

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CÉSAR BORELLI CANUTO
TIAGO RAMOS BIASOTTO

**MODELAGEM E CONTROLE DE UM SISTEMA TERMOELÉTRICO APLICADO
À CONSERVAÇÃO DE MEDICAMENTOS TERMOLÁBEIS**

CURITIBA

2018

CÉSAR BORELLI CANUTO
TIAGO RAMOS BIASOTTO

**MODELAGEM E CONTROLE DE UM SISTEMA TERMOELÉTRICO APLICADO
À CONSERVAÇÃO DE MEDICAMENTOS TERMOLÁBEIS**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica no curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Roman Kuiava

CURITIBA

2018

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a nossos pais e familiares por todo o apoio e compreensão durante esta jornada. A todos nossos amigos pela ajuda, motivação e companheirismo durante esta trajetória.

Agradecemos ao Professor Dr. James Alexandre Baraniuk pelas oportunidades oferecidas, como a participação no projeto *Luz Ciência e Emoção*, além de toda ajuda e orientação.

Também agradecemos ao Professor Dr. Roman Kuiava pela orientação neste trabalho, pela paciência e suporte durante este desafio.

RESUMO

Este trabalho consiste no desenvolvimento de um sistema termoelétrico que seja capaz de armazenar os medicamentos termolábeis na faixa de temperatura compreendida entre 2 °C e 8 °C. O sistema é constituído por um recipiente físico com um módulo termoelétrico acoplado, controlado por um controlador com a função de manter a temperatura na faixa adequada para a correta conservação dos medicamentos. Esse módulo é composto por uma pastilha Peltier acoplada entre dois dissipadores de calor com ventoinhas. O desenvolvimento deste trabalho é composto pela construção de um recipiente físico, desenvolvimento e construção de circuitos elétricos para aquisição dos valores de temperatura obtidos dos sensores e acionamento do Peltier mais ventoinhas. Por fim, é realizada a modelagem matemática do sistema composto pelo recipiente mais módulo termoelétrico e, em seguida, foi desenvolvido e implementado uma técnica de controle que mantém a temperatura interna do recipiente na faixa de temperatura adequada para a conservação dos medicamentos termolábeis.

Palavras-chaves: Sistema Termoelétrico. Peltier. Modelagem. Controle.

ABSTRACT

This work consists in the development of a thermoelectric system capable of storing thermolabile drugs in the temperature range of 2 °C to 8 °C. The system consists of a physical container with a coupled thermoelectric module, controlled by a controller in order to maintain the temperature in the range suitable for the correct conservation of the medicines. This module is composed of a Peltier pellet coupled between two heatsinks with fans. The development of this work consists on the construction of a physical container, development and construction of electrical circuits for the acquisition of the temperature values obtained from the sensors, and circuits to drive the Peltier module and fans. Finally, a mathematical modeling of the system composed of the container plus thermoelectric module is performed, and then a control technique was developed and implemented that maintains the internal temperature of the container in the temperature range suitable for the preservation of thermolabile drugs.

Key-words: Thermoelectric System. Peltier. Modeling. Control.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – DIAGRAMA DE BLOCOS DEMONSTRANDO A COMPOSIÇÃO DO TRABALHO.	13
FIGURA 2 – REDE DE RESISTÊNCIA TÉRMICA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR ATRAVÉS DE UMA PAREDE PLANA E A ANALOGIA ELÉTRICA.	16
FIGURA 3 – REDE DE RESISTÊNCIA TÉRMICA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR ATRAVÉS DE DUAS CAMADAS DE PAREDES PLANAS E A ANALOGIA ELÉTRICA.	17
FIGURA 4 – PAR TERMOELÉTRICO	18
FIGURA 5 – MODELO DE UMA PASTILHA PELTIER.	19
FIGURA 6 – AVALIAÇÃO DE PROCESSOS PERANTE SINAIS DE TESTE.	20
FIGURA 7 – MÉTODOS DE ZN E HAG PARA A MODELAGEM DE PROCESSOS DE PRIMEIRA ORDEM.	21
FIGURA 8 – MÉTODO DE SMITH PARA A MODELAGEM DE PROCESSOS DE PRIMEIRA ORDEM.	22
FIGURA 9 – SISTEMA DE CONTROLE COM REALIMENTAÇÃO.	24
FIGURA 10 – DIAGRAMA DE UM SISTEMA EM MALHA FECHADA COM AÇÃO DE CONTROLE PID.	25
FIGURA 11 – SINTONIA DE ZIEGLER-NICHOLS PARA SISTEMAS DE PRIMEIRA ORDEM.	25
FIGURA 12 – GERAÇÃO DO SINAL MODULADO A PARTIR DA PORTADORA.	28
FIGURA 13 – EXEMPLO DE SINAL PWM.	28
FIGURA 14 – MODELO DO ARDUINO MEGA.	29
FIGURA 15 – MODELO DE SAÍDA PWM UTILIZANDO A FUNÇÃO <i>ANALOGWRITE()</i>	30
FIGURA 16 – DIAGRAMA DA ARQUITETURA DO SENSOR DS18B20.	31
FIGURA 17 – MAPA DE MEMÓRIA DO SENSOR DS18B20.	31
FIGURA 18 – REGISTRADORES DE TEMPERATURA DO SENSOR DS18B20.	32
FIGURA 19 – SENSOR DE TEMPERATURA DS18B20.	32
FIGURA 20 – MODELO DO MÓDULO TERMOELÉTRICO COMPOSTO PELOS DISSIPADORES, VENTOINHAS E CÉLULA PELTIER	34
FIGURA 21 – DISSIPADOR E VENTOINHAS NA PARTE EXTERNA DO RECIPIENTE	35
FIGURA 22 – DISSIPADOR E VENTOINHAS NA PARTE INTERNA DO RECIPIENTE	35
FIGURA 23 – RECIPIENTE FÍSICO CONSTRUÍDO	36
FIGURA 24 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO CIRCUITO ACIONADOR DAS VENTOINHAS	37
FIGURA 25 – ESQUEMÁTICO DOS CIRCUITOS INTEGRADOS CD4050 E ULN2803	38
FIGURA 26 – ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO ACIONADOR DAS VENTOINHAS	38

FIGURA 27 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO CIRCUITO ACIONADOR DO PELTIER .	39
FIGURA 28 – ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO ACIONADOR DO PELTIER	39
FIGURA 29 – CIRCUITO CONFECCIONADO EM PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO	40
FIGURA 30 – MODELO DE PASTILHA PELTIER UTILIZADA	40
FIGURA 31 – MEDIDA 1: RESPOSTA AO DEGRAU UNITÁRIO COM 12 V E VEN- TOINHA INTERNA DESLIGADA	42
FIGURA 32 – MEDIDA 2: RESPOSTA AO DEGRAU UNITÁRIO COM 12 V E VEN- TOINHA INTERNA LIGADA EM 5 V	43
FIGURA 33 – COMPARAÇÃO ENTRA AS CURVAS DE TEMPERATURA INTERNA COM VENTONHA INTERNA LIGADA E DESLIGADA	44
FIGURA 34 – MEDIDA 3: RESPOSTA AO DEGRAU UNITÁRIO COM 12 V E VEN- TOINHA INTERNA LIGADA EM 5 V	45
FIGURA 35 – RETA TANGENTE AO PONTO DE INFLEXÃO NAS MEDIDAS 2 E 3 .	46
FIGURA 36 – COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS DE PRIMEIRA ORDEM NAS MEDIDAS 2 E 3	47
FIGURA 37 – RESPOSTA AO DEGRAU UNITÁRIO DO SISTEMA E RETA TAN- GENTE AO PONTO DE INFLEXÃO	48
FIGURA 38 – SIMULAÇÃO DOS CONTROLADORES OBTIDOS PELA SINTONIA ZIEGLER-NICHOLS	49
FIGURA 39 – SIMULAÇÃO DO CONTROLADOR PI AJUSTADO	49
FIGURA 40 – COMPARAÇÃO ENTRE CURVAS DE TEMPERATURA INTERNA REAL E SIMULADA PARA ENTRADA DEGRAU DE 0.5	51
FIGURA 41 – CURVA DE TEMPERATURA INTERNA REAL PARA CONTROLADOR PI	52
FIGURA 42 – COMPARAÇÃO ENTRE CURVAS DE TEMPERATURA INTERNA REAL E SIMULADA PARA CONTROLE PI	52
FIGURA 43 – SINAL DE SAÍDA PWM DO ARDUINO PARA CONTROLADOR PI . .	53
FIGURA 44 – TEMPERATURA INTERNA MEDIDA COM PERTURBAÇÕES	53

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Sintonia Ziegler-Nichols.	26
TABELA 2 – Características do Arduino Mega.	29
TABELA 3 – Tempos de conversão do sensor DS18B20.	31
TABELA 4 – Dimensões internas do recipiente.	33
TABELA 5 – Dimensões das faces internas do recipiente.	34
TABELA 6 – Parâmetros dos dissipadores utilizados.	35
TABELA 7 – Parâmetros das ventoinhas.	35
TABELA 8 – Condutividade térmica a 300 K.	36
TABELA 9 – Resistência térmica das faces do recipiente.	37
TABELA 10 – Características do transistor FQP30N06L.	39
TABELA 11 – Características da Pastilha Peltier utilizada.	41
TABELA 12 – Característica da Medida 1.	42
TABELA 13 – Caracaterística da Medida 2.	43
TABELA 14 – Comparação entre as medidas 1 e 2 com relação à temperatura interna.	43
TABELA 15 – Caracaterística da Medida 3.	44
TABELA 16 – Função de transferência de malha aberta para a medida 2.	46
TABELA 17 – Função de transferência de malha aberta para a medida 3.	47
TABELA 18 – Parâmetros obtidos pela sintonia Ziegler-Nichols.	48

LISTA DE ABREVIATURAS E DE SIGLAS

CI Circuito Integrado

D Derivativo

HAG Hägglund

I Integral

P Proporcional

ZN Ziegler-Nichols

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS	11
1.1.1 Objetivo geral	12
1.1.2 Objetivos específicos	12
1.2 JUSTIFICATIVA	12
1.3 DESCRIÇÃO DO TRABALHO	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1 CALOR	14
2.2 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	14
2.3 CONDUÇÃO DE CALOR PERMANENTE EM PAREDES PLANAS	15
2.3.1 Analogia com circuitos elétricos	15
2.4 EFEITO TERMOELÉTRICO	17
2.5 FUNCIONAMENTO DOS MÓDULOS TERMOELÉTRICOS	18
2.6 MODELAGEM DE PROCESSOS DE PRIMEIRA ORDEM	20
2.7 SISTEMAS DE CONTROLE COM REALIMENTAÇÃO	22
2.7.1 Ação Proporcional	22
2.7.2 Ação Proporcional-Integral	23
2.7.3 Controle PID	23
2.8 REGRAS DE SINTONIA DE ZIEGLER-NICHOLS PARA CONTROLADORES PID	25
2.9 IMPLEMENTAÇÃO DIGITAL	26
2.10 MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO PWM	27
2.11 CONTROLADOR E SENSOR	28
2.11.1 Arduino Mega	28
2.11.2 Sensor de temperatura DS18B20	30
3 DESENVOLVIMENTO	33
3.1 RECIPIENTE DE ARMAZENAMENTO E MÓDULO TERMOELÉTRICO	33
3.2 PERDAS CALORÍFICAS DO RECIPIENTE	36
3.3 CIRCUITOS ELETRÔNICOS	37
3.4 CARACTERÍSTICAS DA PASTILHA PELTIER	40
3.5 MODELAGEM DO SISTEMA	41
3.6 SINTONIA DO CONTROLADOR	48
3.7 IMPLEMENTAÇÃO NO CONTROLADOR	50
4 RESULTADOS	51

5 CONCLUSÃO	55
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
APÊNDICES	58
APÊNDICE A CIRCUITOS ESQUEMÁTICOS ELABORADOS NO SOFTWARE EAGLE	59
APÊNDICE B CÓDIGO DO CONTROLADOR NO ARDUINO	60
ANEXOS	65
ANEXO A PARÂMETROS DO PELTIER	66

1 INTRODUÇÃO

A temperatura de armazenamento e o transporte são os fatores mais influentes na qualidade dos medicamentos na cadeia de suprimentos, sendo esses fatores responsáveis por alterações e deteriorações dos produtos quando não controlados (GODOY, 2012).

A estabilidade de um medicamento é a extensão em que ele mantém as mesmas propriedades que possuía quando fabricado, ou seja, é a propriedade de um produto em preservar suas características físicas, químicas e farmacológicas durante o seu período de validade. Os principais fatores ambientais controláveis que interferem na estabilidade de um medicamento, levando à diminuição da vida útil ou a sua deterioração, são a temperatura, a luminosidade e a umidade. Sendo que a umidade e temperatura são fatores que mais favorecem na alteração das características dos medicamentos, em que temperaturas elevadas facilitam a propagação de fungos e bactérias e também a aceleração de reações químicas que podem degradar o medicamento. Todavia, uma temperatura reduzida ou o congelamento, pode levar a alterações na solubilidade do fármaco (CRF-PR, 2014).

Medicamentos como a insulina e algumas vacinas, fazem parte dos medicamentos termolábeis, ou seja, de acordo com CRF-PR (2014) "são chamados termolábeis os medicamentos que são sensíveis à ação da temperatura e que por isso requerem uma temperatura de armazenamento na faixa entre 2°C e 8°C ". Para se chegar a essa temperatura é necessário o uso de refrigeradores apropriados, não sendo permitido o uso de frigobar, pois o congelador desses aparelhos não possuem gelo na quantidade necessária e não possuem espaço físico suficiente para o uso de bobinas de gelo, tendo riscos de elevação de temperatura no caso de defeito do aparelho ou queda de energia. Além disso, a espessura do isolamento térmico das paredes desse aparelho facilita a troca de calor com o meio externo (MS, 2001).

Quando exposto por um breve período a condições de temperatura desapropriadas os medicamentos termolábeis podem sofrer alterações irreversíveis levando a perda de eficácia (HPRA, 2011). Dessa forma é necessário oferecer as condições adequadas de transporte a estes produtos durante toda cadeia de frio. Onde, cadeia de frio é uma série de operações responsáveis por manter a temperatura de medicamentos termolábeis entre 2°C e 8°C durante os processos de distribuição e transporte (ENCINA, 2012).

1.1 OBJETIVOS

Tendo em vista os problemas na armazenagem dos medicamentos termolábeis, este trabalho busca apresentar uma alternativa para o armazenamento e o transporte desses fármacos, mantendo a temperatura na faixa adequada. Com isso, serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver um sistema termoelétrico capaz de manter a temperatura na faixa de 2 °C a 8 °C através da utilização de um método de controle aplicado em uma célula Peltier por um controlador.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- a) construção de um recipiente físico composto por uma célula Peltier acoplada entre dois dissipadores de calor com ventilação por ventoinhas;
- b) desenvolvimento e construção de circuitos para acionamento da célula Peltier, ventoinhas e aquisição de dados pelos sensores;
- c) modelagem matemática do funcionamento da célula Peltier e temperatura interna do recipiente;
- d) modelagem e implementação em um controlador de uma técnica de controle para manter a temperatura do recipiente entre 2 °C a 8 °C, sendo 5 °C a temperatura de referência.

1.2 JUSTIFICATIVA

Na refrigeração convencional é indispensável o uso de componentes para completar o ciclo da troca de calor. Tais componentes são: evaporador, compressor, condensador, dispositivo de expansão e também o fluido refrigerante, que "é a substância que circulando dentro de um circuito fechado, é capaz de retirar calor de um meio enquanto se vaporiza a baixa pressão"([SILVA, 2003](#)).

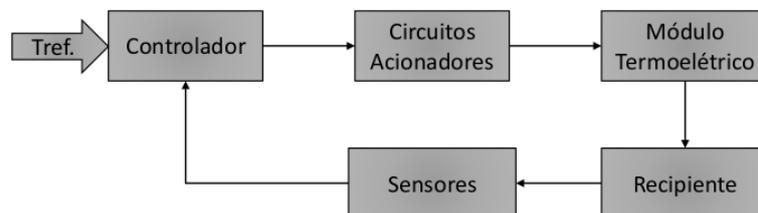
Com o desenvolvimento da tecnologia de compressores e evaporadores de gás, foi possível produzir sistemas refrigeradores com elevada eficiência térmica e razoavelmente baixo consumo de energia. Temperaturas baixas, da ordem de poucos graus Celsius possuem ampla aplicação industrial, comercial e residencial. A tecnologia de compressor dificulta ou impossibilita a construção de minicâmaras térmicas, deste modo, o uso da pastilha termoelétrica Peltier é uma opção vantajosa em refrigeradores menores ([NOLAS; SHARP; GOLDSMID, 2006](#)).

As pastilhas termoelétricas Peltier são compactas e leves, e utilizando potências relativamente baixas produzem um diferencial de temperatura dependente diretamente da temperatura do ambiente. Também não produzem vibrações, não utilizam fluido refrigerante e podem ser alimentadas por baterias ou fontes chaveadas, permitindo maior portabilidade se comparadas a refrigeradores que utilizam sistemas de compressores. Além disso, busca-se neste trabalho a utilização de conhecimentos adquiridos durante o curso, onde é realizada uma aplicação prática da modelagem e controle de um sistema físico para o desenvolvimento de uma solução prática, uma das funções da engenharia.

1.3 DESCRIÇÃO DO TRABALHO

A partir dos objetivos, pode-se verificar que o trabalho é composto por 4 etapas: construção do recipiente em conjunto com um módulo termoelétrico, desenvolvimento e construção de circuitos para acionamento das ventoinhas, pastilha Peltier e aquisição dos dados fornecidos pelos sensores de temperatura, modelagem do sistema e implementação de uma técnica de controle em um controlador. Ao final da conclusão de todas as etapas, o sistema completo é capaz de manter a temperatura na faixa adequada para os medicamentos termolábeis. Um diagrama em blocos ilustrado na figura 1 demonstra a composição do trabalho após a conclusão de todas as etapas.

FIGURA 1 – DIAGRAMA DE BLOCOS DEMONSTRANDO A COMPOSIÇÃO DO TRABALHO.



Fonte: os autores (2018).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo serão apresentados os conceitos e equações relevantes para o desenvolvimento do trabalho.

2.1 CALOR

Calor é a transferência de energia em razão de uma diferença de temperatura. Quando um corpo mais quente está em contato térmico com um corpo mais frio, a energia transferida do corpo mais quente para o mais frio, em razão da diferença de temperatura, é denominada calor (TIPLER; MOSCA, 2009). A quantidade de calor necessária para aumentar a temperatura de uma amostra é dada por 1.

$$Q = C\Delta T = mc\Delta T \quad (1)$$

Onde:

Q -quantidade de calor-[J];

m -massa-[Kg];

C -capacidade térmica-[J/K];

c -calor específico-[$\frac{J}{KgK}$];

ΔT -diferença de temperatura-[K].

2.2 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de energia, como o calor, ocorre do corpo de maior temperatura para o de menor. As formas de transferência de calor são: condução, convecção e radiação. A condução de calor é a transferência de energia das partículas mais energéticas de uma substância para partículas vizinhas adjacentes menos energéticas, como resultado da interação entre elas. Já a convecção trata da transferência de calor entre a superfície sólida e a líquida ou gás adjacente e envolve os efeitos combinados de condução e movimento do fluido. Por fim, a radiação é a energia emitida pela matéria sob a forma de ondas eletromagnéticas e esse método de transferência de energia não exige a presença de um meio interveniente (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

A condução é descrita pela lei de Fourier para condução térmica e é modelada pela equação 2. A convecção é expressa pela lei de resfriamento de Newton, e pode ser verificada na equação 3 (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

Onde:

\dot{Q} -taxa de condução de calor-[W];

k -condutividade térmica do material-[$\frac{W}{K}$];

A -área de transferência de calor- $[m^2]$;
 dT -variação da temperatura- $[\frac{kJ}{kgK}]$;
 dx -espessura do material- $[m]$.

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = hA_s[T_s - T_\infty] \quad (3)$$

Onde:

\dot{Q} -taxa de transferência de calor por convecção- $[W]$;

h -coeficiente de convecção- $[\frac{W}{m^2K}]$;

A_s -área da superfície- $[m^2]$;

T_s -temperatura da superfície- $[K]$;

T_∞ -temperatura do fluido- $[K]$.

2.3 CONDUÇÃO DE CALOR PERMANENTE EM PAREDES PLANAS

Considerando uma parede plana de espessura L e condutividade térmica média k , as duas superfícies da parede são mantidas a temperaturas constantes T_1 e T_2 , desse modo teremos a condução de calor entre as faces da parede expressa de acordo com a equação 2 (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

Reorganizando a equação 2, para a parede plana, fazendo dx ser a espessura da parede, chega-se à equação 4.

$$\dot{Q}_{\text{cond,parede}} = \frac{T_1 - T_2}{R_{\text{parede}}} \quad (4)$$

Onde:

T_1 -temperatura da face quente- $[K]$;

T_2 -temperatura da face fria- $[K]$;

R_{parede} -resistência térmica- $[\frac{K}{W}]$.

A resistência térmica da parede é definida como:

$$R_{\text{parede}} = \frac{L}{kA} \quad (5)$$

Onde:

L -espessura da parede- $[m]$;

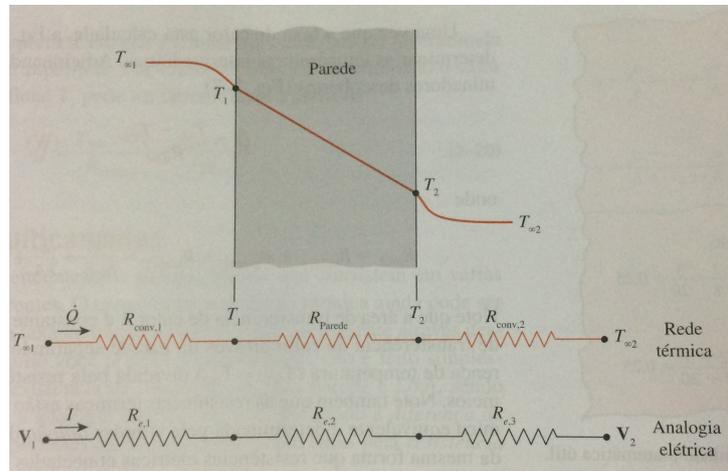
A -área das faces- $[m^2]$.

2.3.1 Analogia com circuitos elétricos

Na transferência de calor unidimensional entre paredes planas, pode-se fazer uma analogia com circuitos elétricos em que a diferença de temperatura entre as faces é análoga a uma diferença de potencial em um circuito, a taxa de transferência de calor tem analogia com a corrente e a resistência oriunda de um resistor se relaciona com a resistência térmica (ÇENGEL;

GHAJAR, 2012). Na figura 2, pode-se verificar essa analogia nas faces de uma parede plana submetida à convecção nas suas faces e condução de calor entre uma face e outra.

FIGURA 2 – REDE DE RESISTÊNCIA TÉRMICA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR ATRAVÉS DE UMA PAREDE PLANA E A ANALOGIA ELÉTRICA.



Fonte: adaptado de (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

A analogia com circuitos elétricos facilita o equacionamento na transferência de calor quando há mais do que uma face envolvida (modelagem por resistências em série), ou quando na mesma face há a presença de materiais diferentes (modelagem por resistências em paralelo), tal como em uma janela em que há vidro e alumínio, por exemplo. Na figura 3, pode-se verificar um exemplo de duas camadas de paredes planas, submetidas à convecção de ambos os lados, nesse caso, há a analogia com um circuito em série.

Em um sistema análogo a um circuito série, a taxa de transferência de calor entre as faces das paredes é calculada de acordo com a equação 4, em que a resistência térmica é a soma das resistências de todas as paredes. No caso de um sistema análogo a um circuito paralelo, a resistência térmica total é calculada como sendo o inverso da soma das resistências. Além da condução, as faces externas de uma parede podem estar submetidas à convecção, nesse caso a equação da resistência térmica para a convecção segue o descrito em 6 (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

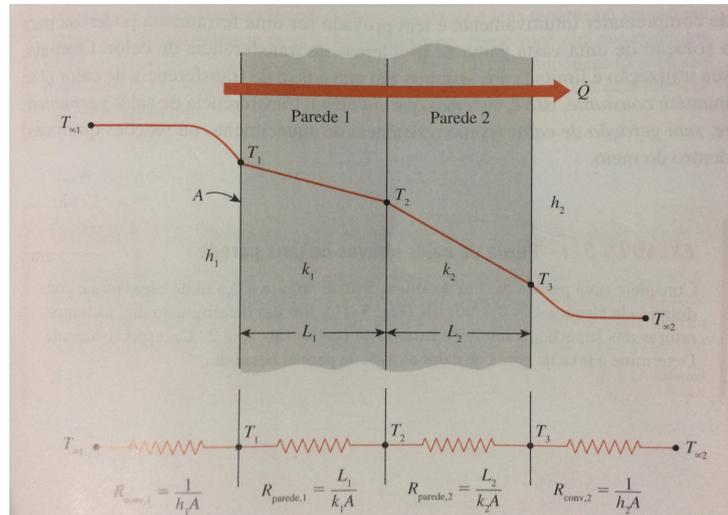
$$R_{\text{parede,conv}} = \frac{1}{hA} \quad (6)$$

Onde:

h -coeficiente de convecção- $[W/m^2K]$;

A -área das faces- $[m^2]$.

FIGURA 3 – REDE DE RESISTÊNCIA TÉRMICA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR ATRAVÉS DE DUAS CAMADAS DE PAREDES PLANAS E A ANALOGIA ELÉTRICA.



Fonte: adaptado de (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

2.4 EFEITO TERMOELÉTRICO

O efeito termoelétrico é a conversão direta entre tensão e diferença de temperatura, podendo também ocorrer o inverso. Quando uma tensão é aplicada aos seus terminais, uma diferença de temperatura é gerada entre as faces do dispositivo termoelétrico. O contrário ocorre quando uma tensão é gerada ao ser aplicada uma diferença de temperatura. Os efeitos termoelétricos podem ser descritos pelo efeito Peltier, Thompson e efeito Seeback. O efeito Peltier trata da taxa de calor gerada ao ser aplicada uma tensão nos terminais do dispositivo termoelétrico que acarretará na circulação de corrente. O equacionamento dos fenômenos termoelétricos está fundamentada nos conceitos dos três efeitos mencionados: Seeback, Peltier e Thompson. A análise dos três efeitos foi baseada em (ROWE, 2006).

1. Efeito Seeback

Considerando dois fios condutores unidos pelas extremidades, como na figura 4. Se as extremidades A e B forem submetidas a diferentes temperaturas T_1 e T_2 com $T_1 > T_2$, uma tensão V é verificada entre C e D. A tensão V é dada pela equação 7

$$V = \alpha(T_1 - T_2) \quad (7)$$

Onde:

V -tensão gerada nos terminais-[V];

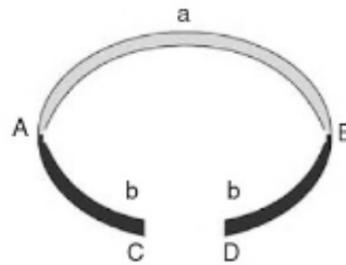
α -coeficiente de Seeback- $[\frac{V}{K}]$;

T -temperatura em cada extremidade-[K].

2. Efeito Peltier

Se na figura 4 for aplicada uma tensão V entre os terminais C e D, uma corrente I percorrerá o sentido horário dos fios condutores e uma taxa de calor \dot{Q} (aquecimento) ocorrerá na junção entre a e b; e uma taxa de calor $-\dot{Q}$ (resfriamento) ocorrerá na outra. A relação entre corrente I e calor que define o coeficiente de Peltier π é dada pela equação 8.

FIGURA 4 – PAR TERMOELÉTRICO



Fonte: (ROWE, 2006)

$$\pi = \frac{I}{\dot{Q}} \quad (8)$$

Onde:

π -coeficiente de Peltier-[A/W];

I -corrente-[A];

\dot{Q} -taxa de calor-[W].

3. Efeito Thompson

O último dos efeitos termoelétricos, o efeito Thompson relaciona a taxa de calor \dot{Q} com a diferença de temperatura gerada entre os pares condutores.

Essa relação é dada pela equação 9

$$\dot{Q} = \beta I \Delta T \quad (9)$$

Onde:

β -coeficiente de Thompson-[$\frac{W}{AK}$];

I -corrente-[A];

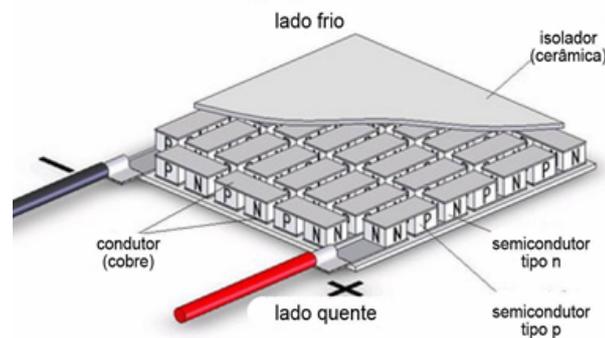
\dot{Q} -taxa de calor-[W].

2.5 FUNCIONAMENTO DOS MÓDULOS TERMOELÉTRICOS

Uma pastilha termoelétrica, ou Peltier, consiste de um número alternativo de ligas formando os termoelementos carregados com excesso de elétrons (tipo-n) ou falta de

elétrons(tipo-p). Esses termoelementos estão ligados termicamente em paralelo e eletricamente em série (LINEYKIN; BEN-YAAKOV, 2007). Aplicando-se uma tensão V entre os terminais da célula Peltier, uma corrente é gerada de modo que ao atravessar o sistema é gerado um gradiente térmico constituindo uma superfície fria e outra quente. Uma representação esquemática de uma pastilha Peltier pode ser verificada na figura 5. Nessa figura, observa-se as duas faces e o revestimento isolante da pastilha, cujo material é cerâmica.

FIGURA 5 – MODELO DE UMA PASTILHA PELTIER.



Fonte: adaptado de (SANTANA, 2015).

Seguindo o modelo matemático proposto por (TSAI; LIN, 2010), que relaciona o aquecimento das partes quente e fria com a conservação de energia, temos que a quantidade de energia no tempo gerada \dot{Q}_a ou removida \dot{Q}_e se relacionam com o efeito Seebeck, perdas por efeito Joule e condução térmica. A condução térmica segue a mesma ideia mostrada pela equação 2. As equações que descrevem o aquecimento e resfriamento podem ser verificadas em 10 e 11. O coeficiente de Thompson, por ter um valor muito pequeno, não é considerado.

$$\dot{Q}_a = \alpha IT_q + 0,5I^2R - k_{th}\Delta T \quad (10)$$

Onde:

R -resistência da célula Peltier- $[\Omega]$;

k_{th} -condutividade térmica- $[W/K]$;

T_q -temperatura da face quente- $[K]$;

ΔT -diferença de temperatura entre a face quente e fria- $[K]$.

$$\dot{Q}_e = \alpha IT_f - 0,5I^2R - k_{th}\Delta T \quad (11)$$

Onde:

R -resistência da célula Peltier- $[\Omega]$;

k_{th} -condutividade térmica- $[W/K]$;

T_f -temperatura da face fria- $[K]$;

ΔT -diferença de temperatura entre a face quente e fria- $[K]$.

Fazendo 10 - 11, determina-se a potência elétrica necessária para alimentar a pastilha Peltier, fornecida pela equação 12.

$$VI = \dot{Q}_a - \dot{Q}_e = \alpha(T_q - T_f)I + 0,5I^2R \quad (12)$$

Onde:

V -tensão de alimentação-[V];

I -corrente de alimentação-[A].

Analisando as equações, verifica-se que há uma relação entre o aquecimento e o resfriamento com a corrente. Além disso, quanto mais se retira calor da parte quente, maior o resfriamento da parte fria.

2.6 MODELAGEM DE PROCESSOS DE PRIMEIRA ORDEM

Um modelo de primeira ordem pode ter sua relação entre entrada e saída caracterizada pela função de transferência de malha aberta mostrada por 13.

$$G_p(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (13)$$

Onde:

$Y(s)$ -sinal de saída;

$U(s)$ -sinal de entrada;

K -ganho do sistema;

τ -constante de tempo.

Para se obter a resposta do sistema e verificar seu comportamento, os sinais de entrada comumente utilizados são: impulso, degrau, rampa e senoidal (COELHO; COELHO, 2004). Na figura 6 é ilustrado o processo de avaliação da dinâmica de um processo perante sinais de teste.

FIGURA 6 – AVALIAÇÃO DE PROCESSOS PERANTE SINAIS DE TESTE.



Fonte: os autores (2018).

Aplicando uma entrada tipo degrau unitário no modelo descrito pela equação 13 e fazendo a transformada inversa de Laplace, chega-se à equação 14.

$$y(t) = K(1 - e^{-t/\tau}) \quad (14)$$

Processos que apresentam atraso de transporte, ou seja, ao ser aplicado o sinal de entrada, existe um tempo para que o sistema comece a responder, tem sua função de transferência de primeira ordem modelada por 15.

$$G_p(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \quad (15)$$

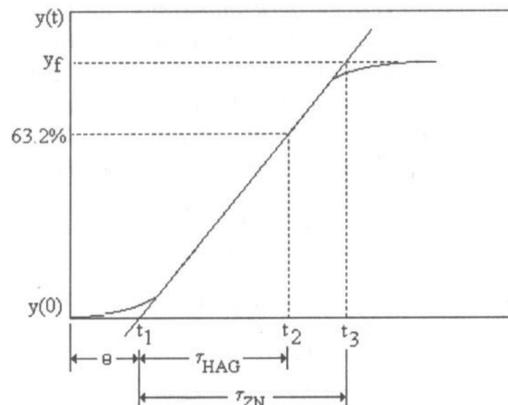
Onde:

θ -atraso de transporte.

Para a identificação dos parâmetros do modelo descrito por 15, baseada na curva de resposta do processo ao degrau, serão avaliados três métodos descritos por (COELHO; COELHO, 2004). Nos métodos de Ziegler-Nichols (ZN) e Hägglund (HAG), os parâmetros K , τ e θ são calculados conforme é ilustrado na figura 7. É traçada uma reta tangente ao ponto de inflexão da curva de reação e o atraso θ , em ambos os métodos, é calculado pelo intervalo de tempo entre a aplicação do degrau na entrada do processo e o instante t_1 em que a reta tangente toca a reta $y(t) = y(0)$. No método de ZN, a constante de tempo τ é determinada pelo intervalo de tempo entre t_1 e o instante t_3 em que a reta tangente toca a reta $y(t) = y_f$, enquanto que no método de HAG, é calculado pelo intervalo entre t_1 e o instante t_2 , em que a curva alcança o valor de $y(t) = y(0) + 0,63y_f$. O parâmetro K é calculado pela relação entre a saída e a entrada, conforme a equação 16.

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (16)$$

FIGURA 7 – MÉTODOS DE ZN E HAG PARA A MODELAGEM DE PROCESSOS DE PRIMEIRA ORDEM.



Fonte: (COELHO; COELHO, 2004).

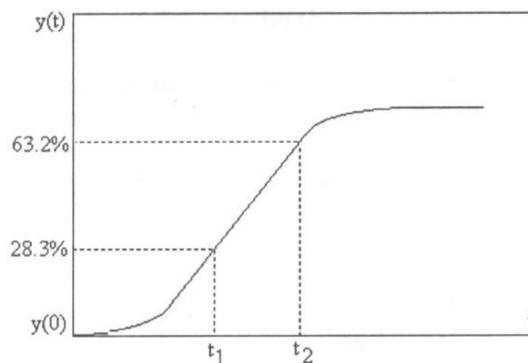
No método de Smith, sobre a curva de reação são marcados os instantes de tempo t_1 e t_2 correspondentes às passagens da resposta pelos pontos $y(0) + 0,283y(\infty)$ e $y(0) + 0,632y(\infty)$,

respectivamente. O parâmetro K , é obtido pela equação 16 e os demais parâmetros são obtidos conforme as equações 17 e 18. Na figura 8 é ilustrado o processo.

$$\tau = 1,5(t_2 - t_1) \quad (17)$$

$$\theta = t_2 - \tau \quad (18)$$

FIGURA 8 – MÉTODO DE SMITH PARA A MODELAGEM DE PROCESSOS DE PRIMEIRA ORDEM.



Fonte: (COELHO; COELHO, 2004).

2.7 SISTEMAS DE CONTROLE COM REALIMENTAÇÃO

Um sistema que estabeleça uma relação de comparação entre a saída e a entrada de referência, utilizando a diferença como meio de controle, é denominado sistema de controle com realimentação. Esses sistemas são denominados também sistemas de controle de malha fechada. Nesse tipo de sistema, o sinal de erro atuante, que é a diferença entre o sinal de entrada e o sinal de realimentação, realimenta o controlador, de modo a minimizar o erro e acertar a saída do sistema ao valor desejado. Um exemplo é um sistema térmico em que o sinal de realimentação é proveniente de um sensor de temperatura e o sinal de referência é uma temperatura em que se deseja que o ambiente tenha (OGATA, 2010). Um modelo de controle é o controlador do tipo PID, que possui ação proporcional (P), Integral (I) e derivativa (D), essas ações atuam sobre o sinal de erro, que é a diferença entre o sinal de realimentação e o sinal de referência. Na figura 9 pode ser verificado um diagrama de blocos de um sistema de controle com realimentação.

2.7.1 Ação Proporcional

Quando o sinal de controle realimentado é proporcional ao erro do sistema, chama-se o resultado de realimentação proporcional (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013).

Um controlador proporcional consiste essencialmente em um amplificador com ganho ajustável. Sendo assim, quanto maior o erro, maior a ação de controle gerada. Com isso, ele provê um rápido ajuste da variável manipulada, tornando mais rápida a dinâmica do processo. A desvantagem desse tipo de controlador é que ele pode apresentar um erro em regime permanente. Esse erro diminui com o aumento do ganho proporcional, todavia isto pode tornar o sistema oscilatório. A equação 19, mostra o modelo matemático de um controlador do tipo P.

$$c(t) = K_p e(t) \mapsto \mathcal{L} \mapsto C(s) = K_p E(s) \quad (19)$$

Onde:

$c(t), C(s)$ -sinal de saída do controlador;

$e(t), E(s)$ -sinal de erro - entrada do controlador;

K_p -ganho proporcional.

2.7.2 Ação Proporcional-Integral

O erro estacionário ou erro residual proveniente do controlador proporcional, pode ser eliminado se uma ação de controle integral for incluída no controlador. A saída desse tipo de controlador se torna função do erro e da integral do erro. Este tipo de controlador adiciona um polo na origem da função de transferência do controlador, eliminando assim, o erro estacionário. Porém, embora a ação integral remova o erro residual ou o erro estacionário, pode conduzir o sistema a uma resposta oscilatória com uma amplitude que decresce lentamente ou mesmo uma amplitude sempre crescente (OGATA, 2010). A equação 20, mostra o modelo matemático de um controlador do tipo PI.

$$c(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau \right) \mapsto \mathcal{L} \mapsto C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) E(s) \quad (20)$$

Onde:

$c(t), C(s)$ -sinal de saída do controlador;

$e(t), E(s)$ -sinal de erro - entrada do controlador;

K_p -ganho proporcional;

T_i -tempo integral.

2.7.3 Controle PID

A inclusão da ação derivativa, permite que se obtenha um controlador de alta sensibilidade. Uma vantagem em se utilizar essa ação, é que ela responde a uma taxa de variação do erro atuante (derivada do erro) e pode produzir uma correção significativa antes que o valor do erro atuante se torne muito elevado, sendo assim, há uma ação corretiva antecipada tendendo a aumentar a estabilidade do sistema. O controle derivativo aumenta o amortecimento do

sistema, permitindo o uso de um valor mais elevado do ganho proporcional, o que resultará em uma maior precisão no regime permanente (OGATA, 2010). Um inconveniente dessa ação é a amplificação de ruídos.

Utilizando então um controle PID, a ação integral elimina o erro estacionário e a ação derivativa permite um aumento do ganho e reduz a tendência para oscilações (LOURENÇO, 1997). Um sistema em malha fechada com um processo sob a ação de um controlador PID, pode ser verificado na figura 10 e o modelo matemático no domínio do tempo desse controlador é fornecido pela equação 21 e em *Laplace*, na equação 22.

$$c(t) = K_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (21)$$

Onde:

$c(t)$ -sinal de saída do controlador;

$e(t)$ -sinal de erro - entrada do controlador;

T_i -tempo integral;

K_p -ganho proporcional;

T_d -tempo derivativo.

$$C(s) = K_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s)E(s) \quad (22)$$

Onde:

$C(s)$ -sinal de saída do controlador;

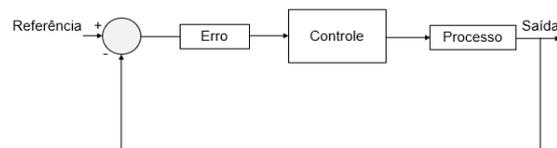
$E(s)$ -sinal de erro - entrada do controlador;

T_i -tempo integral;

K_p -ganho proporcional;

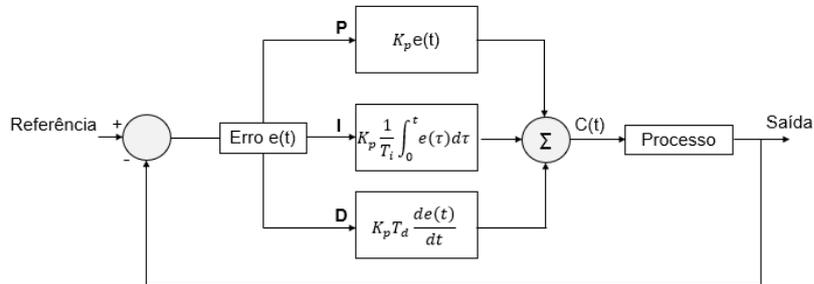
T_d -tempo derivativo.

FIGURA 9 – SISTEMA DE CONTROLE COM REALIMENTAÇÃO.



Fonte: os autores (2018).

FIGURA 10 – DIAGRAMA DE UM SISTEMA EM MALHA FECHADA COM AÇÃO DE CONTROLE PID.

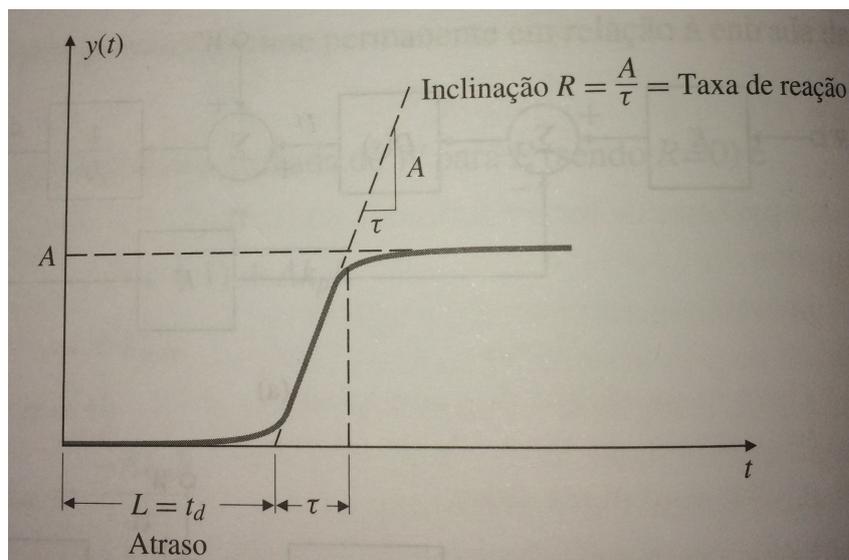


Fonte: os autores (2018).

2.8 REGRAS DE SINTONIA DE ZIEGLER-NICHOLS PARA CONTROLADORES PID

O controlador do tipo PID pode ter seus parâmetros adquiridos através da técnica de sintonia de Ziegler-Nichols. Este método consiste em obter a resposta da planta ou processo a uma entrada degrau unitário, se a planta tiver o formato de uma curva em S, como em um sistema de primeira ordem. Os parâmetros do controlador PID podem ser adquiridos de acordo com o ilustrado na figura 11. Nessa curva, é traçada uma reta tangente ao ponto de inflexão da curva, então a inclinação da reta será $R = \frac{A}{T}$, a intersecção da reta tangente com o eixo do tempo identifica o atraso de transporte no tempo $L = t_d$ e o valor final da curva fornece o valor do ganho A (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013). A partir desses dados, pode-se obter os parâmetros do controlador PID através da tabela 1.

FIGURA 11 – SINTONIA DE ZIEGLER-NICHOLS PARA SISTEMAS DE PRIMEIRA ORDEM.



Fonte: (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013).

TABELA 1 – Sintonia Ziegler-Nichols.

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	1/RL	-	-
PI	0,9/(RL)	L/0,3	-
PID	1,2/(RL)	2L	0,5L

FONTE: adaptado de (FRANKLIN; POWELL; EMAMI-NAEINI, 2013).

2.9 IMPLEMENTAÇÃO DIGITAL

A principal vantagem do controlador digital sobre o controlador contínuo é a flexibilidade de implementação. Como os controladores contínuos são implementados por meio de componentes eletrônicos, a complexidade desses controladores depende da complexidade e da precisão dos componentes. Já os controladores digitais são implementados na forma de programas, possibilitando a implementação em controladores simples ou complexos. Além disso, mudanças nas leis de controle como, por exemplo, parâmetros de um controlador PID, são mais simples de serem realizadas em um controlador digital.

Para a implementação em um controlador digital, é necessário obter a função de transferência de controle obtida no domínio contínuo *Laplace* para o domínio discreto *z*. Uma maneira de se realizar essa transformação é através da transformação bilinear ou de Tustin.

A seguir será obtido um sistema discreto a partir de um sistema contínuo, utilizando a aproximação de Tustin (CASTRUCCI; BITTAR; SALES, 2011).

Considerando a função de transferência de um integrador:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{s} \quad (23)$$

A equação diferencial que representa a função de transferência 23, se torna:

$$u(t) = \frac{dy(t)}{dt} \quad (24)$$

Integrando ambos os lados da equação 24 em um período de amostragem T qualquer, ou seja, de $(k-1)T$ a kT :

$$y(kT) - y[(k-1)T] = \int_{(k-1)T}^{kT} u(t)dt \quad (25)$$

Com isso, no método de Tustin o cálculo da integral é aproximada pela área de um trapézio, cuja altura é igual ao período de amostragem T e cujas bases correspondem aos

valores da função nos instantes kT e $(k - 1)T$, fazendo essa aproximação da equação 25, obtém-se:

$$y(kT) - y[(k - 1)T] = T\left(\frac{u(kT) + u[(k - 1)T]}{2}\right) \quad (26)$$

Aplicando a transformada z em 26:

$$Y(z) - z^{-1}Y(z) = T\left(\frac{U(z) + z^{-1}U(z)}{2}\right) \quad (27)$$

Reagrupando os termos da equação 27:

$$\frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{T(1 + z^{-1})}{2(1 - z^{-1})} \quad (28)$$

Fazendo a equivalência entre as equações 23 e 28.

$$s = \frac{2(z - 1)}{T(z + 1)} \quad (29)$$

Com isso, pode-se fazer a aproximação de s em z , obter a função de transferência do controlador no tempo discreto, aplicar a transformada z inversa e obter a equação a diferenças a ser implementada no programa de um controlador digital.

2.10 MODULAÇÃO POR LARGURA DE PULSO PWM

A modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation-PWM*) consiste na geração de um trem de pulsos de onda quadrada com largura de pulso variada. Normalmente, os sinais PWM são obtidos por comparação entre dois sinais, uma onda portadora e uma onda de referência ou moduladora (CAETANO, 2013). A saída binária PWM pode ser matematicamente descrita conforme a equação 30. A figura 12 ilustra esse processo.

$$b_{pwm}(t) = \text{sgn}[r(t) - c(t)] \quad (30)$$

Onde:

$b_{pwm}(t)$ -sinal modulado;

$r(t)$ -sinal da onda moduladora;

$c(t)$ -sinal da onda portadora.

Usualmente são utilizados três tipos de onda portadora para geração de sinal PWM com frequência constante: onda dente de serra, dente de serra invertido e onda triangular. Em uma implementação digital a onda de referência é amostrada a uma frequência fixa e a portadora é implementada por um contador/temporizador. Em microcontroladores, é usualmente aplicada a técnica da modulação por largura de pulso em que se mantém fixo o período do sinal e varia

a razão cíclica, ou seja, a largura de pulso. Por definição, a razão cíclica é a relação entre a largura do pulso e o seu período. Na figura 13 há um exemplo de sinal PWM e a equação 31 mostra a razão cíclica.

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (31)$$

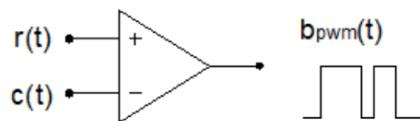
Onde:

D -razão cíclica;

t_{on} -largura do pulso;

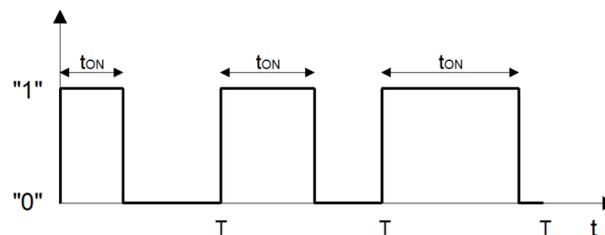
T -período do sinal.

FIGURA 12 – GERAÇÃO DO SINAL MODULADO A PARTIR DA PORTADORA.



Fonte: (CAETANO, 2013).

FIGURA 13 – EXEMPLO DE SINAL PWM.



Fonte: (CAETANO, 2013).

2.11 CONTROLADOR E SENSOR

Nessa seção serão descritos o controlador utilizado e o sensor de temperatura.

2.11.1 Arduino Mega

O Arduino Mega é uma placa de desenvolvimento que utiliza o microcontrolador ATmega 2560. Este microcontrolador possui tecnologia CMOS de baixo consumo de 8 bits, baseado na arquitetura RISC. Executando instruções complexas em um único ciclo de clock, o ATMEGA 2560 atinge o desempenho de 1 MIPS por MHz, possibilitando o programador a otimizar o consumo de energia pela velocidade de processamento (ATMEL, 2014). Na tabela 2 pode ser verificado um resumo das características do Arduino Mega.

TABELA 2 – Características do Arduino Mega.

Característica	Valor
Microcontrolador	ATmega 2560
Tensão de operação	5 V
Tensão de entrada recomendada	7-12 V
Tensão de entrada máxima	20 V
Pinos digitais	54 (sendo 15 saídas PWM)
Pinos analógicos	16
Resolução do conversor A/D	10 bits
Memória Flash	256 kB
SRAM	8 kB
EEPROM	4 kB
Clock	16 MHz

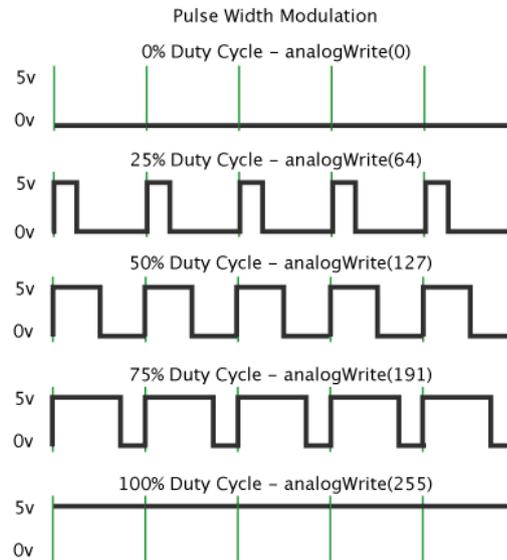
FONTE: (ARDUINO, 2018).

Os pinos digitais podem ser usados como entrada ou saída, eles operam a 5 V e podem receber um máximo de 40 mA de corrente. O conversor analógico digital do ATmega 2560 é de 10 bits e possui uma tensão de referência selecionável de 2,56 V ou 1,1 V. Por padrão, o Arduino Mega tem os pinos de 2 a 13 e de 44 a 46 como saídas PWM de 8 bits. Para a programação, pode-se utilizar a própria interface de programação do Arduino, IDE (*Integrated Development Environment*). A linguagem de programação é simples, adaptada da linguagem *Processing*, que é chamada *Wiring* em que há uma semelhança com a linguagem C, porém várias funções para leitura ou escrita nos pinos, saídas PWM, comunicação serial, entre outras já estão prontas. Por exemplo, na figura 15, pode-se verificar a saída PWM com relação à razão cíclica utilizando a função *AnalogWrite()*, em que utilizando 8 bits, indica-se a razão cíclica do sinal PWM. Um modelo do Arduino Mega pode ser visualizado na figura 14.

FIGURA 14 – MODELO DO ARDUINO MEGA.



Fonte: (ARDUINO, 2018).

FIGURA 15 – MODELO DE SAÍDA PWM UTILIZANDO A FUNÇÃO `ANALOGWRITE()`.

Fonte: (ARDUINO, 2018).

2.11.2 Sensor de temperatura DS18B20

O sensor de temperatura DS18B20 é um termômetro digital que utiliza somente um pino de dados para comunicação com o dispositivo master, cujas regras são estabelecidas pelo protocolo proprietário de comunicação *1-Wire*. Este é um protocolo de comunicação serial half-duplex que utiliza uma linha para transmissão de dados, além da referência. Ele é do tipo master/slave, ou seja, um dispositivo master inicia a comunicação e os dispositivos slave somente respondem aos seus comandos. No caso deste protocolo, todo dispositivo possui um identificador de 64 bits único, dentro do qual um byte indica o tipo do dispositivo. Esse sensor apresenta precisão de 0,5 °C para a faixa de temperaturas de -10 °C a +85 °C, e de 2,0 °C para a faixa completa de operação, de -55 °C a +125 °C. Quanto à resolução, esta pode ser programada de 9 a 12 bits, sendo 8 bits para a parte inteira e 1 a 4 bits decimais (INTEGRATED, 2008). Os tempos para conversão de acordo com a resolução escolhida, podem ser vistos na tabela 3 e a arquitetura interna do sensor pode ser visto na figura 16.

O dispositivo, por utilizar o protocolo *1-Wire*, tem uma ROM de 64 bits para identificação, além de uma região de memória de rascunho, que consiste de uma memória SRAM de 64 bits, dividida em 8 regiões de 1 byte, para promover a interface com as funcionalidades do CI: sensor de temperatura, alarmes programáveis para estouro de valores mínimo e máximo das medições, registrador de configuração da resolução e gerador de código CRC de 8 bits (INTEGRATED, 2008). A figura 17 apresenta o mapa de memória do DS18B20. Os registradores de configuração e alarme são copiados para uma memória não volátil (EEPROM) após configurados pelo master, retendo seus valores mesmo em caso de corte na alimentação. O valor da temperatura lido após uma queda de alimentação é de +85 °C até que o dispositivo

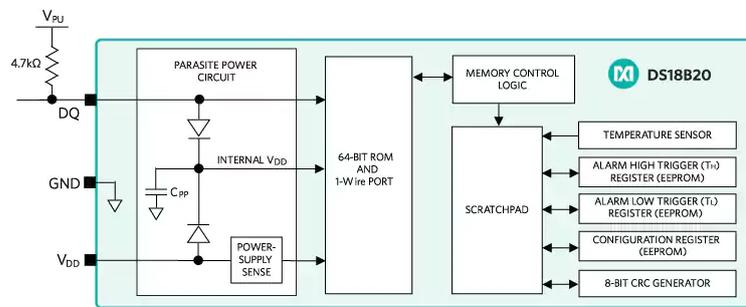
esteja pronto para uso.

TABELA 3 – Tempos de conversão do sensor DS18B20.

Resolução (bits)	Tempo (ms)	LSB (°C)
9	93,75	0,5
10	187,5	0,25
11	375	0,125
12	750	0,0625

FONTE: (INTEGRATED, 2008).

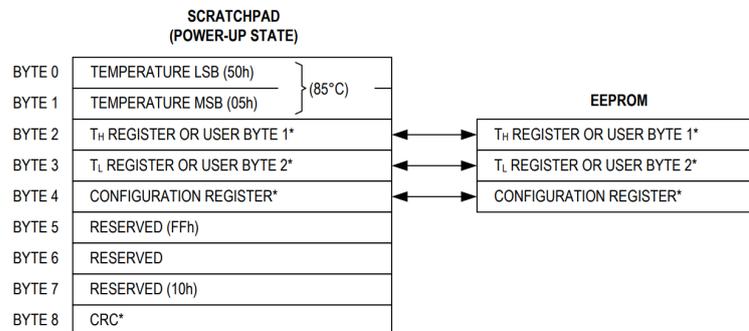
FIGURA 16 – DIAGRAMA DA ARQUITETURA DO SENSOR DS18B20.



Fonte: (INTEGRATED, 2008).

As leituras de temperatura são feitas em dois bytes, LSB e MSB, representados na figura 18, e que juntos são uma representação em complemento de dois, sendo que os 5 bits mais significativos são redundantes e, para resoluções menores do que 12 bits, o valor dos bits menos significativos é indefinido.

FIGURA 17 – MAPA DE MEMÓRIA DO SENSOR DS18B20.



*POWER-UP STATE DEPENDS ON VALUE(S) STORED IN EEPROM.

Fonte: (INTEGRATED, 2008).

As realizações de medições de temperatura são feitas utilizando duas fontes de tensão bandgap. Uma das fontes tem um coeficiente de temperatura alto e varia deterministicamente

FIGURA 18 – REGISTRADORES DE TEMPERATURA DO SENSOR DS18B20.

	BIT 7	BIT 6	BIT 5	BIT 4	BIT 3	BIT 2	BIT 1	BIT 0
LS BYTE	2 ³	2 ²	2 ¹	2 ⁰	2 ⁻¹	2 ⁻²	2 ⁻³	2 ⁻⁴
	BIT 15	BIT 14	BIT 13	BIT 12	BIT 11	BIT 10	BIT 9	BIT 8
MS BYTE	S	S	S	S	S	2 ⁶	2 ⁵	2 ⁴

S = SIGN

Fonte: (INTEGRATED, 2008).

de acordo com a temperatura. A outra fonte de tensão tem um coeficiente de temperatura baixo e não varia com a mudança de temperatura. Um conversor analógico digital converte a diferença entre essas duas tensões para um sinal digital, representando então a temperatura medida pelo dispositivo. A figura 19 mostra um exemplo do sensor DS18B20 com encapsulamento TO-92 e contendo proteção contra água.

FIGURA 19 – SENSOR DE TEMPERATURA DS18B20.



Fonte: (FILIPEFLOP, 2018).

3 DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento do trabalho iniciou-se com a construção do recipiente físico junto com o módulo termoeétrico, posteriormente verificou-se as características da célula Peltier utilizada bem como as características das ventoinhas para então serem desenvolvidos e construídos os circuitos. Com o recipiente físico finalizado juntamente com os circuitos, foram feitas medições para a modelagem do sistema e posterior implementação de uma técnica de controle no Arduino.

3.1 RECIPIENTE DE ARMAZENAMENTO E MÓDULO TERMOELÉTRICO

O recipiente físico foi construído com madeira do tipo Pinus e internamente foi revestido com isopor. Há uma pequena porta para poder manusear o volume interior. As dimensões totais são 29 cm de largura, 30 cm de altura e 25 cm de profundidade, sendo que a porta tem 11 cm de largura e 10,5 cm de altura. Com a colocação dos isopores houve uma diminuição do volume útil. A tabela 4 mostra as dimensões do recipiente após o revestimento interno com isopor e a tabela 5 mostra as espessuras dos isopores utilizados nas faces internas do recipiente.

O objetivo de colocar os isopores é manter uma isolamento térmica de modo que dificulte a troca de calor do volume interno com o meio externo. O volume do recipiente já com os isopores é dado pela equação 32.

$$Volume = Altura.Largura.Profundidade = 0,002372[m^3] \quad (32)$$

TABELA 4 – Dimensões internas do recipiente.

Dimensão	Medida [cm]
Altura	16,5
Largura	11,5
Profundidade	12,5

FONTE: os autores (2018).

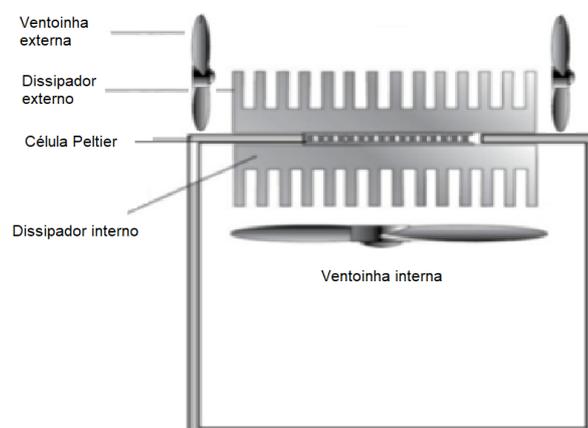
TABELA 5 – Dimensões das faces internas do recipiente.

Face	Espessura da madeira [cm]	Espessura do isopor [cm]	Área [m^2]
Lateral direita	1,8	4	0,019
Lateral esquerda	1,8	4	0,019
Frontal	1,8	2	0,206
Traseira	1,8	4	0,206
Base	1,8	8	0,0144
Teto	1,8	Não possui	0,0144

FONTE: os autores (2018).

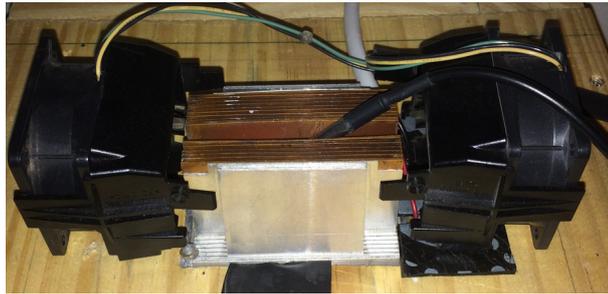
O módulo termoelétrico é composto por uma célula Peltier acoplada entre dois dissipadores de calor. O acoplamento entre os dissipadores de calor e a célula Peltier foi feito utilizando pasta térmica para aumentar a condutibilidade térmica entre as partes quente e fria da pastilha Peltier e seus respectivos dissipadores. Esse módulo foi colocado na parte superior do recipiente de modo que a parte quente fica exposta para fora do recipiente e a parte fria fica na posição interna. Há três ventoinhas nesse módulo, duas para a parte quente e uma para a fria. Para a parte quente, uma ventoinha faz com que o fluxo de ar seja em direção ao dissipador e a outra tem o fluxo contrário, ou seja, de retirar o ar do dissipador. Internamente, há uma ventoinha que tem o sentido de retirar o ar do dissipador da parte fria e promover a troca de calor com o ar do volume interno do recipiente. Um modelo da colocação do módulo termoelétrico pode ser verificado na figura 20. Nas figuras 21 e 22 são ilustrados os dissipadores com as ventoinhas das partes quente e fria já colocados no recipiente. Nas tabelas 6 e 7, são mostradas as características dos dissipadores e ventoinhas utilizados.

FIGURA 20 – MODELO DO MÓDULO TERMOELÉTRICO COMPOSTO PELOS DISSIPADORES, VENTONHAS E CÉLULA PELTIER



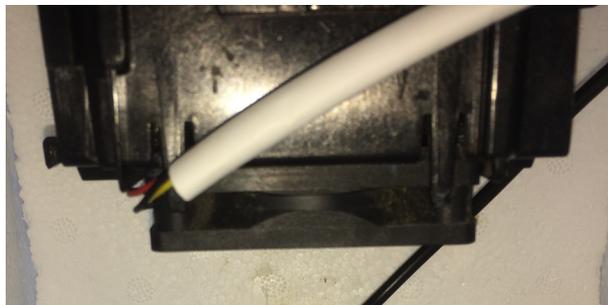
Fonte: os autores (2018).

FIGURA 21 – DISSIPADOR E VENTOINHAS NA PARTE EXTERNA DO RECIPIENTE



Fonte: os autores (2018).

FIGURA 22 – DISSIPADOR E VENTOINHAS NA PARTE INTERNA DO RECIPIENTE



Fonte: os autores (2018).

TABELA 6 – Parâmetros dos dissipadores utilizados.

Característica	Valor
Modelo	Socket 603 - Intel Xeon
Largura	64 mm
Comprimento	88 mm
Altura total	50 mm
Aletas de 1 mm	30

FONTE: os autores (2018).

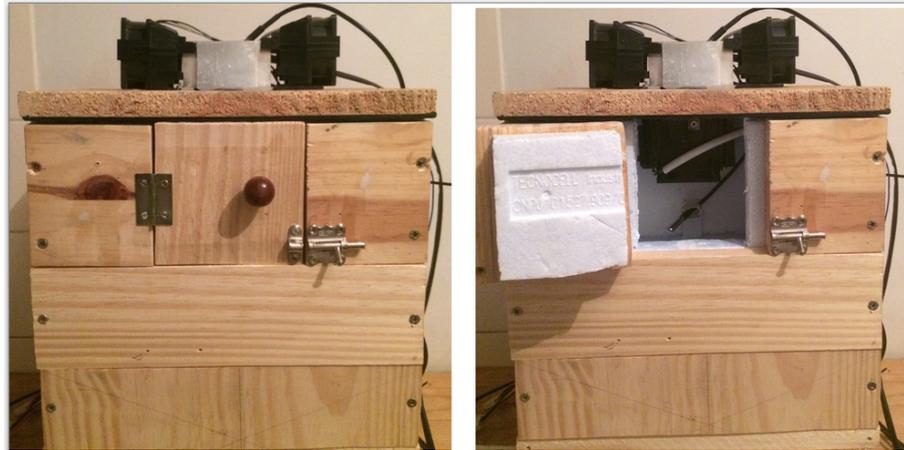
TABELA 7 – Parâmetros das ventoinhas.

Característica	Valor
Modelo	Sanyo Denki 109R0612G4031
Tensão	12 V
Corrente	0,24 A
Dimensões	60x60x60 mm
Velocidade	5600 rpm

FONTE: os autores (2018).

Com o dissipador interno, o volume encontrado na equação 32, deve ter o volume do dissipador interno com a ventoinha descontados, com isso, o volume útil resultante é de $0,002372 - 0,000455 = 0,001917m^3$ ou $1,917[litros]$ para armazenamento de medicamentos. A figura 23 mostra o recipiente físico construído com o módulo termoelétrico já montado.

FIGURA 23 – RECIPIENTE FÍSICO CONSTRUÍDO



Fonte: os autores (2018).

3.2 PERDAS CALORÍFICAS DO RECIPIENTE

Para o cálculo das perdas caloríficas média do recipiente, considerou os valores de condutividade térmica localizados na tabela 8. Utilizando a equação 5, calculou-se a resistência térmica das faces do recipiente, esses valores podem ser verificados na tabela 9

TABELA 8 – Condutividade térmica a 300 K.

Material	Condutividade térmica [W/mK]
Ar	26,3
Madeira Pinus	0,12
Isopor	0,027

FONTE: (INCROPERA et al., 2008).

Utilizando a equação 4, com $T_1=25^\circ C$ e $T_2=5^\circ C$, as perdas por condução das paredes do recipiente são mostradas na equação 33.

$$\dot{Q}_{\text{cond,parede}} = \frac{298K - 278K}{9,04} = 2,21[W] \quad (33)$$

TABELA 9 – Resistência térmica das faces do recipiente.

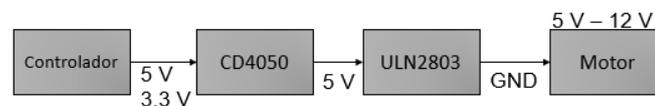
Face	Resistência térmica [$\frac{m^2}{KW}$]
Lateral direita	1,63
Lateral esquerda	1,63
Frontal	0,89
Traseira	1,63
Base	3,11
Teto	0,15

FONTE: os autores (2018).

3.3 CIRCUITOS ELETRÔNICOS

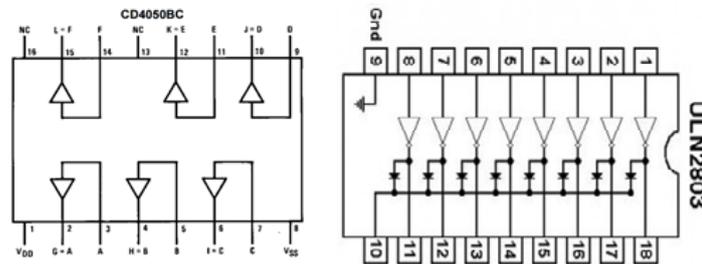
Os circuitos desenvolvidos foram para acionamento das ventoinhas, acionamento da pastilha Peltier e aquisição dos dados dos sensores. Na figura 24, pode-se verificar um diagrama de blocos explicativo do circuito acionador das ventoinhas. Nesse circuito, o sinal proveniente do controlador é entrada para um circuito de buffer em que é utilizado o circuito integrado CD4050. Esse buffer serve para estabilizar a tensão em 5 V caso seja utilizado um microcontrolador que tenha saídas em 3,3 V. O sinal saindo desse buffer entra no circuito integrado ULN2803 que é um conjunto de transistores em Darlington que fazem o chaveamento da ventoinha. Foram construídos dois circuitos dessa forma, um para alimentação de até três ventoinhas de 12 V e um para alimentação de até duas ventoinhas de 5 V. Na figura 25 podem ser verificados os modelos dos circuitos integrados utilizados. Na figura 26, pode ser verificado o esquemático do circuito acionador das ventoinhas desenvolvido.

FIGURA 24 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO CIRCUITO ACIONADOR DAS VENTOINHAS



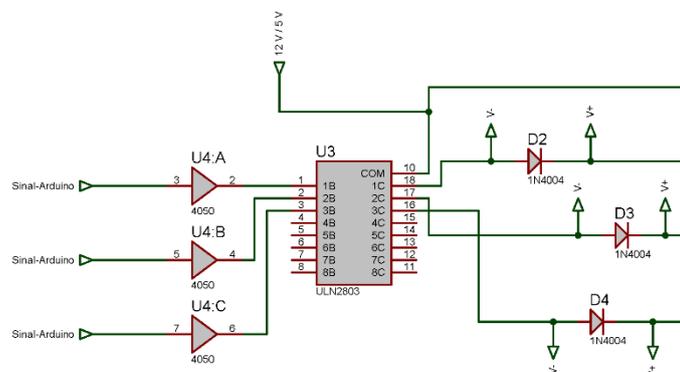
Fonte: os autores (2018).

FIGURA 25 – ESQUEMÁTICO DOS CIRCUITOS INTEGRADOS CD4050 E ULN2803



Fonte: (FAIRCHILD SEMICONDUCTOR, 1989) e (TEXAS INSTRUMENTS, 1997).

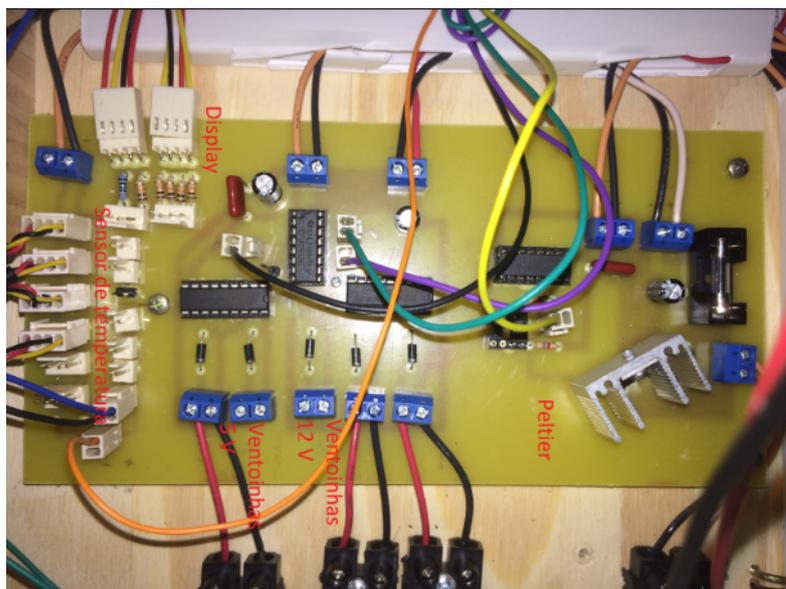
FIGURA 26 – ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO ACIONADOR DAS VENTOINHAS



Fonte: os autores (2018).

Para o circuito acionador do Peltier, por se tratar de uma tensão e uma corrente elevada se comparadas às ventoinhas, foi utilizado para o chaveamento o transistor FQP30N06L, que se trata de um mosfet de canal N com acionamento lógico. Algumas de suas características podem ser visualizadas na tabela 10. Para o acionamento do mosfet utilizou-se um optoacoplador modelo PC817 e um circuito inversor, o CI CD4049. O sinal proveniente do microcontrolador estando em nível lógico 1, entra no inversor e sai com nível lógico zero, isso promove no optoacoplador a queda de tensão de 5 V no resistor R2, este sinal de 5 V aciona o *Gate* do transistor. O uso do optoacoplador foi para isolar o acionamento do microcontrolador com a parte de potência. O diagrama de blocos na figura 27, ilustra o circuito desenvolvido. A figura 28, ilustra o esquemático do circuito desenvolvido. No Apêndice A, podem ser verificados os esquemáticos elaborados no software Eagle para a confecção das placas de circuito impresso. Na figura 29 pode ser verificado o circuito já confeccionado, contendo também uma parte para os sensores de temperatura e um conjunto de pinos para utilização de um Display.

FIGURA 29 – CIRCUITO CONFECCIONADO EM PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO



Fonte: os autores (2018).

3.4 CARACTERÍSTICAS DA PASTILHA PELTIER

A pastilha Peltier utilizada é da marca *AsaFan* e é ilustrada na figura 30. Suas características são descritas na tabela 11. No site da *AsaFan* não há informações técnicas ou *Datasheet* sobre essa pastilha Peltier. Já nos sites dos vendedores há uma descrição de algumas características desse produto. Os parâmetros utilizados foram os adquiridos dos sites dos vendedores. No Anexo A, podem ser verificados os parâmetros adquiridos de três vendedores diferentes, que coincidem nos dados fornecidos.

FIGURA 30 – MODELO DE PASTILHA PELTIER UTILIZADA



Fonte: (SOTUDO, 2018).

Se for considerado que a corrente máxima de $6A$ ocorre no consumo máximo de $120W$ e há a máxima diferença de temperatura $67\text{ }^{\circ}\text{C}$, com a resistência máxima de $2,20\Omega$, pode-se

TABELA 11 – Características da Pastilha Peltier utilizada.

Característica	Valor
Tensão de operação	12 V
Tensão máxima	15,2 V
Corrente máxima	6 A
Diferença de temperatura	67 °C
Consumo	120 W
Dimensões	4x4x0,3 cm
Resistência	1,9 - 2,20 Ω

FONTE: (SOTUDO, 2018).

calcular o coeficiente de Seebeck utilizando a equação 12.

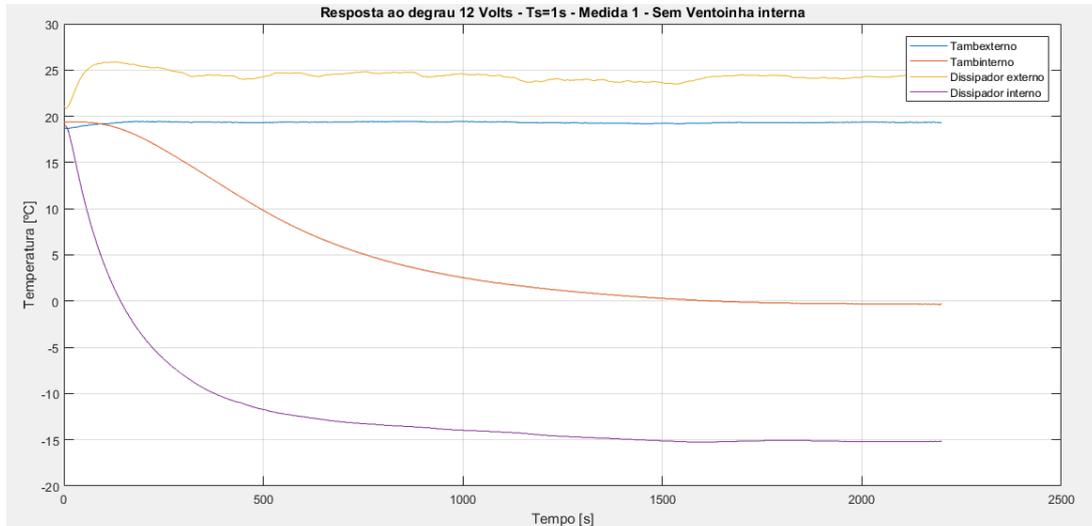
$$120 = \alpha(67 + 273)6 + 2,2(6^2) \Rightarrow \alpha = 0,02 \frac{V}{K} \quad (34)$$

3.5 MODELAGEM DO SISTEMA

A modelagem do sistema foi feita a partir da resposta do sistema ao degrau unitário. Este degrau é representado pela razão cíclica de PWM, em que 0 significa que o sistema está desligado e 1 representa 100 por cento de razão cíclica em relação a uma tensão de 12 V. As ventoinhas externas, sempre estão com a tensão ligada em 12 V, de modo a obter o máximo resfriamento possível da parte quente. Com relação aos sensores de temperatura, foram utilizados 4 sensores: um localizado no dissipador externo (parte quente), um no dissipador interno (parte fria), um para medição da temperatura do ambiente externo e um localizado internamente ao recipiente de modo a medir a temperatura interna. O tempo de aquisição das medidas é de 1 segundo, pois utilizou o sensor configurado em 12 bits o que faz com que ele tenha uma resposta de até 750 ms, conforme tabela 3. Nas legendas das curvas apresentadas, entende-se que Tambexterno é a temperatura do ambiente externo, Tambinterno é a temperatura do ambiente interno do recipiente, Dissipador externo é a temperatura do dissipador externo e Dissipador interno a temperatura medida no dissipador interno.

A primeira medida denominada de Medida 1, foi feita com a ventoinha interna desligada, aplicou-se uma entrada degrau unitário com tensão de 12 V e verificou-se o comportamento do sistema. A figura 31, representa as curvas obtidas e a tabela 12 mostra algumas características dessas curvas.

FIGURA 31 – MEDIDA 1: RESPOSTA AO DEGRAU UNITÁRIO COM 12 V E VENTONHA INTERNA DESLIGADA



Fonte: os autores (2018).

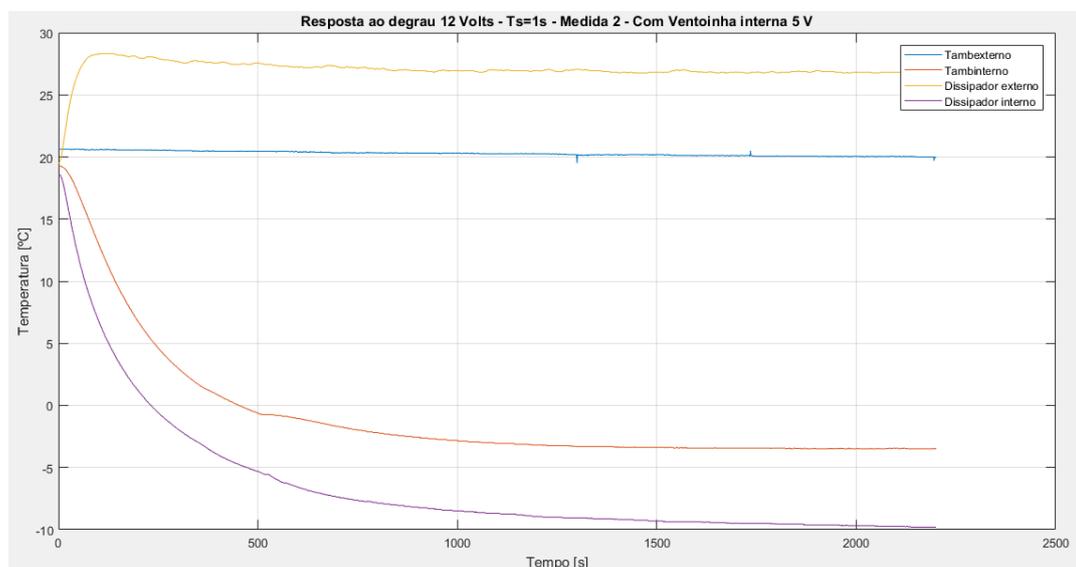
TABELA 12 – Característica da Medida 1.

Sensor	Temperatura inicial [°C]	Temperatura final [°C]
Dissipador externo	21	24
Dissipador interno	19	-15,19
Temperatura ambiente	19,44	19,44
Temperatura interna	19,37	-0,31

FONTE: os autores (2018).

Uma outra medida denominada Medida 2, foi feita com uma entrada degrau unitário com tensão de 12 V porém com a ventoinha interna ligada em 5 V. A figura 32, representa as curvas obtidas e a tabela 13 mostra algumas características dessas curvas. Medidas com a ventoinha interna ligada em 12 Volts também foram feitas, porém o melhor resultado obtido foi com ela alimentada em 5 Volts, caso contrário, o dissipador interno é aquecido de maneira a não resfriar o ambiente de maneira eficiente se comparada com a alimentação em 5 V.

FIGURA 32 – MEDIDA 2: RESPOSTA AO DEGRAU UNITÁRIO COM 12 V E VENTONHA INTERNA LIGADA EM 5 V



Fonte: os autores (2018).

TABELA 13 – Característica da Medida 2.

Sensor	Temperatura inicial [°C]	Temperatura final [°C]
Dissipador externo	19,5	27
Dissipador interno	18,56	-9,5
Temperatura ambiente	20,25	20,25
Temperatura interna	19,25	-3,44

FONTE: os autores (2018).

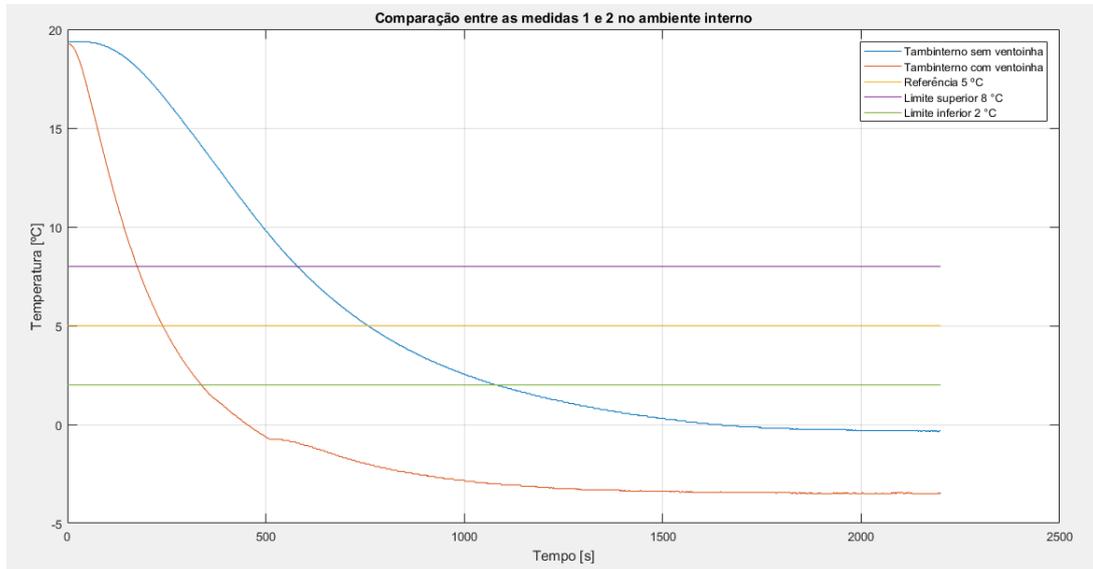
Fazendo uma comparação das curvas do ambiente interno entre a ventoinha ligada e desligada, esse resultado pode ser verificado na figura 33. A comparação foi feita com relação à faixa de temperatura dos medicamentos termolábeis, 2 °C a 8 °C e também a temperatura média central de 5 °C. Na tabela 14 pode-se verificar uma comparação entre as medidas 1 e 2. Como se verifica, a temperatura interna alcança a faixa de temperatura de 2°C a 8 °C mais rapidamente com a ventoinha ligada do que desligada, com isso, ficou estabelecido que a ventoinha interna estaria sempre ligada em 5 V, sendo que o controle atuaria somente na célula Peltier, tendo como referência a temperatura do ambiente interno.

TABELA 14 – Comparação entre as medidas 1 e 2 com relação à temperatura interna.

Medida	Temperatura inicial [°C]	Temperatura final [°C]	Tempo para 8°C [s]	Tempo para 5°C [s]
1	19,37	-0,31	580	757
2	19,25	-3,5	176	240

FONTE: os autores (2018).

FIGURA 33 – COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS DE TEMPERATURA INTERNA COM VENTOINHA INTERNA LIGADA E DESLIGADA



Fonte: os autores (2018).

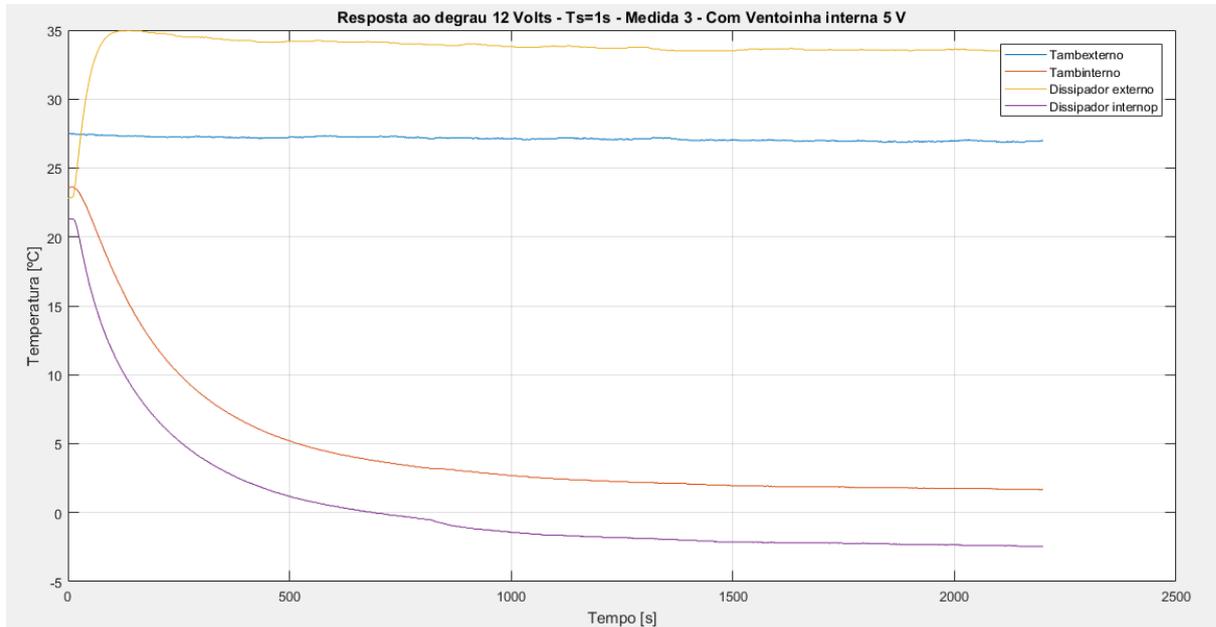
Estabelecido que o sistema teria sempre a ventoinha interna ligada em 5 V, uma nova medida denominada Medida 3 foi feita de modo a se comparar com a Medida 2 e se obter a função de transferência em malha aberta do sistema. As características dessa medida seguem a mesma da Medida 2. A figura 34 mostra as curvas obtidas e a tabela 15 mostra as características dessas curvas.

TABELA 15 – Caracaterística da Medida 3.

Sensor	Temperatura inicial [°C]	Temperatura final [°C]
Dissipador externo	22,81	34
Dissipador interno	21,31	-2,25
Temperatura ambiente	27	27
Temperatura interna	23,62	1,75

FONTE: os autores (2018).

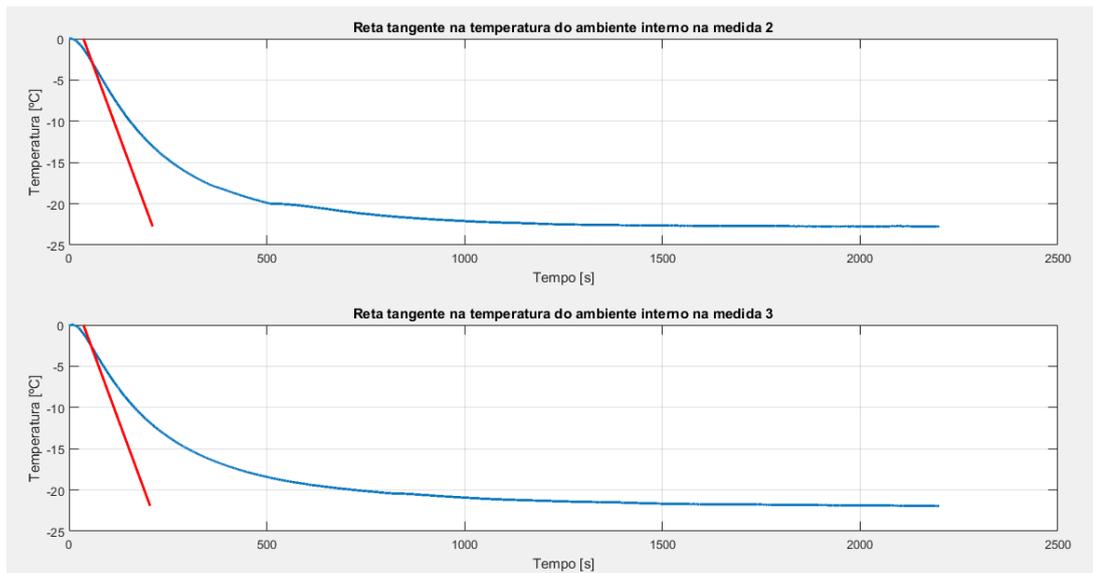
FIGURA 34 – MEDIDA 3: RESPOSTA AO DEGRAU UNITÁRIO COM 12 V E VENTOINHA INTERNA LIGADA EM 5 V



Fonte: os autores (2018).

Com as Medidas 2 e 3, com relação à curva de temperatura do ambiente interno, verifica-se que ela segue o formato de um sistema de primeira ordem. Com isso, aplicou-se sobre as duas curvas obtidas de temperatura interna os três métodos de modelagem de sistemas de primeira ordem (ZN, HAG e Smith). As curvas tiveram suas temperaturas iniciais descontadas de modo a iniciarem na temperatura de 0 °C. Após, foi traçada a reta tangente ao ponto de inflexão e obtidos os parâmetros de atraso de transporte, ganho e constante de tempo das duas curvas através dos três métodos. Com isso, foi feita uma comparação gráfica para se verificar qual dos métodos foi o mais eficaz, no sentido de se aproximar mais da curva real. Na figura 35 pode-se verificar a reta tangente ao ponto de inflexão da curva de temperatura interna da Medida 2, à esquerda e da Medida 3, à direita.

FIGURA 35 – RETA TANGENTE AO PONTO DE INFLEXÃO NAS MEDIDAS 2 E 3



Fonte: os autores (2018).

Aplicando as três metodologias de identificação de sistema de primeira ordem na curva da Medida 2, chega-se aos resultados da tabela 16. Aplicando na medida 3, chega-se aos resultados da tabela 17

TABELA 16 – Função de transferência de malha aberta para a medida 2.

Método	FT
ZN	$\frac{-22,75}{175,02s+1}e^{-36,38s}$
HUG	$\frac{-22,75}{205,62s+1}e^{-36,38s}$
Smith	$\frac{-22,75}{208,5s+1}e^{-33,5s}$

FONTE: os autores (2018).

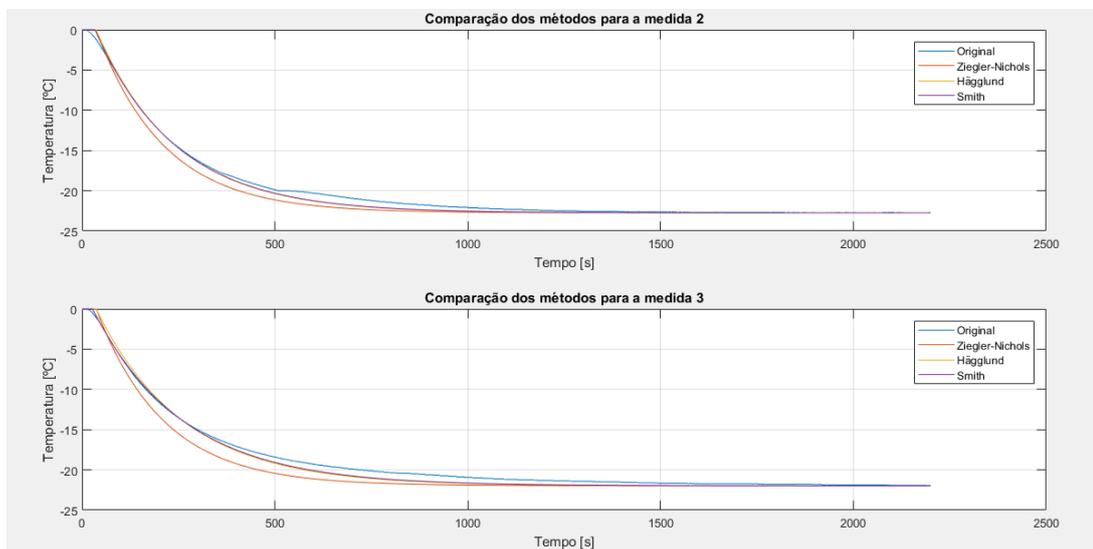
TABELA 17 – Função de transferência de malha aberta para a medida 3.

Método	FT
ZN	$\frac{-21,99}{174,99s+1}e^{-36,31s}$
HUG	$\frac{-21,99}{224,69s+1}e^{-36,31s}$
Smith	$\frac{-21,99}{234s+1}e^{-27s}$

FONTE: os autores (2018).

A comparação gráfica de cada método é ilustrado na figura 36. Em ambas pode-se perceber que os métodos de Hägglund e Smith possuem resultados melhores do que o método de Ziegler-Nichols. Foi escolhido então o método de Smith como sendo o modelo de sistema de primeira ordem a ser seguido e a função de transferência de malha aberta foi elaborada com a média das funções de transferência obtidas pelo método de Smith nas medidas 2 e 3. Com isso, essa função de transferência pode ser verificada na equação 35.

FIGURA 36 – COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS DE PRIMEIRA ORDEM NAS MEDIDAS 2 E 3



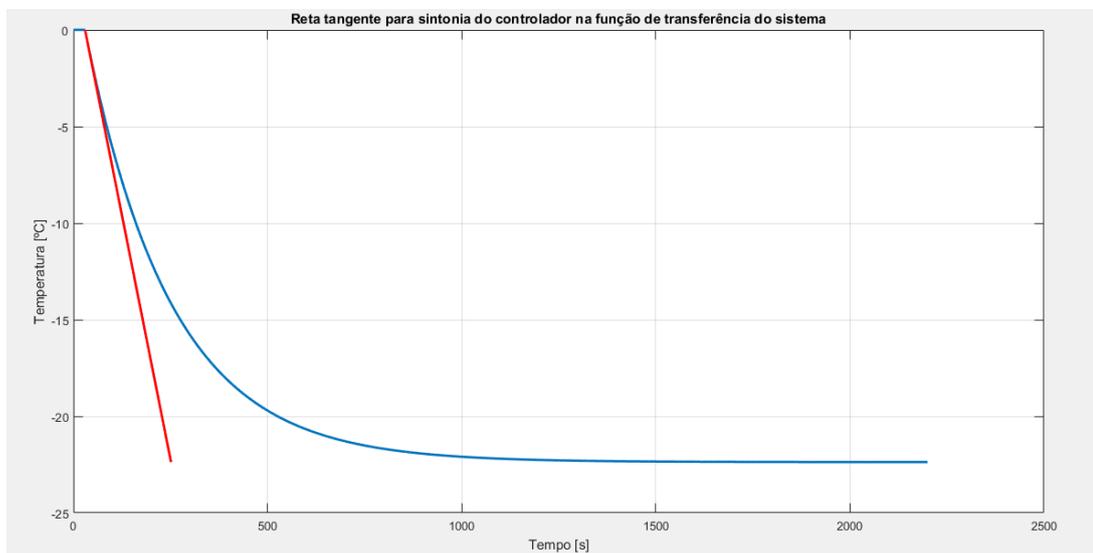
Fonte: os autores (2018).

$$G_p(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{-22.37}{221s + 1}e^{-30s} \quad (35)$$

3.6 SINTONIA DO CONTROLADOR

Através da função de transferência em malha aberta obtida e mostrada na equação 35, utilizou-se a sintonia de Ziegler-Nichols para se chegar aos parâmetros do controlador P, PI e PID. A reta tangente ao ponto de inflexão da curva na resposta ao degrau unitário, pode ser verificada na figura 37. A partir dessa figura foram obtidos os parâmetros $L = 30$, $\tau = 221,5$ e $R = -0,100$. Com esses valores, foi possível obter os parâmetros do controlador P, PI e PID conforme a tabela 1, e montar a tabela com esses parâmetros conforme pode ser visto na tabela 18.

FIGURA 37 – RESPOSTA AO DEGRAU UNITÁRIO DO SISTEMA E RETA TANGENTE AO PONTO DE INFLEXÃO



Fonte: os autores (2018).

TABELA 18 – Parâmetros obtidos pela sintonia Ziegler-Nichols.

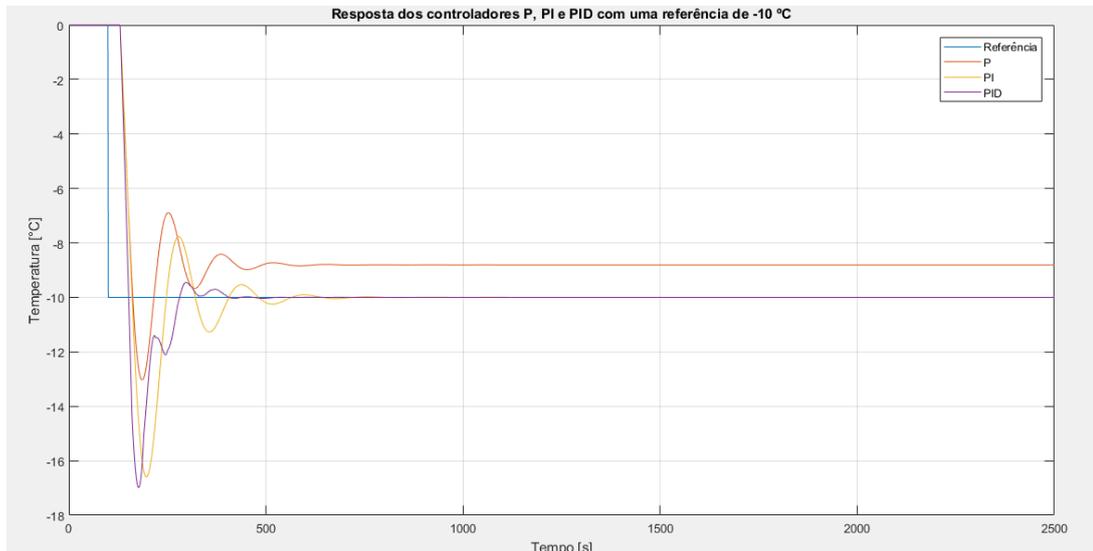
Controlador	K_p	T_i	T_d
P	-0,33	-	-
PI	-0,30	100	-
PID	-0,40	60	15

FONTE: os autores(2018).

Fazendo a simulação no Simulink dos controladores obtidos, com uma referência de $-10\text{ }^\circ\text{C}$, o resultado pode ser verificado na figura 39. O controlador do tipo P, possui um erro em regime permanente, o PI possui um sobressinal e oscila até estabilizar em $-10\text{ }^\circ\text{C}$. Já com PID, há uma diminuição da oscilação. Fazendo um ajuste fino no controlador PI, escolhendo

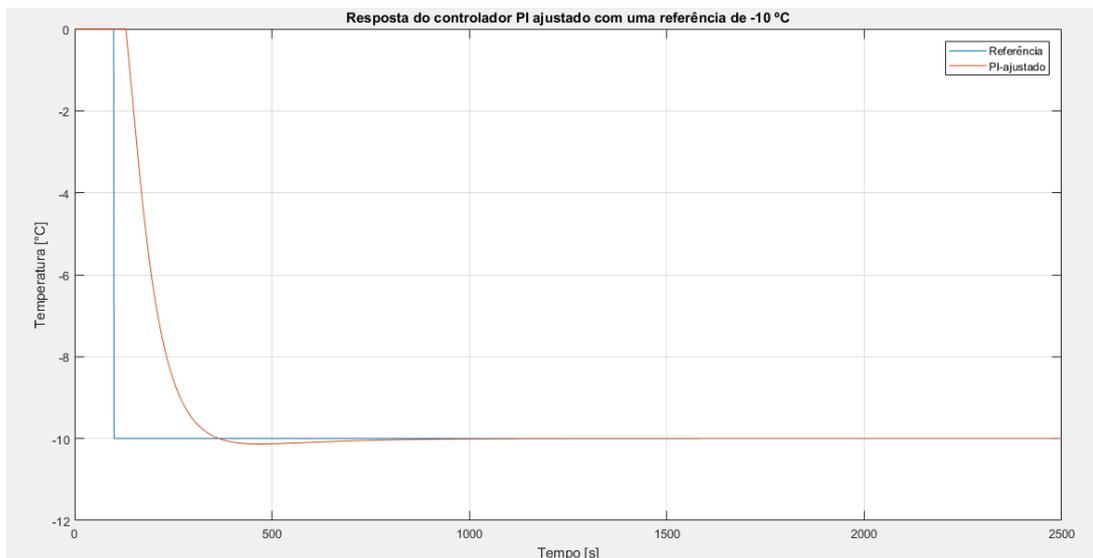
$K_p = -0,1$ e $T_i = 200$, ou seja, dividindo K_p por 3 e multiplicando T_i por 2, há uma melhora na resposta do controlador como pode se observar na figura ???. Não há mais sobressinal e nem oscilação decrescente até se estabilizar na referência.

FIGURA 38 – SIMULAÇÃO DOS CONTROLADORES OBTIDOS PELA SINTONIA ZIEGLER-NICHOLS



Fonte: os autores (2018).

FIGURA 39 – SIMULAÇÃO DO CONTROLADOR PI AJUSTADO



Fonte: os autores (2018).

Com os parâmetros obtidos pela sintonia Ziegler-Nichols, com os resultados de simulação e o ajuste feito no controlador PI, este controlador ajustado foi o escolhido para implementação.

3.7 IMPLEMENTAÇÃO NO CONTROLADOR

Para implementar o controle PI no microcontrolador Arduino, primeiramente há a necessidade de discretizar o controle PI. Utilizando o método de Tustin através da relação da equação 29 em 20 e fazendo a transformada z inversa, chega-se à equação a diferenças do controlador PI a ser implementada no microcontrolador Arduino, representada pela equação 36.

$$u[k] = u[k - 1] + K_p(e[k] - e[k - 1]) + \frac{K_p T_s}{2T_i}(e[k] + e[k - 1]) \quad (36)$$

Onde:

$u[k]$ -sinal de saída do controlador;

$e[k]$ -sinal de erro - entrada do controlador;

T_i -tempo integral;

K_p -ganho proporcional;

T_s -tempo de amostragem.

A equação 36 com os parâmetros $K_p = -0,1$, $T_i = 200$ e $T_s = 1$, pode ser visto em 37.

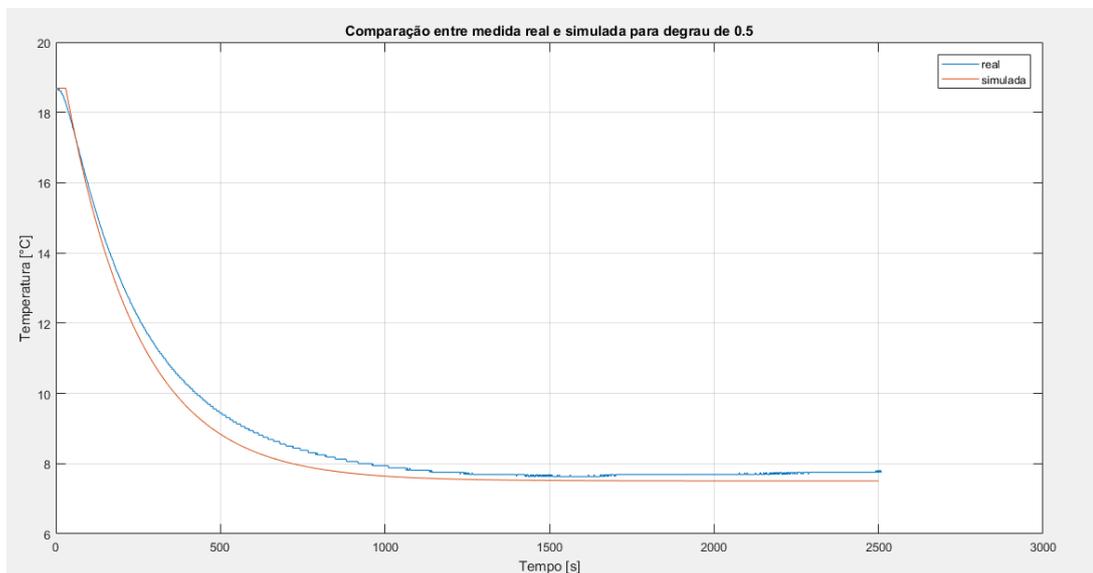
$$u[k] = u[k - 1] - 0,1(e[k] - e[k - 1]) - 0,00025(e[k] + e[k - 1]) \quad (37)$$

Verificando as equações 36 e 37, observa-se que há uma dependência da saída anterior do controlador bem como do erro atual e anterior (uma amostra antes). Além disso, a saída do controlador deve ser entre 0 e 1, sendo esses limites como o valor da razão cíclica no PWM que no Arduino é representado pelos números de 0 a 255, sendo a saída PWM de 8 bits. Com isso, é necessário a implementação no código de um saturador, em que caso a saída do controlador seja inferior a zero, torna essa saída zero e caso seja superior a 1, torna essa saída em 1. A temperatura de referência é a média entre as temperaturas permitidas para os medicamentos termolábeis, ou seja 5 °C. O código implementado pode ser verificado no Apêndice B.

4 RESULTADOS

Esse capítulo apresenta alguns resultados obtidos. Aplicando um degrau de 0,5 equivalente a uma razão cíclica de sinal PWM de 50 por cento, foi feita a comparação do sistema simulado com a função de transferência do processo mostrada em 35 com uma medida prática. Em ambas as situações considerou a temperatura interna inicial do recipiente como a real, de 18,69 °C. A figura 40 representa os resultados obtidos para a temperatura interna do recipiente. Pode-se verificar que as curvas se aproximam, mostrando que a função de transferência obtida está de acordo com o real.

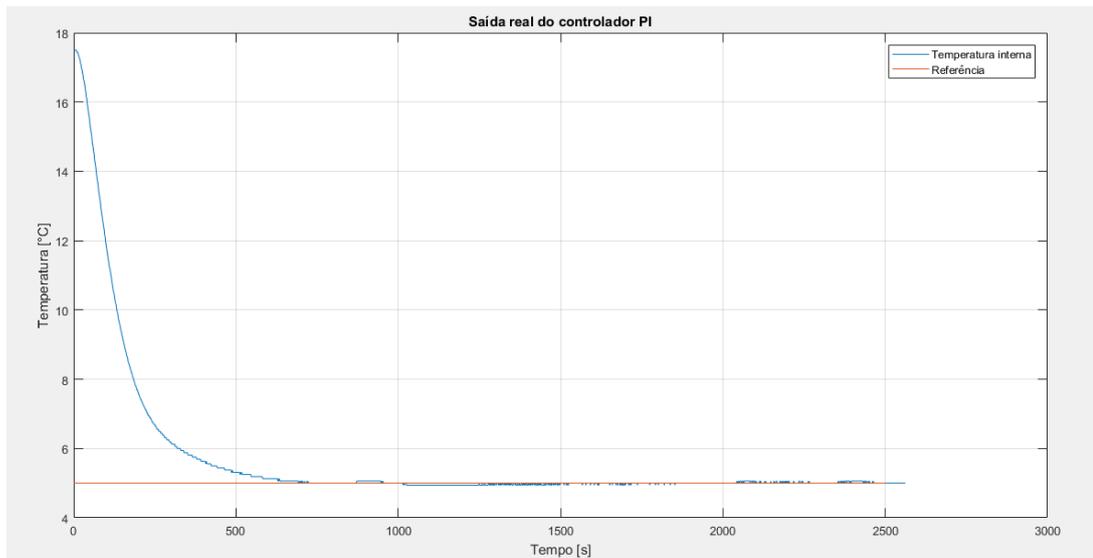
FIGURA 40 – COMPARAÇÃO ENTRE CURVAS DE TEMPERATURA INTERNA REAL E SIMULADA PARA ENTRADA DEGRAU DE 0.5



Fonte: os autores (2018).

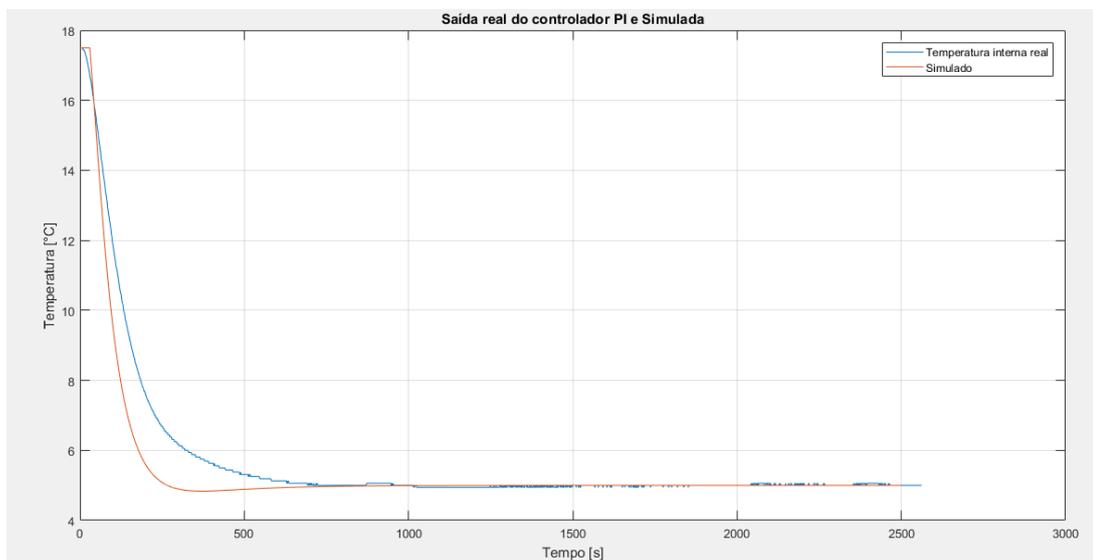
Foi medida a temperatura interna do controlador PI desenvolvido aplicado no microcontrolador. A temperatura de referência é de 5 °C. O resultado pode ser verificado na figura 41, na figura 42 pode ser comparado com a simulação. A temperatura inicial foi de 17,5 °C. Já na figura 43, pode-se verificar o sinal PWM do Arduino, sendo que esse sinal varia de 0 até 255, numa escala de 8 bits. O sinal inicia em 255 e estabiliza em 133, representando então 1 e 0,52.

FIGURA 41 – CURVA DE TEMPERATURA INTERNA REAL PARA CONTROLADOR PI



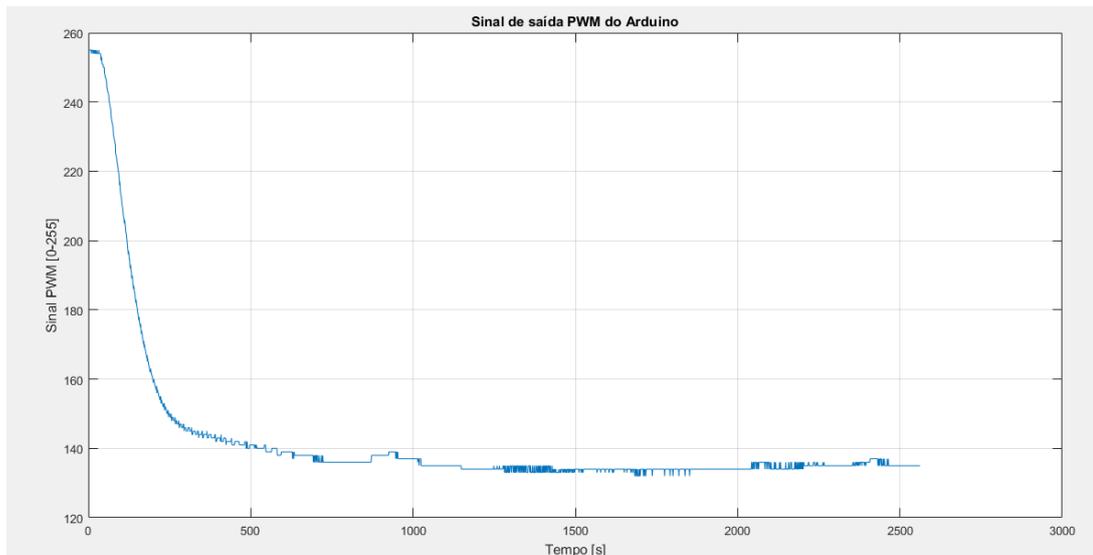
Fonte: os autores (2018).

FIGURA 42 – COMPARAÇÃO ENTRE CURVAS DE TEMPERATURA INTERNA REAL E SIMULADA PARA CONTROLE PI



Fonte: os autores (2018).

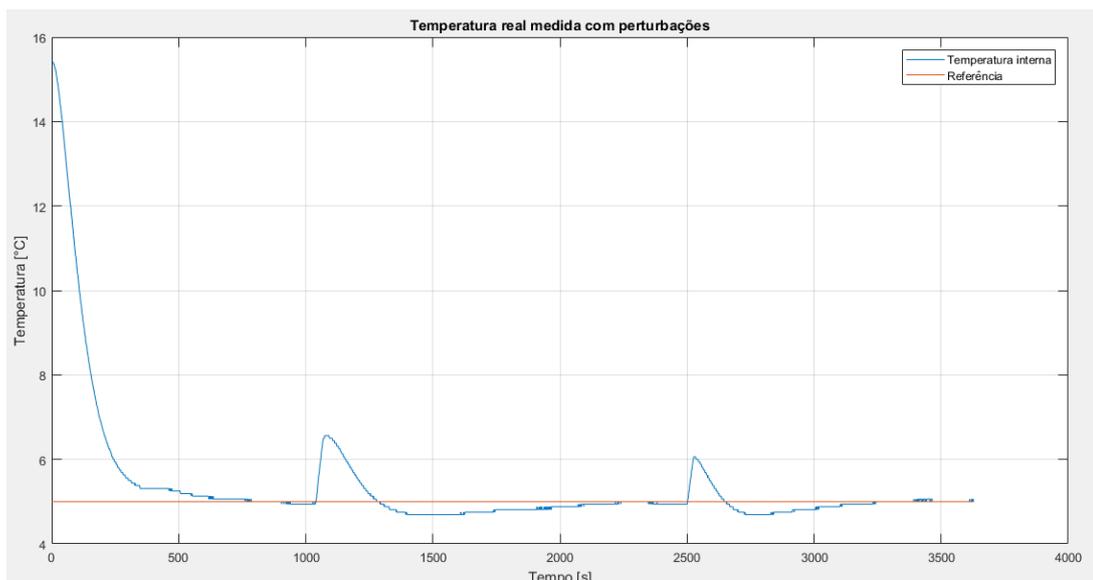
FIGURA 43 – SINAL DE SAÍDA PWM DO ARDUINO PARA CONTROLADOR PI



Fonte: os autores (2018).

Uma última medida foi feita para verificar o comportamento do controlador a alguns distúrbios. Foi colocado um volume de medicamento de formato cilíndrico de material de vidro, contendo água dentro. As dimensões desse volume de medicamento é de 6 cm de altura e 3 cm de diâmetro. Outra perturbação feita foi a de manter a porta aberta por cerca de 15 segundos e fechá-la em seguida, simulando o manuseio real do recipiente. A curva correspondente a essa medida pode ser observada na figura 44.

FIGURA 44 – TEMPERATURA INTERNA MEDIDA COM PERTURBAÇÕES



Fonte: os autores (2018).

As curvas mostram uma boa aproximação entre o real e simulado e também um

resultado satisfatório, visto que o sistema estabilizou a temperatura em 5 °C, o que era desejado e foi motivo para implementação de uma técnica de controle.

5 CONCLUSÃO

O trabalho iniciou com a construção do sistema físico em conjunto com o módulo termoeletrico. Em seguida foram obtidos os requisitos de tensão e corrente das ventoinhas e pastilha Peltier para então serem desenvolvidos e construídos os circuitos. Esse conjunto se mostrou bastante eficiente e junto com o sensor de temperatura escolhido, foram obtidos os valores de temperatura para que se chegasse a uma modelagem do sistema físico. A modelagem do sistema, obtida através de uma função de transferência de primeira ordem, mostrou resultados satisfatórios quando comparados com simulação e medidas reais. Por fim, a modelagem do sistema possibilitou que fosse aplicada a técnica de sintonia de Ziegler-Nichols para a aquisição dos parâmetros dos controladores P, PI e PID. Os resultados de simulação mostraram que o controlador do tipo PI iria suprir os requisitos do projeto. Foi feito então um ajuste fino de modo que, quando implementado no microcontrolador, os resultados mostraram que foram cumpridos o objetivo geral do trabalho, que era obter um sistema capaz de manter a temperatura dentro dos limites para medicamentos termolábeis, de 2 °C a 8 °C. O sistema foi capaz de manter a temperatura na referência escolhida de 5 °C.

Para trabalhos futuros, pode ser aumentado o volume útil do recipiente e colocado mais de uma pastilha Peltier. Outras técnicas de controle podem ser aplicadas e também pode ser feito um modelo do sistema na forma de variáveis de estado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARDUINO. **Arduino Mega 2560 Rev3 Overview**. Site do desenvolvedor, 2018. Disponível em: <<https://store.arduino.cc/usa/arduino-mega-2560-rev3>>. Acesso em: 20 mai 2018. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.

ATMEL. **8-bit Atmel Microcontroller with 16/32/64KB In-System Programmable Flash**. Datasheet, 2014. Disponível em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf>. Acesso em: 20 mai 2018. Citado na página 28.

CAETANO, S. **Comando de Ondulador de Tensão Trifásico por PWM e técnica U/F com implementação por Microcontrolador**. Lisboa: Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.

CASTRUCCI, P. de L.; BITTAR, A.; SALES, R. M. **Controle Automático**. Rio de Janeiro: LTC, 2011. Citado na página 26.

COELHO, A. A. R.; COELHO, L. dos S. **Identificação de Sistemas Dinâmicos**. 1. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 20, 21 e 22.

CRF-PR. **Cuidados no armazenamento de medicamentos sob refrigeração**. 2. ed. Centro de Informação sobre Medicamentos do Conselho Regional de Farmácia do Estado do Paraná, 2014. Disponível em: <http://www.crf-pr.org.br/uploads/revista/24141/cim_crf_pr_2_2014_web.pdf>. Acesso em: 21 mai 2018. Citado na página 11.

ENCINA, G. d. S. **Avaliação da qualidade no transporte de medicamentos no Brasil**. Rio de Janeiro: Fundação Oswaldo Cruz, 2012. Disponível em: <<https://www.arca.fiocruz.br/handle/icict/11128>>. Acesso em: 07 mai 2018. Citado na página 11.

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. **CD4049/CD4050 Data Sheet**. [S.l.], 1989. Disponível em: <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheetpdf/view/50859/FAIRCHILD/CD4050.html>>. Acesso em: 02 mai 2018. Citado na página 38.

FAIRCHILD SEMICONDUCTOR. **FQP30N06L 60 V Logic N-Channel MOSFET Data Sheet**. [S.l.], 2001. Disponível em: <http://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet_Mosfet_FQP30N06L.pdf>. Acesso em: 05 mar 2018. Citado na página 39.

FILIFELOP. **Componentes Eletrônicos**. Loja de Componentes, 2018. Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/>>. Acesso em: 20 mai 2018. Citado na página 32.

FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; EMAMI-NAEINI, A. **Sistemas de Controle para Engenharia**. 6. ed. Porto Alegre: bookman, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 22, 25 e 26.

GODOY, G. **Boas Práticas de Armazenagem, Distribuição e Transporte de Medicamentos**. 2. ed. São Paulo: Contento, 2012. Citado na página 11.

HPRA. **Health Products Regulatory Authority**. IA-G0011, 2011. Disponível em: <<https://www.hpra.ie/docs/default-source/publications-forms/guidance-documents/ia-g0011-guide-to-control-and-monitoring-of-storage-and-transportation-conditions-v1.pdf?sfvrsn=16>>. Acesso em: 07 mai 2018. Citado na página 11.

INCROPERA, F. et al. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. Rio de Janeiro: LTC, 2008. Citado na página 36.

INTEGRATED, M. **DSB18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer**. Datasheet, 2008. Disponível em: <<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>>. Acesso em: 20 mai 2018. Citado 3 vezes nas páginas 30, 31 e 32.

LINEYKIN, S.; BEN-YAAKOV, S. **Modeling and Analysis of Thermoelectric Modules**. IEEE Transactions on Industry Applications, v. 43, n. 2, p. 505–512, March 2007. ISSN 0093-9994. Citado na página 19.

LOURENÇO, J. **Sintonia de Controladores PID**. [S.l.]: Escola Superior de Tecnologia, 1997. Citado na página 24.

MS. **Manual de rede de Frio**. 3. ed. Brasília: Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde, 2001. Disponível em: <http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/3740546/4116233/manual_redefrio.pdf>. Acesso em: 21 mai 2018. Citado na página 11.

NOLAS, G.; SHARP, J.; GOLDSMID, J. **Thermoelectrics: Basic Principles and New Materials Developments**. 1. ed. New York: Springer, 2006. Citado na página 12.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. São Paulo: Pearson, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 22, 23 e 24.

ROWE, D. **Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano**. [S.l.]: CRC Taylor and Francis, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.

SANTANA, A. F. **Characterization of a Peltier module working as a thermoelectric generator**. Barcelona: Facultat de Física, Universitat de Barcelona, 2015. Citado na página 19.

SILVA, J. **Introdução à Tecnologia da Refrigeração e da Climatização**. São Paulo: Artiliber, 2003. Citado na página 12.

SOTUDO. **Componentes Eletrônicos**. Loja de Componentes, 2018. Disponível em: <<https://www.sotudo.com.br>>. Acesso em: 20 mai 2018. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 41.

TEXAS INSTRUMENTS. **ULN2803 Darlington Transistors Array Data Sheet**. [S.l.], 1997. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/uln2803a.pdf>>. Acesso em: 02 mai 2018. Citado na página 38.

TIPLER, A.; MOSCA, G. **Física para Cientistas e Engenheiros**. 6. ed. São Paulo: LTC, 2009. v. 1. Citado na página 14.

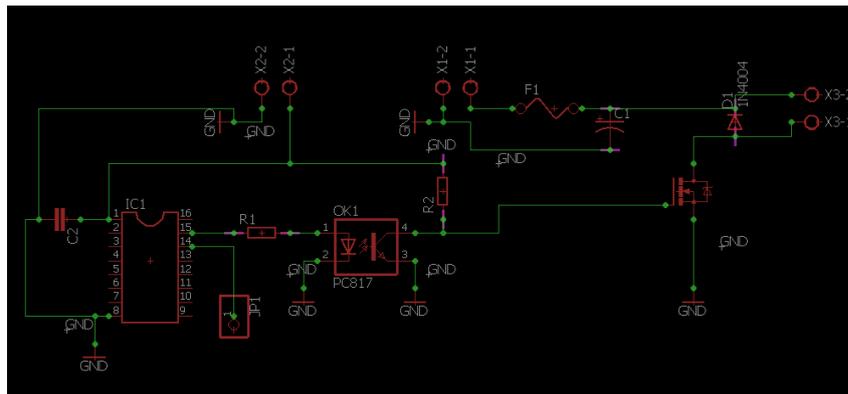
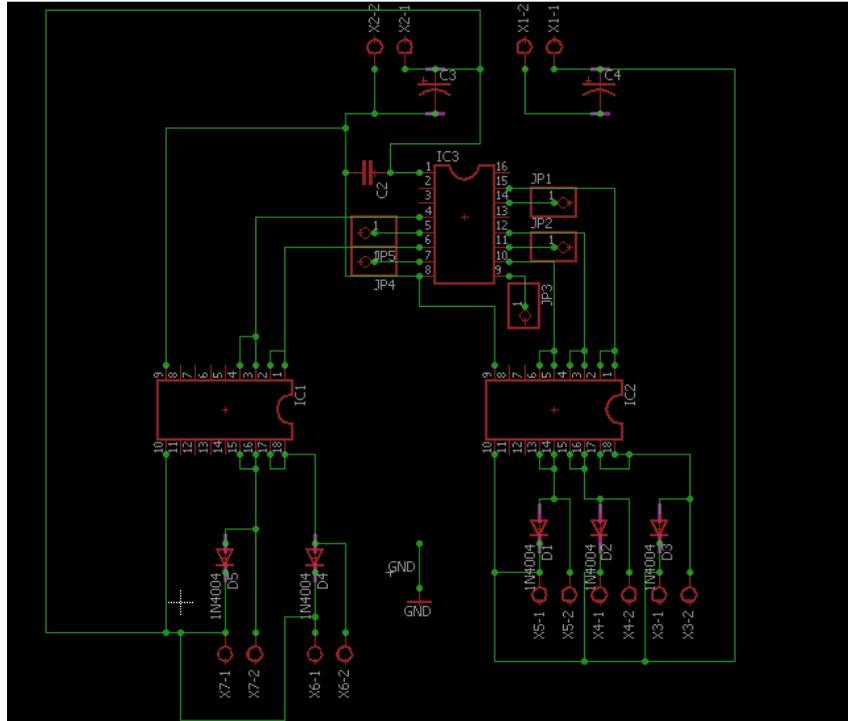
TSAI, H.; LIN, C. **Model building and simulation of thermoelectric module using Matlab/Simulink**. Journal of Electronic Materials, v. 39, p. 2105 – 2111, 2010. Citado na página 19.

ÇENGEL, Y.; GHAJAR, A. **Transferência de Calor e Massa-Uma Abordagem Prática**. 4. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 14, 15, 16 e 17.

APÊNDICES

APÊNDICE A – CIRCUITOS ESQUEMÁTICOS ELABORADOS NO SOFTWARE EAGLE

Os circuitos são respectivamente, o acionador das ventoinhas e o acionador do Peltier.



APÊNDICE B – CÓDIGO DO CONTROLADOR NO ARDUINO

```

// Arduino MEGA
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#define ONE_WIRE_BUS 3

float temperaturaatual=0;
float temperaturaanterior=0;
float erroatual=0;
float erroanterior=0;
float saidaatual=0; //sinal de saida atual do controlador
float saidaanterior=0; //saida anterior do controlador
int sinaldesaida=0; //sinal de saida PWM Arduino
float ref=5; //refer ncia
float controle=0;//sem passar pelo teste de saturacao

//Aquisicao dos sensores de temperatura
float temperatura1=0;
float temperatura2=0;
float temperatura3=0;
float temperatura4=0;

float Kp=-0.1;
float Ti=200; //Kp*1/Ti
float Ts=1; //tempo de amostragem

// Variaveis do sensor de temperatura
float tempo=0;
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);

// Rele
int portarele1=22;
int portarele2=24;

//ventoinhas

```

```
int interno1=8;
int externo1=9;
int externo2=10;

//Peltier
int Peltier1=11;

void setup() {

    //Define pinos como saida
    pinMode(portarele1 , OUTPUT);
    pinMode(portarele2 , OUTPUT);
    pinMode(externo1 , OUTPUT);
    pinMode(externo2 , OUTPUT);
    pinMode(interno1 , OUTPUT);
    pinMode(Peltier1 , OUTPUT);

    // Estado inicial – desligado
    digitalWrite(portarele1 , HIGH);
    digitalWrite(portarele2 , HIGH);
    digitalWrite(externo1 , LOW);
    digitalWrite(externo2 , LOW);
    digitalWrite(interno1 , LOW);
    digitalWrite(Peltier1 , LOW);

    // start serial port
    Serial.begin(9600);
    // Start up the library
    sensors.begin();
    Serial.println("\nParametros\n");

}

void loop() {

    if (tempo==30)//liga rele
```

```

{

digitalWrite(portarele1 , LOW);
digitalWrite(portarele2 , LOW);

}

// Condições iniciais
if (tempo==50)
{
digitalWrite(externo1 , HIGH);
digitalWrite(externo2 , HIGH);
digitalWrite(interno1 , HIGH);
digitalWrite(Peltier1 ,HIGH);
saidaatual=1;
}

// Obtendo Temperatura
sensors.requestTemperatures(); // Send the command to get temperatures

temperatura1=sensors.getTempCByIndex(0);
temperatura2=sensors.getTempCByIndex(1);
temperatura3=sensors.getTempCByIndex(2);
temperatura4=sensors.getTempCByIndex(3);

//Inicia o controlador
if(tempo>=51)

{
temperaturaatual=temperatura1;
erroatual=ref-temperaturaatual;

saidaatual=saidaanterior+(Kp*(erroatual-erroanterior))+((Kp*Ts)/(2*Ti))*
controle=saidaatual;

```

```
//saturador
if (saidaatual >=1)
{
    saidaatual=1;
}
if (saidaatual <=0)
{
    saidaatual=0;
}

    sinaldesaida=int(saidaatual*255);
    analogWrite(Peltier1 , sinaldesaida );

}

//saida serial
Serial.print("t=");
Serial.print(tempo);
Serial.print(";");
Serial.print(temperatura1);
Serial.print(";");
Serial.print(temperatura2);
Serial.print(";");
Serial.print(temperatura3);
Serial.print(";");
Serial.print(temperatura4);
Serial.print(";");
Serial.print(saidaanterior);
Serial.print(";");
Serial.print(saidaatual);
Serial.print(";");
Serial.print(sinaldesaida);
Serial.print(";");
Serial.print(temperaturaanterior);
Serial.print(";");
Serial.print(temperaturaatual);
Serial.print(";");
Serial.print(erroanterior);
```

```
Serial.print(";");
Serial.print(erroatual);
Serial.print(";");
Serial.print(controle);
Serial.print("\n");

//Pega parametros anteriores
temperaturaanterior=temperatura1;
erroanterior=ref-temperaturaanterior;
saidaanterior=saidaatual;

delay(1000);
tempo+=1;

}
```

ANEXOS

ANEXO A – PARÂMETROS DO PELTIER

Os parâmetros da Pastilha Peltier foram obtidos de três sites distintos de venda desse produto. <<https://www.sotudo.com.br/>> em que nesta loja foi adquirida a Pastilha. Outro site é <<http://www.radarindustrial.com.br/produto/149083/pastilha-termoeletrica-peltier.aspx>> e outro é <<http://www.hbstore.com.br/produto/136070/pastilhas-termoeletricas-peltier.aspx>>. As imagens retiradas dos sites, mostram as características desses produtos, de ambos os sites respectivamente. O site do fabricante é <<http://asafan.com.br/>>.

DESCRIÇÃO DO PRODUTO

PASTILHA PELTIER PARA ADEGAS

De um lado aquece e de outro esfria

Tensão de Operação: 12Volts

Tensão Maxima : 15,2Volts

Corrente maxima: 6 Ampéres

Diferença de temperatura(ΔT) 67°C

Consumo(W): 120 Watts

Tamanho(cm): 4,0 × 4,0 × 0,3

Impedancia(Ω) 1.9 ~ 2.2Ohms

USADA EM BEBEDOUROS, MINI GELADEIRAS, CAIXAS TÉRMICAS, ADEGAS

Descrição do produto

Pastilha Termoeétrica Peltier para Bebedouros Eletrônicos.

Especificações técnicas

Tamanho: 40x40mm

Material: Cerâmica, Fios

Voltagem: 15.4

AMP: 6A

Geração de Frio: 61W

Descrição

Características

Dimensão: 40 x 40 mm

Fio de Ligação: 350mm (O comprimento do fio pode ser definido pelo cliente). O final do fio está descascado 8mm e estanhado

VERMELHO - Positivo

PRETO - Negativo

Dados de Energia

Voltagem (máxima): 15.4v

AMP (máxima): 6A

Geração de Frio (máxima): 61W

Resistência de Energia Interna (1Khz): 1.9-2.1

Temperatura

Diferença de Temperatura: >65o.C

Geração Máxima de Calor: Temperatura máxima inferior a 90o.C

Teste Mecânico

Teste de resistência dos fios com peso de 1.8Kg durante 10 segundos