

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA  
CURSO DE ENGENHARIA ELETRÔNICA

HUZIEL RAMOS SOUTO

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA AUXÍLIO AO CÁLCULO DA  
DIFUSIVIDADE TÉRMICA DE ALIMENTOS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAMPO MOURÃO

2019

HUZIEL RAMOS SOUTO

**DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA AUXÍLIO AO CÁLCULO DA  
DIFUSIVIDADE TÉRMICA DE ALIMENTOS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso Superior de Engenharia Eletrônica do Departamento Acadêmico de Eletrônica - DAELN - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro em Eletrônica.

Orientador: Prof. Me. Lucas Ricken Garcia

CAMPO MOURÃO

2019



TERMO DE APROVAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO INTITULADO

Desenvolvimento De Equipamento Para Auxílio Ao Cálculo Da Difusividade Térmica De Alimentos

DO(A) DISCENTE

Huziel Ramos Souto

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no dia 16 de agosto de 2019 ao Curso Superior de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Campo Mourão. O(A) discente foi arguido(a) pela Comissão Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a comissão considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Marcio Rodrigues da Cunha  
Avaliador(a) 1  
UTFPR

---

Prof. Thiago dos Santos Cavali  
Avaliador(a) 2  
UTFPR

---

Prof. Lucas Ricken Garcia  
Orientador(a)  
UTFPR

**Nota:** O documento original e assinado pela banca examinadora encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia de Eletrônica da UTFPR campus Campo Mourão.

## **Agradecimentos**

A Deus, que nos momentos mais difíceis, naqueles em que pensei até desistir, mostrou o caminho e me deu força para continuar.

A meus Pais Diocelia e Geraldo, minha irmã Rita e a todos os familiares, que me sempre me incentivaram a estudar, em especial a minha Mãe, que não mediu esforços para que eu pudesse me dedicar apenas a faculdade.

A Cristiane G. Miranda que me acompanhou durante praticamente toda a jornada da faculdade.

Aos meus amigos que a faculdade me deu a oportunidade de conhecer e que fizeram essa jornada menos difícil, tivemos bons e maus momentos, mas no final as coisas sempre deram certo e depois tudo era motivo de risos.

Aos professores do DAELN, que compartilharam seus conhecimentos e experiências, contribuindo para a minha formação.

Ao Prof. Dr. Bogdan Demczuk e aos alunos do DALIM, que realizaram testes e colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Msc. Lucas Ricken, pela oportunidade e pela paciência durante o desenvolvimento do presente trabalho.

A Pro Solus do Brasil LTDA, que forneceu alguns materiais para o trabalho.

Aos professores e funcionários da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Campo Mourão que contribuíram para a minha formação, direta ou indiretamente.

Agradeço a todos que colaboraram de alguma forma para que esta que fosse possível completar esta jornada.

Muito obrigado!!

## RESUMO

SOUTO, Huziel Ramos. **Desenvolvimento de um equipamento para auxílio ao cálculo da difusividade térmica de alimentos**. 2019. 46 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Eletrônica, Daeln, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2019.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um equipamento para auxílio ao cálculo da difusividade térmica de alimentos. A partir do estudo do método utilizado pelos pesquisadores do DALIM, na UTFPR-CM, verificou-se a possibilidade de automatizar parte do experimento e desenvolver um equipamento dedicado ao mesmo. Com isso definiu-se como objetivo desenvolver um sistema de aquisição e monitoramento de dados de temperatura utilizado para o cálculo da difusividade térmica, que disponibiliza os dados de maneira simples aumentando a qualidade e praticidade do experimento, desenvolver um banho termostático e realizar a integração entre o sistema de aquisição de dados e o banho termostático desenvolvido. A execução do equipamento foi dividida em etapas para otimizar o processo. O equipamento de aquisição de dados e interface gráfica foi o primeiro a ser desenvolvido e testado, utilizou-se a placa *Raspberry Pi 3B*, Termopares tipo-K e conversores MAX-6675. Em seguida foi desenvolvido o banho termostático. Em seu desenvolvimento utilizou-se o conversor CA-CA gradador monofásico e uma resistência de 1000 W. O banho térmico foi integrado ao sistema de aquisição de dados e testado, durante o processo de integração não ocorreram problemas. Os testes realizados com o equipamento integrado foram bem-sucedidos e os resultados atendem a necessidade do experimento. Contudo cabem melhorias como implementação de um controle de temperatura realimentado e sistema de comunicação sem fio como *Bluetooth* e *Wi-Fi*, que são nativos da placa *Raspberry Pi 3B*.

**Palavras chaves:** *Raspberry*, Gradador, Difusividade, sistemas embarcados, otimização de processos.

## ABSTRACT

SOUTO, Huziel Ramos. **Development of equipment to aid the calculation the thermal diffusivity of food.** 2019. 43 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Eletrônica, Daeln, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2019.

This paper presents the development of equipment to assist the calculation of the thermal diffusivity of foods. From the study of the method used by DALIM researchers at UTFPR-CM, it was possible to automate part of the experiment and develop a dedicated equipment for it. Thus, the objective was to develop a temperature data acquisition and monitoring system used for the thermal diffusivity calculation, which makes the data available in a simple way, increasing the quality and practicality of the experiment, developing a thermostatic bath and integrating the temperature. the data acquisition system and the thermostatic bath developed. The execution of the equipment was divided into steps to optimize the process. The data acquisition and graphical interface equipment was the first to be developed and tested, using the Raspberry Pi 3B card, K-type thermocouples and MAX-6675 converters. Thereafter the thermostatic bath was developed. In its development the single-phase AC-AC converter with a 1000 W resistance was used. The thermal bath was integrated with the data acquisition system and tested, during the integration process there were no problems. The tests performed with the integrated equipment were successful and the results comply the requirements of the experiment. However, improvements include the implementation of a feedback temperature control and wireless communication system such as Bluetooth and Wi-Fi, which are native to the Raspberry Pi 3B card.

**Keywords:** Raspberry *PI*, Grader, Diffusivity, embedded systems, process optimization.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição do método Flash-Laser. ....	12
Figura 2 - Sensor usado no método da Fonte Plana Transiente .....	13
Figura 3 - Fluxograma do método de Dickerson .....	14
Figura 4 - Método de Dickerson. ....	15
Figura 5 - Exemplo de um sistema de aquisição de dados. ....	16
Figura 6 - Operação por ciclos inteiros.....	18
Figura 7 - Topologia básico gradador.....	20
Figura 8 - Sinais de tensão na entrada e na carga, e corrente na carga.....	20
Figura 9 - Abstração do equipamento. ....	22
Figura 10 - Fluxograma do Equipamento desenvolvido .....	23
Figura 11 - Circuito de detecção de passagem por zero e parte do circuito de condicionamento do sinal.....	27
Figura 12 - (a) Sinal na saída do opto acoplador e (b) Sinal na saída do buffer. ....	27
Figura 13 - Segunda parte do circuito de condicionamento Driver 3,3V .....	28
Figura 14 - Circuito do Gradador monofásico (Dimmer).....	28
Figura 15 - Perturbações na medição da temperatura .....	29
Figura 16 - Realização dos testes com equipamento em banho térmico comercial. .	30
Figura 17 - Interface gráfica durante um experimento com amostra de polpa de uva. ....	31
Figura 18 - Protoboard com circuitos montados (esquerda) e placa PCI montada (direita). ....	32
Figura 19 - Equipamento montado. ....	33
Figura 20 - Teste pré-acionamento da resistência. ....	34
Figura 21 - Equipamento desenvolvido. ....	34
Figura 22 - Sinal sobre a carga durante o teste 1. ....	35
Figura 23 - Curva de aquecimento durante o teste 1. ....	35
Figura 24 - Sinal sobre a carga durante o teste 2. ....	36
Figura 25 - Curva de aquecimento durante o teste 2. ....	36
Figura 26 - Sinal na carga durante o teste 3. ....	37
Figura 27 - Curva de aquecimento durante o teste 3. ....	37

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

ADC	Conversor Analógico-Digital
DAELN	Departamento Acadêmico de Eletrônica
DALIM	Departamento Acadêmico de Alimentos
DAQ	Aquisição de Dados
CA	Corrente Alternada
CA-CA	Conversor de Corrente Alternada para Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CI	Circuito Integrado
HMTL	Hyper Text Markup Language (Linguagem de Marcação de Hipertexto)
HTTP	Hypertext Transfer Protocol (Protocolo de Transferência de Hipertexto)
IEM	Interferência Eletromagnética
IHM	Interface Homem Máquina
IO	Input-Output (Entrada-Saída)
LED	Diodo Emissor de Luz
NAND	Porta lógica “E”, com saída negada.
PCI	Interconector de Componentes Periféricos
PHP	Hypertext Preprocessor (linguagem de programação interpretada livre)
PHP5	Hypertext Preprocessor 5 (linguagem de programação interpretada livre 5)
PI	Proporcional e Integral
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
PORT	Porta ou Terminal
PWM	Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso)
RMS	Root Medium Square (Raiz Média Quadrada)
RTD	Resistance Temperature Detector (termorresistência)
SMD	Surface-Mount Device (Componente para montagem em superfície)
SPI	Protocolo entre periféricos de Interface Serial
TRIAC	Triode for Alternating Current (tiristor)
USB	Barramento Serial Universal
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal Do Paraná



## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>7</b>
1.1. OBJETIVOS .....	8
1.1.1. Objetivos Específicos .....	9
1.2. JUSTIFICATIVA .....	9
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>10</b>
2.1. DIFUSIVIDADE .....	10
2.2. MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE.....	11
2.2.1. Método Laser-Flash.....	11
2.2.2. Método de Gustafsson .....	13
2.2.3. Método de Dickerson.....	14
2.3. AQUISIÇÃO E APRESENTAÇÃO DOS DADOS .....	15
2.3.1. Aquisição dos dados .....	15
2.4. CONTROLE DE POTÊNCIA CA.....	17
2.4.1. Controle Liga-Desliga .....	18
2.4.2. Modulação por Largura de Pulso.....	19
2.4.3. Gradador monofásico .....	19
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	<b>22</b>
3.1. MATERIAIS E METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO .....	23
3.2. METODOLOGIA DE TESTES UTILIZANDO AMOSTRAS DE ALIMENTOS ...	25
3.3. MATERIAIS E METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DO BANHO TÉRMICO.....	26
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>29</b>
4.1. TESTE 1:.....	35
4.2. TESTE 2:.....	36
4.3. TESTE 3:.....	37
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	<b>39</b>
5.1. TRABALHOS FUTUROS.....	39
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>40</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O crescimento da demanda de produtos alimentícios no país traz como consequência exigências na modernização, adequação dos processos, e maior qualidade para as indústrias. Exigências estas que só serão cumpridas com maior conhecimento científico dos métodos de produção, proporcionando desde o conhecimento das propriedades físicas até os cálculos necessários para o dimensionamento de processos (MOURA, FRANÇA e LEAL, 2005).

O desconhecimento de tais características e do comportamento diante das variações de temperatura podem levar ao inadequado processamento de alimentos, gerando prejuízos tanto no âmbito monetário como na qualidade e nas características do produto final (MOURA, FRANÇA e LEAL, 2005).

Controlar a temperatura durante a elaboração, armazenagem, transporte e comercialização dos gêneros alimentícios é muito importante. Em um processo industrial, pode-se limitar o consumo de energia e, conseqüentemente, diminuir o custo da produção, reduzir os resíduos provenientes da queima dos combustíveis usados na geração do calor, diminuir o impacto ao meio ambiente desta atividade e possibilitar uma maior produção com uma quantidade menor de poluição. Por outro lado, o controle da temperatura é um importante mecanismo de controle microbiológico, impedindo que a qualidade e as características do alimento sejam afetadas (GLAVINA, *et al.*, 2006; BAÏRI, *et al.*, 2007).

Neste contexto, o estudo das propriedades termofísicas é muito importante, dentre elas podemos citar as duas mais importantes: a difusividade e a condutividade térmica, ambas são parâmetros críticos no desenvolvimento e projeto de equipamentos e processos térmicos nas indústrias alimentícias (BROCK *et al.*, 2008). A condutividade térmica é um coeficiente que quantifica a taxa da transferência de calor ao longo de um gradiente de temperatura, que é definido pela Lei de Fourier da capacidade térmica dos materiais, e pode ser definida como a velocidade com que o calor é conduzido através do material. Já a difusividade térmica é a razão entre a condutividade térmica e a capacidade calorífica do material, é um parâmetro que quantifica a habilidade do material em armazenar energia térmica durante o processo de transferência de calor. A difusividade é a taxa que a energia térmica se difunde em um material por condução (HUANG e LIU, 2009).

Para a determinação da difusividade térmica encontram-se vários métodos descritos na literatura, tais como: método *Laser-Flash*, amplamente utilizado para medições de difusividade térmica e condutividade térmica de vários tipos de sólidos, pós e líquidos. Este método foi descrito pela primeira vez por Parker *et. al.* (1961), o método Fonte Plana Transiente que tem sido usado para medir as propriedades térmicas de sólidos e líquidos, na faixa que vai desde temperaturas criogênicas até 1500 °C. Este método é detalhado por Maqsood *et al.* (2013). Utilizando este método Huang e Liu (2009), obtiveram dados da condutividade térmica de alimentos, materiais agrícolas entre outros (MAXWELL PUC-RIO, 2013), e o método de Dickerson, que é o mais antigo e comumente é observado em trabalhos da área de ciência de alimentos tais como ARAUJO, QUEIROZ e FIGUEIREDO (2004), e BHOWMIK e HAYAKAWA (1979).

O método de Dickerson propõe a utilização de um banho térmico para prover um aumento gradual da temperatura e a realização do monitoramento da temperatura de uma amostra (em um recipiente cilíndrico) em relação à temperatura do banho térmico. As informações sobre o (i) gradiente de temperatura, (ii) taxa de aumento da temperatura do banho e (iii) dimensões do recipiente em que está a amostra são utilizadas para calcular a difusividade térmica da amostra estudada. (ARAÚJO, QUEIROZ e FIGUEIRÊDO, 2004)

Por mais que seja um procedimento relativamente simples, o método deve ser aplicado para um determinado intervalo de temperatura e ser monitorado durante todo o processo de aquecimento do banho térmico até sua estabilização. Se exemplificado, no caso de um intervalo de 20 °C a 70 °C e uma taxa de aumento da temperatura de 1 °C/min, o experimento teria um tempo de 50 minutos de execução.

Observou-se, portanto, uma oportunidade de automatizar os procedimentos para aplicação do método de Dickerson e auxiliar no cálculo da difusividade térmica

## 1.1. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral desenvolver um equipamento que irá, de forma automatizada, aquecer um banho térmico, monitorar e realizar a aquisição de dados de temperatura para o cálculo da difusividade térmica em alimentos.

### 1.1.1. Objetivos Específicos

- Desenvolver um equipamento de aquisição e monitoramento de dados de temperatura utilizados para o cálculo da difusividade térmica, que possa ser integrado a um banho termostático comercial;
- Aumentar praticidade do experimento para difusividade térmica;
- Desenvolver banho térmico exclusivo para o experimento e integrá-lo ao equipamento de aquisição e monitoramento de dados de temperatura, minimizando a necessidade de ajuste e agendamento de equipamentos extras para realização do experimento.

## 1.2. JUSTIFICATIVA

Na literatura encontra-se alguns exemplos da realização de vários experimentos, de grande influência no custo de manufatura de produtos alimentícios, que ainda são realizados manualmente; um deles é o experimento para determinação da difusividade térmica em alimentos (HUANG e LIU, 2009). Tendo-se como referência pesquisas realizadas no Departamento Acadêmico de Engenharia de Alimentos da UTFPR *campus* Campo Mourão, o procedimento é realizado de forma manual utilizando banho térmico comercial disponível nos laboratórios do departamento.

De fato, o procedimento requer um pesquisador monitorando e anotando os valores de temperatura durante todo o experimento. A aquisição dos dados ocorre em intervalos de aproximadamente 1 minuto durante um período de 50 a 70 minutos. A coleta de dados de forma manual pode ser prejudicada a medida que aumenta-se o tempo de execução do experimento, uma vez que o cansaço e a repetição manual podem ocasionar erros de medição no processo.

Neste sentido, é interessante otimizar este processo de determinação da difusividade térmica, automatizando-o e visando proporcionar melhor confiabilidade, precisão, segurança e praticidade.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo apresentam-se conceitos de difusividade térmica, propriedades termofísicas relacionadas, a importância destas propriedades para a indústria de alimentos; métodos para a determinação de propriedades termofísicas, forma como são executados, características positivas e negativas, e exemplos de trabalhos que utilizaram o método. Além disso apresentam-se os principais conceitos sobre um sistema de aquisição de dados integrado com uma interface gráfica: composição, características dos componentes e interface gráfica; e conceitos controle de potência CA: formas simples de controle da potência entregue a carga e suas características.

### 2.1. DIFUSIVIDADE

A difusividade térmica ( $\alpha$ ) pode ser expressa pela razão entre a condutividade térmica e a capacidade calorífica do material. Ela é um parâmetro que quantifica a habilidade do material em armazenar e transferir energia térmica durante o processo de transferência de calor (HUANG e LIU, 2009). Portanto quanto maior o valor da difusividade térmica mais rápida será a propagação do calor no material. (SANTOS, FILHO, *et al.*, 2004)

Esta propriedade termo física pode ser expressa pela equação (1):

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} , \quad (1)$$

Onde:

$\alpha$  = difusividade térmica ( $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ );

$k$  = condutividade térmica ( $\text{W}.\text{m}^{-1} \text{K}$ );

$\rho$  = densidade ( $\text{kg}.\text{m}^{-3}$ ) e

$c$  = calor específico ( $\text{J}.\text{kg}^{-1} \text{K}$ ).

Segundo Leal (2017, p. 16) “Materiais de alto valor de difusividade térmica são altamente sensíveis a variações de temperatura em seu ambiente, enquanto que materiais com baixo valor de difusividade térmica apresentam lenta resposta à variação da temperatura no seu ambiente, levando mais tempo para atingir o novo estado de equilíbrio” (apud MERCALI *et al.* 2011).

A “velocidade de reação” do material a variação de temperatura no ambiente é explicada pelo grau de agitação das moléculas, como visto na equação 1, o valor de  $\alpha$ , se relaciona com a densidade  $\rho$ , fazendo referência a quantidade de moléculas em determinada área. O fator densidade é muito importante quando se trata de transferência de calor por condução, pois quanto maior a densidade menor será o espaço entre as moléculas, fazendo com que as vibrações sentidas devido a variação na temperatura por uma molécula seja facilmente repassada para as outras. Como exemplo podemos citar uma barra de ferro e um graveto de madeira, ambos com as mesmas dimensões. Segura-se a ponta da barra e o graveto, e coloca-se a outra ponta sobre uma fonte de calor, a velocidade com que o calor será transferido pela da barra será maior que a velocidade do calor transferido pelo graveto, devido ao fato da densidade de moléculas por área da barra de ferro ser maior que a densidade do graveto. (FILHO, 2012)

Desta forma, conhecer a difusividade térmica de um alimento tem sido de grande importância para a indústria alimentícia visto que o conhecimento desta e de outras propriedades termofísicas dos alimentos processados geram economia de recursos para a geração de calor e mantem-se a qualidade dos produtos, pois muitas vezes devido ao processamento em temperaturas inadequadas ocorrem perdas das propriedades nutricionais. (MOURA, FRANÇA e LEAL, 2005; GLAVINA, *et al.*, 2006; BAÏRI, *et al.*, 2007).

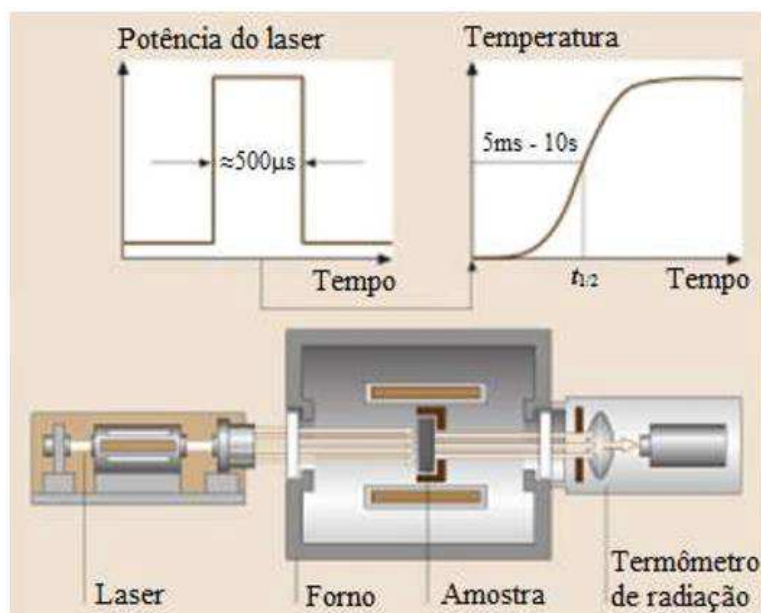
## 2.2. MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE

### 2.2.1. Método Laser-Flash

O método Laser-Flash foi descrito por Parker *et al.* (1961), nesta técnica é disparado um feixe de laser com alta intensidade e curta duração sobre a amostra que está armazenada dentro de um recipiente em forma de disco. Este recipiente possui em sua parte interna de suas faces frontal e traseira, discos metálicos de espessura laminar para absorver o calor e o conduz para a amostra, e é posicionado dentro de um forno que por sua vez isola o ambiente interno e externo para que não haja troca de calor. No forno existem duas aberturas, estas que possibilitam a entrada do feixe de laser e a leitura da temperatura. O feixe de laser entra pela abertura na face frontal

do forno e atinge a face frontal da amostra, a amostra absorve a energia do feixe de laser, este efeito gera calor e é transmitido pela amostra. Um termômetro de radiação (infravermelho) mede a variação da temperatura (TADA *et al.*, 1978). A Figura 1 ilustra o método.

Figura 1 - Composição do método Flash-Laser.



Fonte - Maxwell PUC-RIO (2013) apud Czichos (2012).

Esse método possui a vantagem de não necessitar que a fonte de aquecimento ou o sensor de temperatura estejam em contato com a amostra, fazendo com que seja adequado para uso em amostras em altas temperaturas ou em ambientes agressivos. Em contra partida este método requer uma série de cuidados que devem ser tomados para que não haja influência nos resultados, um desses cuidados é que caso não utilize os discos metálicos nas faces do recipiente que contêm a amostra, geralmente ocorre em casos de amostras de sólidos ou opacas, deve-se alterar os cálculos da teoria e considerar a transferência de calor não unidirecional, pois o feixe de laser é menor que a amostra (MAXWELL PUC-RIO, 2013).

Quando a amostra é transparente deve-se tomar cuidados adicionais utilizando aparatos que impeçam que o feixe de laser atravesse até a face traseira da amostra e também ajustando adequadamente a potência do feixe de laser para que não ocorra fusão nem ablação (que é a perda de material por vaporização ou fusão) na face frontal do material (MAXWELL PUC-RIO, 2013).

O método tem sido bastante aplicado em uma vasta faixa de materiais, que incluem compósitos, polímeros, vidros, metais, materiais refratários, sólidos isolantes

e revestimentos. (MAXWELL PUC-RIO, 2013, apud Webster, 1999). Tada *et al.* (1978), utilizou este método para medir propriedades térmicas de líquidos de baixa condutividade térmica.

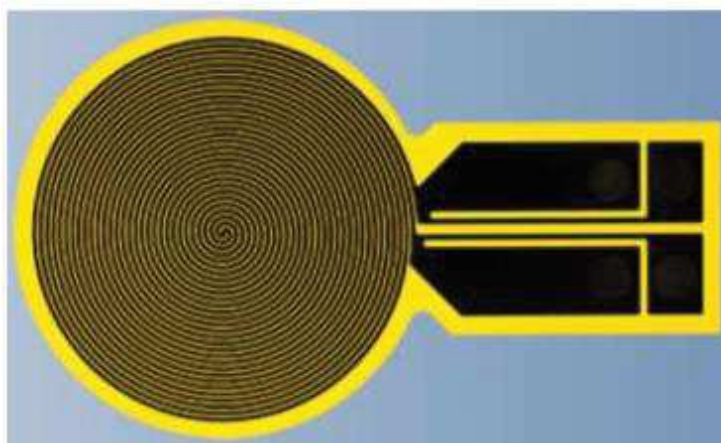
### 2.2.2. Método de Gustafsson

Segundo Maxwell (2013, p. 51), “Gustafsson propôs no ano de 1991, o método da Fonte Plana Transiente para estudos de transporte térmico de materiais sólidos e apresentou a teoria geral sobre a técnica, que é acompanhada de aproximações propostas para arranjos que podem ser referidos como “quadrado quente” ou “disco quente”” (apud Gustafsson, 1991).

O método proposto por Gustafsson foi baseado no método da fonte plana de calor, que consiste em uma espiral metálica dupla, de espessura laminar, que deve ser de um material condutor (geralmente níquel). Esta espiral é posta entre duas camadas de um material isolante elétrico, mas bom condutor térmico. As amostras são posicionadas em contato com os dois lados do sensor.

O processo de aquecimento se inicia quando a corrente elétrica começa a fluir pela espiral, o calor gerado é transmitido para as amostras em uma taxa que depende das propriedades de transporte térmico. A temperatura da interface é obtida através do monitoramento da resistividade da espiral metálica e as propriedades térmicas do material são obtidas por meio de análises numéricas (MAQSOOD e ANIS-UR-REHMAN, 2013). A Figura 2 ilustra o sensor utilizado neste método.

Figura 2 - Sensor usado no método da Fonte Plana Transiente



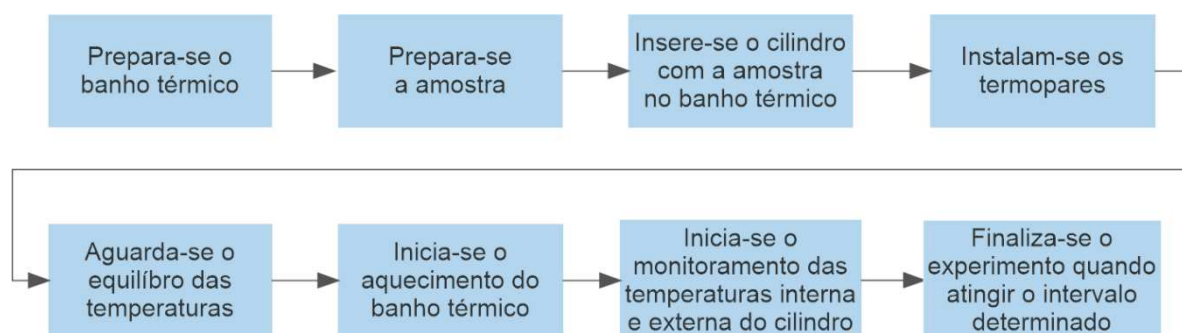
Fonte - Maxwell PUC-RIO (2013) apud (Hot Disk AB, 2012)



### 2.2.3. Método de Dickerson

O método de Dickerson, é o método mais antigo para a aquisição dos dados para calcular a difusividade térmica, em sua execução utilizam-se um cilindro de alumínio com  $2,35 \times 10^{-4}$  m de raio e 15 cm de altura, fechado na extremidade inferior, onde é colocada a amostra, dois termopares, um que é inserido dentro do tubo para medir temperatura no centro da amostra e outro que permanece no banho térmico medindo a temperatura externa ao tubo. Com o tubo inserido no banho térmico se inicia a variação de temperatura, e fazendo o acompanhamento da temperatura interna e externa. A Figura 3, traz o fluxograma do experimento de Dickerson.

Figura 3 - Fluxograma do método de Dickerson



Fonte 1 - Autoria própria (2019)

Através dos dados colhidos durante a execução do experimento é possível calcular a difusividade térmica de amostras usando a equação (2) (MOURA, FRANÇA e LEAL, 2003).

$$\alpha = \frac{A \cdot R^2}{4 \cdot (T_{ext} - T_{int})} \quad (2)$$

onde:

$\alpha$  = difusividade térmica ( $m^2/s$ )

A = taxa de subida de temperatura do banho ( $^{\circ}C/min$ )

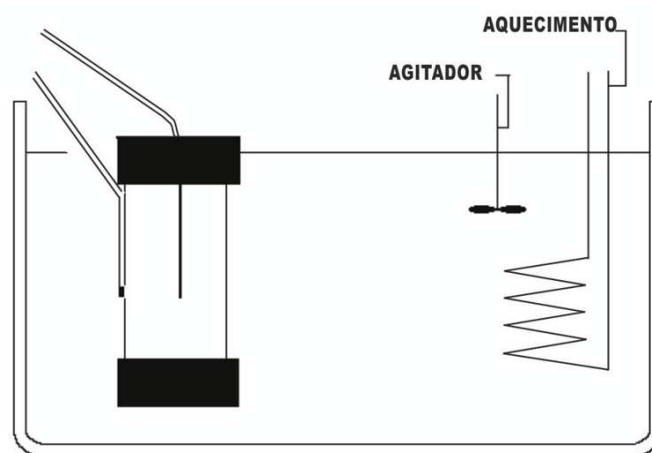
R = raio da célula (m)

$(T_{ext} - T_{int})$  = diferença entre a temperatura externa e a interna da célula ( $^{\circ}C$ )

No experimento utilizando o método de Dickerson, o cilindro com a amostra fica imerso na água do banho térmico, o nível da água do banho térmico deve ser compatível com o nível da amostra no interior do cilindro. Para que a água do banho

térmico esteja com temperatura uniforme é desejável um sistema de agitação próprio, como ilustra a Figura 4.

Figura 4 - Método de Dickerson.



Fonte - (MOURA, VISSOTTO, *et al.*, 2016)

Este método apresenta relativa simplicidade de aplicação em relação aos demais, por isso, tem sido utilizado em trabalhos na análise de alimentos tais como Telis-Romero *et al.*, (1999) Araújo, Queiroz e Figueirêdo (2004), Muniz, *et al.*, (2006), Muramatsu, *et al.*, (2009).

## 2.3. AQUISIÇÃO E APRESENTAÇÃO DOS DADOS

### 2.3.1. Aquisição dos dados

O processo de aquisição de dados (DAQ) consiste na medição de um fenômeno elétrico ou físico, como tensão, corrente, temperatura, pressão ou som, com o uso de um computador. Um sistema DAQ é formado por três “blocos”, que são: sensores, dispositivo DAQ e computador, este último geralmente conta com um *software* customizado de acordo com a necessidade. Se compararmos com os outros sistemas de aquisição de sinais, o DAQ sai na frente, pois ele pode explorar melhor o *hardware* e os outros recursos disponíveis no computador, aumentando a produtividade do sistema. Com isso, tem-se um sistema mais robusto, flexível e com ótimo custo-benefício (NATIONAL INSTRUMENTS, 2017). A Figura 5 mostra um fluxograma de um sistema DAQ.

Figura 5 - Exemplo de um sistema de aquisição de dados.



Fonte - Autoria própria (2019).

A medição de um fenômeno físico começa por um sensor, que muitas vezes é chamado de transdutor, este que converte o fenômeno físico em um sinal elétrico mensurável. Existe uma gama muito grande de tipos de sensores, dependendo do sensor seu sinal de saída pode ser de corrente, tensão ou até mesmo variação de sua resistência. Alguns sensores podem necessitar de componentes e circuitos adicionais para uma melhor precisão das medições (SILVEIRA, 2012-2017).

Logo após a medição do fenômeno os dados são enviados para um *hardware* DAQ que faz a interface entre o fenômeno que ocorre por meio dos sensores e envia para o computador, ele basicamente traduz os sinais que vem dos sensores para que o computador possa interpretá-los. Geralmente este *hardware* tem sistemas internos, que são (i) condicionamento de sinais, (ii) conversor analógico-digital (ADC) e (iii) barramento do computador (NATIONAL INSTRUMENTS, 2017).

Os sinais amostrados no meio podem conter muito ruído ou são difíceis de serem mensurados diretamente, para isso, usa-se o sistema de condicionamento de sinais para disponibilizar o sinal amostrado de forma que o circuito ADC possa interpretá-los da melhor forma. Para isso, pode ser necessário o uso de filtros, amplificadores, atenuadores e isoladores. Alguns dispositivos DAQ contêm sistemas para tipos específicos de fenômenos (OMEGA ENGINEERING INC., 2015; CASSIOLATO, 2017).

Sinais provenientes dos sensores devem ser convertidos para sinais digitais de forma que o computador possa manipulá-los. O ADC faz a amostragem do sinal analógico que está variando com o tempo em determinados períodos, posteriormente, este sinal amostrado é enviado para o computador onde será reconstruído com base nas amostras. Essa transmissão é feita por meio do barramento do computador que é a porta ao qual o *hardware* DAQ está conectada ao computador. Existem inúmeros barramentos para esta finalidade, os mais conhecidos são USB, PCI e Ethernet.

Sistemas mais modernos contam com conexão por Wi-Fi (NATIONAL INSTRUMENTS, 2017).

A última etapa da aquisição é quando o sinal convertido chega ao computador, neste momento existem dois *softwares* com a finalidade de processar os dados: o de *driver* e o de aplicação. O primeiro tem como função permitir que o *software* de aplicação possa interagir com o dispositivo DAQ. Ele simplifica a comunicação entre estas partes. Logo, seu objetivo principal é disponibilizar e realizar a leitura dos dados de forma que possam ser facilmente implementados na construção da aplicação (CASSIOLATO, 2017).

A interação do sistema DAQ é realizada pelo *software* de aplicação que facilita a interação entre o usuário e dispositivo. Este é responsável pela apresentação dos dados da medição, fornecer análises e funcionalidades para a configuração da aplicação. Geralmente nesse tipo de *software* são implementadas funções customizadas para automatizar diversas funções dos dispositivos DAQ, executar algoritmos de processamento de sinais e exibir interfaces de usuários customizadas (NATIONAL INSTRUMENTS, 2017).

Seguindo esta linha, a apresentação dos dados pode ser implementada via Interface Homem Máquina (IHM). Esta etapa serve para facilitar o acesso do usuário aos dados que foram mensurados pelos sensores. De forma geral, a IHM tenta trazer as informações de maneira que seja facilmente compreendida pelo usuário, para isso ela usa mensagens explicativas, *gifs* animados, gráficos, além de outros recursos. Ela pode ser usada para gerenciar e analisar informações a fim de melhorar a eficiência dos equipamentos, mas também pode ser usada para apenas exibir os dados de um processo (COPA-DATA, 2017).

#### 2.4. CONTROLE DE POTÊNCIA CA

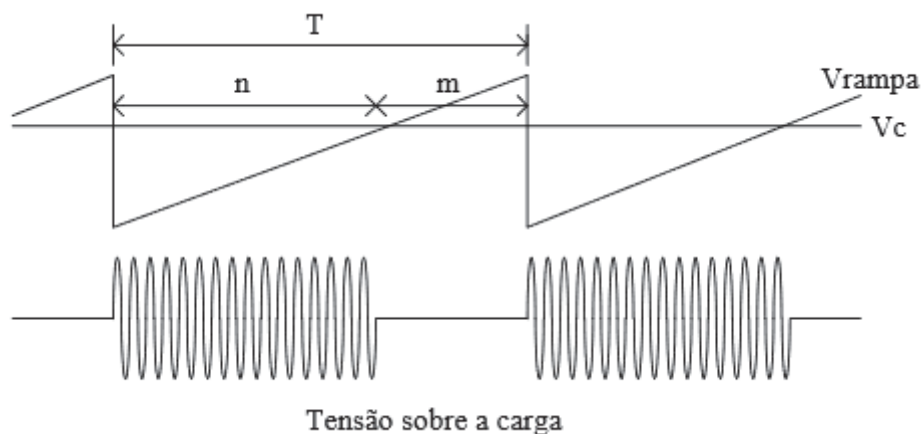
Sinais analógicos podem ser variados continuamente pois possuem um conjunto de infinitas possibilidades, esta característica permite controlar a transferência de potência de forma mais precisa, para isso utilizam-se técnicas de controle digital de potência, a aplicação destas técnicas pode trazer redução no custo e no consumo de potência do equipamento (ASSEF, 2019).

### 2.4.1. Controle Liga-Desliga

Essa técnica é usada geralmente em aplicações que a constante de tempo da carga é muito grande em relação ao período da rede CA, exemplo disso são sistemas de aquecimento. O controle consiste em ligar e desligar a alimentação da carga, que em geral é uma resistência, o intervalo entre as transições de estados são de muitos ciclos da rede. Utilizando esta técnica é possível fazer o controle por ciclos inteiros que tem como vantagem eliminar problemas com Interferência Eletromagnética (IEM) (POMILIO, 2014).

Para a aplicação desta técnica deve-se definir qual é o número de máximo e mínimo de ciclos que o circuito ficará alimentado ( $n$ ), o número mínimo de ciclos pode ser zero ( $m$ ). Com o número de ciclos definidos deve-se analisar como será feito o ajuste. Uma forma simples de se implementar o controle do ajuste é por meio de um gerador de sinal triangular que é comparado com um sinal CC ( $V_c$ ) (corrente contínua) de controle, quando o sinal triangular cruza o valor do sinal CC ( $V_{rampa}$ ) há a comutação entre os estados de ligado e desligado. A Figura 6 ilustra a operação de controle por ciclos inteiros (POMILIO, 2014).

Figura 6 - Operação por ciclos inteiros.



Fonte - Adaptada de (POMILIO, 2014, p. 10-2)

### 2.4.2. Modulação por Largura de Pulso

A técnica de Modulação por Largura de Pulso é mais conhecida pela sigla em inglês PWM (*Pulse-Width-Modulation*), esta técnica é uma forma de controlar circuitos analógicos por meio de um circuito com saída digital, seja geradores de ondas ou até mesmo por um microcontrolador. Por ser bem simples, esta técnica é amplamente usada em aplicações que vão desde instrumentação, comunicação até circuito de controle de potência e conversão de energia (GUERRA, 2006).

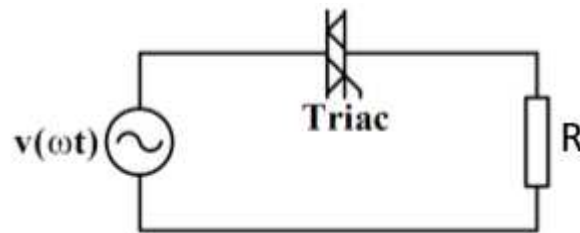
A técnica de PWM é de fácil aplicação, devido ao fácil acesso aos componentes e sua implementação, contudo quando se trata de aplicações mais complexas ela necessita de adaptações e associações com outros circuitos e aplicação de teorias de controle como PID. Isso deixa espaço para a busca de outras técnicas mais elaboradas, que acarretam maior custo e maior tempo de desenvolvimento. (CRISCUOLI e MIRANDA, 2009)

### 2.4.3. Gradador monofásico

Os gradadores são conversores estáticos destinados a variar o valor eficaz de uma tensão alternada e tem como características: (i) o contato direto com a carga, sem realizar o tratamento do sinal controlado; (ii) a frequência da fonte de energia permanece a mesma; (iii) a não utilização de elementos reativos e (iv) a introdução de harmônicas na tensão de saída e na corrente de entrada. São aplicados em controle de intensidade luminosa, controle de temperatura- chuveiros e fornos, controladores de velocidade de motores de indução e limitadores de correntes de partidas de motores. (POMILIO, 2014)

A topologia básica de um gradador é mostrada na Figura 7, compostas por uma fonte CA ( $v(\omega t)$ ), um TRIAC e uma carga resistiva (R). O TRIAC (*Triode for Alternating Current*) ou tiristor, funciona como uma chave, quando há um pulso em seu *gate*, o TRIAC deixa o sinal senoidal passar até que um valor mínimo ou nenhuma corrente flua, quando a corrente está abaixo desse valor o sinal é ceifado, este valor varia de acordo com as especificações de cada TRIAC. (ASSEF, 2019)

Figura 7 - Topologia básico gradador.

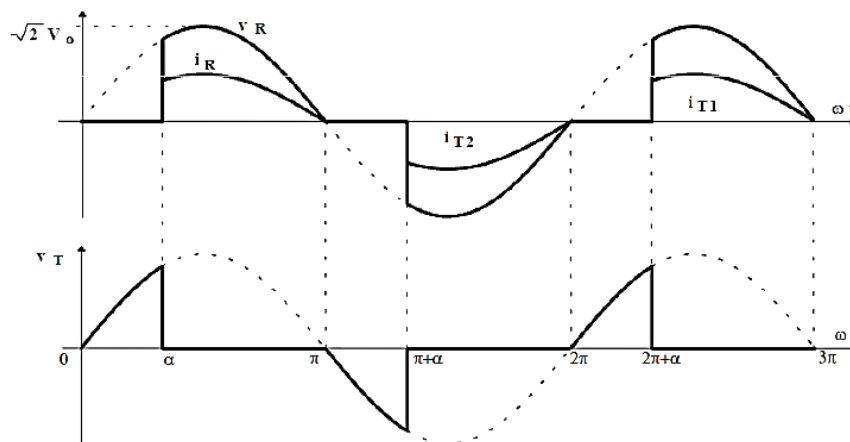


Fonte – Adaptado de (ASSEF, 2019)

O controle de acionamento do TRIAC pode ser feito tanto por um circuito gerador de pulsos quanto por um microcontrolador. As formas de onda da tensão de entrada e na carga e da corrente na carga de um gradador é mostrada na Figura 8. (POMILIO, 2014)

Na Figura 8, pode ser a forma de onda da corrente ( $i_R$ ) e da tensão ( $V_R$ ), sendo controladas pelo disparo do TRIAC.

Figura 8 - Sinais de tensão na entrada e na carga, e corrente na carga



Fonte - (ASSEF, 2019)

Os valores de tensão e corrente RMS (raiz média quadrada) sobre a carga (R) podem ser calculados utilizando as equações (3), (4) e (5) (ASSEF, 2019).

$$V(\omega t) = \sqrt{2}V_0 \text{sen}(\omega t) \quad (3)$$

$$V_R(\omega t) = \sqrt{2}V_0 \text{sen}(\omega t) \left| \left( \frac{\pi}{a} \right), \left( \frac{2\pi}{\pi + \alpha} \right) \right. \quad (4)$$

$$i_R(\omega t) = \frac{\sqrt{2}V_0}{R} \text{sen}(\omega t) \left| \left( \frac{\pi}{a} \right), \left( \frac{2\pi}{\pi + \alpha} \right) \right. \quad (5)$$

Onde:

$\omega$  = frequência em radianos;

$\alpha$  = atraso do disparo em milissegundos;

$R$  = Carga;

$V_R$  = tensão sobre a carga em Volts;

$i_R$  = corrente na carga em Ampère.

Aproximando do tema do presente trabalho, em que será necessário acionar uma resistência para o aquecimento de um banho térmico, o uso de um gradador demonstrou ser suficiente devido a sua simplicidade de implementação, não demandando circuitos complexos, baixo custo e fácil e rápida integração com o sistema que já estava pronto.



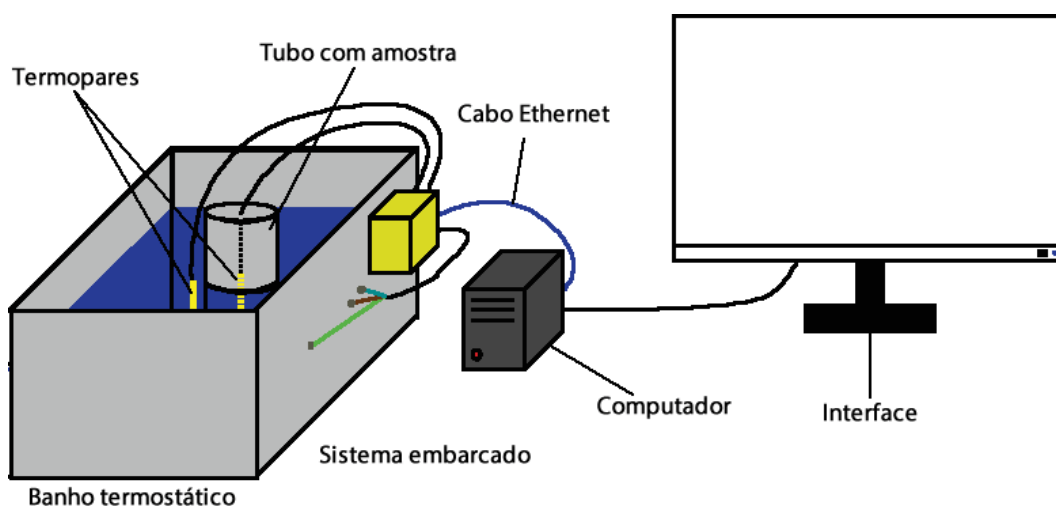
### 3. METODOLOGIA

Para definir como seria desenvolvido o equipamento foi necessário estudar o método de Dickerson, e analisar a possibilidade de divisão em etapas, para que o equipamento pudesse ser desenvolvido de forma rápida e que de certa forma fosse executado em paralelo em alguns momentos.

Com base neste estudo, foram definidas as seguintes etapas: (i) desenvolvimento da aquisição dos dados, processamento e interface gráfica para monitoramento da temperatura; (ii) realização de testes do equipamento em bancada; (iii) realização de testes com amostras de alimentos em banho térmico comercial; (iv) ajustes, correções e melhorias no instrumento; (v) desenvolvimento de banho térmico exclusivo para o experimento; e por fim, (vi) integração entre instrumento de monitoramento e acionamento da temperatura no banho térmico desenvolvido. A Figura 9, mostra uma abstração do equipamento pensado durante os estudos do método de Dickerson.

É importante destacar que os testes e validações em situações de experimento real foram realizados em conjunto com os pesquisadores do DALIM orientados pelo Prof. Dr. Bogdan Demczuk. O desenvolvimento, em sua maioria ocorreu no laboratório de pesquisa do Departamento Acadêmico de Eletrônica (DAELN), ao qual foram utilizados: fonte de bancada, gerador de funções, osciloscópio e multímetro. Para os testes do instrumento em uma situação de experimento real, foram cedidos laboratório, banho térmico e termômetros do DALIM.

Figura 9 - Abstração do equipamento.

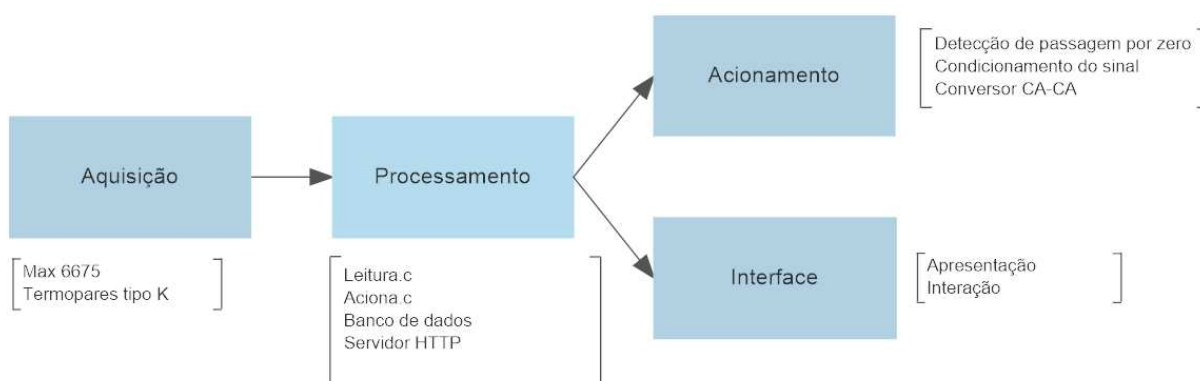


Fonte - Autoria própria (2019).

### 3.1. MATERIAIS E METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO

Para facilitar o processo de desenvolvimento do equipamento, o mesmo foi dividido em quatro sistemas: Aquisição de dados, Processamento, Acionamento e Interface (Figura 10); ao final teve-se como resultado um equipamento capaz de iniciar o experimento, acionar o aquecimento do banho termostático e monitorando o equipamento até o fim do experimento. A metodologia de desenvolvimento de cada bloco será detalhada a seguir.

Figura 10 - Fluxograma do Equipamento desenvolvido



Fonte - Autoria própria (2019).

Iniciou-se o desenvolvimento do equipamento pela leitura da temperatura. Para o desenvolvimento do equipamento utilizou-se uma Placa *Raspberry Pi 3B*, com sistema operacional *Raspbian*, que é uma variante do Debian baseada no ARM hard-float. O *software* de leitura foi desenvolvido na própria placa, utilizando as ferramentas padrão do sistema operacional, tal como o editor de texto *nano* e o compilador *gcc*. O programa faz a leitura do sinal via barramento SPI™ proveniente dos CI's Max6675, e os converte do formato digital 12-bits, para o formato decimal. (ADAFRUIT, 2002).

Para facilitar o desenvolvimento utilizou-se a biblioteca *wiringPi.h*, o que possibilitou nomear os pinos de IO da placa *Raspberry*. Foram distribuídas mensagens no programa para verificar seu funcionamento tal como, sensor desconectado e as mensagens com o valor da temperatura. Realizou-se alguns testes e verificou-se que o sistema estava funcionando corretamente.

Após o desenvolvimento do programa de leitura foi implementado um banco de dados local utilizando a ferramenta MySQL. Os dados provenientes do programa de leitura são enviados para o banco de dados e armazenados em uma tabela. Esta

tabela possui quatro campo: número da amostra, tempo da amostra, temperatura do sensor 1, temperatura do sensor 2.

Para enviar os dados foi utilizada uma função da ferramenta MySQL dentro do programa de leitura da temperatura. Essa função recebe como parâmetro os dados já em formato decimal e executa comandos para realizar o login no banco de dados, enviar uma mensagem de status de “Conexão com sucesso” e um comando para gravar os dados na tabela do banco de dados. Para isso, utilizou-se a biblioteca do MySQL “mysql/mysql.h”. Para verificar a funcionalidade do banco de dados foram realizados acessos via comandos de terminal, requisitando dados das colunas da tabela. Com os dados salvos no banco de dados deu-se início ao procedimento de implementação do servidor HTTP.

O servidor HTTP foi implementado usando a ferramenta Apache, junto com a instalação desta ferramenta é feita a instalação do Módulo php5, que executa sites desenvolvidos usando a linguagem PHP. Após a implementação do servidor, foi possível disponibilizar o acesso ao banco de dados local via HTTP, para facilitar foi configurado um IP fixo na placa Raspberry. A partir disso deu-se início ao desenvolvimento da interface gráfica.

A interface gráfica foi desenvolvida utilizando linguagem HTML, criando uma página que pode ser aberta em qualquer navegador de internet. Nesta página foi utilizada a ferramenta de plotagem de gráficos CanvasJS, esta que vem previamente implementada, bastando adaptar o código da página em que os gráficos serão mostrados. Na página HTML também foram implementadas funcionalidades de comando tais como Inicializar, Finalizar, Salvar e Desligar.

Na página escrita usando linguagem HTML, foram implementadas funções e comandos em linguagem PHP, que interpretam os comandos provenientes das funcionalidades e executam comandos referentes àquela ação. Por exemplo, quando é utilizada a funcionalidade de iniciar, executam-se as ações correspondentes à inicialização do experimento: (i) limpar os dados da tabela do banco de dados, (ii) mudar o campo status da tabela responsável pelo armazenamento no banco de dados, e em seguida (iii) mostrar no canto superior da tela a mensagem “O experimento está em andamento...”.

Após a implementação das funcionalidades da página da interface gráfica, criou-se uma tabela no banco de dados chamada *status*, com duas linhas e duas colunas, para que o programa que faz a leitura da temperatura pudesse avaliar o

*status* atual e realizar a ação. Por exemplo, para inserir dados na tabela do banco de dados a funcionalidade Inicializar preenchia valor 1 na primeira linha da tabela status, então programa realizava as ações para preencher os dados na tabela, quando era utilizada a função Finalizar, ela preenchia com 0, a primeira linha, então o programa parava de preencher a tabela do banco de dados.

### 3.2. METODOLOGIA DE TESTES UTILIZANDO AMOSTRAS DE ALIMENTOS

Nos testes foram usadas amostras de polpa de frutas congeladas cedidas pela Cooperativa Agroindustrial de Produtores de Corumbataí do Sul – PR (COAPROCOR). As amostras utilizadas foram descongeladas a temperatura ambiente e homogeneizadas. A amostra diluída foi colocada no tubo de alumínio e utilizou-se uma tampa de material com característica isolante ao calor, para minimizar qualquer troca de calor entre a amostra e o meio externo.

Foram instalados os dois termopares do equipamento, um deles na superfície para realizar as medições naquela região e o outro, no centro do raio do cilindro para que fosse possível adquirir a temperatura no centro da amostra. O aparato montado foi mergulhado no banho térmico com a temperatura da água a 10 °C.

Aguardou-se alguns minutos para que houvesse o equilíbrio térmico entre o tubo a amostra e o banho térmico, após este evento iniciou-se o processo de aquecimento que só foi finalizado quando a temperatura no interior do cilindro com a amostra atingiu 70 °C.

Os dados obtidos pelos termopares foram registrados de forma automatizada e disponibilizados via interface gráfica para o usuário, na forma de um gráfico, e posteriormente foram exportados para pós processamento.

O teste realizado com o equipamento desenvolvido faz parte do trabalho de conclusão de curso intitulado “*Desenvolvimento E Validação De Metodologia Para Determinação De Propriedades Termofísicas Em Alimentos*” de (LEAL, 2017), nele é possível ter acesso aos demais procedimentos realizados para a aquisição da difusividade térmica.

Durante os testes foram realizados ajustes como inserção de proteções nos termopares, ajuste na medição, substituição do termopar que realizava as medições no centro da amostra por um modelo mais adequado e alteração no tempo de aquisição dos dados de temperatura.

Para ajustar o valor de temperatura, foi utilizado um termômetro de mercúrio comercial. Utilizou-se duas situações, uma com os instrumentos mensurando temperatura do ar e outra de uma amostra de água. O ajuste foi feito de forma comparativa e de acordo com o valor indicado no termômetro fez-se o ajuste no código do programa para equalizar os valores mensurados pelos termopares do equipamento com o valor mensurado do termômetro.

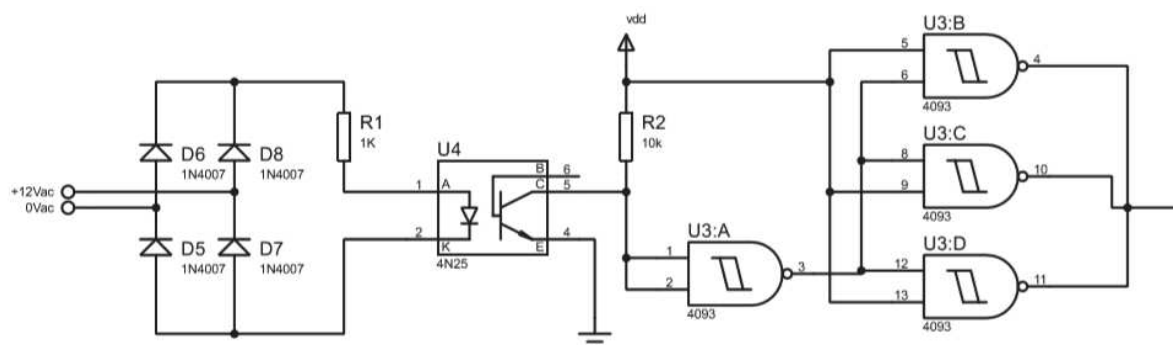
### 3.3. MATERIAIS E METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO DO BANHO TÉRMICO

Para o desenvolvimento do banho termostático foi necessário desenvolver uma placa de acionamento para a resistência elétrica que aquece a água do mesmo, esta placa incorpora um circuito de detecção de passagem por zero, circuito de condicionamento de sinais e circuito de chaveamento do TRIAC.

O circuito de detecção de passagem por zero, trata o sinal que é proveniente de um transformador de 127 V para 12 V, o sinal 12 V alternado é retificado e o sinal resultante é enviado para o LED do opto isolador, durante o tempo em que o valor médio da tensão é suficiente o LED fica aceso, quando o sinal vai se aproximando de zero o brilho do LED é reduzido até que o LED apaga. Desta forma, o sinal na saída do opto acoplador que está em nível lógico alto, passa para nível lógico baixo. Entretanto essa transição é rápida, fazendo com que o sinal de saída não seja bem definido e fique acima da tensão que os *PORTs* de entrada da *Raspberry Pi* suportam, logo fez-se necessário condicionar o sinal antes de fazer a leitura.

O condicionamento do sinal foi realizando usando um *CI4093*, que conta com 4 portas NAND Schmitt Triggers de 2 entradas, a Figura 11 mostra o circuito de detecção de passagem por zero e a primeira parte do circuito de condicionamento do sinal.

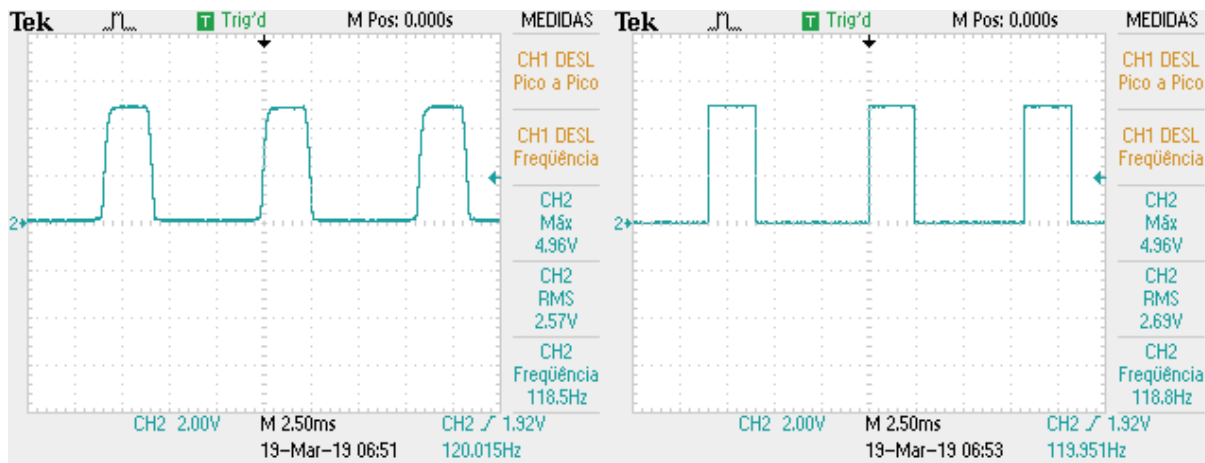
Figura 11 - Circuito de detecção de passagem por zero e parte do circuito de condicionamento do sinal



Fonte - Autoria própria (2019).

O sinal da saída do opto acoplador foi conectado aos pinos 1 e 2, que são as entradas da primeira porta NAND. Como em uma porta NAND o sinal será invertido Figura 12(a), para reverter o sinal utilizou-se das outras três portas do CI, estas portas além de reverter o sinal servem de *buffer* de corrente e melhoram ainda mais a qualidade do sinal como mostra a Figura 12(b).

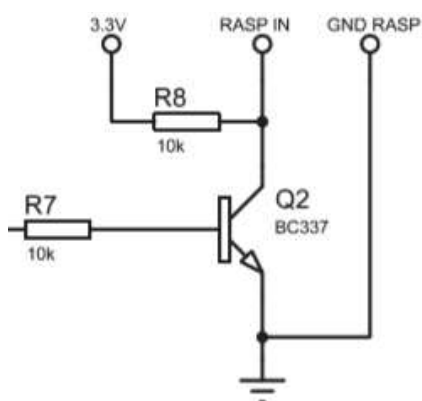
Figura 12 - (a) Sinal na saída do opto acoplador e (b) Sinal na saída do buffer.



Fonte - Autoria própria (2019).

O sinal resultante ainda está acima do nível suportado pelo PORT da placa *Raspberry Pi*, portanto ainda é necessário baixar a tensão para 3,3 V. Utilizou-se então um transistor operando como chave em uma configuração *pull-down*. Quando está cortado o sinal enviado para a placa tem nível lógico alto (3,3 V) e quando está saturado o sinal lógico é baixo (0 V). A Figura 13 mostra o circuito usado.

Figura 13 - Segunda parte do circuito de condicionamento Driver 3,3V

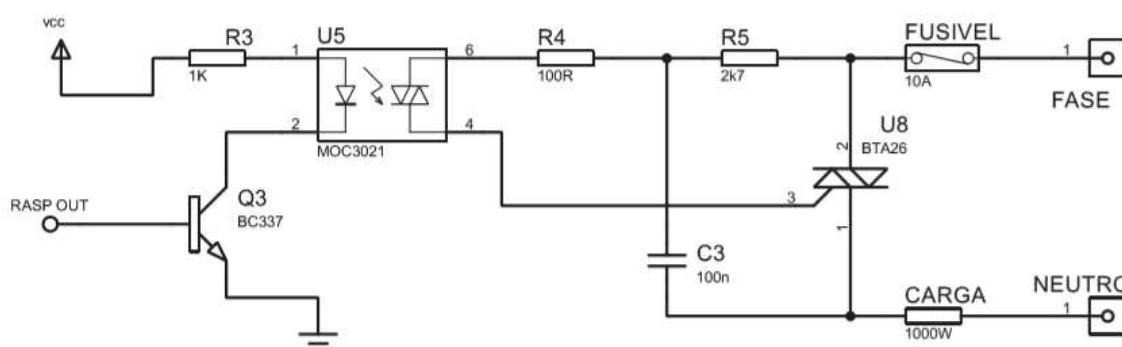


Fonte – Autoria própria (2019).

O tratamento do sinal condicionado é realizado pelo programa de acionamento. Quando a placa *Raspberry Pi* detecta alteração do nível lógico do pino ela dispara uma interrupção e a partir desta interrupção é gerado um pulso que aciona o conversor CA-CA. Este pulso não é instantâneo, tem-se um atraso fixo  $\alpha$ , para que a potência entregue à resistência seja sempre a mesma, este assunto é tratado na seção 2.4.3 gradador de tensão.

A topologia escolhida para o conversor CA-CA foi a do Gradador monofásico, mais conhecido como *Dimmer*. A Figura 14 ilustra o circuito de disparo do TRIAC.

Figura 14 - Circuito do Gradador monofásico (Dimmer).



Fonte - Autoria própria (2019).

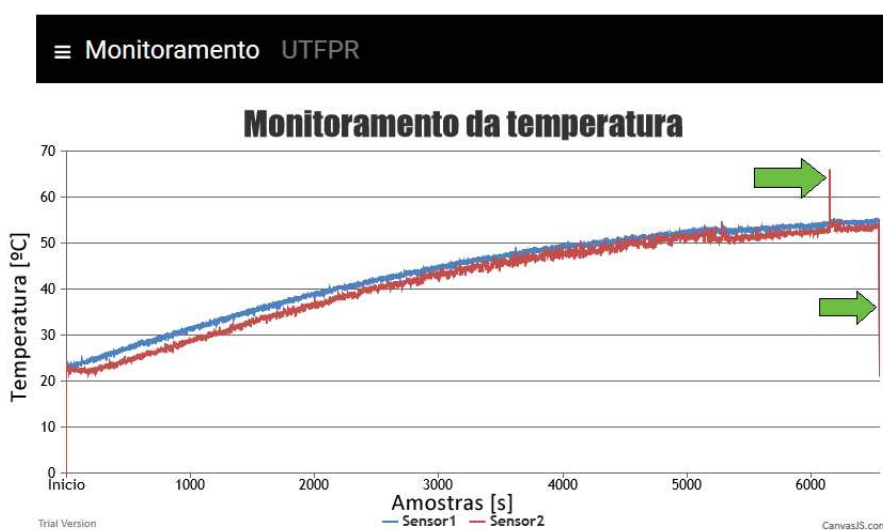
Realizou-se testes de bancada antes de acionar a resistência, onde pode-se verificar a funcionalidade do circuito e testar o tempo mínimo e máximo de atraso no chaveamento.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para que fosse possível obter dados de forma precisa o equipamento sofreu ajustes, pois após alguns experimentos realizados pelos pesquisadores do DALIM, notou-se algumas divergências nas medições, mesmo após várias calibrações. Estas divergências foram analisadas e chegou-se à conclusão de que o cabo do termopar que tem em sua parte externa uma malha metálica de proteção, sofria influência do meio externo. A princípio foi utilizado um pedaço de termo contrátil para isolar a malha metálica do contato com a água do banho, este procedimento foi realizado nos dois termopares, e ajudou a facilitar a limpeza do termopar que é inserido no centro do cilindro com a amostra.

Após a instalação do termo contrátil houve uma melhoria no sistema, mas ainda havia alguns momentos onde ocorriam medidas fora do padrão. Analisando melhor a montagem e o ambiente em que os testes estavam sendo realizados, notou-se que as medidas fora do padrão ocorriam em sua maioria quando havia algum movimento no cabo, geralmente apoiado sobre a superfície metálica do banho térmico, que sofria constantes vibrações devido ao seu sistema de agitação. O detalhe na Figura 15 mostra o momento dessas perturbações.

Figura 15 - Perturbações na medição da temperatura



Fonte - Autoria própria (2019).

Como solução primária utilizou-se um conduíte plástico para proteger o cabo do contato a superfície do banho térmico, com isso as divergências diminuíram para



quase zero, mas o cabo ainda sofria com a vibração do banho térmico e acabava movimentando-se. Para sanar este problema, foi utilizado um suporte com garra, para acondicionar o cabo de forma que ele não ficasse apoiado na superfície do banho térmico, com o intuito de evitar que as vibrações fossem transmitidas para o cabo. A Figura 16 mostra o experimento sendo realizado em banho térmico comercial.

Na imagem vê-se o banho térmico comercial utilizado durante os testes. Posicionado a direita do banho térmico está o suporte que impede que os cabos, já protegidos pelos conduítes e termo contrátil, encostem na carcaça dele.

Figura 16 - Realização dos testes com equipamento em banho térmico comercial.



Fonte - (SEMPREBOM JUNIOR, 2018).

Na imagem ainda é possível ver o aparato de medição montado, imerso em água no interior do banho, e no canto inferior direito próximo a base do suporte está a caixa onde se encontra a placa *Raspberry Pi*.

Durante estes testes a interface gráfica também foi testada, e foram feitas pequenas correções e ajustes.

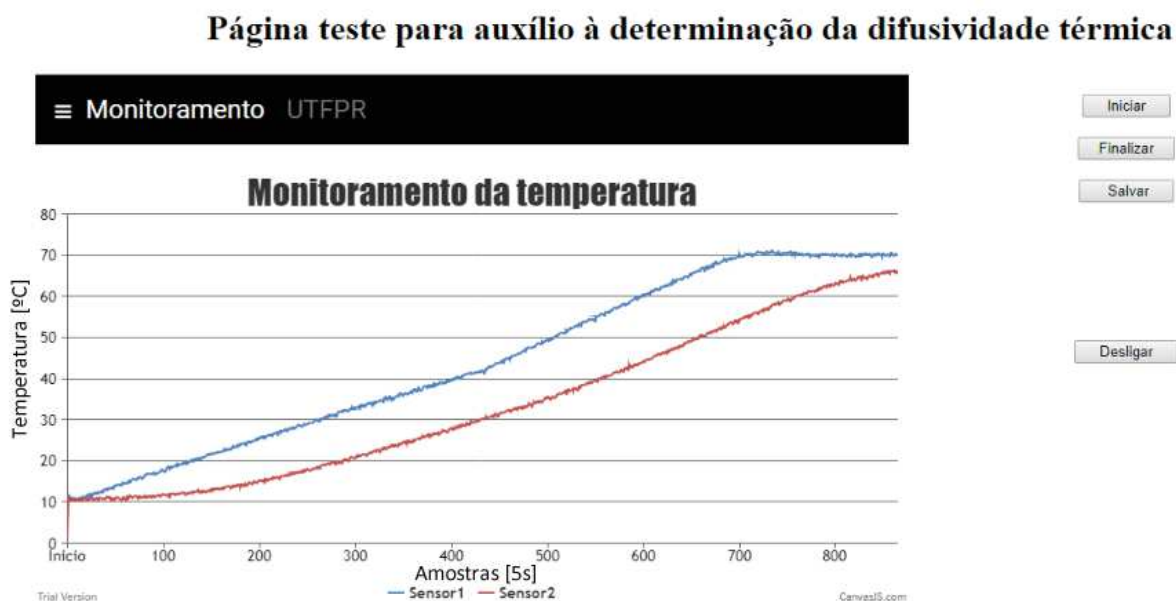
A interface gráfica conta com os recursos e funcionalidades destacados abaixo:

- Funcionalidades:

- Iniciar: Envia o comando para excluir os dados do experimento anterior salvo no banco de dados e inicia a aquisição dos novos dados e os envia ao banco de dados;
  - Finalizar: Envia o comando para que o sistema de aquisição de dados pare de adquirir e salva os dados no banco de dados;
  - Salvar: Envia um comando que exporta os dados de temperatura do banco de dados em formato .csv, para que sejam processados posteriormente;
  - Desligar: Envia o comando para que o equipamento seja desligado de forma correta.
- Gráfico em tempo real.

A Figura 17 mostra interface gráfica durante um experimento com amostra de polpa de uva.

Figura 17 - Interface gráfica durante um experimento com amostra de polpa de uva.



Fonte - (SEMPREBOM JUNIOR, 2018).

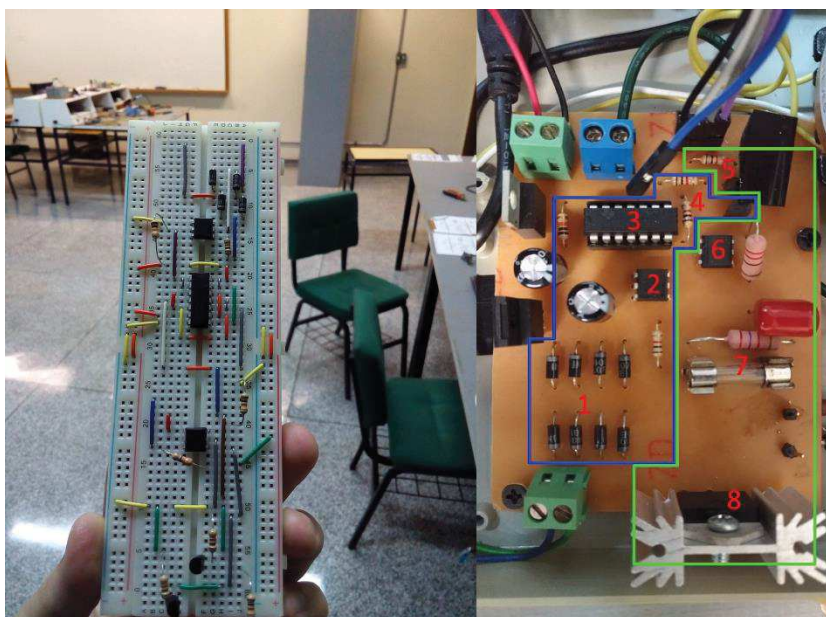
O gráfico apresentado na Figura 17 é um dos resultados dos testes com amostras de alimentos, neste caso com amostra de uva. O experimento foi realizado por SEMPRE BOM JUNIOR (2018), no laboratório C106, com orientação do Prof. Dr.

Bogdan Demczuk. O resultado para a difusividade térmica foi de  $1,47 \times 10^{-7}$ , que está dentro de intervalo de  $1,25 \times 10^{-7}$  a  $1,50 \times 10^{-7}$ , que são os valores encontrados na literatura. O valor da taxa de aquecimento obtido neste experimento foi  $0,0118 \text{ } ^\circ\text{C/s}$ .

O equipamento desenvolvido comportou-se inicialmente de forma satisfatória, os testes que foram realizados com amostras de alimentos em banho térmico comercial tiveram resultados práticos com valores muito próximos dos teóricos, isto demonstrou que o equipamento cumpriu com sua função corretamente.

Após os testes em banho térmico comercial deu-se início ao desenvolvimento do banho térmico exclusivo para o equipamento. Os circuitos propostos foram montados e testados em *protoboard* e após esta etapa, foi confeccionada uma placa de circuito impresso. A Figura 18 mostra a *protoboard* e a placa de circuito impresso, já com os componentes soldados. No interior do detalhe azul, tem-se o circuito de detecção de passagem por zero (1 e 2) e acondicionamento de sinal (3 e 4), em verde o circuito de disparo de TRIAC, (5) driver; (6) opto isolador; (7) Fusível e (8) TRIAC.

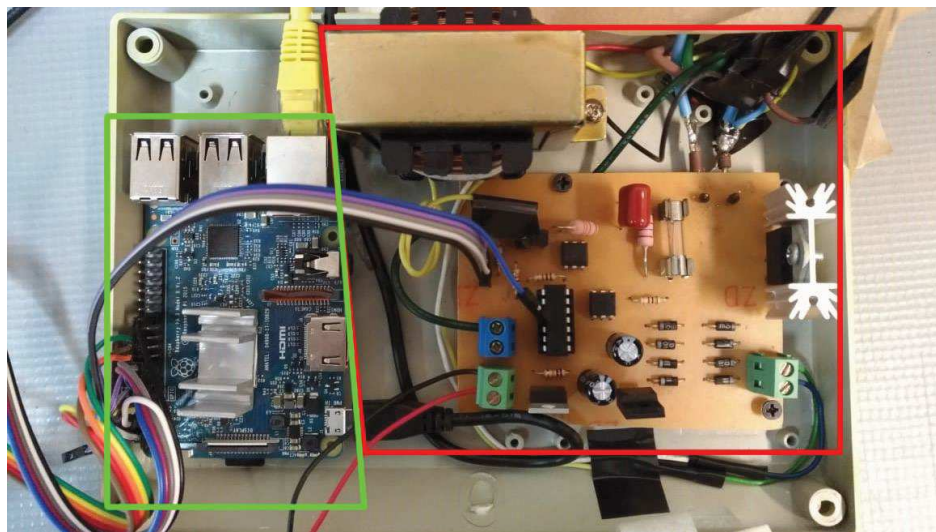
Figura 18 - Protoboard com circuitos montados (esquerda) e placa PCI montada (direita).



Fonte - Aatoria própria (2019).

Iniciou-se então a integração do sistema composto por aquisição, processamento e interface com a placa de acionamento. O equipamento integrado foi montado em uma caixa plástica cedida pela empresa Pro Solus do Brasil LTDA, como mostra a Figura 19, no detalhe verde, vê-se os sistemas de aquisição, processamento e interface gráfica, no detalhe vermelho o sistema de acionamento.

Figura 19 - Equipamento montado.



Fonte - Autoria própria (2019).

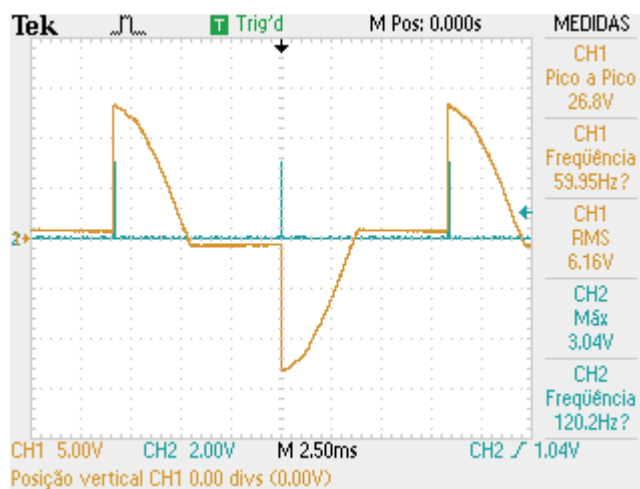
Para o teste do banho térmico utilizou-se uma cuba de um banho térmico antigo, uma resistência de 1000 W, uma bomba de aquário para agitar água no interior do banho térmico e cilindro com tampa de isolamento. Colocou-se água no interior do banho térmico e dentro do cilindro, instalou-se os termopares no aparato. O início do experimento se dá quando a temperatura entre a amostra de água no interior do cilindro fica em equilíbrio com a temperatura da água na parte externa do cilindro. O intervalo de temperatura utilizado para o teste foi da temperatura ambiente até 70 °C.

Durante os testes iniciais com o equipamento integrado, o equipamento apresentou falha no aterramento, essa falha foi percebida quando era feito o acionamento da resistência, neste momento os valores adquiridos pelos termopares variavam de forma abrupta, após revisar o projeto e analisar os situações, verificou-se que deveria ser feito uma malha de aterramento completa, levando em consideração a carcaça do banho termostático. Com a malha de aterramento completa o circuito não teve mais oscilações abruptas e pode-se realizar os testes finais.

Foram realizados três testes para verificar a funcionalidade do banho térmico desenvolvido, cada um com *setup* de disparo do TRIAC diferente para que fosse possível analisar as influências dessas mudanças.

Antes de realizar o teste acionando a resistência, realizou-se testes sem carga e com resistores de baixa potência, utilizando como fonte um transformador de 12 V. a Figura 20, mostra em azul o sinal de disparo e em amarelo o sinal chaveado.

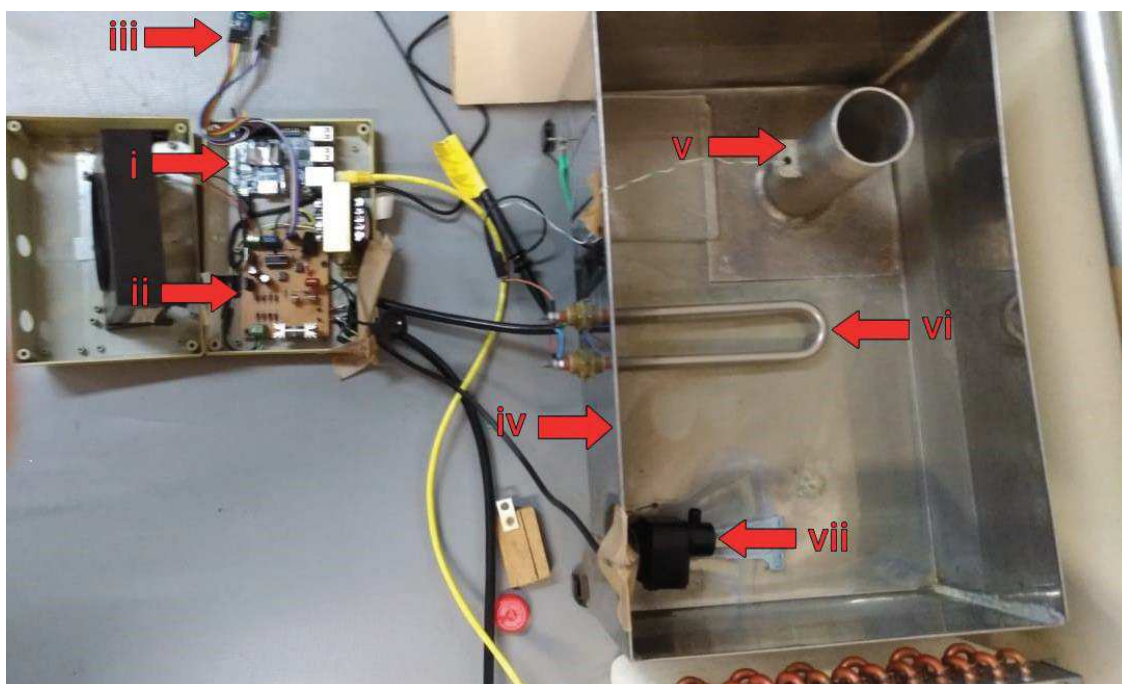
Figura 20 - Teste pré-acionamento da resistência.



Fonte - Autoria própria (2019)

O equipamento final, resultante da integração do sistema de aquisição de dados de temperatura e banho termostático desenvolvido é mostrado na Figura 21.

Figura 21 - Equipamento desenvolvido.



Fonte - Autoria própria (2019).

A esquerda pode-se ver a caixa com as (i) placas *Raspberry* e a (ii) placa de acionamento, acima da caixa os (iii) conversores ADC MAX6675. A direita tem-se a (iv) cuba do banho, no interior dele na parte superior vê-se o (v) cilindro onde é colocada a amostra, ao centro a (vi) resistência elétrica e abaixo a (vii) bomba de aquário usada para agitar a água.

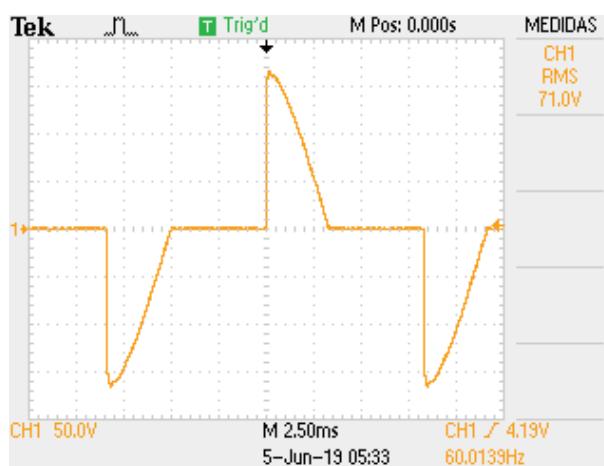
Os dados de cada disparo são expressos na forma de *Duty cycle* (ciclo de trabalho), estes dados e os gráficos obtidos para cada um são mostrados abaixo:

#### 4.1. Teste 1:

- *Duty cycle* 41%.

A Figura 22, mostra o sinal de tensão sobre a carga, no canto superior direito tem-se o valor da tensão RMS sobre a carga, 71 V.

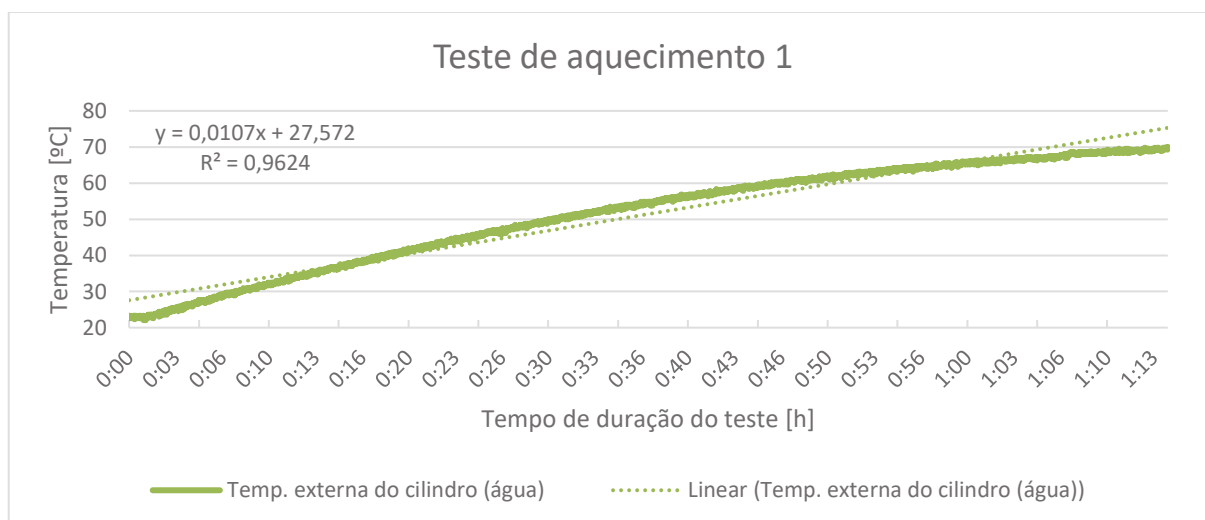
Figura 22 - Sinal sobre a carga durante o teste 1.



Fonte - Autoria própria (2019).

A curva de aquecimento da água obtida no teste 1, pode ser vista na Figura 23, nela também pode-se ver os coeficientes de linearidade da curva  $R^2$  e o coeficiente da taxa de aquecimento que neste caso foi 0,0107 °C/s. A potência entregue a resistência neste teste foi estimada entorno de 352 W, durante os 74 minutos do teste.

Figura 23 - Curva de aquecimento durante o teste 1.



Fonte - Autoria própria (2019).

#### 4.2. Teste 2:

- *Duty cycle* 56%.

A Figura 24, mostra o sinal de tensão sobre a carga, no canto superior direito tem-se o valor da tensão RMS sobre a carga, cerca 35% maior que o teste 1.

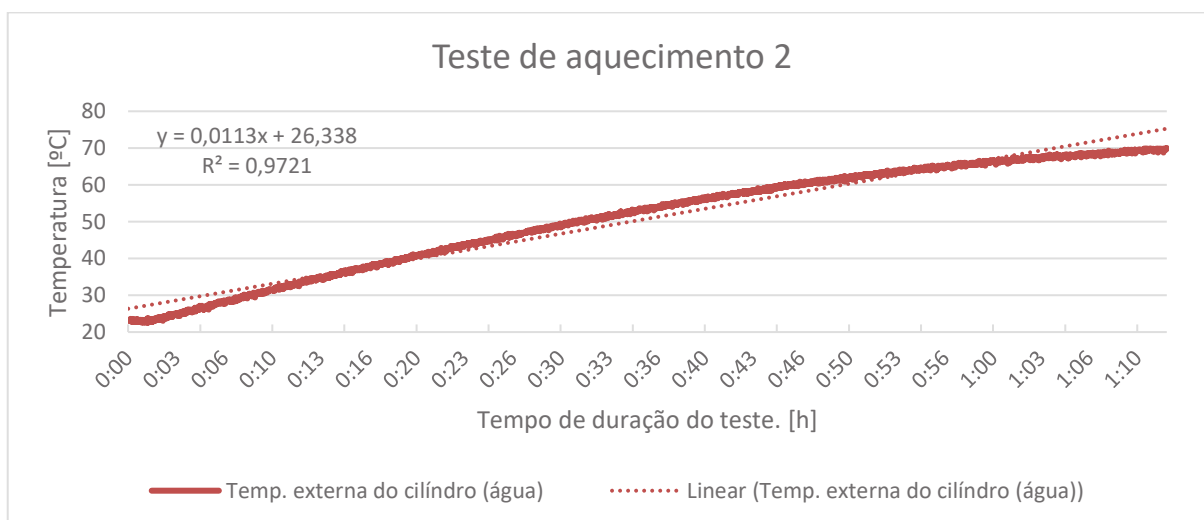
Figura 24 - Sinal sobre a carga durante o teste 2.



Fonte - Autoria própria (2019).

A curva resultante do teste 2 é representada na figura 25, verifica-se que o sistema não mudou o comportamento, e que os valores dos coeficientes de taxa de aquecimento de linearidade aumentaram e tempo para alcançar a temperatura de 70 °C, teve uma pequena redução, como esperado, já que a potência entregue a carga foi estimada em 671 W, contra 352 W no teste 1.

Figura 25 - Curva de aquecimento durante o teste 2.



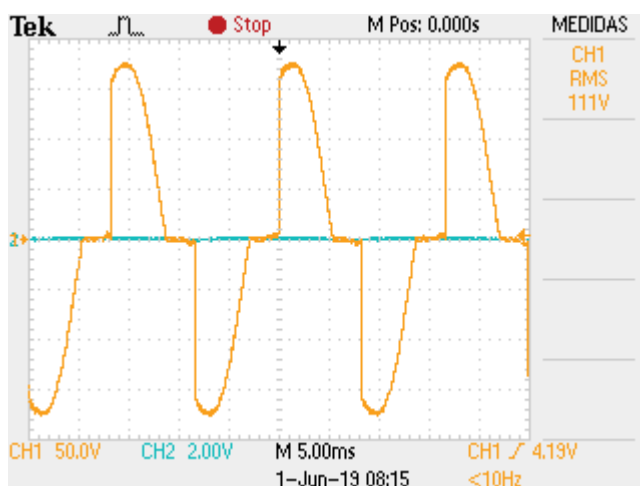
Fonte - Autoria própria (2019).

#### 4.3. Teste 3:

- *Duty cycle 65%*.

A Figura 26, mostra o sinal de tensão sobre a carga, no canto superior direito tem-se o valor da tensão RMS sobre a carga, cerca 15% maior que o teste 2.

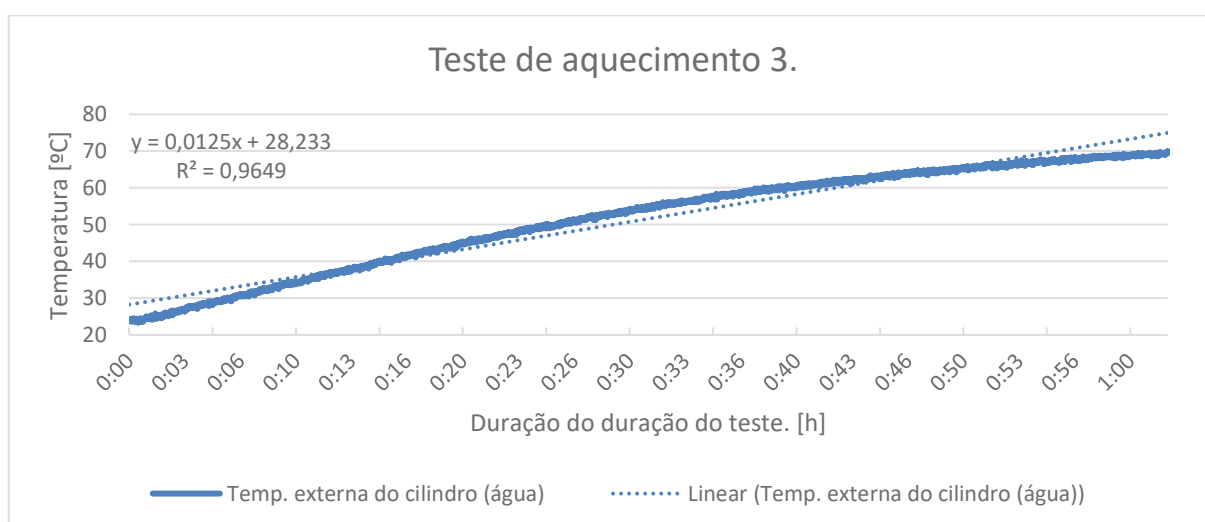
Figura 26 - Sinal na carga durante o teste 3.



Fonte - Autoria própria (2019).

Na figura 27, tem-se a curva do terceiro teste, verifica-se que o comportamento da curva foi mantido, os coeficientes da taxa de aquecimento aumentaram, o tempo para alcançar a temperatura de 70 °C diminuiu, entretanto o coeficiente de linearidade diminuiu, apesar da potência aplica estar próxima de 845 W.

Figura 27 - Curva de aquecimento durante o teste 3.



Fonte - Autoria própria (2019).

Analisando os gráficos dos testes pode-se afirmar que o sistema integrado funciona como esperado, não há grandes oscilações nas medições e a taxa de



aquecimento que o banho térmico oferece supre a necessidade para a realização do experimento, visto que no experimento teste com a amostra de alimento a taxa do banho térmico comercial foi 0,0118 °C/s.

Com estes dados verifica-se então que a curva do teste 2 é a que mais se adequa ao experimento. Porém, nos gráficos pode-se notar que o tempo para que a temperatura da água chegue aos 70 °C, muda conforme a taxa de aquecimento varia, para que seja possível controlar esse parâmetro é necessária a implementação de um sistema de controle de temperatura, onde o usuário possa definir o tempo de realização do experimento. Este ajuste faria com que o usuário economizasse tempo de execução e não necessitasse estimar parâmetros como é feito para a taxa de aquecimento. Então percebe-se que apesar do método utilizado para o acionamento da resistência ser suficiente para a execução, ele ainda é deficiente em certos aspectos, como no teste 3, que a potência aplicada sendo maior que a potência aplicada no teste 2, não foi suficiente para aumentar o valor da taxa de aquecimento consideravelmente.

## 5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nos testes, pode-se dizer que o equipamento proposto cumpre os objetivos, pois com o resultado se obteve um equipamento prático, que disponibiliza as informações de forma simples e em tempo real, além de automatizar grande parte do experimento, prevenindo erros e trazendo ganhos em confiabilidade e precisão nas medições.

Além dos ganhos citados acima, o treinamento necessário para operar o equipamento é simples, fazendo com que além do ganho de tempo resultante da otimização do processo do experimento, o pesquisador envolvido economize tempo na etapa de treinamento.

### 5.1. TRABALHOS FUTUROS

Pode-se melhorar o equipamento, pois a solução encontrada para realizar o acionamento da resistência e realizar o aquecimento, apesar de atender a demanda, não é a ideal, a curva de aquecimento alcançou uma boa aproximação, mas não é linear. Para corrigir isso pode-se aproveitar a estrutura de aquisição dos dados de temperatura e implementar controles com realimentação, tal como PID.

Cabe ainda um melhor aproveitamento dos recursos disponibilizados pela placa *Raspberry Pi 3B*, pode-se melhorar a comunicação com outros dispositivos utilizando sistemas *Wi-Fi* ou *Bluetooth*, sem necessidade da integração com módulos externos e uso de conexão cabeada.

## Referências

- ADAFRUIT. Downloads | Thermocouple | Adafruit Learning System. **Adafruit**, 2002. Disponível em: <<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/MAX6675.pdf>>. Acesso em: 9 nov. 2017.
- ARAÚJO, J. D. L.; QUEIROZ, A. J. D. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. D. PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DA POLPA DO CUPUAÇU COM DIFERENTES TEORES DE SÓLIDOS. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, jan/fev 2004. 126-134.
- ASSEF, A. Apresentações - Página pessoais UTFPR. **Universidade Tecnológica Federal do Paraná**, Curitiba, p. 20,. julho 2019. ISSN. Disponível em: <<http://paginapessoal.utfpr.edu.br/amauriassef/disciplinas/electronica-de-potencia/apresentacoes>>. Acesso em: julho 2019..
- BAÏRI, A.; LARAQI, N.; MARÍA, J. M. G. D. Determination of thermal diffusivity of foods using 1D Fourier cylindrical solution. **Journal of Food Engineering** **78**, 28 Dezembro 2007. 669-675.
- BHOWMIK, S. R.; HAYAKAWA, K. A NEW METHOD FOR DETERMINING THE APPARENT THERMAL DIFFUSIVITY OF THERMALLY CONDUCTIVE FOOD. **Journal of Food Science**, Chicago, 1979. 469-474.
- BROCK, J. et al. Determinação experimental da viscosidade e condutividade térmica de óleos vegetais. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, Setembro 2008. 564-570.
- CASSIOLATO, C. Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados - SMAR Líder em Automação Industrial. **Smar Automação Industrial**, 2017. Disponível em: <<http://www.smar.com/brasil/artigo-tecnico/sistemas-de-supervisao-e-aquisicao-de-dados>>. Acesso em: 11 Novembro 2017.
- COPA-DATA. Interface homem-máquina (HMI). **COPADATA**, 2017. Disponível em: <<https://www.copadata.com/pt/solucoes-hmi-scada/interface-homem-maquina-hmi/>>. Acesso em: 8 Novembro 2017.
- CRISCUOLI, F. P.; MIRANDA, B. L. PG\_correcao1 - 2009-2\_felipe\_padilha\_e\_beatriz\_miranda.pdf. **engenharia mecanica ufes**, 2009. Disponível em: <[http://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/2009-2\\_felipe\\_padilha\\_e\\_beatriz\\_miranda.pdf](http://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/2009-2_felipe_padilha_e_beatriz_miranda.pdf)>. Acesso em: julho 2019.

- FILHO, O. D. S. P. Transferencia de Calor e Termodinamica. **Bombeiro Oswaldo**, 2012. Disponível em: <<http://bombeiroswaldo.blogspot.com/2012/09/transferencia-de-calor-e-termodinamica.html>>. Acesso em: julho 2019.
- GLAVINA, M. Y. et al. Estimation of thermal diffusivity of foods using transfer functions. **LWT** **39**, 24 Fevereiro 2006. 455-459.
- GUERRA, L. N. D. A. monopoli10000326.pdf. **Monografias UFRJ**, 2006. Disponível em: <<http://www.monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10000326.pdf>>. Acesso em: 27 julho 2019.
- HUANG, L.; LIU, L.-S. Simultaneous determination of thermal conductivity and thermal diffusivity of food and agricultural materials using a transient plane-source method. **Journal of Food Engineering** **95**, Wyndmoor, 5 Maio 2009. 179-185.
- LEAL, F. C. Desenvolvimento e validação de metodologia para determinação de propriedades termofísicas em alimentos. **Repositório de Outras Coleções Abertas (ROCA)**, Campo Mourão, 6 Dezembro 2017. Disponível em: <<http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/8566/1/metodologiaproriedade-stermofisicasalimentos.pdf>>. Acesso em: 27 julho 2019.
- MAQSOOD, A.; ANIS-UR-REHMAN, M. Transient plane source (tps) sensors for simultaneous measurements of thermal conductivity and thermal diffusivity of insulators, fluids and conductors. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering** , 2013. 51.
- MAXWELL PUC-RIO. 22034\_3.PDF. **Site maxwell PUC-RIO**, 8 julho 2013. Disponível em: <[https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/22034/22034\\_3.PDF](https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/22034/22034_3.PDF)>. Acesso em: 27 jul. 2019.
- MOURA, S. C. S. R. D. et al. Propriedades físicas e reológicas de produtos à base de frutas. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, 1 Dezembro 2016.
- MOURA, S. C. S. R. D. et al. Propriedades físicas e reológicas de produtos à base de frutas. **Brazilian Journal of Food Technology**, Campinas, 1 Dezembro 2016.
- MOURA, S. C. S. R. D.; FRANÇA, V. C. L.; LEAL, Á. M. C. B. PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE SOLUÇÕES MODELO SIMILARES A SUCOS. **Ciênc. Technol. Aliment.** , Campinas, 23 Janeiro 2003. 62-68.
- MOURA, S. C. S. R.; FRANÇA, V. C. L.; LEAL, Á. M. C. B. PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DE SOLUÇÕES-MODELO SIMILARES A SUCOS - PARTE II. **Ciênc. Technol. Aliment.**, Campinas, 11 Agosto 2005. 454-459.

MUNIZ, M. B. et al. CARACTERIZAÇÃO TERMOFÍSICA DE POLPAS DE BACURI. **Food Science and Technology** vol. **26**, Campinas, abr-jun 2006. 360-368.

MURAMATSU, Y. et al. Simultaneous estimation of the thermophysical properties of three kinds of fruit juices based on the measured result by a transient heat flow probe method. **Journal of Food Engineering**, 10 setembro 2009. 607-613.

NATIONAL INSTRUMENTS. Q que é aquisição de dados? - National Instruments. **National Instruments**, 2017. Disponível em: <<http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/pt/>>. Acesso em: 10 Novembro 2017.

OMEGA ENGINEERING INC. Aquisição de dados. **Omega Sensing Incredible Things**, 2015. Disponível em: <<https://br.omega.com/prodinfo/aquisicao-de-dados.html>>. Acesso em: 10 Novembro 2017.

PARKER, W. J. et al. Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity. **Journal of Applied Physics**, São Francisco, Setembro 1961. 1679-1684.

POMILIO, J. A. 10. CONVERSORES CA-CA: VARIADORES DE TENSÃO E CICLOCONVERSORES. **docplayer**, 2014. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/25267815-10-conversores-ca-ca-variadores-de-tensao-e-cicloconversores.html>>. Acesso em: julho 2019.

SANTOS, W. N. D. et al. Método de Fio Quente na Determinação das Propriedades Térmicas de Polímeros. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 14, n. 5, p. 354-359, 2004.

SEMPREBOM JUNIOR, E. J. EMPREGO DA ANÁLISE MULTIVARIADA NA CLASSIFICAÇÃO DE POLPAS DE FRUTAS DE ACORDO COM AS PROPRIEDADES FÍSICAS E A DIFUSIVIDADE TÉRMICA. **Repositório de Outras Coleções Abertas (ROCA)**, 2018. Disponível em: <<http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/11302/1/analismultivariadapolpafrutas.pdf>>. Acesso em: julho 2019.

SILVEIRA, C. B. Sensor: Você Sabe o Que é Quais os Tipos? **Citisystems Soluções Industriais que Aumentam a Produtividade**, 2012-2017. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/sensor-voce-sabe-que-quais-tipos/>>. Acesso em: 10 Novembro 2017.

TADA, Y. et al. Laser flash method for measuring thermal conductivity of liquids—application to low thermal conductivity liquids. **Review of Scientific Instruments**, Kyoto, 30 maio 1978. 1305-1314.

TELIS-ROMERO, J. et al. Thermophysical properties of Brazilian orange juice as affected by temperature and water content. **Journal of Food Engineering**, 3 março 1999. 27-40.