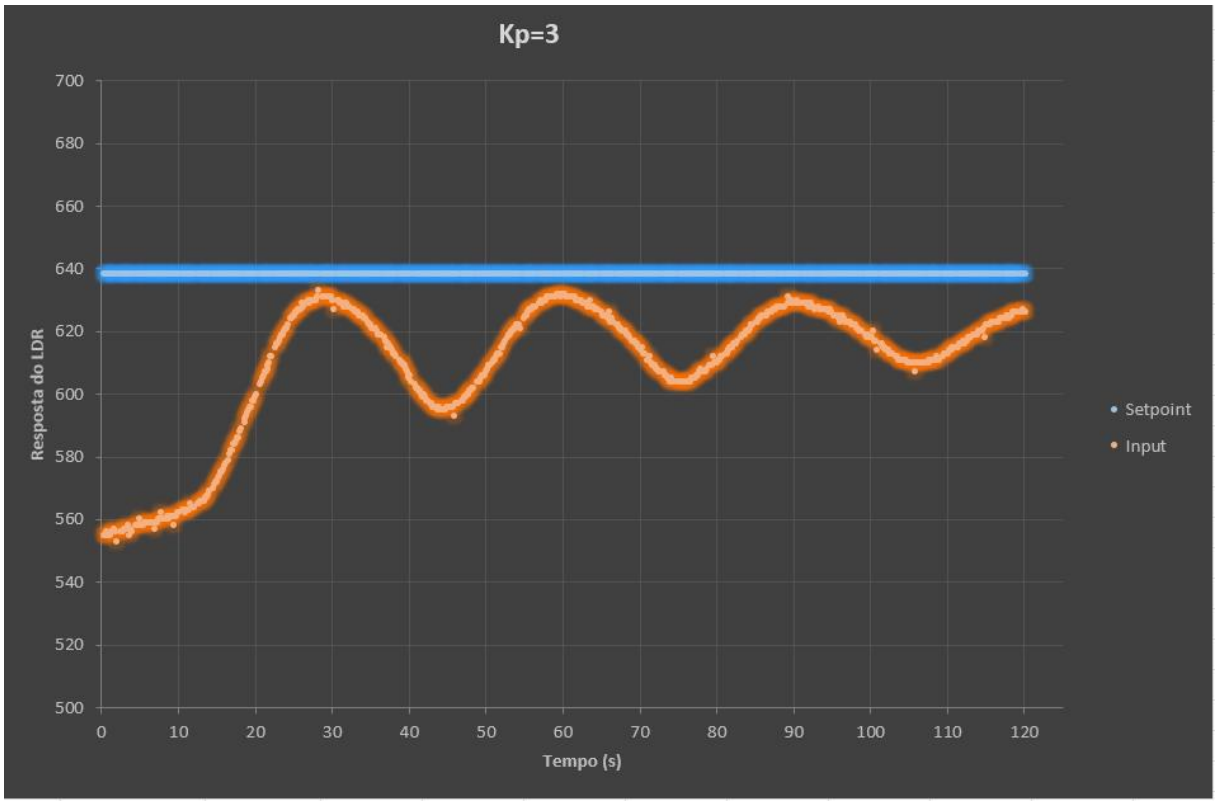
4.1 AJUSTE PID

Após a tentativa de encontrar valores para kp, ki pelo método matemático optou-se por utilizar o método “guess and check” (“adivinhar e checar”).

Neste método, os termos Ki e Kd são definidos como zero e o ganho proporcional é aumentado até que a saída comece a oscilar. Quando se aumenta o ganho proporcional, o sistema torna-se mais rápido, mas deve-se tomar cuidado para não o tornar instável.

Para a primeira tentativa de ajuste escolheu-se Kp=3 e obteve-se o gráfico de resposta da Figura 38.

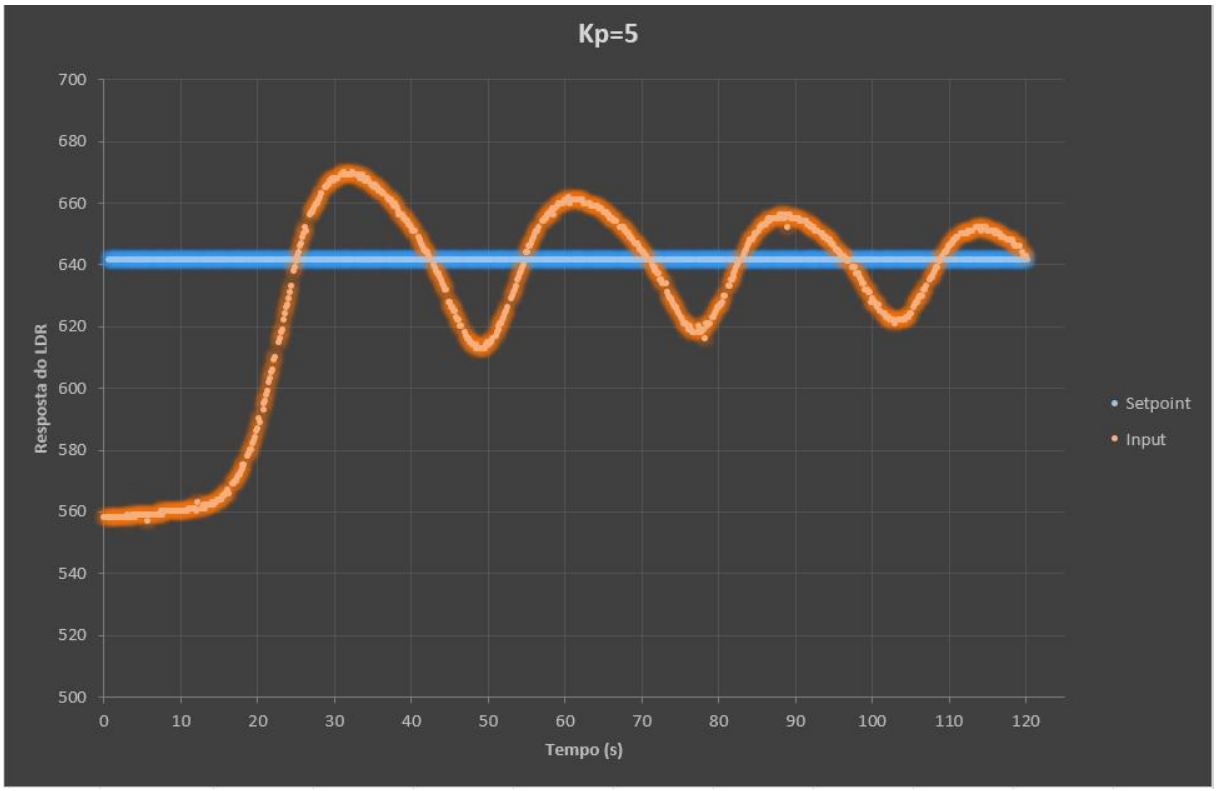
Figura 38 – Resposta da planta para Kp=3



Fonte: Elaboração própria.

Com o valor de Kp=3 não se atingiu o valor de setpoint, então escolheu-se um novo valor de kp, e para esta tentativa o valor de kp foi definido como 5 e obtendo-se a resposta mostrada no gráfico da Figura 39.

Figura 39 – Resposta da planta para Kp=5

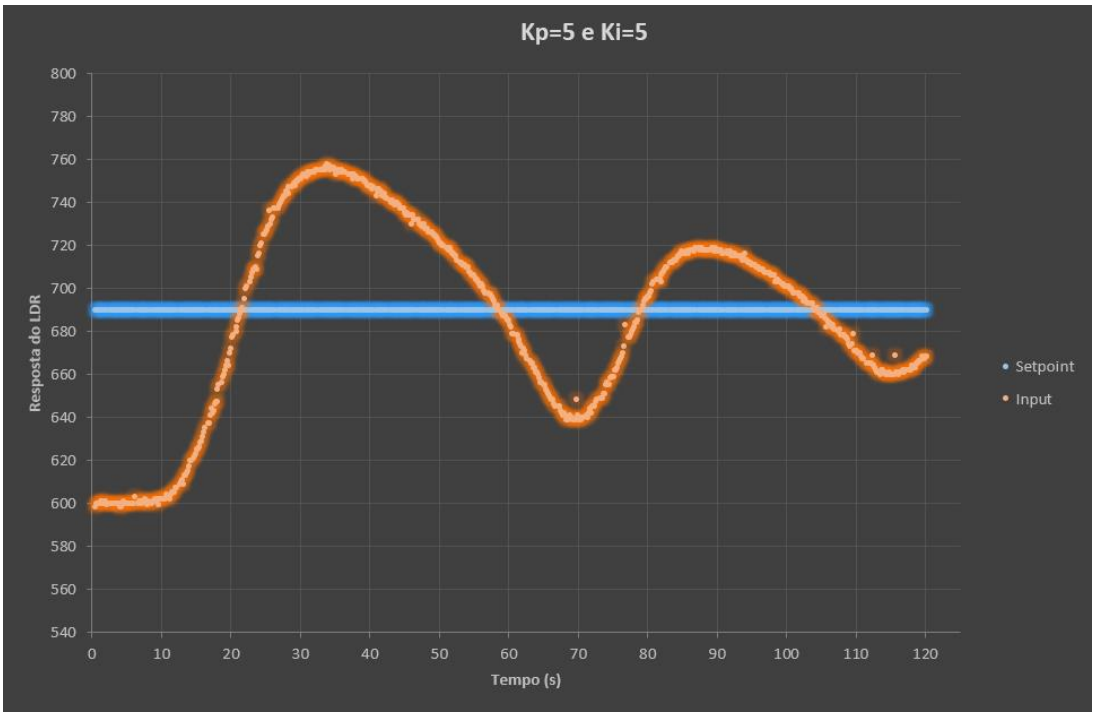


Fonte: Elaboração própria.

Após definir o Kp=5 para obter uma resposta com um tempo de subida aceitável, o termo integral foi aumentado a fim de diminuir as oscilações. O termo integral reduz o erro de estado estacionário, mas aumenta o overshoot. Um certo valor de overshoot é sempre necessário para um sistema rápido de modo que possa responder às mudanças imediatamente.

Para a primeira tentativa escolheu-se os valores de kp=5 e ki=5 gerando a resposta mostrada na Figura 40.

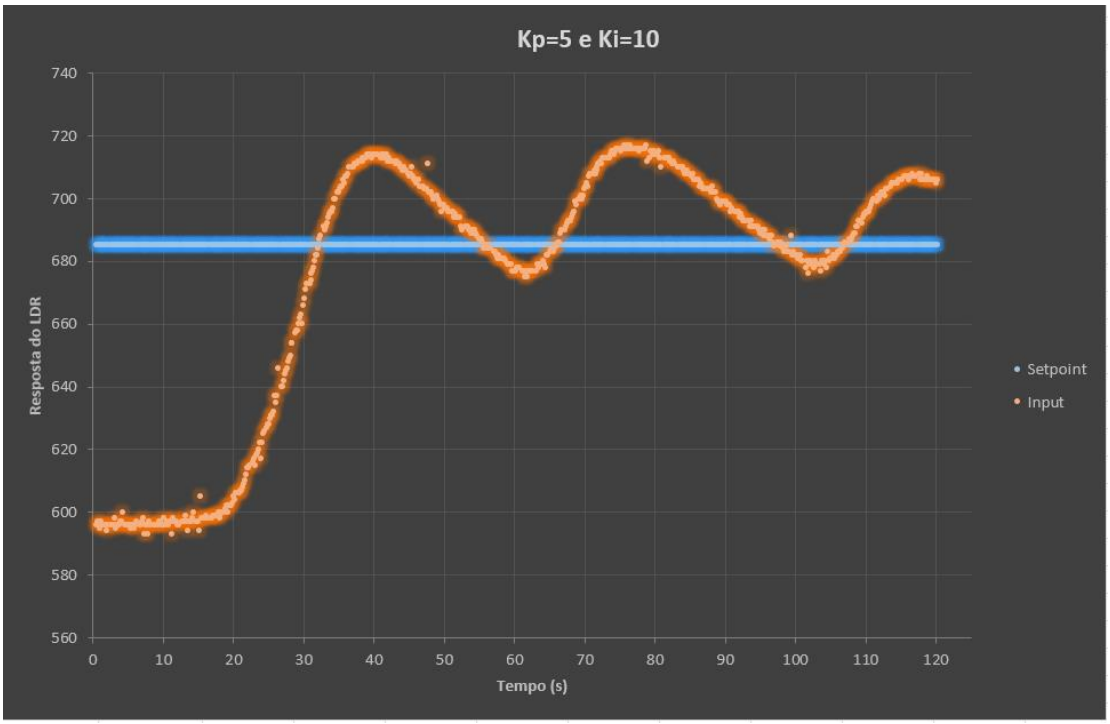
Figura 40 – Resposta da planta para Kp=5 e Ki=5



Fonte: Elaboração própria.

Com os valores de kp=5 e Ki=5 não se conseguiu uma saída desejada então escolheu-se os valores para a segunda tentativa kp=5 ki=10 que resultou na resposta que mostra o gráfico da Figura 41.

Figura 41 – Resposta da planta para Kp=5 e Ki=10

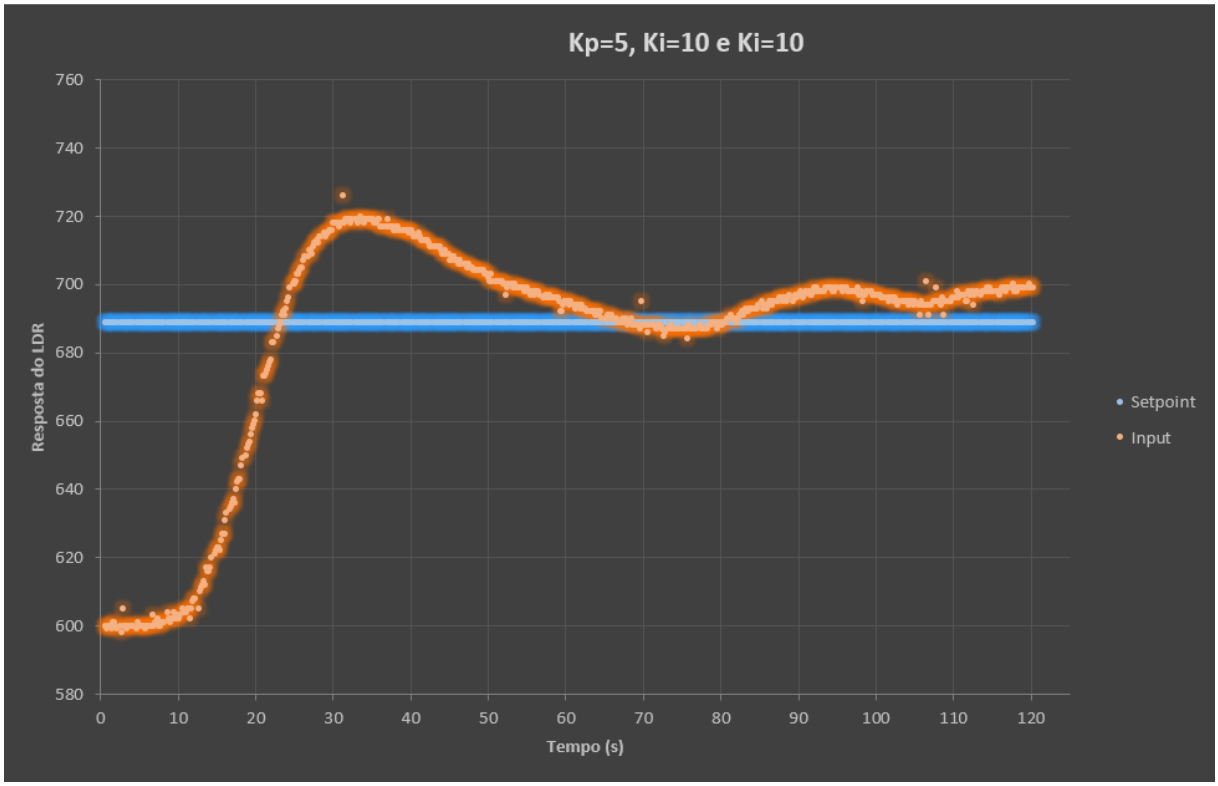


Fonte: Elaboração própria.

Uma vez que Kp e Ki foram definidos para que o sistema de controle seja rápido, o termo derivativo é aumentado até que o loop seja aceitavelmente rápido em relação ao seu ponto de referência. Aumentar o termo da derivada diminui o overshoot, aumentando o ganho, mantendo a estabilidade e ainda fazendo com que o sistema seja altamente sensível ao ruído.

Como primeira tentativa para definição de Kd escolheu-se os seguintes parâmetros kp=5, ki=10 e kd=10 e obteve-se a resposta apresentada no gráfico da Figura 42

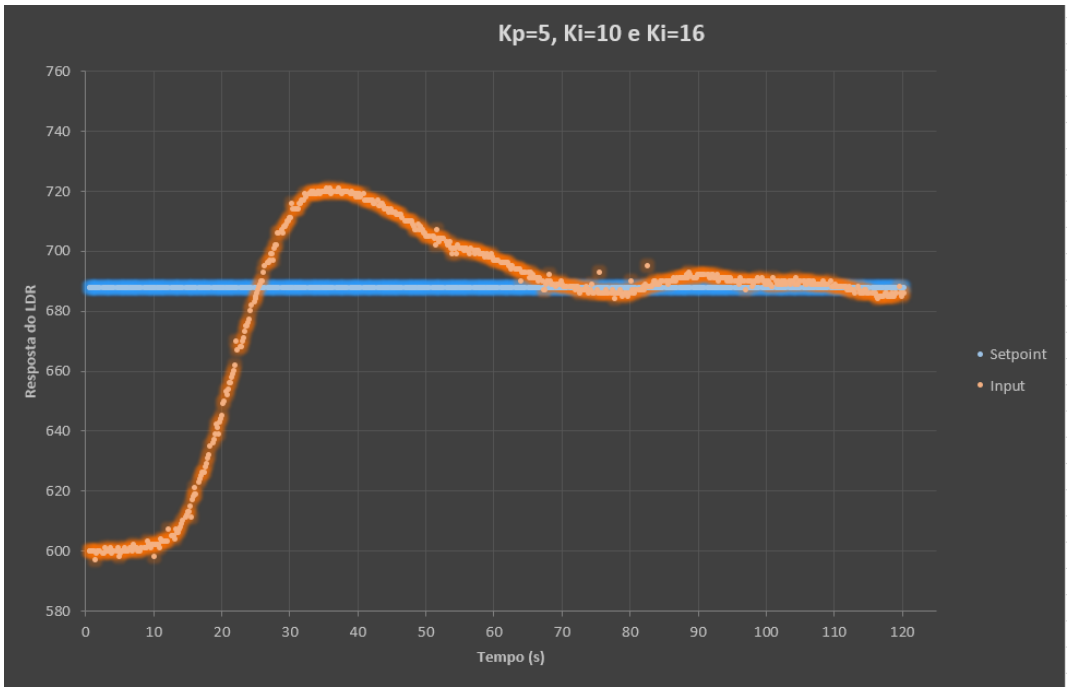
Figura 42 – Resposta da planta para Kp=5, Ki=10 e Kd=10



Fonte: Elaboração própria.

Para melhorar a estabilidade do sistema realizou-se outra tentativa de com os valores de Kp=5, Ki=10 e Kd=16 gerando a resposta apresentada no gráfico da Figura 43.

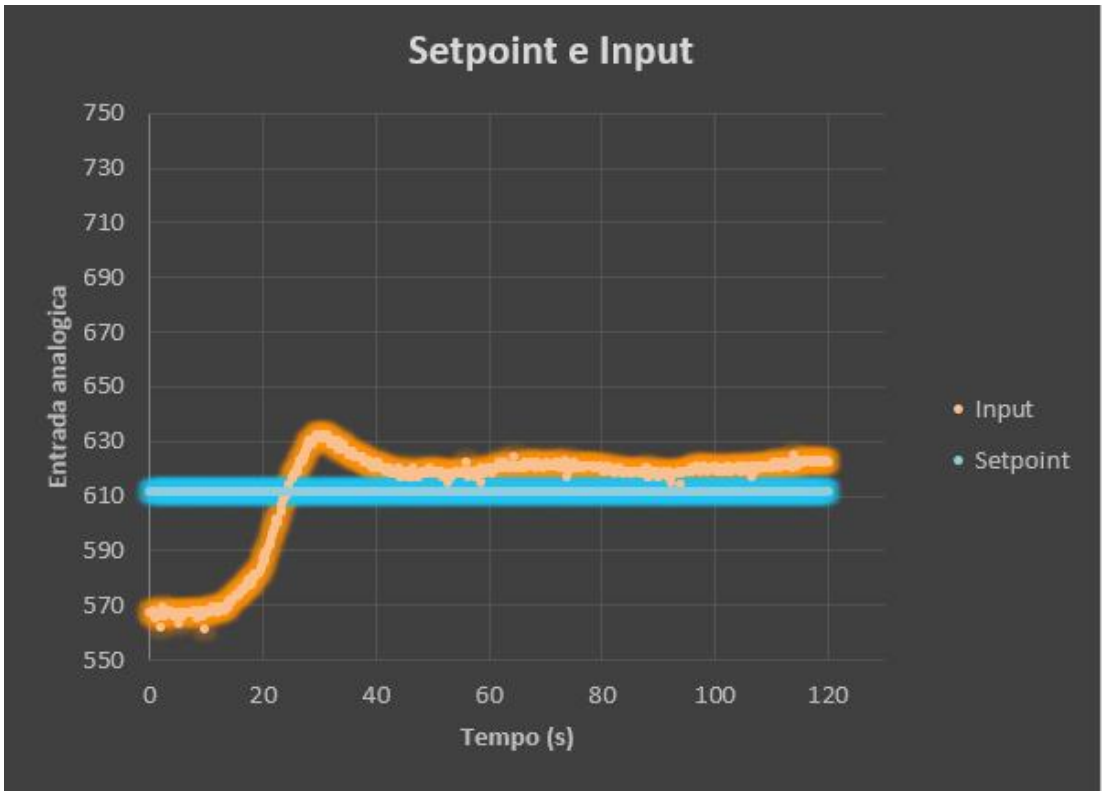
Figura 43 – Resposta da planta para Kp=5, Ki=10 e Kd=16



Fonte: Elaboração própria.

Aplicando os novos valores de kp ki e kd obteve-se a curva de resposta para a planta mostrada na Figura 44.

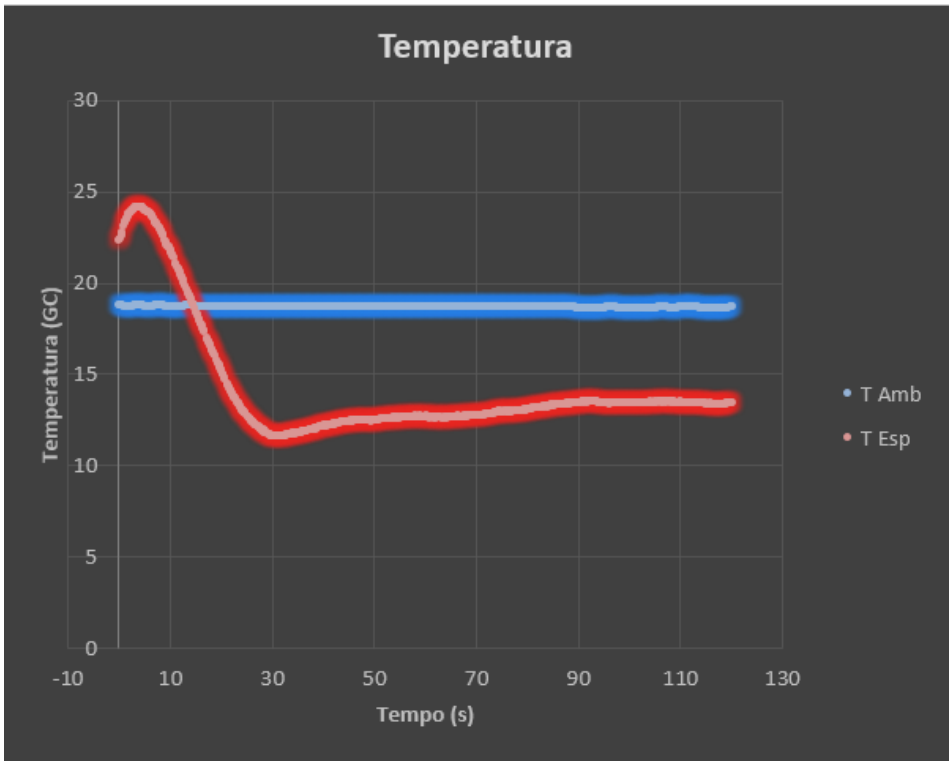
Figura 44 – Controle aplicado a planta



Fonte: Elaboração própria.

Para esta curva de resposta com o PID aplicado obteve-se a curva de temperatura mostrada na Figura 45.

Figura 45 – Gráfico de temperaturas com controle aplicado



Fonte: Elaboração própria. Troca figura

4.2 CÁLCULO DA UMIDADE

Conforme citado anteriormente para o cálculo da umidade relativa do ar a partir do ponto de orvalho utiliza-se a Equação 7.

$$UR = 100 * [\frac{T_e + d}{T_a + d}]^a * 10^{b[(T_e+d)^{-1}-(T_a+d)^{-1}]}$$

Esta equação foi inserida na programação do Arduino e é realizada quando a temperatura do elemento refletor se encontra estável, por um período de 60 segundos e o valor mostrado como resultado na interface gráfica é a média dessas medições deste período.

4.2.1 Combinação de incertezas

Combinação de incerteza é uma forma de verificar a confiabilidade dos dados de uma certa medida, quando esta é submetida a diferentes operações

matemáticas. Ela define como as incertezas das variáveis estão relacionadas e fornece a melhor estimativa para aquele conjunto de dados.

A medição da umidade relativa do ar realizada neste aparato utiliza um método indireto de mediação, utilizando duas medidas de temperatura, assim a incerteza da U.R. depende diretamente das incertezas das temperaturas medidas. A incerteza da U.R. calculada é dada pela fórmula de propagação de incertezas, enunciada da seguinte maneira (Equação 27)

$$\sigma_{UR}^2 = (\frac{\partial UR}{\partial T_e})^2 {\sigma_{T_e}}^2 + (\frac{\partial UR}{\partial T_a})^2 {\sigma_{T_a}}^2 \qquad (27)$$

Onde:

σ_{UR} = Incerteza da medição

T_e = Temperatura de ponto de orvalho (°C)

σ_{Te} = Incerteza do PT100 (°C)

T_a = Temperatura do gás (°C)

σ_{Ta} = Incerteza do DHT22 (°C)

Como valor de incerteza do termômetro usado para a leitura da temperatura do ar (σ_{Ta}), foi considerado o valor de incerteza para temperatura descrito no datashhet do sensor DHT22 (± 0,5°C) pois o mesmo não possui certificado de calibração. E como incerteza do termômetro usado para a leitura da temperatura de ponto de orvalho (σ_{Te}) foi utilizado o valor informado no datasheet do PT100 (± 0,1°C).

Para o cálculo desta incerteza foi utilizado software de cálculos Mathcad, o qual o código com os cálculos segue no Apêndice C.

O valor da incerteza para a umidade calculada é dependente dos valores das temperaturas por isso para cada medição foi calculada a incerteza e adicionada ao quadro de medidas.

4.3 TESTES

Foram realizadas três series de medições cada uma com dez medições, cada medição tem a duração de dois minutos, como pode-se analisar no gráfico da Figura 45 o período de pré-aquecimento dura em média 10s e o tempo para estabilização é de 40s em média, os cálculos de U.R. iniciam-se após os 60s e são realizados durante os 60s finais da medição onde o sistema se encontra estável. A primeira série de medições foi realizada com a câmara aberta (Quadro 11).

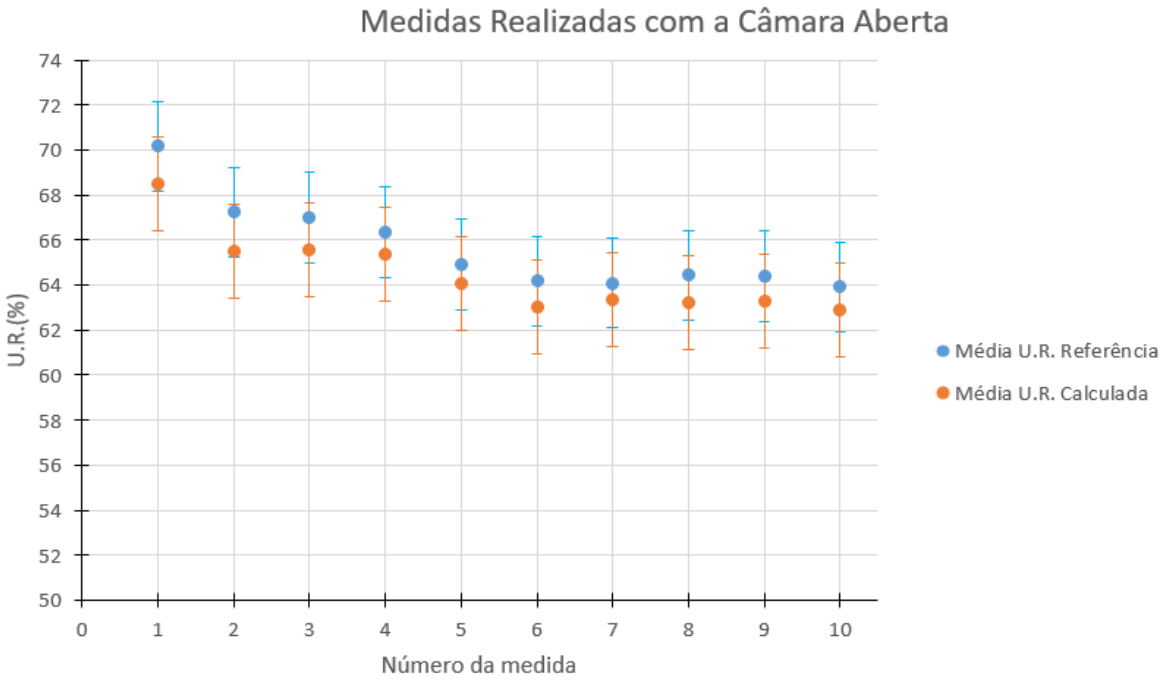
Quadro 11 - Primeira série de medições

	Medidas Realizadas com a Câmara Aberta									
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Medida 6	Medida 7	Medida 8	Medida 9	Medida 10
Média U.R. Referência	70,17	67,23	67	66,34	64,93	64,17	64,1	64,44	64,39	63,92
Incerteza U.R. Referêcia ±	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Média U.R. Calculada	68,51	65,49	65,56	65,35	64,08	63,02	63,34	63,21	63,29	62,9
Incerteza U.R. Calculada ±	2,18	2,14	2,14	2,14	2,09	2,06	2,07	2,06	2,06	2,05
Média Temperatura Ambiente	15,59	15,79	15,79	15,81	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9	15,9
Incerteza Temperatura Ambiente ±	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	5	0,5	0,5
Média Temperatura Espelho	9,38	9,35	9,37	9,34	9,13	8,88	8,95	8,92	8,94	8,85
Incerteza Temperatura Espelho ±	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Diferença entre as U.R.	-1,66	-1,74	-1,44	-0,99	-0,85	-1,15	-0,76	-1,23	-1,1	-1,02

Fonte: Elaboração própria.

Analisando os dados do Quadro 11 percebeu-se que o sensor desenvolvido quando sob influência de perturbações externas possui uma incerteza de 2,1%U.R. para a faixa de umidade relativa de 60% a 70% para uma temperatura ambiente de 16°C. Para esta faixa de medição encontrou-se um erro médio de -1,2%U.R. com desvio padrão de ± 0,32%U.R. como mostra o gráfico da Figura 46.

Figura 46 – Medidas realizadas com a câmara aberta



Fonte: Elaboração própria.

A segunda série de medições foi realizada com a câmara fechada (Quadro 12).

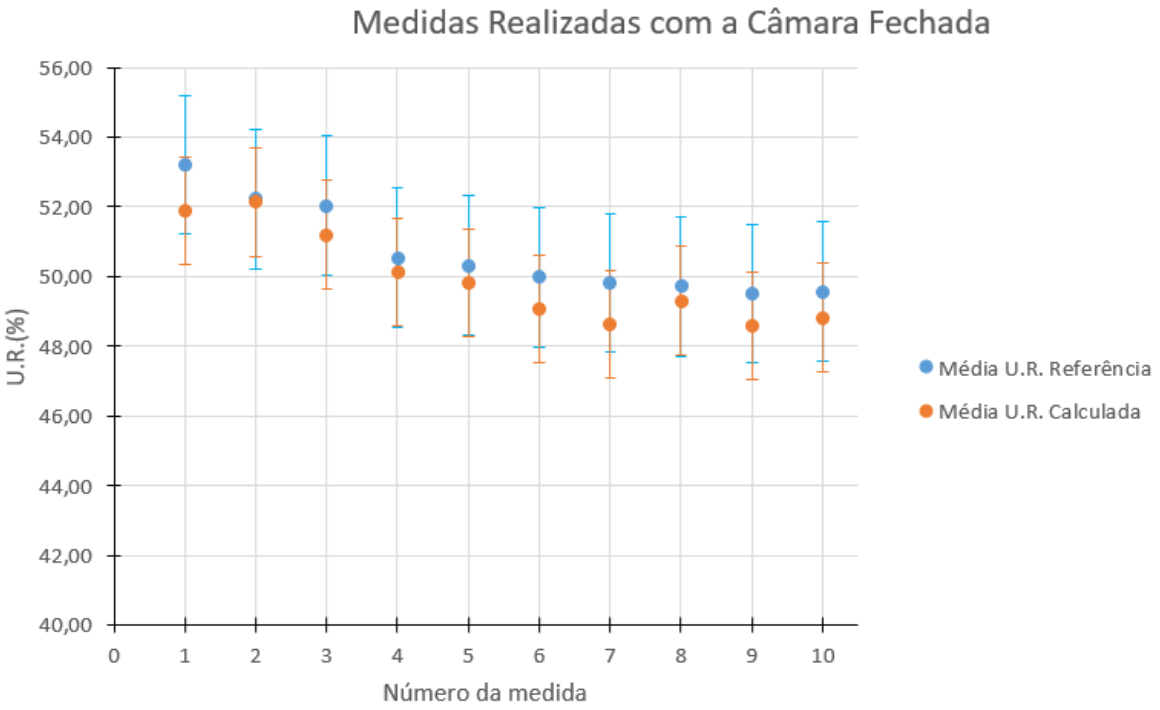
Quadro 12 - Segunda série de medições

	Medidas Realizadas com a Câmara Fechada									
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Medida 6	Medida 7	Medida 8	Medida 9	Medida 10
Média U.R. Referência	53,21	52,23	52,04	50,54	50,32	49,98	49,82	49,72	49,51	49,56
Incerteza U.R. Referêcia ±	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Média U.R. Calculada	51,88	52,13	51,20	50,13	49,81	49,07	48,62	49,31	48,58	48,82
Incerteza U.R. Calculada ±	1,61	1,62	1,59	1,56	1,55	1,52	1,51	1,53	1,51	1,52
Média Temperatura Ambiente	22,57	22,51	22,50	22,40	22,30	22,30	22,30	22,30	22,30	22,30
Incerteza Temperatura Ambiente ±	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Média Temperatura Espelho	12,19	12,21	11,93	11,51	11,32	11,09	10,95	11,17	10,94	11,02
Incerteza Temperatura Espelho ±	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Diferença entre as U.R.	-1,33	-0,10	-0,84	-0,41	-0,51	-0,91	-1,20	-0,41	-0,93	-0,74

Fonte: Elaboração própria.

Analisando os dados do Quadro 12 percebeu-se que ao se restringir as perturbações da atmosfera externa o sensor desenvolvido possui uma incerteza de 1,55%U.R. para a faixa de umidade relativa de 48% a 53% para uma temperatura ambiente de 22°C. Para esta faixa de medição encontrou-se um erro médio de -0,74%U.R. com desvio padrão de ± 0,38%U.R. como mostra o gráfico da Figura 47.

Figura 47 – Medidas realizadas com a câmara fechada



Fonte: Elaboração própria.

A terceira série de medições foi realizada com a câmara fechada e coberta para avaliar a influência da luminosidade do ambiente (Quadro 13).

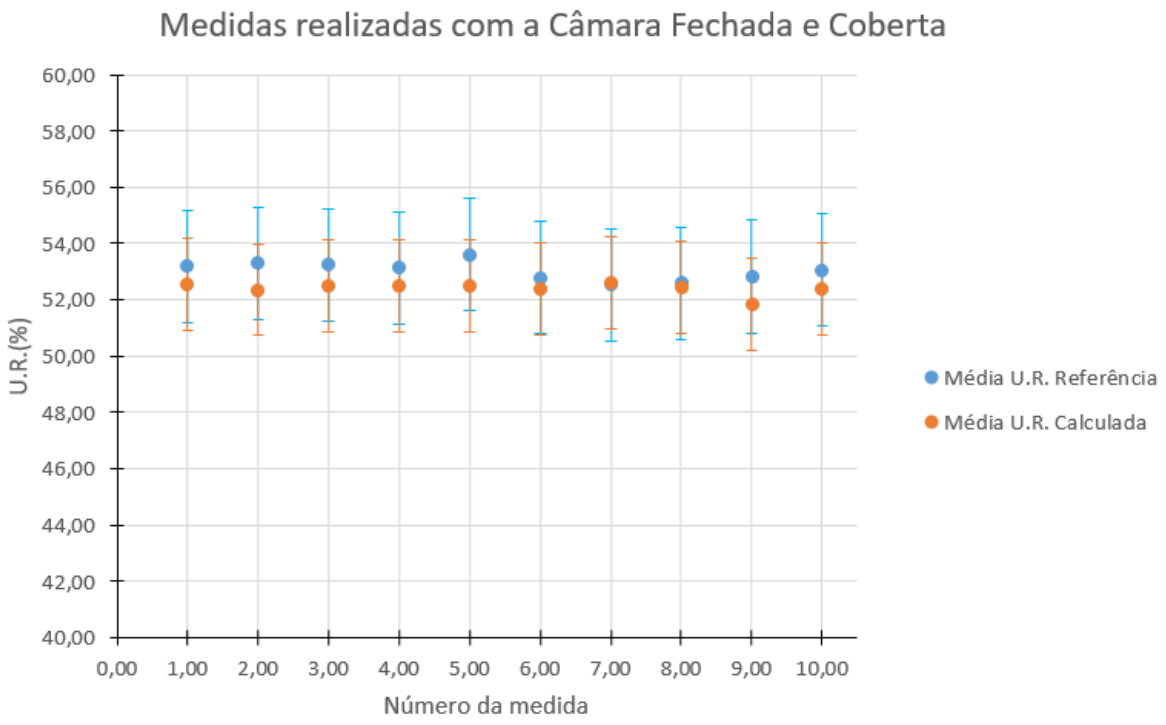
Quadro 13 - Terceira série de medições

	Medidas realizadas com Umidade Baixa e Câmara Fechada e Coberta									
	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Medida 6	Medida 7	Medida 8	Medida 9	Medida 10
Média U.R. Referência	53,19	53,30	53,24	53,13	53,61	52,79	52,53	52,59	52,82	53,07
Incerteza U.R. Referêcia ±	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Média U.R. Calculada	52,55	52,36	52,51	52,52	52,50	52,38	52,62	52,44	51,84	52,40
Incerteza U.R. Calculada ±	1,63	1,62	1,63	1,63	1,63	1,62	1,63	1,63	1,61	1,62
Média Temperatura Ambiente	22,54	22,53	22,51	22,52	22,50	22,50	22,53	22,54	22,57	22,52
Incerteza Temperatura Ambiente ±	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
Média Temperatura Espelho	12,36	12,29	12,32	12,32	12,30	12,27	12,37	12,32	12,18	12,28
Incerteza Temperatura Espelho ±	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,01	0,10	0,10	0,10
Diferença entre as U.R.	-0,64	-0,94	-0,73	-0,61	-1,11	-0,41	0,09	-0,15	-0,98	-0,67

Fonte: Elaboração própria.

Analisando os dados do Quadro 13 percebeu-se que ao se restringir as perturbações da atmosfera externa e também, as variações de luminosidade externas o sensor desenvolvido possui uma incerteza de 1,63%U.R. para umidade relativa de 52% em uma temperatura ambiente de 22°C. Para esta faixa de medição encontrou-se um erro médio de -0,62%U.R. com desvio padrão de ± 0,37%U.R. como mostra o gráfico da Figura 48.

Figura 48 - Medidas realizadas com a câmara fechada e coberta



Fonte: Elaboração própria.

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA PROJETOS FUTUROS

Foi verificado que a metodologia estudada, pode ser empregada na medição de umidade relativa do ar, como comprovado nos ensaios tanto com a câmara coberta quanto com a câmara exposta à iluminação do ambiente. A utilização de poucos componentes comuns, juntamente com o projeto simplificado do dispositivo e a interface gráfica desenvolvida, torna a metodologia possível de ser reproduzida, e com fácil operação para os usuários.

A comparação entre os ensaios apontou um erro médio de medição menor para os ensaios sem perturbações do ambiente (câmara fechada), e um desvio padrão constante, para utilização com proteção contra luminosidade do ambiente. Dessa forma a medição com a câmara fechada e coberta, apresenta-se como uma metodologia mais confiável a ser explorada em trabalhos futuros, pela boa estabilidade de medição do sistema, como solução para cobertura da câmara aconselha-se a aplicação de adesivo preto em toda a área externa da câmara.

O Quadro 14 mostra o levantamento de custos dos materiais utilizados para desenvolver o aparato.

Quadro 14 – Levantamento de custos

Item	Quantidade	Valor	
Pastilha peltier	2	R$	23,00
Driver L298	1	R$	17,00
CI MAX31865	1	R$	120,00
Sensor de umidade DHT22	1	R$	16,99
Câmara com dimensões 20x24x30cm	1	R$	300,00
Dissipador 90x67x35mm	1	R$	13,75
Cooler 80x80mm	1	R$	11,44
Chapa de aço inox polido 45x20x1mm	1	R$	1,80
Flange suporte dos sensores	1	R$	15,00
Flange fixação do cooler	1	R$	10,00
Arduino Uno	1	R$	26,90
Termoresistência PT-100	1	R$	95,50
Fotoresistência LDR	1	R$	1,10
Módulo Laser	1	R$	9,30
Fonte 12V	1	R$	19,40
Fios	1	R$	30,00
Caixa para componentes eletronicos	1	R$	53,00
Demais componentes	1	R$	15,00
Total		**R$**	**779,18**

Fonte: Elaboração própria.

A Quadro 15 mostra o comparativo de preço do aparato desenvolvido com higrômetros comerciais.

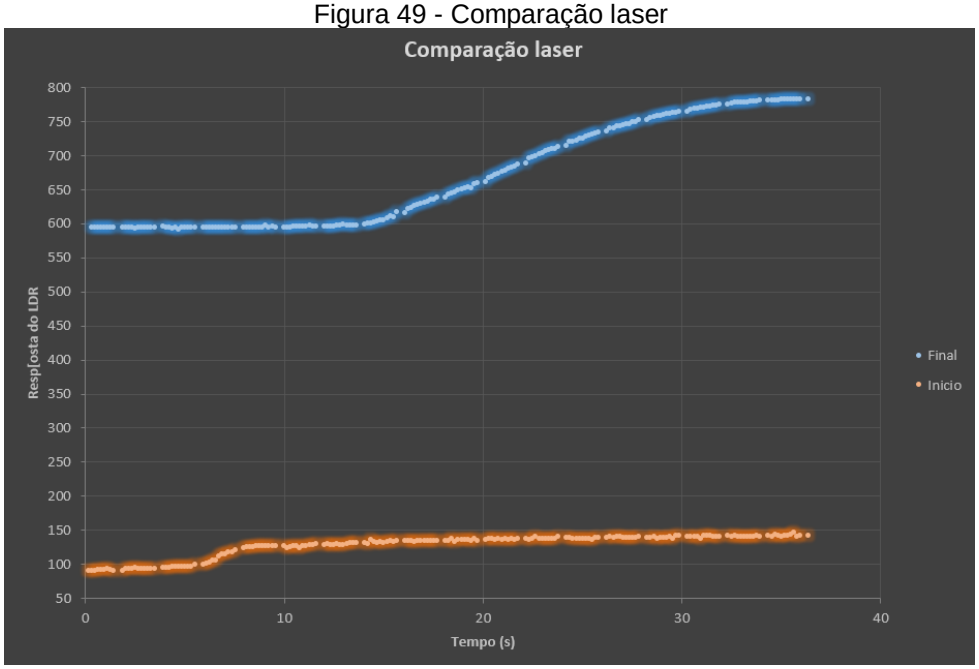
Quadro 15 – Comparação de preços de sensores de umidade

Produto	Faixa de medição	Precisão	Caracteristicas	Valor
Aparato desenvolvido	0 a 100% U.R.	1,55%	Camara de calibração	R$ 779,18
Termo higrometro Akso	0 a 100% U.R.	3,50%	Portatil	R$ 602,00
Rotronic hts11	0 a 100% U.R.	2%	Sonda usada	R$ 4.597,53
Labgo humidity cabinet	55 a 95% U.R.	5%	Camara de controle	R$ 13.875,50

Fonte: Elaboração própria.

Durante os testes verificou-se que a utilização continua diminui a intensidade da luminosidade do laser utilizado, como mostra a Figura 49 que compara as medidas realizadas no início da construção do aparato e as realizadas durante os testes finais.

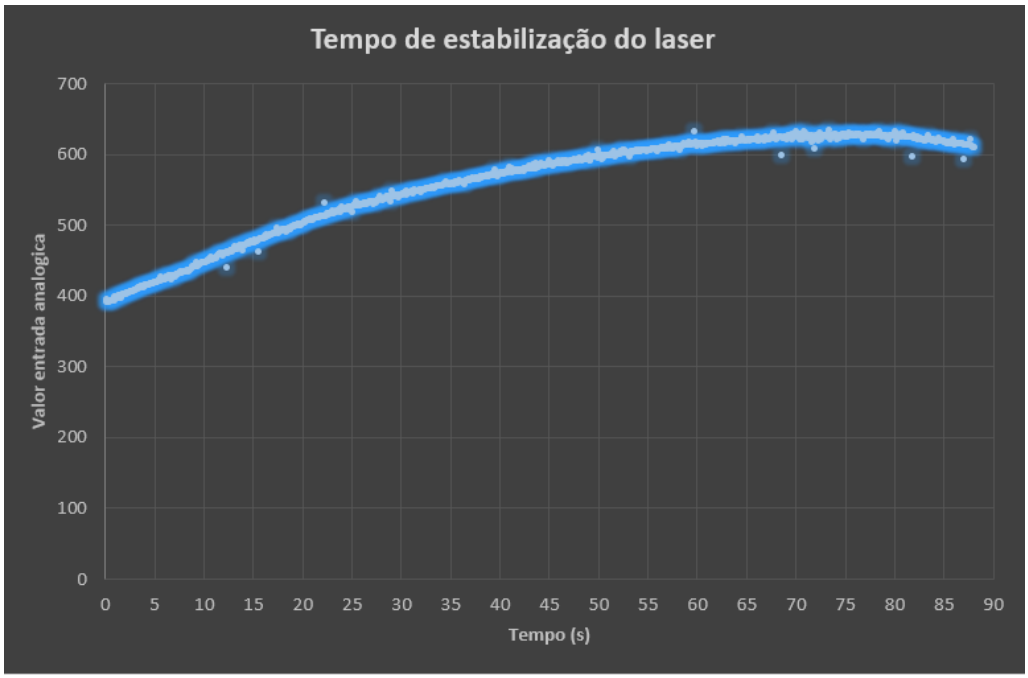
Figura 49 - Comparação laser



Fonte: Elaboração própria.

Outra dificuldade encontra da na utilização de um laser convencional foi o tempo de estabilização, após ligado o mesmo leva em torno de 60 segundos para atingir uma luminosidade estável como mostra a Figura 50, uma sugestão para minimizar este efeito nas medições de umidade seria adicionar outro conjunto laser e LDR para que possa ser utilizado como referência.

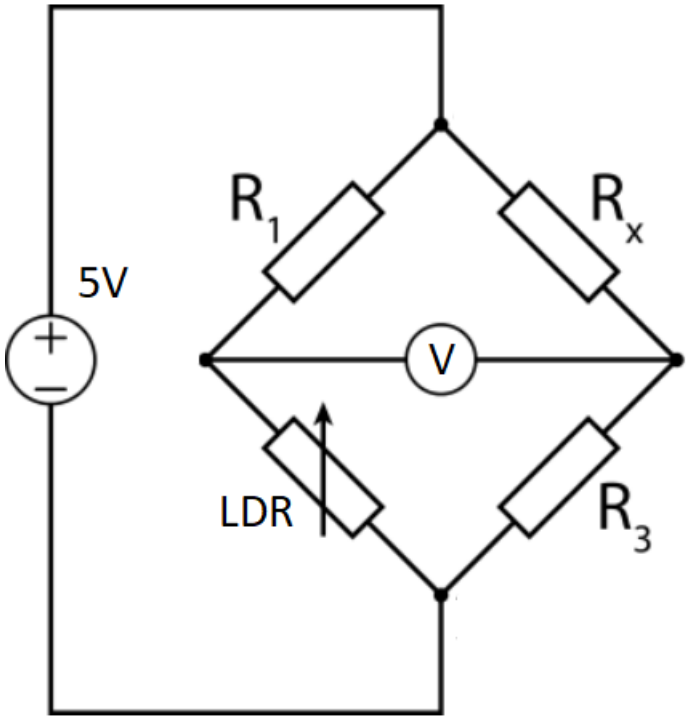
Figura 50 - Estabilização do laser



Fonte: Elaboração própria.

Constatou-se que a utilização de um LDR para a leitura da luminosidade refletida pela chapa de inox, utilizando um divisor de tensão e ligado à entrada analógica não ofereceu uma variação considerável da tensão lida, dificultando o ajuste do controlador PID devido sua baixa sensibilidade. Este problema pode ser resolvido utilizando uma Ponte de Wheatstone (Figura 51) que amplificara a variação de tensão percebida pela entrada analógica do Arduino.

Figura 51 - Ponte de Wheatstone



Fonte: Adaptado de wikiwand

Outra solução possível para o sistema óptico seria substituir o laser por um LED de alto brilho e o LDR por um fotodiodo, lembrando da necessidade de verificar o nível de variação deste sistema a condensação sobre o elemento refletivo.

Estas alterações devem diminuir o erro sistemático do sensor, como solução para diminuir a incerteza das medições recomenda-se a utilização de sensores de temperatura PT100 com incerteza de 0,1°C tanto para a temperatura do gás quanto para a temperatura de ponto de orvalho, que possuam certificado de calibração.

Para a calibração da câmara recomenda-se a utilização de um sensor de umidade relativa que possua certificado de calibração e incerteza menor que 2% U.R.

Para trabalhos futuros sugere-se o desenvolvimento de uma interface gráfica utilizando o software Labview, a implementação se um sistema que permita a alteração do nível de umidade da câmara insuflando ar úmido ou seco para o interior da câmara e um dispositivo que possibilite o acoplamento de diferentes sensores de umidade relativa que serão calibrados.

REFERENCIAS

ADDA Corp., Disponivel em:<http://www.adda.com.tw/fan.php?pro1=DC-Fan&pro2=80x80x25&pro3=&pro4=&pro5=&x=39&y=10&act=cat_search>. Acesso em: 22 de junho de 2018

ARDUINO,**Arduino Uno Rev3.** Disponível em: <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>. Acesso em: 24 de junho de 2018.

AYOADE, J. O. **Introdução a climatologia para os trópicos**. 4 ed. Rio de Janeiro: Bertand Brasil, 1996. 332 p.

BOJORGE, Ninoska. **Dinâmica e modelagem de processos**. 8 de setembro de 2009. 22 p. notas de aula PPT.

DUFFY, David C; MCDONALD, J. Cooper; SCHUELLER, Oliver J.; WHITESIDES, George M., **Rapid Prototyping of Microfluidic Systems in Poly (dimethylsiloxane). Massachusetts:** Havard, 1998.

ECIL. **Tabela de Correlação para Termorresistência** - Tabelas de Correlação | Pirometria - Ecil Temperatura Industrial. Disponível em: <http://www.ecil.com.br/temperatura-industrial/tabelas-de-correlacao/tabela-de-correlacao-para-termorresistencia-pt-100/>. Acesso em: 22 de junho de 2018.

FRADEN, Jacob. **Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications**. 3 ed. San Diego, California: Springer, 2003. 598 p.

JUNIOR, Juvenil Severino da Costa. **Sensor de umidade microeletrônico fabricado em substrato de alumina e baseado na detecção do ponto de**

MARGARIDO, Gustavo Neves. **Avaliação de medição da umidade relativa do ar pelo método do ponto de orvalho usando materiais acessíveis e sistema de controle convencional**. 2014. 128 f. Dissertação (Mestrado em Automação e Controle de Processos) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, São Paulo.

MARTINELLI, Luiz Carlos. **Refrigeração e ar condicionado**: Psicrometria. Pato Branco: UTFPR, 2010. 45 p.

"Medidor de Umidade de Materiais - AK840". Akso Loja Virtual. Disponível em: <https://loja.akso.com.br/produto/detalhe/458/medidor-de-umidade-de-materiais-ak840>. Acesso 21/06/2018.

Orvalho. 2011. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas.

PARISH, O. Owen; PUTNAM,Terrill W. **Equations for the determination of humidity from dewpoint and psychrometric data**.Washington: NASA, 1977. 25 p.

Ponte de Wheatstone - Wikiwand. Disponível em: <http://www.wikiwand.com/pt/Ponte_de_Wheatstone> Acesso em 21/06/2018.

POTTER, Merle C; SCOTT, Elaine P. **Ciências térmicas: termodinâmica, mecânica dos fluidos e transmissão de calor.** São Paulo: Thomson Learning, 2007, 772 p.

Psicrômetro de aspiração PCE-APA 1. Disponível em: <http://www.pce-medidores.com.pt/fichas-dados/psicrometro-aspiracao-pce-apa-1.htm>. Acesso em 21/06/2018.

SCHNEIDER, Paulo Smith. **Termometria e psicrometria**. Porto Alegre: UFGRS, 2000. 36 p.

SILVA, Juarez de Sousa; LOPES, Roberto Precci; LOPES, Daniela de Carvalho; REZENDE, Ricardo Caetano. **Princípios básicos da psicrometria**, Secagem e armazenagem de produtos agrícolas. 2ed.Viçosa-MG: Aprenda Fácil, 2008.

“Umidade relativa: o que é e como se determina? ” Pergunte ao CREF.

disponível em:<https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta=umidade-relativa-o-que-e-e-como-se-determina>. Acesso 21/06/2018.

VASCONCELOS, José Antônio Maciel. **Projeto de um sistema de refrigeração de Ambientes utilizando pastilhas peltier**. São Paulo: Pontifícia Universidade Católica Do Rio Grande Do Sul Faculdade De Engenharia, 2017. 68 p.

VICKERS, J. A.; CAULUM, M. M.; HENREY, C. S. **Generation of hydrophilic poly(dimethylsiloxane) for high-performance microchip electrophoresis.**Colorado: Colorado State University 2006.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guide to meteorological instruments and methods of observation**. Genebra, 2008.

APÊNDICE A – PROGRAMAÇÃO DO MICROCONTROLADOR

```
#include <PID_v1.h>
#include <DHT.h>
#include <DHT_U.h>

#define DHTPIN 2
#define DHTTYPE DHT22

#include <Adafruit_MAX31865.h>
Adafruit_MAX31865 max = Adafruit_MAX31865(10, 11, 12, 13);
#define RREF      430.0
#define RNOMINAL  100.0

//variaveis que definen entradas e saidas do sistema de controle.
double Setpoint, Input, Output;
// variaveis para definição dos ganhos do sistema de controle.
double KP=10, KI=0, KD=0;
//variaveis para temperatura.
float TEMPESP, TEMPAMB;
// variaves para calculo da umidade.
float var1, var2, var3,var4, UMI;
//variaveis para correção dos sensores de temperatura.
float correcaopt100=.5, correcaotdh=0.6;

unsigned long TIME;
// variavel para sinalizar loop ativo.
int flag;
//variavel pra inicio do ciclo de medição.
int botao;
```

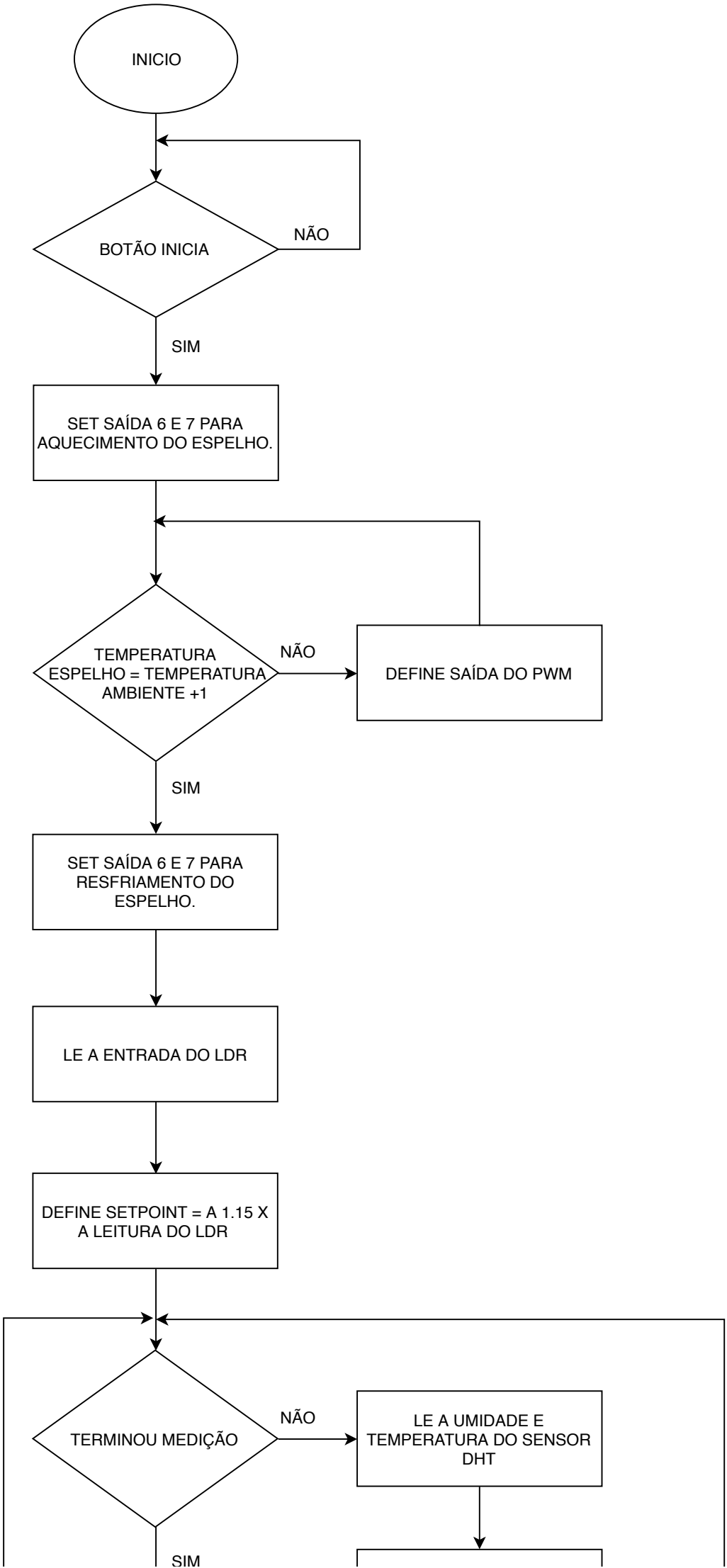
```
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint,KP,KI,KD,DIRECT);
DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

void setup(){

  // define velocidade da comunicação serial.
  Serial.begin(115200);

  max.begin(MAX31865_4WIRE);
  // define pino 3  como entrada e liga pull up.
  pinMode(3, INPUT);
  digitalWrite(3,HIGH);
  //defini pinos 6 e 7 como saida.
  pinMode(6, OUTPUT);
  pinMode(7, OUTPUT);

  flag=0;
  myPID.SetMode(AUTOMATIC);
  dht.begin();
  // imprime cabeçalho no banco de dados.
  Serial.println("LABEL,HORA,Tempo,Setpoint,Input,Output,Temperatura do espelho,Tempetarura ambiente,Umidade Ref,Umidade Calculada ");
}

void loop(){

  Input = analogRead(0);
  botao = Serial.read();
  uint16_t rtd = max.readRTD();
  // verifica comando de inicio de medição.
```

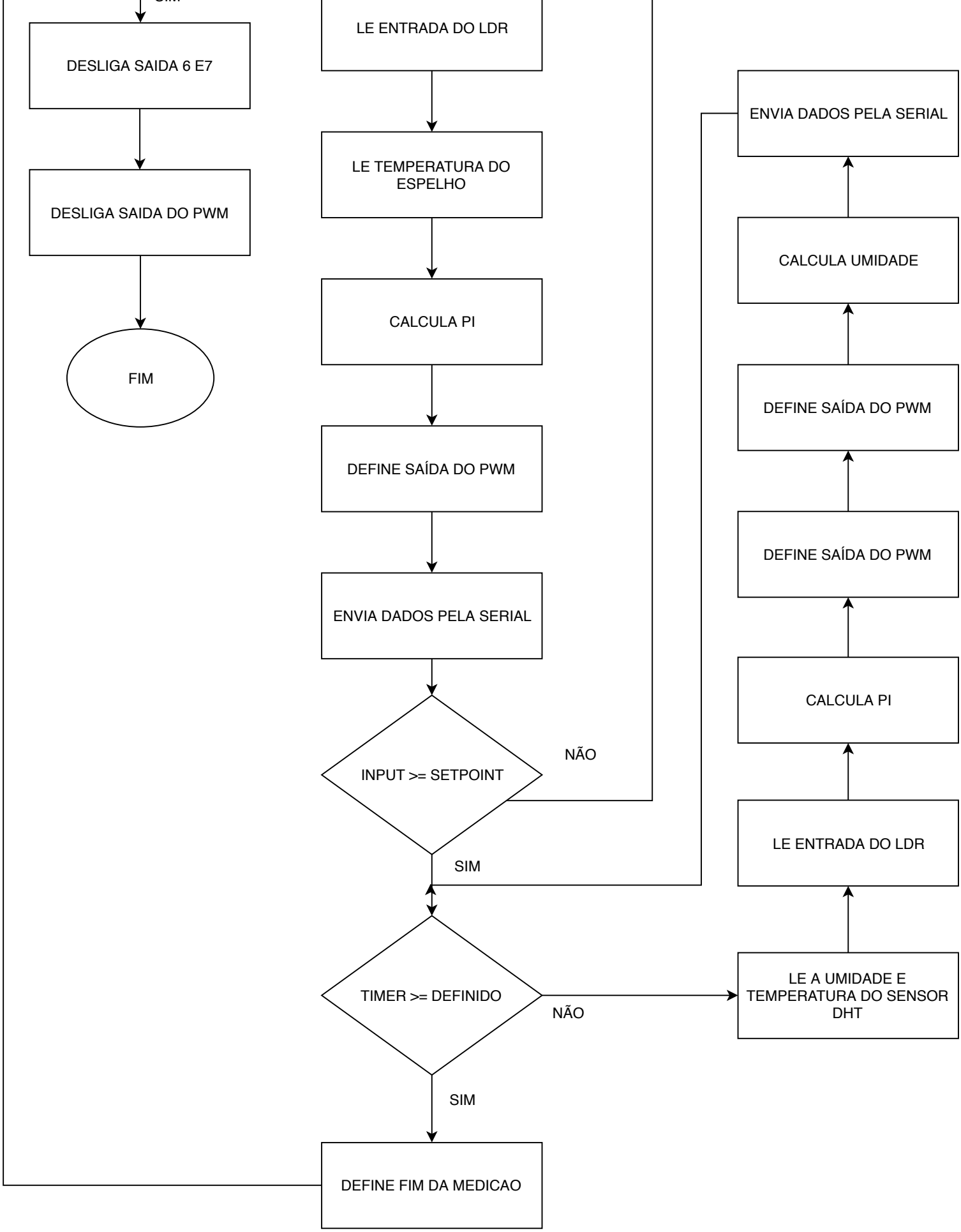
```
if(botao=='1'||digitalRead(3)==1){
  //define saidas para pré aquecimento
  //Serial.println("AQUECENDO");
  digitalWrite(6,HIGH);
  digitalWrite(7,LOW);
  analogWrite(5,255);
  float t = (dht.readTemperature()-correcaotdh);
  uint16_t rtd = max.readRTD();
  TEMPESP = (max.temperature(RNOMINAL, RREF)-correcaopt100);
  // verifica se o espelho atingio a temperatura desejada.
  if (TEMPESP >= t){
    // define saidas para resfriamento.
    //Serial.println("ENTROU");
    digitalWrite(6,LOW);
    digitalWrite(7,HIGH);
    delay(200);
    // define valor de setpoint.
    Input = analogRead(0);
    Setpoint=1.15*Input;
    uint16_t rtd = max.readRTD();
    unsigned long currentMillis=millis();

    while(flag==0){

      float h = dht.readHumidity();
      float t = (dht.readTemperature()-correcaotdh);
      uint16_t rtd = max.readRTD();
      Input = analogRead(0);
      TEMPESP = (max.temperature(RNOMINAL, RREF)-correcaopt100);
      TEMPAMB= t;
```

```
myPID.Compute();
analogWrite(5,Output);
TIME = millis()-currentMillis;

//verifica se atingio o valor de setpoint
if(Input >= Setpoint){
  unsigned long currentMillis=millis();
  Serial.println("ESTABILIZOU");
  flag = 1;
  while(millis()-currentMillis < 200000){
    float h = dht.readHumidity();
    float t = (dht.readTemperature()-correcaotdh);
    uint16_t rtd = max.readRTD();
    Input = analogRead(0);
    TEMPESP = (max.temperature(RNOMINAL, RREF)-correcaopt100);
    TEMPAMB = t;
    myPID.Compute();
    analogWrite(5,Output);
    TIME = millis()-currentMillis;
    //calcula o valor da umidade.
    var1=pow((TEMPESP+273)/(TEMPAMB+273),-4.9283);
    var2=pow((TEMPESP+273),-1);
    var3=pow((TEMPAMB+273),-1);
    var4=pow(10,(-2937.4*(var2-var3)));
    UMI=var1*var4*100;
    //imprimi valores no banco de dados.
    Serial.println( (String) "DATA,TIME," +TIME+","+ Setpoint + "," + Input + "," + Output + "," +
TEMPESP + "," + TEMPAMB + "," + h + "," + UMI + "" );
    }
  // reseta valores para iniciar nova medição.
```

```
        botao=0;
        analogWrite(5,0);
        digitalWrite(6,LOW);
        digitalWrite(7,LOW);
      }
    }
  }
 }
 float t = (dht.readTemperature()-correcaotdh);
 TEMPESP = (max.temperature(RNOMINAL, RREF)-correcaopt100);
 float h = dht.readHumidity();
 flag = 0;
}
```

APÊNDICE B – FLUXOGRAMA.


INICIO
BOTÃO INICIA
NÃO
SIM
SET SAÍDA 6 E 7 PARA AQUECIMENTO DO ESPELHO.
TEMPERATURA ESPELHO = TEMPERATURA AMBIENTE +1
NÃO
DEFINE SAÍDA DO PWM
SIM
SET SAÍDA 6 E 7 PARA RESFRIAMENTO DO ESPELHO.
LE A ENTRADA DO LDR
DEFINE SETPOINT = A 1.15 X A LEITURA DO LDR
TERMINOU MEDIÇÃO
NÃO
LE A UMIDADE E TEMPERATURA DO SENSOR DHT
SIM


SIM
DESLIGA SAIDA 6 E7
DESLIGA SAIDA DO PWM
FIM
LE ENTRADA DO LDR
LE TEMPERATURA DO ESPELHO
CALCULA PI
DEFINE SAÍDA DO PWM
ENVIA DADOS PELA SERIAL
INPUT >= SETPOINT
NÃO
SIM
TIMER >= DEFINIDO
NÃO
SIM
DEFINE FIM DA MEDICAO
ENVIA DADOS PELA SERIAL
CALCULA UMIDADE
DEFINE SAÍDA DO PWM
DEFINE SAÍDA DO PWM
CALCULA PI
LE ENTRADA DO LDR
LE A UMIDADE E TEMPERATURA DO SENSOR DHT

APÊNDICE C – MEMORIAL DE CALCULOS MATHCAD

UMIDADE RELATIVA

DADOS DE ENTRADA:

$Ta := 22.52$ $uTa := 0.5$ $Te := 12.28$ $uTe := 0.1$

MODELO MATEMÁTICO:

$$UR := \left[\left[\frac{(Te + 273)}{(Ta + 273)}\right]^{-4.9283} \cdot 10^{-2937.4\cdot\left[(Te+273)^{-1}-(Ta+273)^{-1}\right]}\right]\cdot 100$$

DERIVADAS PARCIAIS:

$$dTe := \frac{d}{dTe}\left[\left[\left[\frac{(Te + 273)}{(Ta + 273)}\right]^{-4.9283} \cdot 10^{-2937.4\cdot\left[(Te+273)^{-1}-(Ta+273)^{-1}\right]}\right]\cdot 100\right]$$

$$dTa := \frac{d}{dTa}\left[\left[\left[\frac{(Te + 273)}{(Ta + 273)}\right]^{-4.9283} \cdot 10^{-2937.4\cdot\left[(Te+273)^{-1}-(Ta+273)^{-1}\right]}\right]\cdot 100\right]$$

$dTa = -3.18$

$dTe = 3.445$

CALCULO DO RESULTADO:

$$U := \sqrt{dTa^2\cdot uTa^2 + dTe^2\cdot uTe^2}$$

$UR = 52.323$ $U = 1.627$

ANEXO A – RECOMENDAÇÕES PARA DESENVOLVIMENTO E UTILIZAÇÃO DE UM HIGRÔMETRO DE PONTO DE ORVALHO.

Os requisitos gerais para a exposição de sensores de umidade são semelhantes aos de sensores de temperatura, sendo que os principais requisitos incluem:

a) proteção contra radiações solares diretas, contaminantes atmosféricos, chuva e vento;

b) evitar a criação de um microclima local dentro da estrutura de alojamento do sensor, madeira e materiais sintéticos podem absorver ou liberar vapor d'água de acordo com a umidade atmosférica.

Os erros na medição da umidade podem ser causados por:

a) Modificação da amostra de ar, por exemplo, por calor ou fonte de vapor d'água;

b) Contaminação do sensor, por exemplo, por sujeira;

c) Erro de calibração, incluindo correção de pressão, coeficiente de temperatura do sensor, e interface elétrica;

d) Tratamento inadequado da fase água / gelo;

f) Operação incorreta, por exemplo, falha ao alcançar equilíbrio estável;

g) Uso inadequado de amostragem e/ou intervalos de media.

Os seguintes procedimentos de manutenção devem ser considerados:

a) Limpeza: Sensores e caixas devem ser mantidos limpos. Por exemplo, higrômetros de cabelo e de espelho resfriado, devem ser limpos com água destilada regularmente. Já os que possuem algum tipo de eletrólito revestimento, ou com substrato polímero, não podem, em hipótese alguma, ser tratados desta maneira. O fornecimento de instruções para operadores e equipe de manutenção é vital;

b) Verificação e calibração de instrumentos de campo.

Como o higrômetro de espelho resfriado está sujeito a influencias que podem afetar seu desempenho, deve-se realizar comparações regulares com um instrumento de referência, como um psicrômetro de Assmann ou outro higrômetro de espelho resfriado.

Um instrumento usado continuamente em campo deve ser objeto de medições de verificação semanal. Quando possível, sua operação nos os pontos de orvalho e geada devem ser verificados. Quando a temperatura do espelho é inferior a 0 ° C, deve-se inspecionar visualmente, se for possível, se há deposito de água super-arrefecida ou gelo. Uma verificação útil é comparar a temperatura do espelho com a temperatura do ar enquanto o sistema de controle térmico do higrômetro está inativo.

Um sistema eletro-óptico é normalmente empregado para detectar a formação de condensação e fornecer a entrada para o sistema de controle regular a temperatura do espelho. Um feixe estreito de a luz é direcionado para o espelho em um ângulo de incidência de cerca de 55 °. Em sistemas simples, a intensidade da luz refletida é detectada por um fotodetector que regula o arrefecimento e aquecimento utilizando um controlador. A refletividade da superfície diminui conforme a espessura de depósito aumenta, o arrefecimento deve cessar enquanto o depósito está fino, com uma redução refletância na faixa de 5 a 40 por cento.

Sistemas mais elaborados usam um fotodetector auxiliar que detecta a luz espalhada pelo depósito, sistemas com dois detectores são capazes de um controle de temperatura mais preciso. Um segundo espelho, não resfriado, pode ser usado para melhorar o sistema de controle. A maior precisão é obtida quando a temperatura do espelho não permite que o condensado se acumule nem se dissipe. É fundamental que o tempo de resposta do espelho ao aquecimento e arrefecimento fique em torno de 1 a 2 s. É possível determinar a temperatura em que a condensação ocorre com uma precisão de 0,05 K

ANEXO B – PELTIER DEW POINT HYGROMETER PATENTED 3 DE DEZEMBRO DE 1963

Dec. 3, 1963 G. A. DULK ETAL 3,112,648

PELTIER DEW POINT HYGROMETER

Filed Dec. 11, 1961 2 Sheets-Sheet 1

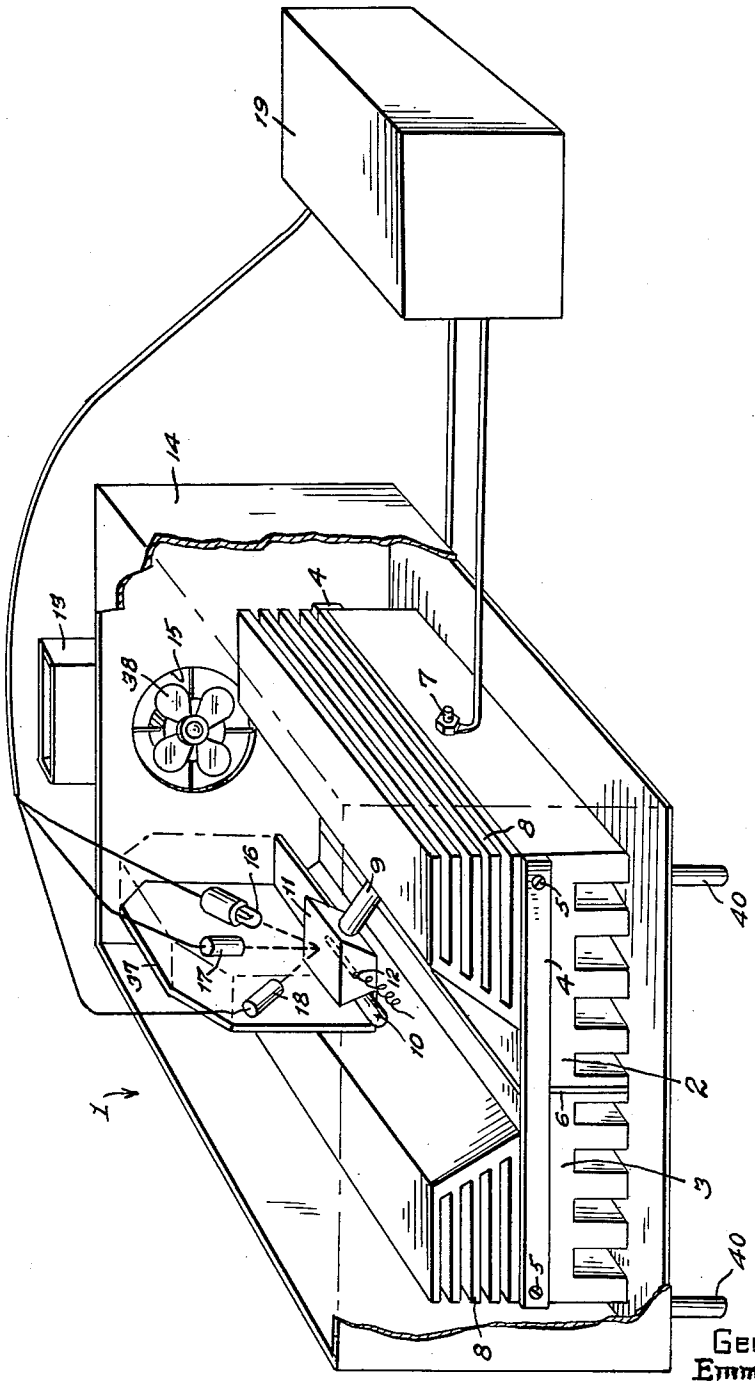


Fig. 1.

INVENTORS,
George A. Dulk
Emmett J. Pybus

By: S. J. Rotondi & A. J. Dupont

PELTIER DEW POINT HYGROMETER

Filed Dec. 11, 1961 2 Sheets-Sheet 2

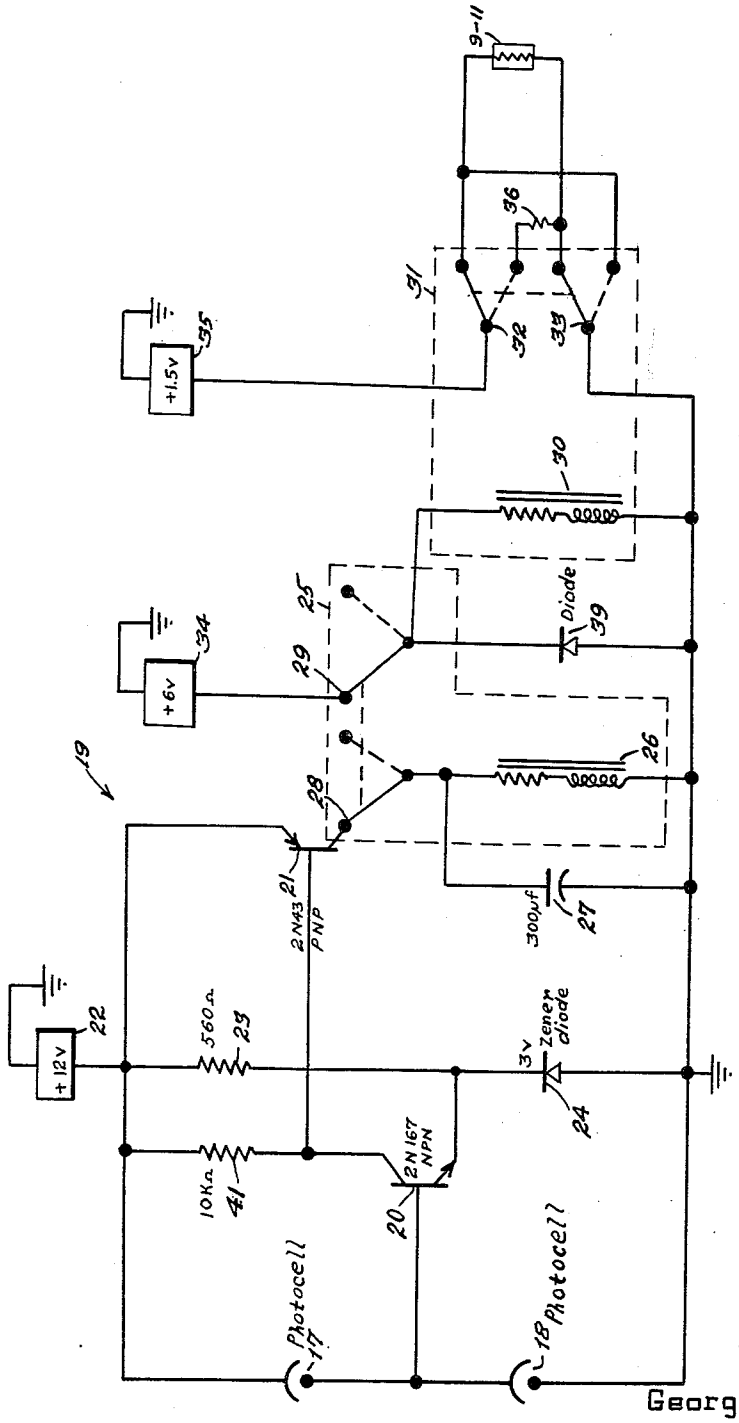


Fig. 2.

INVENTORS,
George A. Dulk
Emmett J. Fybus
By: S. J. Rotondi & A. J. Dupont

United States Patent Office

3,112,648

Patented Dec. 3, 1963

1

3,112,648
PELTIER DEW POINT HYGROMETER

George A. Dulk, Joppa, and Emmett J. Pybus, Havre de Grace, Md., assignors to the United States of America as represented by the Secretary of the Army

Filed Dec. 11, 1961, Ser. No. 158,617
1 Claim. (Cl. 73—336.5)
(Granted under Title 35, U.S. Code (1952), sec. 266)

The invention described herein may be manufactured and used by or for the Government for governmental purposes without the payment to us of any royalty thereon.

This invention relates in general to dew point hygrometers, and more particularly to a dew point hygrometer utilizing Peltier thermoelectric cooling.

Dew point hygrometers are widely used for determining and recording the dew point temperature of the air at some location where the information is required, such as a station of the Weather Bureau, for example, or as part of an instrument sent into the air on a ballon or rocket. Such a hygrometer, to be acceptable, must be inexpensive to construct and adapted to operate over extended periods of time in inaccessible places such as weather ballons, automatic weather stations, or the like. In addition, such hygrometers must be adapted to provide stable operation even when subject to adverse conditions.

It is, therefore, an object of this invention to provide a Peltier dew point hygrometer which is inexpensive to construct and which is adapted to operate over extended periods of time in inaccessible places.

Another object of the present invention is to provide a hygrometer with improved speed response.

Still another object of this invention is to provide a durable hygrometer having a high degree of accuracy.

A further object of this invention is to provide a hygrometer which is readily regulative.

The foregoing and other features of the invention will be described more fully hereinafter, reference being made to the accompanying drawings, in which:

FIGURE 1 is a perspective view of the Peltier hygrometer and control system; and

FIGURE 2 is a circuit diagram of the electrical control system used to control the hygrometer.

The Peltier effect, one of the thermoelectric effects, is the cooling of the junction between two dissimilar materials when a current is passed through it. Heating of the junction is obtained by reversing the directing of current flow. The basic equation describing the phenomenon is

$$\dot{Q}=jST_0-\frac{1}{2}\rho j^2-K\frac{dt}{dl}$$

where:

$\dot{Q}$ is the rate of heat absorbed at the junction from the environment

j is the current density at the junction

S is the Seebeck coefficient for the material

T_0 is the temperature of the junction in degrees Kelvin

ρ is the resistivity of the material

K is the heat conductivity of the material

$\frac{dt}{dl}$ is the temperature gradient across the length of material at a junction.

The above equation applies at the junction of the material elements (legs) comprising the junction.

The maximum change in temperature obtainable, ΔT_{max}, can be approximated

$$\Delta T_{max}=\frac{1}{2}ZT_0^2,\ Z=\frac{S^2}{\rho K}$$

where Z is the figure of merit and ρ equals the resistivity of the semiconductor material.

2

Referring now to FIGURE 1, there is shown an embodiment of the present invention in which the numeral **1** represents generally a Peltier type thermoelectric junction and its enclosure. The thermoelectric junction consists of two copper blocks **2** and **3** secured together by non-conductive strips **4** and screws **5**. Located between the blocks **2** and **3** is an insulator strip **6** which serves to isolate the blocks electrically from each other. A terminal connection **7** is provided for each block. The copper blocks are preferably provided with fins **8** to give maximum area for heat dissipation.

A first and second piece of thermoelectric material **9** and **10** are electrically secured to the copper blocks **2** and **3**, respectively. These pieces of material are of different type material, i.e., of the p and n type. The opposite ends of the pieces of material are secured electrically to a polished metal block **11**. Also secured within block **11** is a resistance thermometer, or thermistor, or thermocouple **12** which may be located, for example, in an aperture as shown.

The blocks **2** and **3** are enclosed within a housing **14** and are secured to the inside of the housing by any suitable means (not shown). One end of the housing **14** has an opening **15** therein. Located within the opening is a fan **38** which is used to draw air across the fins in order to aid cooling. Fan **38** also draws air across the mirrored surface of block **11**. An exhaust vent **13** is provided for expelling the air. Stand off mounting means **40** are provided for mounting the housing **14**.

Secured to the top of the housing **14** is an observing means **37**. The observing means **37** is mounted over a slot in the top of the housing **14** so that the illumination from the light source **16** will strike the mirrored surface of the polished block **11**. Also mounted within observing means **37** are two photocells **17**, **18** which may be of the semiconductor type. The photocell **18** is so mounted that it will receive the direct reflection of source **16** from the mirror surface of block **11**. Photocell **17** is mounted directly over the mirrored surface so as to receive only indirect or diffused illumination from the source **16**.

Referring to the circuit diagram of FIGURE 2, there is shown generally the control circuit **19** for operating the thermoelectric junction. The control circuit **19** is made up of a two-stage amplifier system having an NPN transistor **20** and a PNP transistor **21** connected together as direct current amplifiers. Connected to the base of transistor **20** are the two photocells **17**, **18** (shown in FIG. 1) which are connected in series to form a voltage divider circuit. The collector of the transistor **20** is connected through a resistor **41** to a positive source of potential **22**. Connected between the potential source **22** and ground is a second voltage divider circuit consisting of a resistor **23** connected in series with a Zener diode **24**. The characteristics of the Zener diode are explained in the textbook "Vaccum-tube and Semiconductor Electronics," by Jacob Millman, McGraw-Hill Book Co., 1958, pages 116–119. The emitter of the transistor **20** is connected to the junction of the resistor and diode. The base of the second transistor **21** is connected directly to the collector of the transistor **20** while the emitter of transistor **21** is connected directly to the potential source **22**. The collector of the transistor **21** is connected through a relay **25** to ground. Located across the relay coil **26** is a capacitor **27** which serves to hold the relay open for a predetermined period of time upon each operation of the control circuit. The relay **25** is of the double pole double throw type having one contact **28** of the relay connected to the collector of the transistor **21** while the second contact **29** is connected to the coil of a second relay **31**. Connected in shunt with the coil **30** is a diode **39** which serves to discharge the coil **30** upon the termination of the operating

signal. The relay 31 is also of the double pole double throw type having first and second contacts 32, 33 ganged together for simultaneous operation.

In considering the operation of the circuit shown in FIGURE 2, assume that at the beginning of the operation cycle the resistance of photocell 18 is small with respect to the resistance of photocell 17 by virtue of its receiving a maximum of reflected light from source 16. Consequently the larger portion of the voltage drop between the potential source 22 and ground will occur across photocell 17. Thus the voltage appearing on the base of transistor 20 will be close to that of the grounded side of photocell 18. It should be noted that the emitter of transistor 20 is clamped at a positive value in reference to ground by the Zener diode 24 and resistor 23. Thus, with the base at substantially ground potential, the transistor 20 will be non-conductive since its emitter will be positive with respect to the base. With the transistor 20 in a non-conductive state, there will be no potential drop across the resistor 41. Therefore, the full potential of the source 22 will be applied to the base of transistor 21, thereby biasing the transistor into its non-conductive state. The current flow through coil 26 will be insufficient to operate the relay 25 with the transistor 21 in a non-conductive state. Hence the relay will remain in its normally closed position, as shown in FIGURE 2. In this closed position the contact 28 will remain connected to the collector of transistor 21 while the contact 29 will remain in contact with the power source 34. With the contact 29 connected to the source 34, the relay coil 30 of the relay 31 will be energized thereby connecting the contacts 32, 33 to the Peltier junction 9—11 so as to pass a large current through this junction for the start of the cooling cycle. With the current passing from the p type piece of the junction to the n type piece, a cooling of the mirrored surface of the metal block 11 takes place. When the cooling of the block 11 has progressed sufficiently far, a "dew spot" will begin to form on the mirrored surface. This dew spot will decrease the amount of light being reflected from the polished surface of metal block 11 onto the photocell 18 while at the same time the amount of indirect or diffused illumination striking the photocell 17 will increase. This change in illumination striking the photocells will cause a corresponding change in the conductivity of the cells with photocell 17 becoming more conductive while photocell 18 will become less conductive. As the dew spot becomes larger, there will be a corresponding change in the voltage appearing at the base of transistor 20.

With the photocell 17 in a low resistance state while photocell 18 is exhibiting high resistance, the majority of the voltage drop between the source 22 and ground will occur across the cell 18. Under these conditions the voltage on the base of the transistor 20 will be substantially that of the source 22 thereby placing the transistor in a conductive state. With the transistor 20 conducting, there will be a voltage drop across the resistor 23 which will be sufficient to place transistor 21 in a conductive state. As the current through transistor 21 increases, the relay coil 26 will be energized thereby opening the relay 25. The energy stored in the capacitor 27 allows the relay 25 to remain in the open position for a predetermined period of time sufficient to complete the heat cycle. With the relay 25 opened, the contact 29 will be disconnected from the source 34 causing the relay 31 to become de-energized. With the relay 31 de-energized, the contacts 32—33 will close thus causing a reverse current to flow through the Peltier junction 9—11. This reverse current flow will start the heating cycle of the system.

The added resistor 36 is placed in the Peltier junction circuit to reduce the current thru the junction and admit only the current necessary to remove the dew spot from the reflecting surface.

Having the two photocells 17 and 18 in the control circuit permits the operation of the system to be based on a ratio of the light intensities reflected and diffused rather than being directly dependent on light intensity. Thus any fluctuations of the light source 16 will not affect the operation of the Peltier dew point hygrometer.

The operation of the system produces a "temperature bracketing" of the dew point. The temperature is continuously monitored by the thermistor 12 thereby giving an accurate indication of the dew point at the hygrometer location at any given time.

While we have shown and described a single embodiment of our invention, it should be obvious that various modifications may be made without departing from the scope thereof. Hence, it is our intention to cover in the attached claim not only the particular circuit shown in the drawing, but also modifications which fall within the true scope of our invention as set forth in the appended claim.

What is claimed is:

In a dew point hygrometer having a Peltier junction, control means for the junction comprising a first and second photosensitive semiconductor connected in series between a power source and a reference potential, a first transistor having its base connected to the junction of the photosensitive semiconductors, a resistor connected between the collector of the first transistor and the power source, a voltage divider system connected to the emitter of the first transistor so as to bias the emitter positive in reference to the reference potential, a second transistor, means for connecting the base of the second transistor directly to the collector of the first transistor, means for connecting the emitter of the second transistor directly to the power source, a first relay means connected to the collector of the second transistor, a capacitor connected across the first relay means, a second relay means connected to and controlled by the first relay means, means connecting the output of the second relay to the Peltier junction so that the direction of current flow through the junction will be controlled by the control means.

References Cited in the file of this patent

UNITED STATES PATENTS

2,720,107	McBrair	Oct. 11, 1955
2,893,237	De Coriolis et al.	July 7, 1959
2,979,950	Leone	Apr. 18, 1961