

**PROGRAMA DE PÓS - GRADUAÇÃO EM SISTEMAS E PROCESSOS
INDUSTRIAIS - MESTRADO
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM CONTROLE
E OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS**

Douglas Roberto Nervo da Cruz

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA DETERMINAÇÃO
ENTALPIMÉTRICA POR INFRAVERMELHO**

Santa Cruz do Sul, fevereiro de 2015

Douglas Roberto Nervo da Cruz

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA DETERMINAÇÃO
ENTALPIMÉTRICA POR INFRAVERMELHO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas e Processos Industriais - Mestrado, Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC, como requisito parcial para obtenção ao título de Mestre e Sistemas e Processos Industriais.

Orientador: Prof. Dr. Adilson Ben da Costa
Coorientador: Prof. Dr. Leonel Pablo Tedesco

Santa Cruz do Sul, fevereiro de 2015

Douglas Roberto Nervo da Cruz

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA PARA DETERMINAÇÃO
ENTALPIMÉTRICA POR INFRAVERMELHO**

Esta dissertação foi submetida ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas e Processos Industriais - Mestrado, Universidade de Santa Cruz do Sul - UNISC, como requisito parcial para obtenção ao título de Mestre e Sistemas e Processos Industriais.

Dr. Adilson Ben da Costa
Professor Orientador

Dr. Leonel Pablo Tedesco
Professor Coorientador

Dr. Rolf Fredi Molz
Professor examinador – UNISC

Dr. Rômulo Davi Albuquerque Andrade
Professor examinador – Instituto Federal Goiano

Santa Cruz do Sul, fevereiro de 2015

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por iluminar meus caminhos em todos os momentos da minha vida.

Agradeço a minha família pelo constante incentivo, apoio e compreensão pelos momentos de ausência, em virtude da dedicação necessária para a realização deste trabalho.

Agradeço aos professores orientadores Adilson Ben da Costa e Leonel Pablo Tedesco pela orientação segura, atenção constante, disposição e profissionalismo durante a realização deste trabalho.

Agradeço ao professor Rolf Fredi Molz pelo conhecimento repassado.

Agradeço aos bolsistas Keiti, Katiuscia e Andre pela ajuda constante durante a realização deste trabalho.

Agradeço ao Thiago pelas aulas de Arduino.

Agradeço ao Gelson e ao Richard pelas caronas durante o período do Mestrado.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas e Processos Industriais por acreditar e me confiar à oportunidade.

Agradeço a Capes, pelo apoio financeiro.

E agradeço a todos os demais que, de alguma maneira, contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

No presente trabalho montou-se um sistema para análise entalpimétrica utilizando câmera de infravermelho como sensor de temperatura. Os primeiros testes tinham o propósito de avaliar a eficiência deste sistema no monitoramento da temperatura de uma titulação termométrica de neutralização. Desta forma, utilizou-se o sistema na determinação da concentração de uma alíquota de 20 mL de uma solução de NaOH ($\cong 1\text{ molL}^{-1}$) utilizando, como titulante, uma solução de HCl padronizada, com concentração de $1,007\text{ molL}^{-1}$. O próximo passo foi determinar a entalpia de neutralização utilizando soluções de 50 e 20 mL de soluções de HCl ($1,007\text{ molL}^{-1}$) e NaOH ($1,012\text{ molL}^{-1}$). Os resultados obtidos na determinação da entalpia de neutralização de cinco alíquotas de 50 mL de solução de NaOH ($1,012\text{ molL}^{-1}$) com 50 mL de solução de HCl ($1,007\text{ molL}^{-1}$) foram de $- 61,81 \pm 4,45\text{ kJ mol}^{-1}$ (sensor PT-100), $- 59,98 \pm 2,23\text{ kJ mol}^{-1}$ (termômetro de mercúrio) e $- 57,08 \pm 0,26\text{ kJ mol}^{-1}$ (câmera de infravermelho). Em relação a solução de 20 mL, a determinação da entalpia de neutralização de seis alíquotas de 20 mL de solução de NaOH ($1,012\text{ molL}^{-1}$) com 20 mL de solução de HCl ($1,007\text{ molL}^{-1}$) utilizando a câmera resultou num valor de $- 58,34 \pm 1,96\text{ kJ mol}^{-1}$. Além da entalpia, determinou-se a curva de calibração e o coeficiente de determinação (R^2) referente aos valores de temperaturas das reações. Os valores de R^2 foram de 0,941 (PT-100), 0,9933 (termômetro) e 0,9999 (câmera), tornando a câmera o equipamento mais apropriado para determinação das variações de temperatura das reações para solução de 50 mL de NaOH (0,25; 0,5; 0,75 e 1 molL^{-1}) com solução de 50 mL de HCl (1 molL^{-1}). A terceira etapa foi a miniaturização do sistema de análise entalpimétrica desenvolvido. Inicialmente, com o uso de um pipetador multicanal, foi realizada a adição de 0,1 mL da solução de HCl ($1,007\text{ molL}^{-1}$) a um volume igual da solução de NaOH ($1,012\text{ molL}^{-1}$) e após foram calculados capacidade calorífica do sistema e entalpia. Os resultados determinaram um valor médio de entalpia de neutralização de $- 59,61 \pm 2,94\text{ kJ mol}^{-1}$, além de um erro de $- 3,77\text{ kJ mol}^{-1}$. Também determinou-se a curva de calibração e coeficiente R^2 referente aos valores de temperaturas resultantes do acréscimo de 0,15 mL da solução de HCl (1 molL^{-1}) a um volume igual de NaOH (0,25; 0,5; 0,75 e 1 molL^{-1}) utilizando pipetadores monocanal e multicanal. Os valores de R^2 foram de 0,90 (PT-100) e 0,9921 (câmera) com pipetador monocanal e 0,959 (PT-100) e 0,9748 (câmera) para pipetador multicanal. Diante desses valores, a câmera mostrou-se mais apropriado para análises entalpimétricas, tanto com pipetador monocanal quanto com multicanal. No último passo desenvolveu-se um sistema automatizado para análise

entalpimétrica utilizando câmera de infravermelho como sensor de temperatura. Em uma linha da placa de Elisa (8 cavidades) adicionou-se um volume de 0,1 mL da solução de HCl ($1,007 \text{ molL}^{-1}$) a um volume igual da solução de NaOH ($1,012 \text{ molL}^{-1}$) e calculados capacidade calorífica do sistema e entalpia. Quando analisado de forma manual, o valor da entalpia foi de $-60,96 \text{ kJ mol}^{-1}$ e com o uso do programa, a entalpia passou a ser $-57,65 \text{ kJ mol}^{-1}$. Em virtude disso, pode-se concluir que a câmera de infravermelho é o melhor equipamento para se determinar a entalpia das reações químicas de neutralização. Também se faz necessário um programa que analise valores de temperatura e calcule a entalpia, pois a chance de erro é menor do que se análise e cálculo forem feitas manualmente.

Palavras-chave: câmera de infravermelho, entalpia, análise entalpimétrica.

ABSTRACT

In the present study was set up a system for entalpimetrica analysis using infrared camera as a temperature sensor. The first tests were designed to evaluate the efficiency of this system in monitoring the temperature of a thermometric titration neutralization. Therefore, we used the system for determining the concentration of an aliquot of 20 mL of NaOH solution ($\cong 1 \text{ molL}^{-1}$) using, as a titrant, a standardized HCl solution, with a concentration of 1.007 molL^{-1} . The next step was to determine the enthalpy of neutralization solutions using 50 and 20 mL of HCl solution (1.007 molL^{-1}) and NaOH (1.012 molL^{-1}). The results of the determination of the enthalpy of neutralization five aliquots of 50 mL of NaOH solution (1.012 molL^{-1}) 50 mL of HCl solution (1.007 molL^{-1}) were $- 61.81 \pm 4.45 \text{ kJ mol}^{-1}$ (PT-100 sensor) $- 59.98 \pm 2.23 \text{ kJ mol}^{-1}$ (mercury thermometer) and $- 57.08 \pm 0.26 \text{ kJ mol}^{-1}$ (infrared camera). In relation to 20 mL of solution, the determination of the enthalpy of neutralization six aliquots of 20 mL NaOH (1.012 molL^{-1}) with 20 mL of HCl solution (1.007 molL^{-1}) using the camera resulted in a value $- 58.34 \pm 1.96 \text{ kJ mol}^{-1}$. In enthalpy, determined the calibration curve and the coefficient of determination (R^2) for the temperatures of the reactions values. The R^2 values were 0.941 (PT-100), 0.9933 (thermometer) and 0.9999 (camera), thus making the camera most suitable equipment for the determination of temperature changes of the reactions to 50 mL of NaOH solution (0.25, 0.5, 0.75 and 1 molL^{-1}) with a solution of 50 mL HCl (1 molL^{-1}). The third stage was the miniaturization of entalpimétrica analysis system developed. Initially, using a multichannel pipettor, was performed adding 0.1 mL of HCl solution (1.007 molL^{-1}) at an equal volume of NaOH solution (1.012 molL^{-1}) and after the heat capacity were calculated system and enthalpy. The results determined an average value of enthalpy of neutralization $- 59.61 \pm 2.94 \text{ kJ mol}^{-1}$, and an error $- 3.77 \text{ kJ mol}^{-1}$. We also determined the calibration curve and R^2 coefficient related to temperature values resulting from the addition of 0.15 mL of HCl solution (1 molL^{-1}) at an equal volume of NaOH (0.25, 0.5, 0.75 and 1 molL^{-1}) using single-channel and multichannel pipettors. The R^2 values were 0.90 (PT-100), and 0.9921 (camera) with a single channel pipettor and 0.959 (PT-100), and 0.9748 (camera) for multichannel pipettor. Given these values, the camera was more suitable for entalpimétricas analyzes, both with single-channel pipettor as multichannel. In the last step we developed an automated system for entalpimetrica analysis using infrared camera as a temperature sensor. In an ELISA plate line (8 wells) was added a volume of 0.1 mL of HCl solution (1.007 molL^{-1}) at an equal volume of NaOH solution (1.012 molL^{-1}) and the

calculated heat capacity system and enthalpy. When analyzed manually, the value of the enthalpy was $-60.96 \text{ kJ mol}^{-1}$ and using the program, the enthalpy has become $-57.65 \text{ kJ mol}^{-1}$. As a result, it can be concluded that the infrared camera is the best device for determining the enthalpy of the chemical neutralization reactions. Also a program to analyze temperature values and calculate the enthalpy is necessary because the chance of error is smaller than and calculations are done manually.

keywords: infrared camera, enthalpy, entalpimetrica analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Gráfico de uma reação exotérmica.....	20
Figura 2. Gráfico de uma reação endotérmica.....	20
Figura 3. Esquema que representa o modo de funcionamento de um sensor.....	27
Figura 4. Imagem de um termistor NTC com coeficiente de temperatura de 3470 K..	30
Figura 5. Termômetro de mercúrio clínico analógico oval com escala de 35°C à 42°C..	32
Figura 6. Comportamento típico dos termorresistores de Níquel, Platina, Liga de Níquel e de Cobre.....	34
Figura 7. Sensor PT-100 com 4 fios e faixa de temperatura de – 50°C até + 250°C.....	35
Figura 8. Características de temperatura e resistência do sensor PT-100..	36
Figura 9. Diagrama simplificado de um sistema de diagnóstico de falhas baseado em análise térmica.....	37
Figura 10. Faixa de comprimentos de onda do Espectro Eletromagnético.	38
Figura 11. Termograma com o uso de câmera de infravermelho Flir.	40
Figura 12. Esquema representando a medição de temperatura de um objeto.....	41
Figura 13. Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE)..	44
Figura 14. Tela inicial do Matlab..	46
Figura 15. Tela inicial do GUIDE..	47
Figura 16. Representação de uma imagem digital.....	48
Figura 17. Etapas do processamento de imagens..	49
Figura 18. Fluxograma executivo da pesquisa experimental..	51
Figura 19. Circuito utilizado para determinação da temperatura ambiente.....	52
Figura 20. Esquema que representa a determinação da temperatura aparente refletida.....	53
Figura 21. Sistema de titulação termométrica com câmera de infravermelho como sensor de temperatura.....	54
Figura 22. Montagem para a realização do teste do programa para a automação do processo.	58
Figura 23. Esquema elétrico utilizado para o acionamento dos atuadores.....	59
Figura 24. Curvas de titulação termométrica para 5 alíquotas de 20 mL de uma solução de NaOH ($\cong 1\text{molL}^{-1}$). Os pontos marcados indicam a temperatura máxima obtida em cada titulação..	64
Figura 25. Sequência de imagens capturadas durante a titulação termométrica (vista superior). A) Início da titulação; B) Efeito na temperatura pela adição de uma gota da	

solução de HCl; C) Dissipação da temperatura, dois segundos após a adição de uma gota da solução de HCl; e D) Ponto final de titulação. As setas azul e vermelha indicam locais de temperatura mínima e máxima, respectivamente..65

Figura 26. Resultados típicos do monitoramento de temperatura para determinação da capacidade calorífica.. 66

Figura 27. Curvas de calibração do sensor PT-100, termômetro de mercúrio e câmera de infravermelho, de acordo com os resultados obtidos nos 4 procedimentos (em triplicata) de entalpimetria, para determinação da variação de temperatura. 74

Figura 28. Curvas de calibração do sensor PT-100 e da câmera de infravermelho, de acordo com os resultados obtidos nos 4 procedimentos (em triplicata) de entalpimetria, para determinação da variação de temperatura, utilizando pipetador monocanal.. 77

Figura 29. Curvas de calibração do sensor PT-100 e da câmera de infravermelho, de acordo com os resultados obtidos nos 4 procedimentos (em triplicata) de entalpimetria, para determinação da variação de temperatura, utilizando pipetador multicanal... 79

Figura 30. Imagem na qual foi aplicada a binarização e que apresenta as reações químicas acontecendo em 8 cavidades na placa de Elisa.. 79

Figura 31. Tela do programa que apresenta os valores da capacidade calorífica e da entalpia das reações químicas na placa de Elisa.. 80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Nomes, conceitos e exemplos dos diferentes tipos de entalpia	21
Tabela 2 – Resultados para a determinação de água no etanol por entalpimetria por injeção direta e picnometria	23
Tabela 3 – Resultados para a determinação de água na acetona por entalpimetria por injeção direta e picnometria	23
Tabela 4 – Índice de acidez de amostras de óleos refinados e não refinados determinado por titulação termométrica	24
Tabela 5 – Entalpia de interação de alcoóis/ <i>Saccharomyces Cerevisiae</i> a 298 K.....	25
Tabela 6 – Resultados das determinações de óxido de cálcio nas amostras certificadas por entalpimetria de fluxo contínuo	26
Tabela 7 – Resultados das determinações de óxido de magnésio nas amostras certificadas por entalpimetria de fluxo contínuo	26
Tabela 8 – Classificação das variáveis por características físicas.	27
Tabela 9 – Características físico-químicas e coeficiente de expansão dos líquidos (transdutores) mais usados nos termômetros.....	32
Tabela 10 – Tabela comparativa de três modelos de plataforma Arduino disponíveis no mercado.	44
Tabela 11 – Valores e tipos de coeficientes de determinação para uma curva de calibração. .	57
Tabela 12 – Marcas, modelos e especificações técnicas dos principais equipamentos utilizados neste trabalho.	61
Tabela 13 – Relação de <i>softwares</i> utilizados neste trabalho.	63
Tabela 14 – Resultados produzidos na determinação da capacidade calorífica do sistema de titulação termométrica desenvolvido utilizando copo de poliestireno.....	67
Tabela 15 – Resultados de entalpia de neutralização para as cinco alíquotas da solução de 50 mL de NaOH utilizando sensor PT-100.....	68
Tabela 16 – Resultados de entalpia de neutralização para as cinco alíquotas da solução de 50 mL de NaOH utilizando termômetro de mercúrio.	68
Tabela 17 – Resultados de entalpia de neutralização para as cinco alíquotas da solução de 50 mL de NaOH utilizando câmara de infravermelho.	69
Tabela 18 – Comparação dos valores de entalpia obtidos neste trabalho com os resultados dos trabalhos de outros autores.....	69
Tabela 19 – Resultados de entalpia de neutralização para as seis alíquotas da solução de 20	

mL de NaOH utilizando câmera de infravermelho.	70
Tabela 20 – Resultados obtidos na utilização de sensor PT-100 para determinação das variações de temperatura das reações para solução de 50 mL de NaOH com solução de 50 mL de HCl.....	71
Tabela 21 – Resultados obtidos na utilização do termômetro para determinação das variações de temperatura das reações para solução de 50 mL de NaOH com solução de 50 mL de HCl.....	72
Tabela 22 – Resultados obtidos na utilização da câmera para determinação das variações de temperatura das reações para solução de 50 mL de NaOH com solução de 50 mL de HCl	73
Tabela 23 – Resultados produzidos na determinação da capacidade calorífica do sistema de titulação termométrica desenvolvido utilizando Placa de Elisa.	74
Tabela 24 – Resultados de entalpia de neutralização para as seis alíquotas da solução de 0,1 mL de NaOH utilizando câmera de infravermelho.	75
Tabela 25 – Resultados obtidos na utilização de sensor PT-100 para determinação das variações de temperatura das reações para solução de 0,15 mL de NaOH com solução de 0,15 mL de HCl utilizando pipetador monocanal	76
Tabela 26 – Resultados obtidos na utilização de câmera de infravermelho para determinação das variações de temperatura das reações para solução de 0,15 mL de NaOH com solução de 0,15 mL de HCl utilizando pipetador monocanal	77
Tabela 27 – Resultados obtidos para determinação das variações de temperatura das reações para solução de 0,15 mL de NaOH com solução de 0,15 mL de HCl utilizando pipetador multicanal.....	78
Tabela 28 – Comparação dos valores de temperatura e de entalpia obtidas de forma manual e com o uso do programa desenvolvido no Matlab.	80

LISTA DE ABREVIATURAS

AEPI	Auxílio ao Ensino de Processamento de Imagens
CAL	Calorias
CLP	Controlador Lógico Programável (do inglês <i>Programmable Logic Controller</i>)
cm	Centímetros
CNPQ	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CSV	Valores separados por vírgulas (do inglês <i>Comma Separated Values</i>)
DC	Corrente contínua (do inglês <i>Direct Current</i>)
DP	Desvio padrão
ELISA	Imunoensaio enzimático (do inglês <i>Enzyme-Linked Immunosorbent Assay</i>)
g	Gramas
GND	terra (do inglês <i>Ground</i>)
GUI	Interface gráfica do usuário (do inglês <i>Graphical User Interface</i>)
GUIDE	Ambiente de desenvolvimento da interface gráfica do usuário (do inglês <i>Graphical User Interface Development Environment</i>)
Hz	Hertz
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado (do inglês <i>Integrated Development Environment</i>)
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IF	Instituto Federal
IR	Infravermelho (do inglês <i>Infrared</i>)
J	Joule
kB	Quilobyte
kg	Quilograma
kJ	Quilojoule
L	Litro
LER	Lesão por esforço repetitivo
mA	Microampère
MATLAB	<i>Matrix Laboratory</i>
mg	miligramas
MHz	Mega-Hertz
mL	Mililitro

mm	Milímetro
NTC	Coeficiente negativo de temperatura (do inglês <i>Negative Temperature Coefficient</i>)
PDI	Processamento Digital de Imagens
PIC	Controlador de Interface Programável (do inglês <i>Programmable Interface Controller</i>)
PIXEL	Elementos da figura (do inglês <i>picture elements</i>)
PS	Poliestireno
PT	Platina (do inglês <i>Platinum</i>)
PTC	Coeficiente positivo de temperatura (do inglês <i>Positive Temperature Coefficient</i>)
R	Coeficiente de correlação
RTD	Termorresistência (do inglês <i>Resistance Temperature Detectors</i>)
s	Segundo
SC	<i>Saccharomyces Cerevisiae</i>
t	Temperatura
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UNISC	Universidade de Santa Cruz do Sul
UV	Ultravioleta
V	Volts
W	Watt

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
2.	OBJETIVOS	18
2.1	Objetivo geral	18
2.2	Objetivos específicos	18
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1	Entalpia.....	19
3.1.1	Entalpiometria	22
3.1.1.1	Entalpiometria por injeção direta	22
3.1.1.2	Titulação Termométrica	23
3.1.1.3	Titulação Calorimétrica	24
3.1.1.4	Entalpiometria por injeção de fluxo	25
3.1.1.5	Entalpiometria por fluxo contínuo.....	25
3.2	Sensores	26
3.3	Medição de Temperatura	28
3.3.1	Termistor	29
3.3.2	Termômetro de mercúrio	31
3.3.3	Sensor PT-100	33
3.3.4	Câmera de Infravermelho	37
3.4	Plataforma de Desenvolvimento.....	42
3.5	Linguagem de Programação	48
3.6	Matlab.....	45
3.7	Processamento de imagens	48
4.	METODOLOGIA	51
4.1	Procedimentos metodológicos	51
4.1.1	Obtenção dos parâmetros necessários para a câmera realizar a medição de temperatura	52
4.1.2	Montagem do sistema para análise entalpimétrica utilizando câmera de infravermelho como sensor de temperatura	53
4.1.3	Sistema de análise por titulação termométrica utilizando câmera de infravermelho como sensor de temperatura	55
4.1.4	Miniaturização do sistema de análise entalpimétrica desenvolvido	57

4.1.5	Sistema automatizado para análise entalpimétrica utilizando câmera de infravermelho como sensor de temperatura	57
4.1.6	Materiais e equipamentos	61
5.	RESULTADOS	64
5.1	Titulação termométrica de 5 alíquotas de 20 mL de NaOH	64
5.2	Capacidade calorífica do copo de poliestireno	66
5.3	Resultados obtidos na determinação da entalpia de neutralização de 50 mL de solução de NaOH com 50 mL de solução de HCl	67
5.4	Resultados obtidos na determinação da entalpia de neutralização de 20 mL de solução de NaOH com 20 mL de solução de HCl	70
5.5	Medidas entalpimétricas utilizando sensor PT-100, termômetro de mercúrio e câmera de infravermelho para solução de 50 mL de NaOH com solução de 50 mL de HCl ...	70
5.6	Capacidade calorífica da Placa de Elisa	74
5.7	Resultados obtidos na determinação da entalpia de neutralização de 0,1 mL de solução de NaOH com 0,1 mL de solução de HCl	75
5.8	Medidas entalpimétricas utilizando sensor PT-100 e câmera de infravermelho com um pipetador monocanal.....	76
5.9	Medidas entalpimétricas utilizando sensor PT-100 e câmera de infravermelho com um pipetador multicanal	78
5.10	Comparação dos valores obtidos pelo programa com os obtidos manualmente	79
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
	REFERÊNCIAS	84
	ANEXO A – Programa desenvolvido para movimentar os atuadores e depositar os reagentes na Placa de Elisa	90
	ANEXO B – Resultados obtidos no procedimento de titulação termométrica de cinco alíquotas de 20 mL de uma solução de NaOH.....	94
	ANEXO C – Resultados obtidos para determinação das variações de temperatura das reações para solução de 0,15 mL de NaOH com solução de 0,15 mL de HCl utilizando pipetador multicanal	95
	ANEXO D – Trecho do programa desenvolvido no Matlab que processa o vídeo da reação química e calcula capacidade calorífica e entalpia de neutralização da reação ..	97

1. INTRODUÇÃO

O crescente desenvolvimento da indústria nacional tem como reflexo o aumento da competitividade entre empresas pelo mercado nacional e internacional. Esta situação tem levado as indústrias a ampliar seus investimentos no aprimoramento constante das ferramentas utilizadas no monitoramento e controle de processos, de forma a melhorar características de segurança operacional, estabilidade operacional, especificação do produto, redução do impacto ambiental, adaptação a restrições dos equipamentos e materiais e desempenho econômico.

Esta situação tem aumentado significativamente a demanda por resultados analíticos que permitam, com rapidez e segurança, identificar qualquer não conformidade de produtos ou processos e, neste contexto, a automação de métodos analíticos tradicionais pode representar uma contribuição importante para o desenvolvimento industrial, conferindo a estes, características compatíveis às necessidades de cada processo.

Na maioria das vezes, os procedimentos analíticos realizados em laboratório apresentam erros sistemáticos nos valores medidos. Segundo a CNI (2002), o erro sistemático é a diferença entre a média de um determinado número de medições e o valor verdadeiro convencional. Os erros sistemáticos fazem a média de um conjunto de medições se desviar do valor verdadeiro aceitável e afetam a exatidão dos resultados. Abaixo, segue um exemplo de cálculo do erro sistemático.

Valor verdadeiro convencional: 12,3 cm

Medidas: 12,2 cm 12,1 cm 12,3 cm

$$\text{Média das medidas} = \frac{(12,2 + 12,1 + 12,3)}{3} = 12,2 \text{ cm}$$

$$\text{Erro sistemático} = 12,2 - 12,3 = - 0,1 \text{ cm}$$

De acordo com Skoog *et al.* (2007), os erros sistemáticos são classificados em: instrumentais, que são causados pelo comportamento não ideal de um instrumento ou por calibrações falhas; erros de método, que surgem do comportamento químico ou físico não ideal de sistemas analíticos; erros pessoais, resultantes da falta de cuidado, falta de atenção ou limitações pessoais do analista.

A importância da automação ou de um *software* que realize a determinação entalpimétrica é diminuir ou até anular esses erros, principalmente os erros pessoais. Desta

forma, este trabalho tem por tema o desenvolvimento de um sistema para determinação entalpimétrica utilizando uma câmera de infravermelho como sensor de temperatura.

Este projeto está vinculado à linha de pesquisa em Instrumentação, Sistemas de medição e Tratamento de dados do Programa de Pós-graduação (Mestrado) em Sistemas e Processos Industriais da Universidade de Santa Cruz do Sul, e foi desenvolvido junto ao grupo de Pesquisa em Sistemas e Processos Industriais da UNISC, cadastrado junto ao CNPq. Além disto, este projeto de pesquisa integra um projeto maior, denominado *Desenvolvimento de novas metodologias para o controle e otimização de processos industriais*.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste estudo é desenvolver um sistema para análise entalpimétrica utilizando câmera de infravermelho como sensor de temperatura.

2.2 Objetivos específicos

- Montar um sistema para análise entalpimétrica utilizando câmera de infravermelho como sensor de temperatura;
- Montar um sistema de análise por titulação termométrica utilizando câmera de infravermelho como sensor de temperatura;
- Investigar alternativas para miniaturização do sistema de análise entalpimétrica desenvolvido;
- Desenvolver um sistema automatizado para análise entalpimétrica utilizando câmera de infravermelho como sensor de temperatura.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão de literatura abordada nesta pesquisa está dividida em 8 tópicos principais. Inicialmente será abordado sobre a entalpia e os métodos de entalpimetria. O segundo tópico descreve sobre câmeras de infravermelho utilizadas para produção de termogramas. O tópico seguinte trata da instrumentação, descrevendo sobre os tipos de sensores e sua classificação. O quarto tópico compreende a medição de temperatura e os equipamentos e sensores utilizados. Posteriormente são apresentadas as diferentes plataformas de desenvolvimento de hardware existentes. Os dois últimos tópicos desta revisão tratam sobre programação em Matlab ® (<http://www.mathworks.com>) e processamento de imagens, respectivamente.

3.1 Entalpia

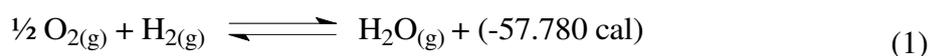
Entalpia é a energia liberada pelos reagentes, quando os mesmos se transformam em produtos (USBERCO e SALVADOR, 2006).

Conforme Sardella e Mateus (1986), a variação de entalpia é a quantidade de calor que se pode medir em uma reação química, sendo o calor resultante da diferença dos conteúdos energéticos antes e depois da reação, simbolizada por ΔH .

O cálculo da variação de entalpia é dado pela expressão $\Delta H = H_{\text{final}} (\text{produtos}) - H_{\text{inicial}} (\text{reagentes})$ ou $\Delta H = H_p - H_r$ (ASSUMPÇÃO *et al.*, 2010).

Reações exotérmicas cedem energia na forma de calor para o ambiente (ASSUMPÇÃO *et al.*, 2010). Nas reações exotérmicas, como ocorre liberação de calor, a entalpia dos produtos (H_p) é menor do que a entalpia dos reagentes (H_r). Se $H_r > H_p$ e $\Delta H = H_p - H_r$, então $\Delta H < 0$ (USBERCO e SALVADOR, 2006).

Abaixo um exemplo de reação exotérmica (BASTOS *et al.*, 2011):



A Figura 1 apresenta um gráfico de uma reação exotérmica.

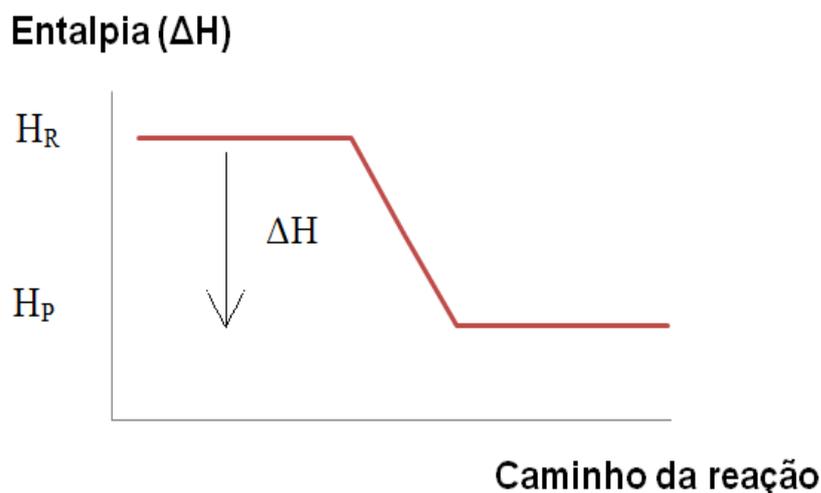
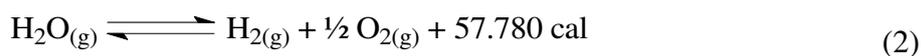


Figura 1. Gráfico de uma reação exotérmica. Fonte: Do autor.

Numa reação endotérmica, o calor é absorvido do ambiente (ASSUMPÇÃO *et al.*, 2010). Se $H_R < H_P$ e $\Delta H = H_P - H_R$, então $\Delta H > 0$ (USBERCO e SALVADOR, 2006).

Nas reações endotérmicas, como ocorre absorção de calor, a entalpia dos produtos (H_P) é maior do que a entalpia dos reagentes (H_R) (USBERCO e SALVADOR, 2006).

Abaixo um exemplo de reação endotérmica (BASTOS *et al.*, 2011):



A Figura 2 apresenta um gráfico de uma reação endotérmica.

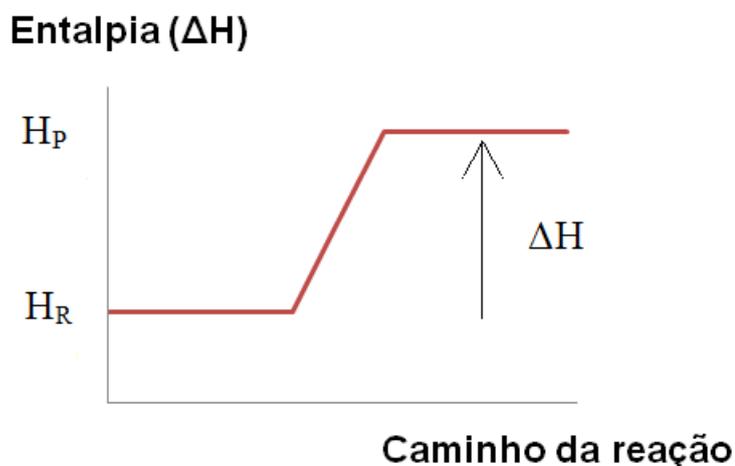


Figura 2. Gráfico de uma reação endotérmica. Fonte: Do autor.

A Tabela 1 apresenta os diferentes tipos de entalpia (SARDELLA e MATEUS, 1986)

Tabela 1 – Nomes, conceitos e exemplos dos diferentes tipos de entalpia

Tipo	Conceito	Exemplo
Combustão	Varição de entalpia envolvida na combustão completa de 1 mol de moléculas de determinada substância, em que todos os participantes da reação se encontram em condições-padrão.	$\text{CH}_{4(g)} + 2 \text{O}_{2(g)} \longrightarrow \text{CO}_{2(g)} + 2 \text{H}_2\text{O}_{(l)}$ $\Delta H^0 = -212,8 \text{ kcal mol}^{-1}$
Neutralização	Varição de entalpia envolvida na neutralização de 1 equivalente-grama de um ácido por 1 equivalente-grama de uma base, ambas em soluções aquosas diluídas.	$\text{HCl}_{(aq)} + \text{NaOH}_{(aq)} \longrightarrow \text{NaCl}_{(aq)} + \text{H}_2\text{O}_{(l)}$ $\Delta H^0 = -13,8 \text{ kcal mol}^{-1}$
Dissolução	Varição de entalpia envolvida na dissolução de 1 mol de determinada substância numa quantidade de água suficiente para que a solução seja diluída.	$\text{HCl}_{(g)} \xrightarrow{\text{H}_2\text{O}} \text{HCl}_{(aq)}$ $\Delta H^0 = -18,0 \text{ kcal mol}^{-1}$
Formação	Varição de entalpia envolvida na reação de formação de 1 mol de moléculas de determinada substância, a partir de substâncias simples em condição padrão.	$\text{H}_{2(g)} + \frac{1}{2} \text{O}_{2(g)} \longrightarrow \text{H}_2\text{O}_{(l)}$ $\Delta H^0 = -68,3 \text{ kcal mol}^{-1}$
Fusão	Varição da entalpia observada (calor absorvido) na fusão total de 1 mol da substância, à pressão de 1 atm.	$\text{H}_2\text{O}_{(s)} \longrightarrow \text{H}_2\text{O}_{(l)}$ $\Delta H = +1,7 \text{ kcal mol}^{-1}$
Solidificação	Varição de entalpia observada (calor liberado) na solidificação total de 1 mol da substância, a pressão de 1 atm.	$\text{H}_2\text{O}_{(l)} \longrightarrow \text{H}_2\text{O}_{(s)}$ $\Delta H = -1,7 \text{ kcal mol}^{-1}$
Vaporização	Varição de entalpia observada (calor absorvido) na vaporização total de 1 mol da substância, a pressão de 1 atm.	$\text{H}_2\text{O}_{(l)} \longrightarrow \text{H}_2\text{O}_{(v)}$ $\Delta H = +10,5 \text{ kcal mol}^{-1}$
Condensação	Varição de entalpia observada (calor liberado) na condensação de 1 mol da substância, a pressão de 1 atm.	$\text{H}_2\text{O}_{(v)} \longrightarrow \text{H}_2\text{O}_{(l)}$ $\Delta H = -10,5 \text{ kcal mol}^{-1}$
Solução	Varição de energia observada na dissolução de 1 mol da substância (soluto) em solvente suficiente para uma solução diluída, de modo que a adição de mais solvente não altere o estado térmico do sistema.	$\text{HCl}_{(g)} + \text{H}_2\text{O}_{(l)} \longrightarrow \text{H}_3\text{O}^+_{(aq)} + \text{Cl}^-_{(aq)}$ $\Delta H = -18,0 \text{ kcal mol}^{-1}$

Fonte: Sardella e Mateus (1986)

3.1.1 Entalpimetria

A análise entalpimétrica é a designação genérica dos métodos analíticos em que a variação de entalpia de uma reação química é medida direta ou indiretamente, com o objetivo de realizar uma determinação quantitativa de um reagente ou catalisador (STAHL, 1994).

Segundo Stahl (1994), essa análise se divide em 5 métodos: entalpimetria por injeção direta, titulação termométrica, titulação calorimétrica, entalpimetria por injeção em fluxo e entalpimetria por fluxo contínuo.

3.1.1.1 Entalpimetria por injeção direta

A entalpimetria por injeção direta é um método analítico em que um reagente é injetado em um recipiente calorimétrico contendo outro reagente. A variação de entalpia da reação resultante é medida e diretamente relacionada com a quantidade do reagente limitante (geralmente o analito). Em algumas variantes utilizadas para ensaios de catalisador, a taxa inicial de troca de calor é a variável medida. Os gráficos de temperatura *versus* tempo da troca de calor e troca de calor *versus* tempo da troca de calor podem ser chamados de entalpograma (STAHL, 1994).

A entalpimetria por injeção direta foi utilizada por Oliveira e Pasquini (1984) para determinação de água no etanol e na acetona baseado no calor da diluição. Foram usados dois métodos: no primeiro, foi colocado 50 mL de água destilada num frasco e a pipeta foi abastecida com as amostras (acetona e etanol) e mergulhada no frasco; depois de atingido o equilíbrio térmico, as amostras foram injetadas na água e devido à mudança de temperatura, o calor de diluição foi registrado. No segundo, foi colocado 50 mL de amostra e 1,30 mL de água destilada foi adicionada com a pipeta após o equilíbrio térmico. Os resultados para cinco repetições de etanol e acetona, feitos com os dois procedimentos mostraram que a variação de temperatura foi medida com desvio padrão de 0,002 °C para o etanol e de 0,004 °C para acetona.

As Tabelas 2 e 3 mostram os resultados para determinação de água no etanol e na acetona, respectivamente.

Tabela 2 – Resultados para a determinação de água no etanol por entalpiometria por injeção direta e picnometria

Amostras	Procedimento	Massa de água em 100 g de amostra, g		Erro relativo (%)
		Picnometria	Calor de diluição	
1	1	57,50	57,40	-0,20
2	1	49,60	49,80	+0,40
3	1	54,30	54,00	-0,60
4	1	16,90	16,70	-0,90
5	2	7,60	7,80	+2,60
6	2	5,47	5,50	+0,50
7	2	4,66	4,60	-1,30
8	2	3,26	3,28	+0,60
9	2	2,00	2,03	+1,50
10	2	0,83	0,82	-1,20

Fonte: Oliveira e Pasquini (1984).

Tabela 3 – Resultados para a determinação de água na acetona por entalpiometria por injeção direta e picnometria

Amostras	Procedimento	Massa de água em 100 g de amostra, g		Erro relativo (%)
		Picnometria	Calor de diluição	
1	1	57,20	57,10	-0,20
2	1	44,70	44,60	-0,20
3	1	39,40	39,60	0,50
4	1	21,60	21,80	1,10
5	2	4,29	4,22	-1,60
6	2	3,68	3,60	-2,20
7	2	1,37	1,38	0,70
8	2	1,00	1,03	3,00

Fonte: Oliveira e Pasquini (1984).

3.1.1.2 Titulação Termométrica

A titulação termométrica é um método de análise no qual um reagente (o titulante) é adicionado continuamente ou passo a passo em um recipiente adiabático ou isoperibol contendo outro reagente. A variação de entalpia(s) da reação subsequente(s) causa uma mudança de temperatura que, quando representada graficamente em função do volume de titulante, pode ser utilizado para localizar o ponto final da titulação(s). Este é o termo preferido para experimentos que produzem gráficos de temperatura *versus* volume de titulante em que o objetivo principal é a determinação quantitativa. No entanto, quando um recipiente calorimétrico é utilizado, de tal forma que a capacidade de calor é conhecida, parâmetros termodinâmicos podem ser calculados a partir destas experiências. Um sinônimo aceitável nesse caso é a titulação entalpiométrica. O gráfico de variação de temperatura *versus* volume

de titulante é chamado de curva de titulação termométrica ou curva de titulação entalpimétrica (STAHL, 1994).

A titulação termométrica foi usada por Carneiro *et al.* (2002) para a determinação da acidez de óleos graxos. Foram usados óleos refinados e não refinados e seis procedimentos para cada óleo (Tabela 4).

Tabela 4 – Índice de acidez de amostras de óleos refinados e não refinados determinado por titulação termométrica

	Amostras de óleos	Índice de acidez (mg de KOH g ⁻¹ de óleo)	
		Média (n=6)	Desvio-padrão
Óleos não refinados	Óleo Castor	2,851	0,021
	Óleo Babassu	0,947	0,038
	Óleo Buriti	6,846	0,052
	Óleo Pequi	2,405	0,017
Óleos refinados	Óleo de soja	0,624	0,053
	Óleo de milho	0,558	0,092
	Óleo de girassol	0,76	0,055

Fonte: Carneiro *et al.* (2002).

3.1.1.3 Titulação Calorimétrica

A titulação calorimétrica é uma titulação realizada em um calorímetro. Essa titulação apresenta um gráfico de troca de calor *versus* volume de titulante. Este é o termo mais usual para experimentos em que o objetivo principal é a medição de parâmetros termodinâmicos (STAHL, 1994).

A titulação calorimétrica foi usada por Silva Filho e Volpe (1999) como estudo da interação de Álcoois com *Saccharomyces Cerevisiae* (SC) a 298 K. O objetivo foi determinar a entalpia de transferência de álcoois alifáticos em suspensões de *Saccharomyces Cerevisiae* utilizando o método calorimétrico de quebra de ampola, ou seja, ampolas com células de Sc mergulhadas numa solução de álcool, onde as mesmas são quebradas e ocorre a titulação.

A Tabela 5 mostra os valores das entalpias de transferência para sete álcoois.

Tabela 5 – Entalpia de interação de alcoóis/*Saccharomyces Cerevisiae* a 298 K

Álcoois	Quantidade de álcool adicionado (mol)	Entalpia álcool/solução isotônica (kJmol ⁻¹)	Entalpia álcool/células de Sc (kJmol ⁻¹)	Entalpia de transferência (kJmol ⁻¹)
Etanol	5,21 x 10 ⁻³	6,56 ± 0,23	7,70 ± 0,20	1,14 ± 0,30
Propanol-1	5,51 x 10 ⁻³	7,03 ± 0,30	8,58 ± 0,20	1,55 ± 0,36
Butanol-1	4,51 x 10 ⁻³	5,01 ± 0,40	6,49 ± 0,23	1,48 ± 0,46
Pentanol-1	3,82 x 10 ⁻³	3,57 ± 0,20	6,07 ± 0,20	2,50 ± 0,28
Hexanol-1	4,51 x 10 ⁻³	2,46 ± 0,01	5,97 ± 0,07	3,51 ± 0,07
Heptanol-1	2,30 x 10 ⁻³	2,46 ± 0,14	6,07 ± 0,07	3,43 ± 0,16
Octanol-1	1,96 x 10 ⁻³	0,50 ± 0,02	4,33 ± 0,07	3,83 ± 0,07

Fonte: Silva Filho e Volpe (1999).

3.1.1.4 Entalpietria por injeção de fluxo

A entalpietria por injeção de fluxo é utilizada para descrever vários métodos relacionados em que uma mudança momentânea de temperatura num fluxo de corrente líquida, causada por uma reação química, é utilizada para determinar quantitativamente um analito. O analito é introduzido como uma amostra discreta de líquido (isto é, porção de teste) para o fluxo de fluido (STAHL, 1994).

Kamogawa e Teixeira (2009) desenvolveram um amostrador automático de baixo custo para análise por injeção em fluxo. Com o uso de dois motores de passo e componentes eletrônicos para a construção do amostrador automático, foram adicionados soluções de NaOH em amostras contendo NH₄⁺ (sal), produzindo NH₃ (gás). A equação linear que representou a curva de calibração foi $Y = 0,059 (\pm 0,02) * X + 0,005 (\pm 0,002)$ com ajuste de $R^2 = 0,998$.

3.1.1.5 Entalpietria por fluxo contínuo

A entalpietria por fluxo contínuo é utilizada para descrever os métodos em que um reagente é alimentado continuamente em uma corrente de fluxo de analito e a diferença de temperatura é medida antes e depois de ocorrer a mistura. A concentração de analito é diretamente proporcional à diferença de temperatura medida (STAHL, 1994).

A entalpietria por fluxo contínuo foi utilizada por Mendes (1986) para determinação de cálcio e magnésio em calcários (Tabelas 6 e 7). Ambos foram misturados com diversas soluções através de uma bomba peristáltica. A equação da reta para o cálcio foi $S_{Ca} = - 0,149$

+ 0165 * C_{Ca} com coeficiente de correlação de 0,9999 e para o magnésio foi de S_{Mg} = 0,087 – 0,159 * C_{Mg} com coeficiente de correlação de 0,9999.

Tabela 6 – Resultados das determinações de óxido de cálcio nas amostras certificadas por entalpimetria de fluxo contínuo

Amostra	% CaO (massa/massa)		Erro relativo (%)
	Valor de referência	Método Entalpimétrico	
1	53,8	53,3	-0,9
2	31,0	31,4	1,3
3	60,9	60,6	-0,5
4	52,1	51,5	-1,1
5	54,7	54,0	-1,3

Fonte: Mendes (1986).

Tabela 7 – Resultados das determinações de óxido de magnésio nas amostras certificadas por entalpimetria de fluxo contínuo

Amostra	% CaO (massa/massa)		Erro relativo (%)
	Valor de referência	Método Entalpimétrico	
1	0,5	0,6	20,0
2	12,4	12,8	3,2
3	1,8	1,9	5,5
4	6,2	6,7	8,1
5	23,5	24,0	2,1

Fonte: Mendes (1986).

3.2 Sensores

Segundo Fraden (2010), um sensor é um dispositivo que recebe um estímulo e responde com um sinal elétrico e sua finalidade é responder a algum tipo de uma propriedade física de entrada (estímulo) e convertê-lo em um sinal elétrico que é compatível com circuitos eletrônicos.

A Figura 3 mostra o funcionamento de um sensor, onde o processo físico a ser medido está no lado esquerdo da figura e o mensurando é representado por uma variável física observável X. A variável X não precisa ser necessariamente o mensurando, mas relacionada ao mensurando, de alguma forma. Por exemplo, a massa de um objeto é muitas vezes medida pelo processo de pesagem, onde o mensurando é a massa, mas a variável física de medição é a força que a massa exerce no campo gravitacional da Terra. A variável de sinal S pode ser exibida, gravada ou usada como um sinal de entrada em um dispositivo secundário. E por fim, M é a medida observada na saída do sensor (HANSMAN, 1999).

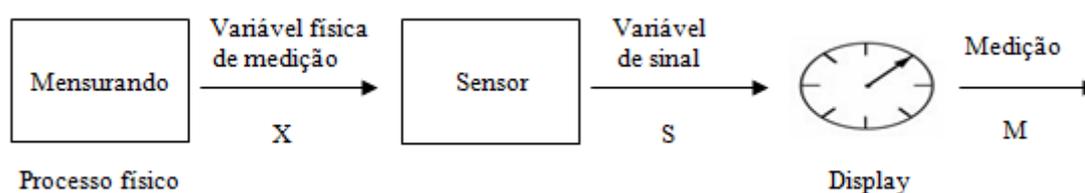


Figura 3. Esquema que representa o modo de funcionamento de um sensor. Fonte: Figura elaborada pelo autor a partir de informações recolhidas em Hansman (1999).

Balbinot e Brusamarello (2010) classificaram as variáveis em relação a suas características físicas, como pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8 – Classificação das variáveis por características físicas.

Classe das variáveis	Exemplos
Variáveis térmicas – relacionada à condição ou à característica do material. Depende da energia térmica do material.	Temperatura, temperatura diferencial, calor específico, entropia e entalpia.
Variáveis de radiação – relacionadas à emissão, propagação, reflexão e absorção de energia através do espaço ou através de materiais. Emissão, absorção e propagação corpuscular.	Radiação nuclear. Radiação eletromagnética (infravermelho, luz visível, ultravioleta). Raios X, raios cósmicos e radiação gama. Variáveis fotométricas e variáveis acústicas.
Variáveis de força – relacionadas à alteração de repouso ou de movimento dos corpos.	Peso, força total, momento de torque, tensão mecânica, força por unidade de área, pressão, pressão diferencial e vácuo.
Taxa de variáveis – relacionadas à taxa com que um corpo ou uma variável medida se afasta ou se aproxima de um determinado ponto de referência ou à taxa de repetição de um determinado evento. O tempo é sempre um componente da medida de taxas.	Vazão de um determinado fluido, fluxo de massa, aceleração, frequência, velocidade linear, velocidade angular e vibração mecânica.
Variáveis de quantidade – relacionadas às quantidades de material existente dentro de limites específicos ou que passa sobre um ponto num determinado período.	Massa e peso a uma gravidade local. Vazão integrada num tempo, volume, espessura e mols de material.
Variáveis de propriedades físicas – relacionadas às propriedades físicas de materiais (exceto propriedades relacionadas à massa ou composição química).	Densidade, umidade, viscosidade, consistência, características estruturais como ductibilidade, dureza, plasticidade.
Variáveis de composição química – relacionadas às propriedades químicas e à análise de substâncias.	Medidas quantitativas de CO ₂ , CO, H ₂ S, NO _x , S, SO _x , C ₂ H ₂ , CH ₄ , pH, qualidade do ar e vários solventes e químicos, entre outros.
Variáveis elétricas – relacionadas às variações de parâmetros elétricos.	Tensão, corrente, resistência, condutância, indutância, capacitância, impedância.

Fonte: Balbinot e Brusamarello (2010)

3.3 Medição de Temperatura

Temperatura é uma grandeza física que mede o estado de agitação das partículas de um corpo, caracterizando o seu estado térmico (BONJORNO *et al.*, 1999).

Segundo a Física Clássica, a temperatura quantifica o calor, que é uma forma de energia associada à atividade molecular de uma substância. Quanto maior a agitação molecular, maior a quantidade de calor e maior será a temperatura da substância (BEGA, 2011).

A relação entre a quantidade de calor e a temperatura é dada pela fórmula mostrada em 3 (BEGA, 2011):

$$\Delta Q = m \times c \times \Delta t \quad (3)$$

Onde:

ΔQ = variação da quantidade de calor;

m = massa da substância envolvida;

c = calor específico (característica da substância);

Δt = variação da temperatura.

Como a sensação térmica é variável de indivíduo pra indivíduo, ela não serve como medida de temperatura de um sistema (BONJORNO *et al.*, 1999). Segundo Hoppe (1928) citado por Pires *et al.* (2006), além de ser um instrumento “diferencial” (uma vez que só consegue distinguir entre “mais frio” e “mais quente” em relação à sua própria temperatura), o corpo humano induz facilmente o observador em erro, dado que é sensível a outras grandezas, como por exemplo a condutividade térmica (uma maçaneta metálica “parece mais fria” ao tato do que a madeira da porta onde se encontra colocada, apesar de estarem ambas à mesma temperatura).

Portanto, para se determinar a temperatura de um objeto é necessário um conceito independentemente das percepções sensoriais e que envolva quantidades mensuráveis (BONJORNO *et al.*, 1999).

Assim, Almeida *et al.* (2010) afirmam que a medição de temperatura pode ser feita por 4 tipos de instrumentos: termômetro de contato, termometria convencional, pirômetro de radiação ou pirômetro óptico e termógrafos ou termovisores.

Brito *et al.* (2005) e Araújo *et al.* (2011) citam que a termometria pode ser dividida em 2 métodos: convencional e infravermelho. Já Marins *et al.* (2012), Mata (2006), Sung *et al.*

(2014), von Beckerath *et al.* (1998) e Fontes (2005) comentam que a medição de temperatura pode ser realizada por 2 métodos: medição por contato e medição sem contato.

Em métodos de medição da temperatura por contato, o termômetro, e em especial a parte que contém o transdutor sensível à temperatura, é colocada em contato com o meio que está sendo medido. A troca de energia entre termômetro e o meio ocorre principalmente através de condução térmica e ambos devem estar em equilíbrio térmico no momento da medição de temperatura. Como exemplo, podemos citar termômetro de mercúrio, termistor e PT-100.

Métodos de medição de temperatura sem contato usam a troca de energia entre o objeto medido e termômetro pela radiação de calor emitida pelo objeto (VON BECKERATH *et al.*, 1998). Câmera de infravermelho é um exemplo de medição sem contato.

A seguir serão explicados o conceito e funcionamento dos principais sensores de temperatura relacionados ao desenvolvimento desta pesquisa.

3.3.1 Termistor

Os termistores são resistores termicamente sensíveis. São semicondutores eletrônicos cuja resistência elétrica varia com a temperatura (THOMAZINI e ALBUQUERQUE, 2009).

Devido ao fato da resistência elétrica dos termistores poder variar de forma proporcional ou inversa com o aumento de temperatura ao qual o sensor for exposto, os termistores podem ser classificados em 2 tipos (THOMAZINI e ALBUQUERQUE, 2009).

- NTC (negative temperature coefficient): a resistência aumenta com a diminuição da temperatura;
- PTC (positive temperature coefficient): a resistência aumenta com o aumento da temperatura.

Conforme Balbinot e Brusamarello (2010), o NTC é o mais fácil de ser encontrado no mercado, com grande variedade no tipo construtivo e nos valores de resistência, ao contrário do PTC, que possui maior complexidade no seu aspecto construtivo.

A Figura 4 mostra a imagem de um termistor NTC.



Figura 4. Imagem de um termistor NTC com coeficiente de temperatura de 3470 K . Fonte: Cantherm (2015).

Os termistores têm vasta aplicação no cotidiano, como por exemplo, acoplados em uma prótese de mão, evitando que a mesma fique danificada quando toca objetos muito quentes ou frios (ANDRIANESIS e TZES, 2014). O termistor também pode ser utilizado em sistemas de alarme de incêndio rastreável onde é realizada a leitura da temperatura e repassados os valores lidos a um microcontrolador PIC (JEE *et al.*, 2014). Adicionalmente, o termistor pode ser o elemento sensor de um sistema eletrônico simples de leitura direta de temperatura, no qual o termômetro possui uma faixa de trabalho entre 0 e 32°C e uma exatidão de 0,1°C para medidas nessa faixa (GUADAGNINI e BARLETTE, 2005).

Conforme Citolin (2012), Maniçoba (2013), Sapoff (1999), von Beckerath *et al.* (1998), Muñoz *et al.* (2010), Kim e Kim (2011), a relação resistência e temperatura pode ser feita utilizando a equação (4):

$$R_T = R_0 \times e^{\beta \times \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad (4)$$

Onde:

R_T é a resistência no NTC para uma certa temperatura T, em ohms;

R_0 é a resistência que o NTC apresenta na temperatura de referência T_0 , em ohms;

β é o coeficiente de temperatura do termistor, dado em Kelvin;

T é a temperatura para a qual se quer determinar a resistência R_T , dada em Kelvin;

T_0 é a temperatura de referência, dada em Kelvin.

Conforme Balbinot e Brusamarello (2010), Chen (2009), Steinhart e Hart (1968), Thomazini e Albuquerque (2009), a relação resistência e temperatura também pode ser adquirida utilizando a equação (5):

$$T(K) = \frac{1}{a + b \times \ln(R_{NTC}) + c \times (\ln(R_{NTC}))^3} \quad (5)$$

Onde,

T(K) = temperatura, em Kelvin;

R_{NTC} = resistência do termistor;

a, b e c = coeficientes que normalmente são fornecidos pelos fabricantes de termistor.

Citolin (2012) e von Beckerath *et al.* (1998) citam que para converter o valor de Kelvin para Celsius, utiliza-se a fórmula mostrada em (6)

$$T(^{\circ}\text{C}) = T(\text{K}) - 273,15 \quad (6)$$

A precisão obtida pelo uso da equação de Steinhart-Hart é da ordem de $\pm 0,01$ °C (BALBINOT e BRUSAMARELLO, 2010).

3.3.2 Termômetro de mercúrio

Os materiais líquidos se dilatam com o aquecimento e contraem-se com o esfriamento, segundo uma lei de expansão volumétrica a qual relaciona seu volume com a temperatura e um coeficiente de expansão que é próprio de cada material (FIALHO, 2005).

A equação que rege esta relação é:

$$V_t = V_o \times (1 + \beta \times \Delta t) \quad (7)$$

Em que:

V_o = Volume do líquido a temperatura inicial de referência t_o

V_t = Volume do líquido a temperatura t

β = Coeficiente de expansão do líquido °C⁻¹

Δt = t – t_o

A Tabela 9 apresenta as características físico-químicas e o coeficiente de expansão dos líquidos (transdutores) mais usados nos termômetros (FIALHO, 2005) e (NICHOLAS, 1999).

Tabela 9 – Características físico-químicas e coeficiente de expansão dos líquidos (transdutores) mais usados nos termômetros.

Líquido	Ponto de Solidificação (°C)	Ponto de Ebulição (°C)	Faixa de Uso (°C)	Coeficiente de expansão (°C ⁻¹)
Mercúrio	-39	+357	-38 a 550	0,00016
Álcool Etilico	-115	+78	-100 a 70	0,00104
Tolueno	-92	+110	-80 a 100	0,00145
Pentano	-130	+36	-100 a 30	0,00103

Fonte: Fialho (2005) e Nicholas (1999).

A Figura 5 apresenta um termômetro de mercúrio.



Figura 5. Termômetro de mercúrio clínico analógico oval com escala de 35°C à 42°C. Fonte: Incoterm (2015).

Conforme Nicholas (1999), o termômetro de líquido em vidro é formado por 4 partes:

- O bulbo é um recipiente de vidro fino preenchido pela maior parte do líquido termométrico.
- A haste é um capilar de vidro, acoplado ao bulbo.
- O líquido é geralmente o mercúrio para melhor precisão, ou um líquido orgânico para faixas de temperatura mais baixas.
- As marcações são geralmente gravadas ou impressas sobre a haste. As marcações incluem a escala, para permitir uma leitura direta da temperatura, bem como outras informações importantes.

Quanto a escala, os termômetros de vidro podem ser de 2 tipos, termômetros de escala externa e interna (NICHOLAS, 1999). Os termômetros de escala externa são fabricados em vidro maciço, normalmente em formato circular ou prismático. A impressão da escala é feita

na superfície do vidro. Já os termômetros de escala interna são constituídos de tubo invólucro que faz com que a escala, que pode ser de vidro ou metal, fique embutida em seu interior.

Em relação a medição de temperatura, os termômetros podem funcionar por imersão parcial e imersão total (BALBINOT e BRUSAMARELLO, 2010). Termômetros de imersão parcial são calibrados para ler a temperatura corretamente quando expostos a temperaturas desconhecidas e ainda imersos até uma profundidade indicada enquanto que os termômetros de imersão total são calibrados para ler a temperatura corretamente quando expostos a temperaturas desconhecidas e ainda imersos totalmente, ficando visível apenas a porção necessária para se realizar a leitura.

A diferença fundamental entre esses dois instrumentos é que o termômetro de imersão parcial estará sujeito a erros maiores, devido à diferença de temperatura entre uma parte do corpo do instrumento e o ponto de medição (BALBINOT e BRUSAMARELLO, 2010).

Por ser constituído de material frágil e devido à dificuldade de se registrar de maneira automática sua indicação ou transmiti-la à distância, o uso deste termômetro é mais comum em laboratórios ou em indústrias, com a utilização de uma proteção metálica. Além disso, sua medição é analógica e pode apresentar erros acima do esperado, dependendo da precisão desejada (DANTAS, 2006).

3.3.3 Sensor PT-100

As termorresistências, bulbos de resistência ou RTD (Resistance Temperature Detectors) são sensores de temperatura cujo princípio de funcionamento baseia-se na variação da resistência elétrica do elemento condutor em função da temperatura. Seu elemento sensor consiste em uma resistência em forma de fio de platina (Pt) de alta pureza, níquel (Ni) ou cobre (Cu), encapsulada num bulbo de cerâmica ou de vidro (THOMAZINI e ALBUQUERQUE, 2009).

A equação 8 representa com alta aproximação a variação da resistência elétrica em função da temperatura (FIALHO, 2005):

$$R_{(T)} = R_0 \times (1 + \alpha \times T) \quad (8)$$

Em que:

$R_{(T)}$: Resistência elétrica a temperatura “T”;

R_0 : Resistência elétrica a temperatura de 0 °C;

α : Coeficiente de variação da resistência elétrica em função da temperatura medida em °C;

T: Temperatura medida em °C.

O coeficiente α é calculado pela resistência medida a duas temperaturas de referência (por exemplo, 0 °C e 100 °C).

Pode-se isolar o coeficiente de temperatura α :

$$\alpha = \frac{R - R_0}{R_0 \times (T - T_0)} \quad (9)$$

ou, de maneira específica, entre 0°C e 100°C:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{(100^\circ\text{C}) \times R_0} \quad (10)$$

Conforme Balbinot e Brusamarello (2010), podem-se citar alguns α (0 a 100 °C) de materiais comumente utilizados em RTDs:

$$\text{Cobre} \rightarrow \frac{0,0043 \Omega}{\Omega^\circ\text{C}}$$

$$\text{Níquel} \rightarrow \frac{0,00681 \Omega}{\Omega^\circ\text{C}}$$

$$\text{Platina} \rightarrow \frac{0,00385 \Omega}{\Omega^\circ\text{C}}$$

$$\text{Tungstênio} \rightarrow \frac{0,0046 \Omega}{\Omega^\circ\text{C}}$$

A Figura 6 mostra o comportamento, em relação à temperatura e resistência, dos metais mais comuns usados na construção dos RTDs.

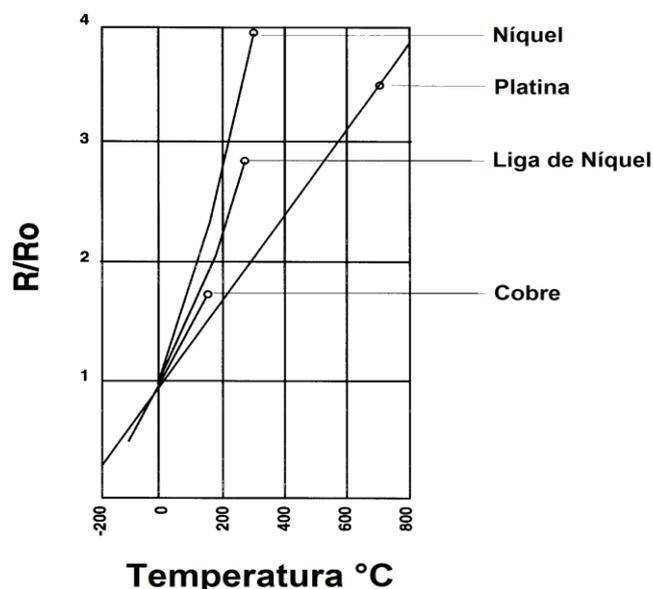


Figura 6. Comportamento típico dos termorresistores de Níquel, Platina, Liga de Níquel e de Cobre. Fonte: Balbinot e Brusamarello (2010) e Burns (1999).

Segundo Thomazini e Albuquerque (2009), as termorresistências são sensores de temperatura muito utilizados na indústria por suas condições de alta estabilidade mecânica e térmica, resistência à contaminação, baixo índice de desvio pelo envelhecimento e tempo de uso, além de possuir uma larga faixa de trabalho. Thomazini e Albuquerque (2009) também citam que as mais utilizadas são PT-100, PT-1000, Ni-100 e Ni-1000.

Burns (1999) cita que a platina é uma escolha melhor do que o cobre ou níquel, porque é quimicamente inerte, ele resiste bem a oxidação e também funciona numa gama de temperaturas superior.

Conforme Balbinot e Brusamarello (2010), atualmente, as termorresistências de platina mais usuais são: PT-25,5 Ω , PT-100 Ω , PT-120 Ω , PT-130 Ω , PT-500 Ω , e o mais conhecido e mais utilizado industrialmente é o PT-100 Ω . Essas siglas significam o metal (PT, platina) e a resistência à temperatura de 0 °C.

A Figura 7 ilustra um sensor PT-100.



Figura 7. Sensor PT-100 com 4 fios e faixa de temperatura de -50°C até $+250^{\circ}\text{C}$. Fonte: Farnell (2015).

A Figura 8 mostra a curva característica do sensor PT-100.

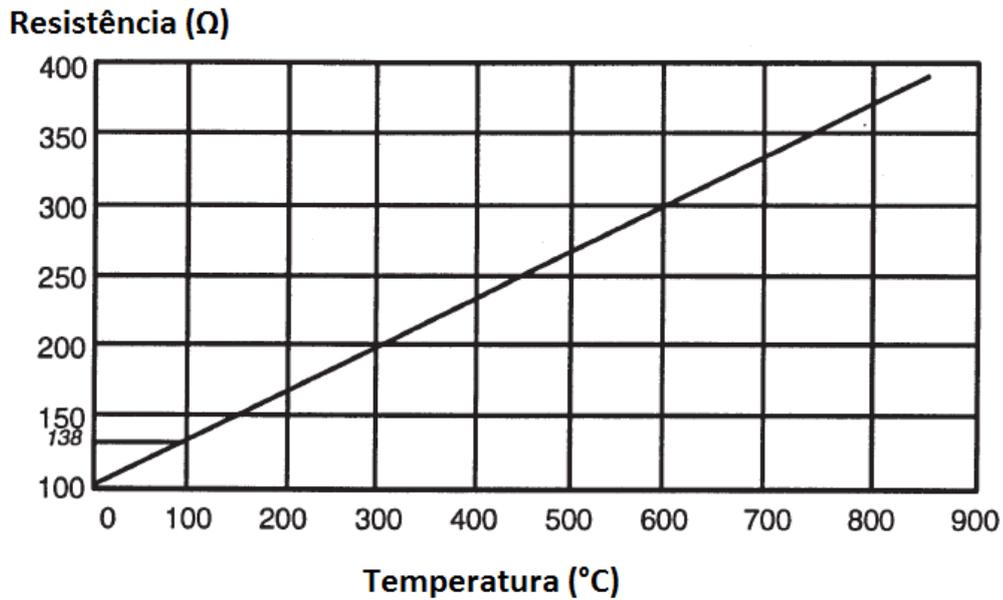


Figura 8. Características de temperatura e resistência do sensor PT-100. Fonte: Labfacility (2014).

A termorresistência de platina é a mais usada industrialmente, devido à grande estabilidade e precisão (THOMAZINI e ALBUQUERQUE, 2009) e (MATA, 2006). Possui como característica uma resistência de 100 Ω a 0 °C (THOMAZINI e ALBUQUERQUE, 2009).

RTDs comuns podem fazer medidas com erros da ordem de $\pm 0,1$ °C, enquanto os termômetros de resistência de platina podem chegar a erros da ordem de 0,0001 °C (BALBINOT e BRUSAMARELLO, 2010) e (BURNS, 1999).

A resistência elétrica do sensor é usada para calcular a temperatura, utilizando a relação entre a resistência e a temperatura do padrão IEC 60751.

As fórmulas para conversão, conforme IEC 60751 (THOMAZINI e ALBUQUERQUE, 2009) e (LABFACILITY, 2014) são:

- Para a faixa de -200 a 0 °C:

$$R_t[\Omega] = R_0 \times [1 + A \times t + B \times t^2 + C(t-100)t^3] \quad (11)$$

- Para a faixa de 0 a 850 °C:

$$R_t[\Omega] = R_0(1 + A \times t + B \times t^2) \quad (12)$$

Onde:

R_t = Resistência na temperatura t

R_0 = Resistência em $t = 0$ °C

$A = 3,9083 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

$B = -5,775 \times 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-2}$

$C = -4,183 \times 10^{-12} \text{ } ^\circ\text{C}^{-4}$

3.3.4 Câmera de Infravermelho

A análise térmica por infravermelhos é a técnica utilizada para converter a radiação térmica emitida pela superfície de um objeto, que é invisível ao olho humano devido ao seu comprimento de onda, em imagens visuais detalhadas do perfil de temperaturas. Para tal, é utilizado um equipamento de análise térmica por infravermelho que capta a radiação térmica (ou infravermelha) emitida pela superfície em estudo sem a necessidade de qualquer contato (SOUZA, 2010).

Pelo fato da análise térmica possibilitar a medição de temperatura à distância sem haver necessidade de contato físico com o objeto, é então permitido ao operador a vantagem de não se expor a perigos gerados pelas mais diversas fontes de energia (COUTINHO, 2013). Outra vantagem é que, através da análise térmica, é possível verificar equipamentos em pleno funcionamento (sem interferência na produção) e inspecionar grandes superfícies em pouco tempo (alto rendimento) (SOUZA, 2008).

A Figura 9 apresenta um diagrama simplificado de um sistema de diagnóstico de falhas baseado em análise térmica. Nesse diagrama, o equipamento elétrico é monitorado por uma câmera de infravermelho. A câmera manda imagens do equipamento para uma central de processamento. Caso a central perceba que o equipamento apresenta algum problema, uma equipe de manutenção é enviada para consertar ou trocar o equipamento (ROCHA, 2006).

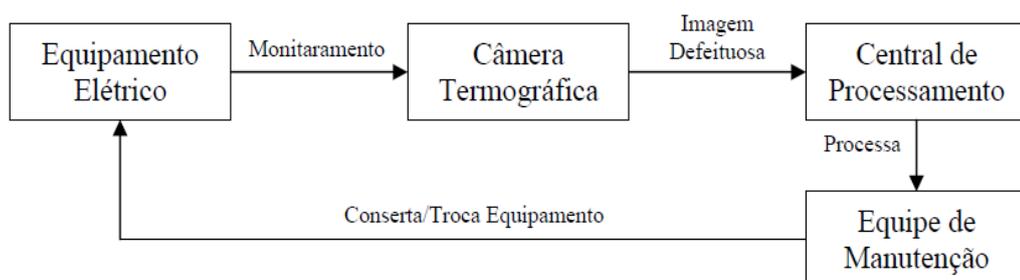


Figura 9. Diagrama simplificado de um sistema de diagnóstico de falhas baseado em análise térmica. Fonte: Rocha (2006)

Um termograma é uma imagem digital formada por ondas eletromagnéticas na faixa infravermelha do espectro de frequências, fora do intervalo correspondente à luz visível (OLIVEIRA e LAGES, 2011).

Pode-se concluir então que é possível medir a temperatura de um corpo medindo a radiação térmica por ele emitido. Isso pode ser feito medindo-se a intensidade de radiação ou analisando-se as características do espectro de frequência (ou comprimento de onda) (BALBINOT e BRUSAMARELLO, 2010).

Rocha (2006) afirma que a energia térmica ou infravermelha é uma onda invisível que possui comprimento de onda muito longo para ser detectado pelo olho humano. A luz visível ao olho humano está no intervalo de 0,4 μm até 0,7 μm do comprimento de onda do espectro eletromagnético; o intervalo do infravermelho está logo em seguida, com comprimento de onda de 0,7 μm até 1 mm. A Figura 10 apresenta o espectro eletromagnético.

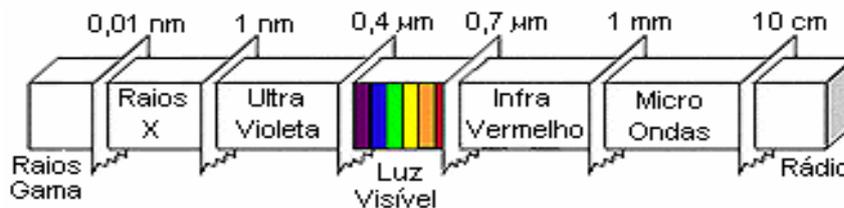


Figura 10. Faixa de comprimentos de onda do Espectro Eletromagnético. Fonte: Rocha (2006)

Todos os objetos com uma temperatura superior ao zero absoluto (0 K ou $-273,15\text{ }^{\circ}\text{C}$) emitem radiação infravermelha devido à agitação de seus átomos e moléculas. A intensidade da radiação emitida depende da temperatura do objeto e da capacidade do objeto de emitir radiação. A capacidade de um objeto em emitir energia infravermelha é conhecida por emissividade (ϵ) (SANCHES, 2009).

A emissividade pode ser definida como a razão entre a energia radiante emitida por uma superfície real e a energia radiante emitida pelo corpo negro, de mesma área, nas mesmas condições de temperatura (PERIN, 2009). A equação 13 mostra a equação para o cálculo da emissividade.

$$\text{Emissividade } (\epsilon) = \frac{\text{Energia emitida pela superfície real}}{\text{Energia emitida pelo corpo negro}} \quad (13)$$

Segundo Sanches (2009), a emissividade pode ser um valor de 0 (refletida por um espelho) a 1 (corpo negro teórico). A emissividade mede a capacidade de um corpo emitir energia (FIALHO, 2005).

O corpo negro é definido como uma superfície ideal que tem propriedades fundamentais que o tornam um padrão de comparação para os corpos radiantes reais (PERIN, 2009). Um corpo negro absorve toda a energia nele radiada, não tendo, porém, capacidade de transmissão e reflexiva, definiu-se então que sua emissividade é igual a 1 (FIALHO, 2005).

Conforme Silva *et al.* (2010), Maldague (2002) e Melo (2009) a análise térmica por infravermelho é dividida em 2 modos: ativa e passiva. Na análise térmica ativa é necessário aquecer o objeto com uma fonte de calor artificial para depois analisar o comportamento térmico do objeto. Na análise térmica passiva o objeto já é aquecido, não necessitando de uma fonte de calor artificial (SILVA *et al.*, 2010).

Conforme Oliveira (2013) e Barreira (2004), as imagens térmicas podem ser analisadas de forma qualitativa ou quantitativa. A análise é qualitativa quando se pretende apenas visualizar as diferenças de temperatura nas superfícies dos objetos em estudo. A análise é quantitativa quando se pretende quantificar as variações de temperatura superficial do objeto em estudo, sendo necessária a introdução de parâmetros ambientais no equipamento de análise térmica (OLIVEIRA, 2013).

Segundo Barreira (2004) e Souza (2010), existem 3 tipos de sistemas de medição da radiação térmica: termômetros pontuais, scanners de linha e câmeras de infravermelho. Os termômetros pontuais fornecem o valor da temperatura num ponto, os scanners permitem obter um perfil de temperatura ao longo de uma linha e as câmeras possibilitam a representação de imagens térmicas com a distribuição das temperaturas de um objeto.

As câmeras de infravermelho são instrumentos que captam e convertem a radiação infravermelha emitida por uma superfície numa imagem térmica a duas dimensões numa escala de cores ou escala de cinza, representativa da temperatura a que se encontra a superfície (SOUZA, 2010). Teoricamente, cores frias significam baixas temperaturas e cores quentes significam altas temperaturas (AZEVEDO e SILVA JUNIOR, 2012). As imagens térmicas podem ser analisadas usando *softwares* específicos e armazenadas em algum dispositivo de arquivamento de dados para referência posterior (SANCHES, 2009).

A Figura 11 apresenta um termograma feito por uma câmera de infravermelho Flir A35. No lado direito da imagem existe uma barra, na qual se faz uma relação da temperatura com as cores que aparecem na figura. Do outro lado, aparece uma elipse, que é uma das várias

ferramentas de medição de temperatura da imagem. Essa elipse mostra a maior temperatura (triângulo vermelho) e a menor temperatura (triângulo azul) de determinada região.

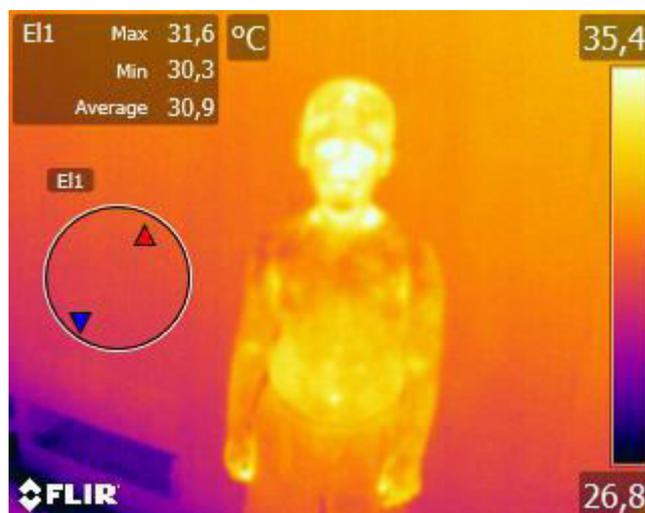


Figura 11. Termograma com o uso de câmera de infravermelho Flir. Fonte: Do autor

Sua versatilidade é observada nos diferentes tipos de aplicações registradas na literatura, como na astronomia e exploração espacial, na avaliação da eficiência de fornos e caldeiras, na construção civil, na indústria aeronáutica e espacial (SOUZA, 2010), na monitoração de equipamentos elétricos para auxiliar no diagnóstico de falhas (ROCHA, 2006), na análise da variação de temperatura de superfície para detectar mudanças metabólicas em bovinos da raça Nelore (CANATA *et al.*, 2010) ou mesmo para determinar a acidez de vinhos tintos (BARIN *et al.*, 2013).

Existem diferentes fabricantes de câmeras de infravermelho no mercado atualmente, como por exemplo, a Flir (<http://www.flir.com>), a Fluke (<http://www.fluke.com>) e a PCE (<http://www.pce-medidores.com.pt>). Em relação às câmeras Flir A35, elas se apresentam extremamente compactas, com comunicação e alimentação realizadas através de um cabo, possibilita a configuração de uma câmera como mestre e outras como escravas e possui uma saída que pode controlar outro equipamento e uma entrada para ler o estado desse equipamento. Além disso, a Flir é o único fabricante com presença direta no Brasil.

Segundo a Flir (2013), para a câmera poder medir a temperatura, a emissividade do objeto, a temperatura aparente refletida, a distância entre o objeto e a câmera, a umidade relativa do ar e a temperatura atmosférica são parâmetros devem ser informados:

A Figura 12 mostra a maneira que a câmera realiza as medições (FLIR, 2013).

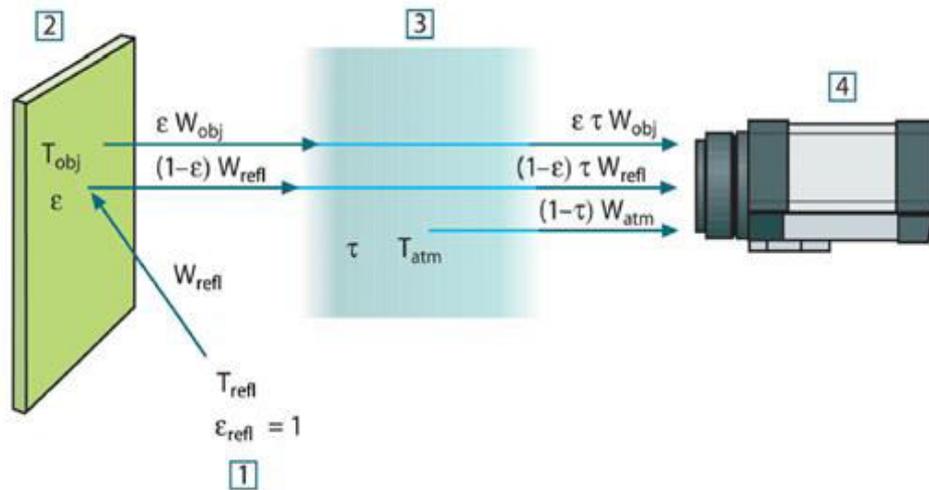


Figura 12. Esquema representando a medição de temperatura de um objeto. Fonte: Flir (2013).

Na Figura 12, o número 1 representa o ambiente, o número 2 o objeto, o número 3 o ar e o número 4 representa a câmera.

A energia total de radiação recebida pela câmera é descrita na equação 14.

$$W_{tot} = \varepsilon\tau W_{obj} + (1 - \varepsilon)\tau W_{refl} + (1 - \tau)W_{atm} \quad (14)$$

Na equação 14, $\varepsilon\tau W_{obj}$ representa emissão do objeto (ε é a emissividade do objeto e τ é a transmitância do ar); $(1 - \varepsilon)\tau W_{refl}$ representa a emissão refletida a partir de fontes do ambiente ($(1 - \varepsilon)$ é a refletância do objeto); $(1 - \tau) W_{atm}$ representa a emissão do ar ($(1 - \tau)$ é a emitância do ar).

Substituindo o W na equação 14 por um valor de tensão (U), obtém-se a equação 15.

$$U_{tot} = \varepsilon\tau U_{obj} + (1 - \varepsilon)\tau U_{refl} + (1 - \tau)U_{atm} \quad (15)$$

Isolando o termo U_{obj} na equação 15, se chega na equação 16, que é a fórmula usada pelas câmeras de infravermelho da Flir Systems para o cálculo da temperatura do objeto.

$$U_{obj} = \frac{1}{\varepsilon\tau} \times U_{tot} - \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} \times U_{refl} - \frac{1-\tau}{\varepsilon\tau} \times U_{atm} \quad (16)$$

Na equação 16, U_{obj} é a tensão de saída da câmera para um objeto de temperatura T_{obj} , ou seja, uma tensão que pode ser convertida na temperatura real do objeto; U_{tot} é a medida de tensão de saída da câmera para um caso real; U_{refl} é a tensão teórica de saída da câmera para um objeto de temperatura T_{refl} de acordo com a calibração; U_{atm} é a tensão teórica de saída da câmera para um objeto de temperatura T_{atm} de acordo com a calibração (FLIR, 2013).

Segundo a Flir (2013), a câmera de infravermelho pode ser utilizada nos ramos de automação, construção civil, elétrica e mecânica, área veterinária, detecção de gás, entre outros.

3.4 Plataforma de Desenvolvimento

Um grande problema encontrado na realização de experiências práticas é a complexidade envolvida na montagem da infraestrutura da experiência e, conseqüentemente, o tempo necessário para fazê-lo, além da experiência em si. Uma forma de contornar esse problema é a utilização de plataformas de desenvolvimento. Ao permitir uma rápida prototipagem, as plataformas podem ser pensadas não só como ferramenta de projeto, mas também como ferramentas de aprendizado (FONSECA e LA VEGA, 2011).

As plataformas de desenvolvimento baseadas em microcontroladores podem ser utilizadas em projetos de diversas áreas de conhecimento. Um microcontrolador pode ser entendido como a evolução de um microprocessador, na qual ele é ampliado com sistemas de temporização, de aquisição e de comunicação (FONSECA e LA VEGA, 2011).

Um exemplo de plataforma de desenvolvimento é o Controlador de Interface Programável (PIC) (do inglês *Programmable Interface Controller*), que foi utilizado por (LIMA *et al.*, 2011) para monitorar de forma *on-line*, *in situ* e remoto o pH, a condutividade e temperatura de águas. A temperatura foi medida por um termistor NTC, de resistência 1k Ω , que trabalha numa faixa entre 10 e 50 °C. As medidas foram feitas em triplicata e como resultado, foi obtida uma curva de calibração igual a $254,27 + 10,37T$, com um coeficiente de regressão (r) de 0,9997. Outro exemplo, apresentado em (FARIA e CARVALHO, 2002), é um sistema de aquisição de dados formado por um microcomputador Pentium 266 MHz, uma placa de aquisição da National Instruments (modelo AT-MIO-16E-10) e por um programa desenvolvido em LabVIEW para medir, de forma automatizada, os esforços exercidos pelos membros inferiores e superiores de pacientes paraplégicos, durante uma marcha com muletas. Por fim, outra plataforma que poder ser citada é o CLP (Controlador Lógico Programável). Em (CANSADO e SARAIVA, 2003) é mostrado que nas saídas de um dispositivo CLP foram ligados sensores de temperatura e umidade, ventiladores, bombas, entre outros equipamentos que formam um sistema desenvolvido para controle climático de casas de vegetação.

Recentemente a plataforma Arduino (<http://www.arduino.cc>) tem se difundido como uma plataforma para diferentes tipos de aplicações. Cavalcante *et al.* (2011) utilizaram o

Arduino para o ensino de Física, através do estudo da carga e descarga dos capacitores. Kamogawa e Miranda (2013) utilizaram o Arduino para acionamento de dispositivo solenóide em sistemas de análise de fluxo.

O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica *open-source* que se baseia em hardware e *software* flexíveis, sendo de fácil utilização. É destinado a artistas, designers, hobbistas e qualquer pessoa interessada em criar objetos ou ambientes interativos. O Arduino pode medir o estado do ambiente que o cerca por meio da recepção de sinais de sensores e pode interagir com os seus arredores, controlando luzes, motores e outros atuadores (ARDUINO, 2013).

Ainda, conforme Arduino (2013), tal plataforma Arduino possui vantagens como:

- Baixo preço, ou seja, as placas arduino são relativamente baratas em comparação com outras plataformas de microcontroladores;
- Pode ser configurado em ambientes Linux, Mac OS e Windows, enquanto a maioria dos sistemas de microcontroladores são limitados ao Windows;
- Filosofia de hardware livre, ou seja, as pessoas podem usá-lo para criar diversos projetos sem custo algum de direitos pela utilização da plataforma, podendo ser distribuído gratuitamente.

Para programar o Arduino, deve-se utilizar o IDE (*Integrated Development Environment*/ Ambiente de desenvolvimento integrado), que é um *software* livre no qual o código é escrito na linguagem que o Arduino compreende. O IDE permite a escrita de um programa de computador, que é um conjunto de instruções passo a passo e que posteriormente é transferido para o Arduino. O Arduino, então, executará essas instruções, interagindo com o que estiver conectado a ele. Tais programas são conhecidos como *sketches* (McROBERTS, 2011).

A linguagem utilizada para a programação do Arduino é baseada em C/C++ (ARDUINO, 2013).

A Figura 13 apresenta a IDE com um exemplo de programa.

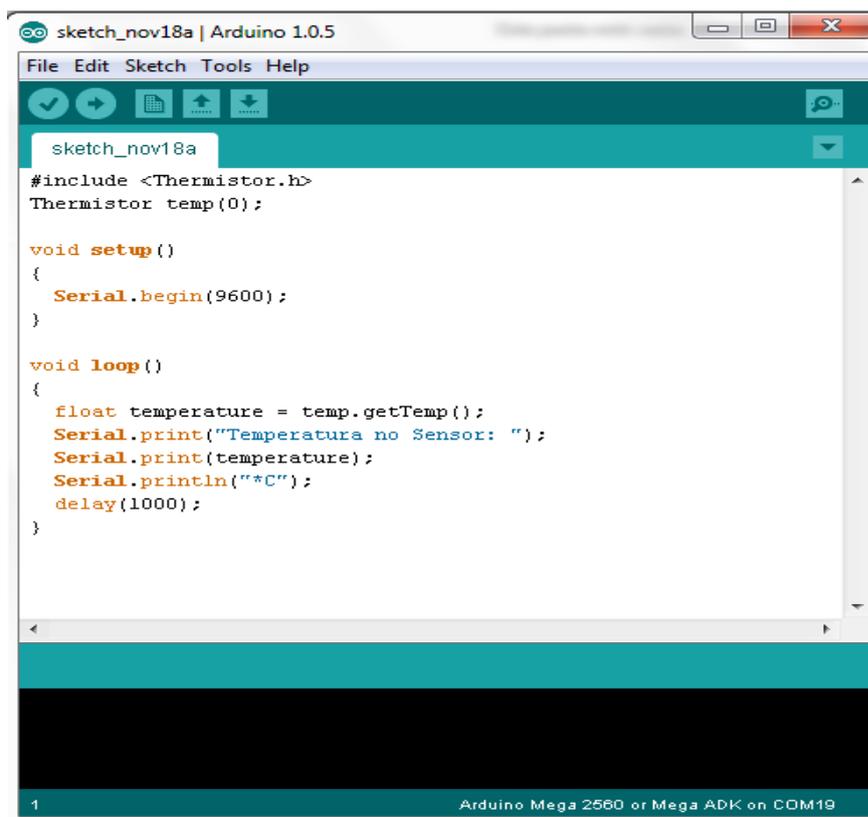


Figura 13. Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE). Fonte: Do autor.

A Tabela 10 mostra um comparativo entre três modelos de Arduino disponíveis no mercado.

Tabela 10 – Tabela comparativa de três modelos de plataforma Arduino disponíveis no mercado.

	Arduino Uno R3	Arduino Leonardo R3	Arduino Mega 2560 R3
Tamanho	5,3 cm x 6,8 cm x 1,0 cm	5,3 cm x 6,8 cm x 1,0 cm	5,3 cm x 10,2 cm x 1,0 cm
Microcontrolador	ATmega328	ATmega32u4	ATmega2560
Tensão de operação	5 V	5 V	5 V
Tensão de entrada (recomendada)	7-12 V	7-12 V	7-12 V
Tensão de entrada (limites)	6-20 V	6-20 V	6-20 V
Pinos de entrada/saída digitais	14 (6 podem ser saídas)	20 (7 podem ser saídas)	54 (14 podem ser saídas)
Pinos de entrada analógicas	6	12	16
Corrente DC por pino I/O	40m A	40m A	40m A
Memória Flash	32kB	32kB	256kB
Memória SRAM	2kB	2,5kB	8kB
Memória EEPROM	1kB	1kB	4kB
Velocidade de clock	16MHz	16MHz	16MHz
Temperatura de operação	10 a 60 °C	10 a 60 °C	10 a 60 °C

Fontes: www.arduino.cc.

3.5 Matlab

Matlab é uma linguagem de alto nível e ambiente interativo para computação numérica, visualização e programação. Através do Matlab é possível analisar dados, desenvolver algoritmos e criar modelos e aplicações. A linguagem, ferramentas e funções matemáticas embutidas permitem explorar múltiplas abordagens e chegar a uma solução mais rapidamente do que planilhas ou linguagens de programação tradicionais, como C/C++ ou Java (MATHWORKS, 2014).

Conforme Chapman (2008), Matlab (abreviatura de *Matrix Laboratory*) é um programa de computador utilizado na engenharia e para cálculos científicos. Ele foi criado para cálculo de matrizes matemáticas, mas ao longo dos anos, cresceu e se tornou capaz de resolver qualquer problema técnico.

Ao contrário de linguagens como C e Fortran, no Matlab o programador não se preocupa com itens como declaração de variáveis, alocação de memória, utilização de ponteiros e outras tarefas de rotina (ARAÚJO *et al.*, 2012).

Segundo MathWorks (2014), as principais características do Matlab são:

- Linguagem de alto nível para computação numérica, visualização e desenvolvimento de aplicativos;
- Ambiente interativo para a exploração interativa, design e resolução de problemas;
- Funções matemáticas para álgebra linear, estatística, análise de Fourier, filtragem, otimização, integração numérica e resolução de equações diferenciais ordinárias;
- Gráficos embutidos para visualização de dados e ferramentas para a criação de gráficos personalizados;
- Ferramentas de desenvolvimento para melhorar a qualidade do código e facilidade de manutenção e maximizando o desempenho;
- Ferramentas para a criação de aplicativos com interfaces gráficas personalizado;
- Funções para integração de algoritmos baseados MATLAB com aplicações externas e linguagens como C, Java, NET, e Microsoft® Excel.

A Figura 14 mostra a tela inicial do Matlab.

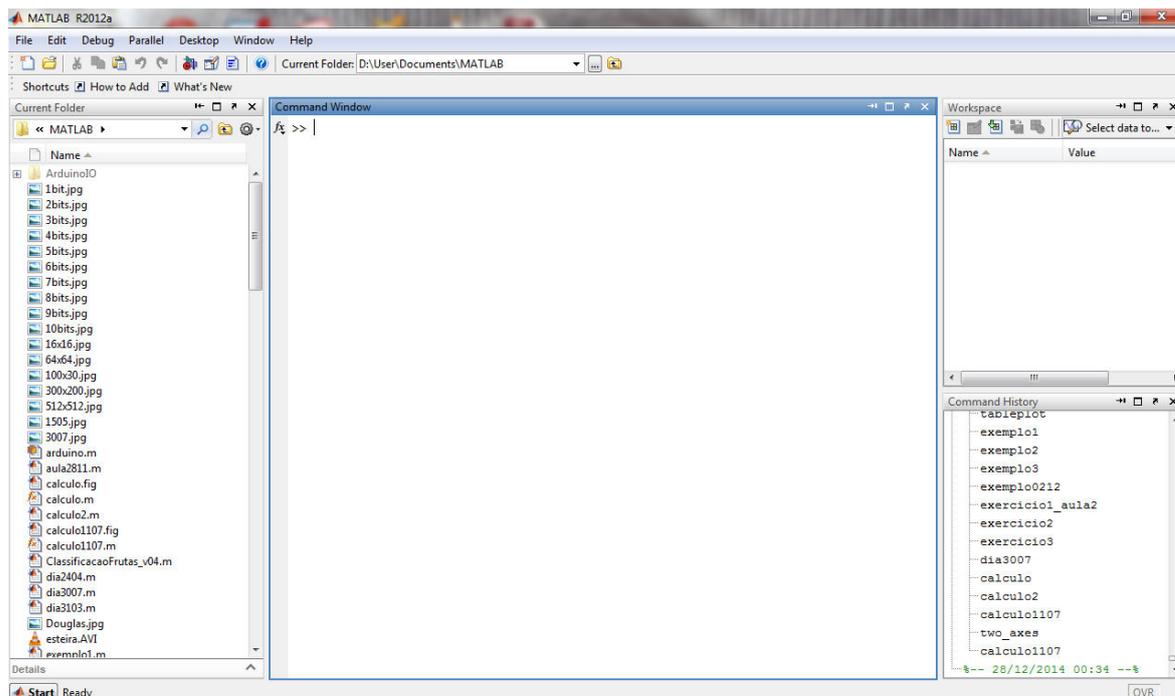


Figura 14. Tela inicial do Matlab. Fonte: Do autor.

Existe um ambiente dentro do próprio MATLAB para elaboração de interfaces gráficas. Esse ambiente é conhecido como *GUIDE* (*Graphical User Interface Development Environment*) e é ativado digitando seu nome na janela de comandos do MATLAB. Este ambiente torna possível a união de um programa escrito em linguagem *.m* (extensão de arquivos do Matlab) com uma interface para a interação com o usuário final (ARAÚJO *et al.*, 2012).

A interface gráfica do usuário (GUI) é uma representação gráfica de uma ou mais janelas que contêm componentes, que permitem ao usuário executar tarefas interativas. O usuário do GUI não precisa criar um arquivo de *script* (com múltiplos comandos) ou digitar comandos em sequência para realizar as tarefas. Ao contrário de outros programas, o usuário de uma interface gráfica não precisa entender os detalhes de como as tarefas são executadas (MATHWORKS, 2014).

Uma interface gráfica com o usuário, ou GUI, incorpora objetos gráficos, como janelas, ícones, botões, menus e texto. A seleção ou ativação desses objetos normalmente provoca uma ação ou mudança (HANSELMAN e LITTLEFIELD, 2003).

Depois de reproduzir o desenho da interface no ambiente GUIDE, ao salvá-lo, o MATLAB criará dois arquivos, um arquivo de extensão *fig* (onde se encontra o desenho da interface) e um arquivo *.m* (onde se encontra toda a parte funcional da interface, ou seja, o

programa). Esses dois arquivos não funcionam separados já que são dependentes um do outro (ARAÚJO *et al.*, 2012).

A Figura 16 mostra a tela inicial do GUIDE.

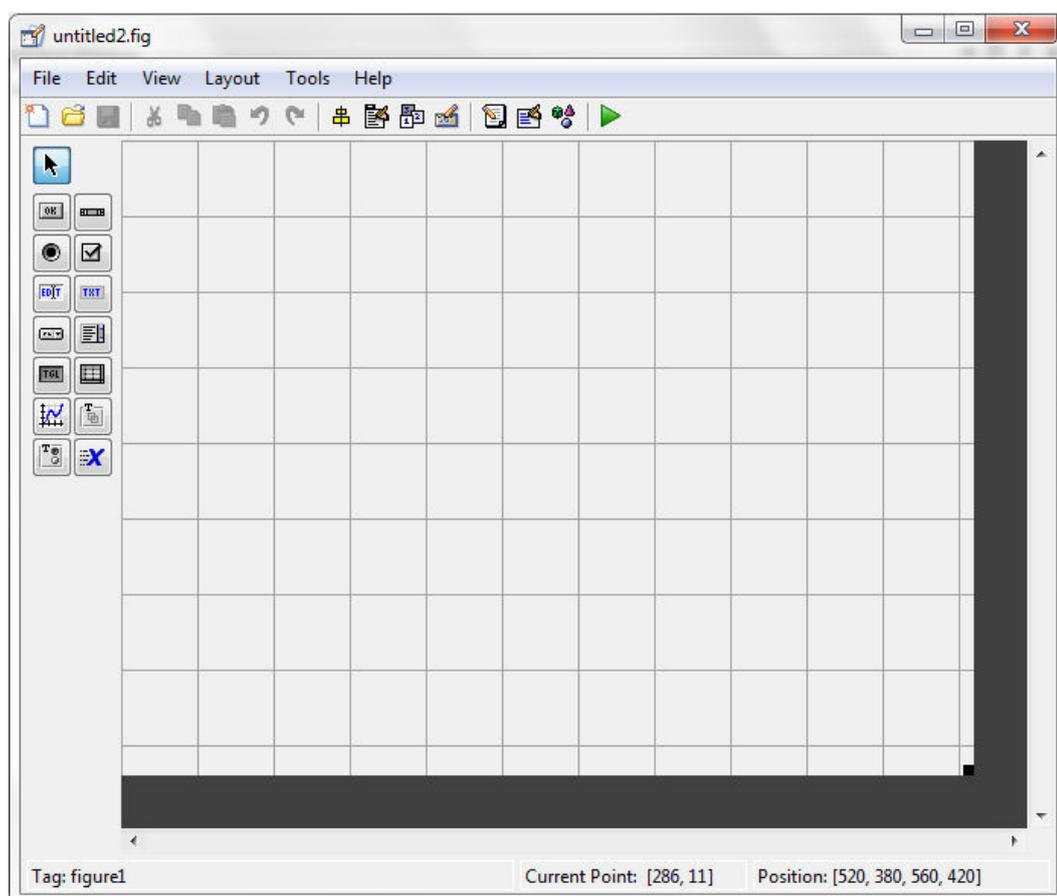


Figura 15. Tela inicial do GUIDE. Fonte: Do autor.

O Matlab pode ser utilizado em diversas aplicações, como por exemplo, no desenvolvimento de algoritmos que realizam a segmentação (uma das etapas do processamento de imagens) de uma determinada imagem (NEVES e PELAES, 2001). Em (AMARAL *et al.*, 2006) é apresentado um aplicativo denominado AEPI (Auxílio ao Ensino de Processamento de Imagens) em Matlab para auxiliar e melhorar o ensino da disciplina Processamento Digital de Imagens. Além dessas, TEIXEIRA e SALLES (2009) desenvolveram uma interface para auxiliar no ensino de controle automático na disciplina Laboratório de Controle do curso de Engenharia Elétrica da UFES (Universidade Federal do Espírito Santo).

3.6 Processamento de imagens

O Processamento Digital de Imagens (PDI) é uma técnica que se utiliza de operações matemáticas para alterar os valores dos pixels de uma imagem digital, modificando-a, para facilitar sua visualização ou para preparar a imagem para ser analisada pelo próprio computador (Análise Digital de Imagens) (GOMES, 2001).

O termo imagem monocromática, ou simplesmente imagem, refere-se à função bidimensional de intensidade da luz $f(x,y)$, onde x e y denotam as coordenadas espaciais e o valor de f em qualquer ponto (x,y) é proporcional ao brilho (ou níveis de cinza) da imagem daquele ponto (GONZALEZ e WOODS, 2000).

Uma imagem digital é uma imagem $f(x,y)$ discretizada tanto em coordenadas espaciais quanto em brilho. Uma imagem digital pode ser considerada como sendo uma matriz cujos índices de linhas e de colunas identificam um ponto na imagem, e o correspondente valor do elemento da matriz identifica o nível de cinza naquele ponto. Os elementos dessa matriz digital são chamados de elementos da imagem, elementos da figura, “pixels” ou “pels”, estes dois últimos, abreviações de “*picture elements*” (elementos da figura) (GONZALEZ e WOODS, 2000).

A Figura 16 representa uma imagem digital composta por um número finito de pixels representados na forma de uma matriz bidimensional $M \times N$, onde M representa o número de linhas e N o número de colunas (SANCHES, 2009).

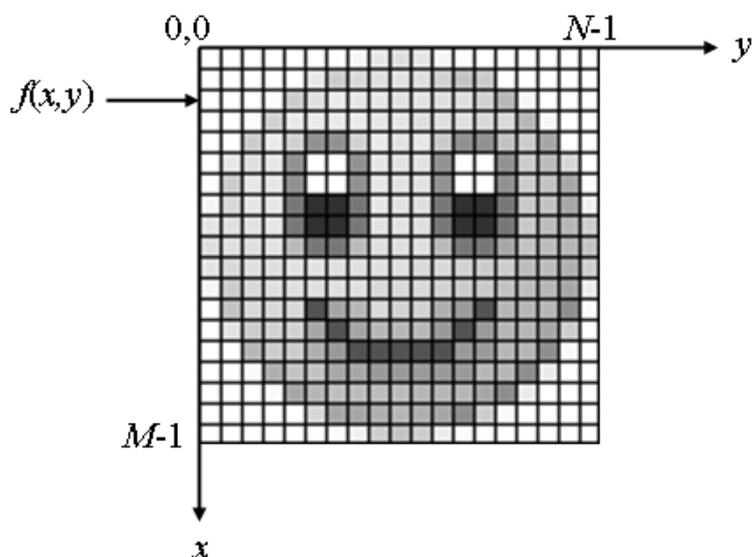


Figura 16. Representação de uma imagem digital. Fonte: Sanches (2009).

O Processamento de imagens se divide em aquisição de imagens, pré-processamento, segmentação, representação e descrição e reconhecimento e interpretação (GONZALEZ e WOODS, 2000) e (PEDRINI e SCHWARTZ, 2008).

A Figura 17 apresenta as etapas do processamento de imagens.

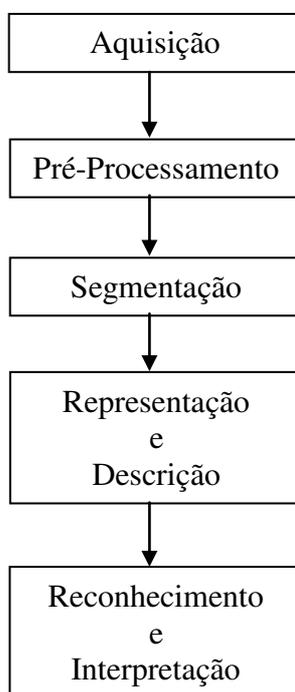


Figura 17. Etapas do processamento de imagens. Fonte: Do autor.

O objetivo do bloco de Aquisição é a obtenção de uma imagem digital (GOMES, 2001). A etapa de aquisição captura a imagem por meio de um dispositivo ou sensor e converte-a em uma representação adequada para o processamento digital subsequente.

Os principais dispositivos para aquisição de imagens são câmeras de vídeo, tomógrafos médicos, satélites e scanners (PEDRINI e SCHWARTZ, 2008). Além dos dispositivos citados anteriormente (que são sensíveis a uma banda do espectro de energia eletromagnética – raios X, ultravioleta, visível ou banda infravermelha – e produzem um sinal elétrico de saída proporcional a um nível de energia percebida) é necessário um segundo dispositivo, chamado digitalizador, que faz a conversão da saída elétrica para a forma digital (GONZALEZ e WOODS, 2000).

A imagem digital resultante do processo de aquisição pode apresentar imperfeições ou degradações decorrentes, por exemplo, das condições de iluminação ou características dos dispositivos. A função do pré-processamento é melhorar a qualidade da imagem por meio da aplicação de técnicas para atenuação de ruído, correção de contraste ou brilho e suavização de

determinadas propriedades da imagem (PEDRINI e SCHWARTZ, 2008). Conforme Gomes (2001), outra função do pré-processamento é realçar detalhes de interesse específico.

A segmentação divide a imagem em regiões e distingue essas regiões como objetos independentes uns dos outros e do fundo (GOMES, 2001). A segmentação deve finalizar quando os objetos de interesse na aplicação tiverem sido isolados (GONZALEZ e WOODS, 2000). Após a segmentação, cada objeto é descrito por meio de suas propriedades geométricas e topológicas. Atributos como área, forma e textura, por exemplo, podem ser extraídos dos objetos e utilizados no processo de análise (PEDRINI e SCHWARTZ, 2008).

A representação deve ser utilizada para armazenar e manipular os objetos de interesse extraídos da imagem (PEDRINI e SCHWARTZ, 2008). A descrição procura extrair características que resultem em alguma informação quantitativa de interesse ou que sejam básicas para discriminação entre classes de objetos (GONZALEZ e WOODS, 2000).

O reconhecimento é o processo que atribui um identificador ou rótulo aos objetos da imagem, baseado nas características fornecidas pelos seus descritores. A interpretação consiste em atribuir um significado ao conjunto de objetos reconhecidos (GONZALEZ e WOODS, 2000) e (PEDRINI e SCHWARTZ, 2008).

4. METODOLOGIA

A presente pesquisa desenvolveu um sistema para análise entalpimétrica utilizando câmera de infravermelho como sensor de temperatura. Desta forma, em relação ao nível, esta pesquisa é acadêmica; quanto aos seus objetivos esta pesquisa pode ser definida como preditiva; quanto à coleta de dados, foi de forma experimental; quanto à fonte de informação, o trabalho foi desenvolvido em um laboratório; por fim, em relação às variáveis, o trabalho é multifatorial (quantitativo e qualitativo) (SANTOS, 2000).

4.1 Procedimentos metodológicos

Os procedimentos metodológicos utilizados neste estudo foram divididos fundamentalmente em 4 etapas principais. A primeira compreendeu a montagem de um sistema para titulação termométrica utilizando câmera de infravermelho como sensor de temperatura. Posteriormente, foi aplicado um sistema para análise entalpimétrica utilizando câmera de infravermelho como sensor de temperatura. A terceira etapa compreendeu a investigação de alternativas para miniaturização do sistema de análise entalpimétrica desenvolvido e a última etapa compreendeu o sistema automatizado para análise entalpimétrica utilizando câmera de infravermelho como sensor de temperatura. A Figura 18 apresenta um fluxograma básico da estrutura desta pesquisa que será descrita a seguir.

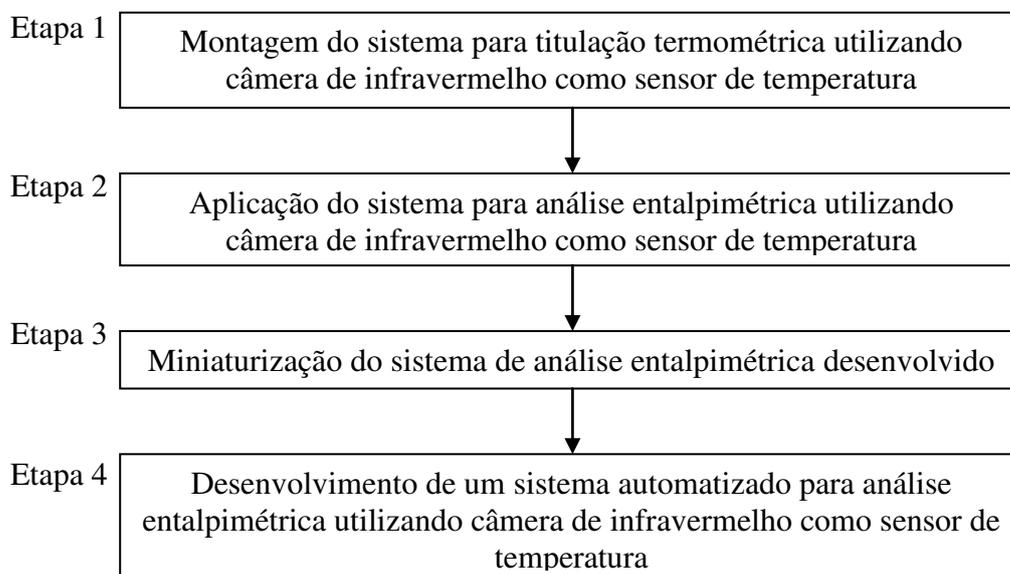


Figura 18. Fluxograma executivo da pesquisa experimental. Fonte: Do autor.

A seguir, são descritas as etapas de desenvolvimento e aplicação de forma detalhada, visando esclarecer a proposta apresentada neste trabalho.

4.1.1 Obtenção dos parâmetros necessários para a câmera realizar a medição de temperatura

Conforme citado no item 3.3.4, para a câmera medir a temperatura determinou-se a emissividade do objeto, a temperatura aparente refletida, a distância entre o objeto e a câmera, a umidade relativa do ar e a temperatura atmosférica.

Com o uso de um termistor NTC, um resistor de 10 k Ω e uma entrada analógica do Arduino, foi possível determinar a temperatura ambiente. O termistor mediu a temperatura e o Arduino foi o responsável por ler o valor do sensor e apresentar a temperatura. A Figura 19 apresenta o esquema de ligação entre termistor e Arduino utilizado para medir a temperatura ambiente.

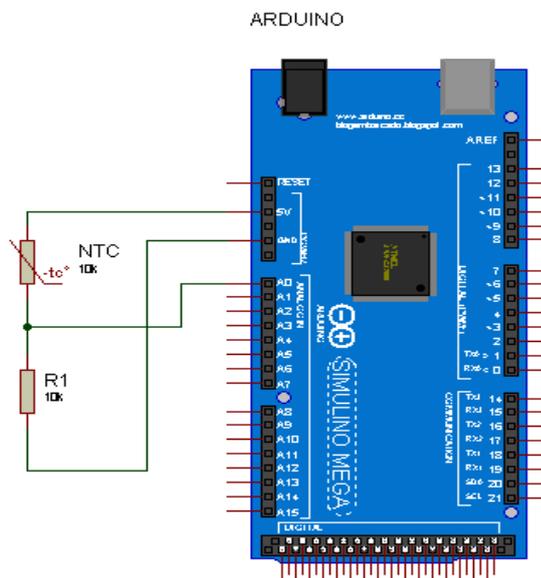


Figura 19. Circuito utilizado para determinação da temperatura ambiente. Fonte: Do autor.

A umidade relativa do ar foi medida com o uso de um termo-higrômetro, seguindo orientações do fabricante (<http://www.incoterm.com.br>).

A determinação da emissividade e da temperatura aparente refletida foi realizada de acordo com os procedimentos apresentados em Flir (2013). Inicialmente, determinou-se a temperatura aparente refletida. Para isso, foi utilizada uma fonte de reflexão (1), considerando

que o ângulo de incidência fosse igual ao ângulo de reflexão ($a = b$), conforme mostrada na Figura 20. Por fim, os campos emissividade e distância receberam valores igual a 1 e 0, respectivamente, para que fosse determinada a temperatura aparente.

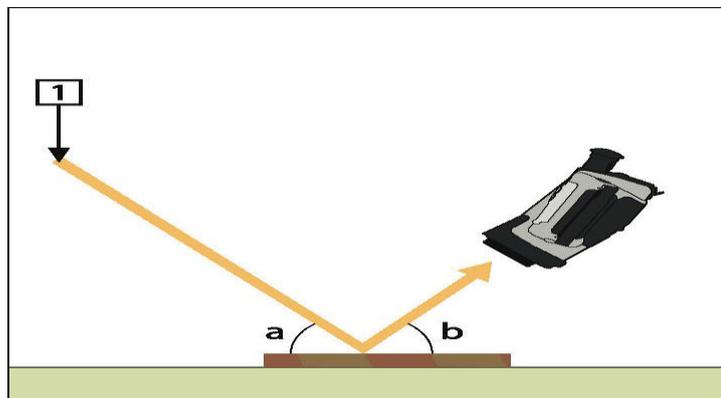


Figura 20. Esquema que representa a determinação da temperatura aparente refletida. Fonte: Flir (2013).

Para determinar a emissividade, primeiramente, foi inserido um pedaço de fita elétrica, com emissividade igual a 0,97, no reagente (NaOH). Posteriormente, o reagente foi aquecido para que sua temperatura aumentasse em 20 °C, sendo a partir de então aferida a temperatura. Por fim, a emissividade do reagente foi alterada até o momento em que as temperaturas do reagente e da fita ficassem iguais. Este novo valor da emissividade foi definido como a emissividade do reagente e o valor foi informado no *software* Flir Tools +, que é o *software* desenvolvido pelo fabricante da câmera.

A distância entre a câmera e o reagente foi medida com uma régua.

A seguir, todos os parâmetros (emissividade do objeto, a temperatura aparente refletida, a distância entre o objeto e a câmera, a umidade relativa do ar e a temperatura atmosférica) foram informados no *software* Flir Tools +.

4.1.2 Montagem do sistema para titulação termométrica utilizando câmera de infravermelho como sensor de temperatura

Para o desenvolvimento deste estudo um conjunto de titulação foi utilizada uma bureta de 25 mL e montado um sistema de agitação com pino magnético. Ao conjunto de titulação foi introduzida uma câmera de infravermelho FLIR, modelo A35 (<http://www.flir.com>), com sensibilidade térmica menor que 0,05 °C. A câmera de infravermelho foi posicionada a 20 cm

do fundo do frasco de titulação, e as imagens foram registradas utilizando o *software* FLIR Tools + (<http://www.flir.com>). Como frasco de titulação foi utilizado um copo descartável de poliestireno (PS) de 200 mL. A Figura 21 ilustra o sistema de titulação termométrica montado neste estudo. Os valores de emissividade foram ajustados para 0,97, conforme orientações do fabricante (<http://www.flir.com>), e os ensaios foram realizados a temperatura ambiente (24 – 25 °C), e umidade relativa do ar entre 80 e 70 %.

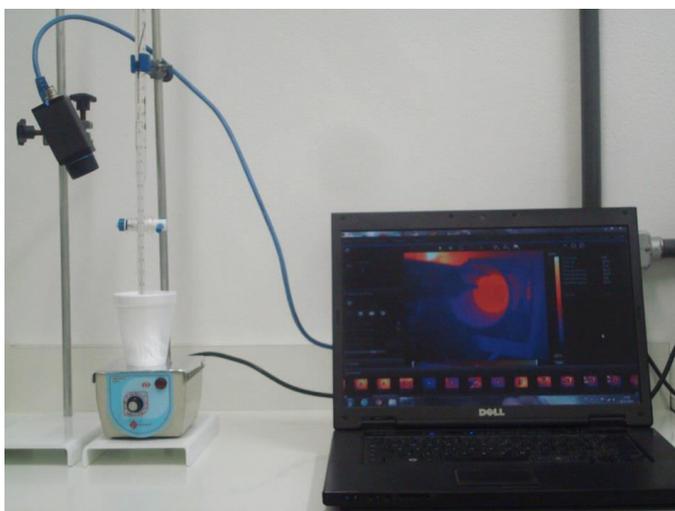


Figura 21. Sistema de titulação termométrica com câmera de infravermelho como sensor de temperatura. Fonte: Do autor.

Os primeiros testes de laboratório foram desenvolvidos com o propósito de avaliar a eficiência deste sistema no monitoramento da temperatura de uma titulação termométrica de neutralização. Para isso, o sistema foi utilizado na determinação da concentração de uma alíquota de 20 mL de uma solução de NaOH ($\cong 1 \text{ molL}^{-1}$) utilizando, como titulante, uma solução de HCl padronizada, com concentração de $1,007 \text{ molL}^{-1}$.

A velocidade de adição do titulante foi de aproximadamente $0,1 \text{ mL s}^{-1}$, e a temperatura na superfície do meio reacional foi monitorada constantemente pela câmera de infravermelho, com velocidade de 1 frame s^{-1} . Para identificação do ponto final de titulação foi considerada a temperatura máxima detectada na superfície, a partir da qual quantidades adicionais do titulante resultam na redução da temperatura (SMITH, 2014). Os resultados da titulação termométrica foram comparados aos obtidos por titulação de neutralização com reagente indicador de fenolftaleína.

4.1.3 Sistema de análise entalpimétrica utilizando câmera de infravermelho como sensor de temperatura

Este sistema foi utilizado para a determinação da entalpia de neutralização conforme metodologia adaptada de Assumpção *et al.* (2010), utilizando as mesmas soluções citadas no item 4.1.2. Assim, primeiramente 50 mL e depois 20 mL da solução de HCl ($1,007 \text{ molL}^{-1}$) foram adicionados a um volume igual da solução de NaOH ($1,012 \text{ molL}^{-1}$). Cabe destacar que, como o frasco de PS é um sistema aberto, a adição do HCl foi feita de forma rápida (2 mL s^{-1}), e a temperatura média da superfície foi registrada em até 40 segundos após o início da reação, tempo suficiente para sua estabilização com o mínimo de perda de calor para o ambiente.

Para determinar a capacidade calorífica do sistema, foi medida a temperatura superficial do frasco de PS, antes (temperatura inicial) e após (temperatura final) a adição de 100 mL de água deionizada a $50 \text{ }^\circ\text{C}$, e a capacidade calorífica foi calculada conforme a equação 17 (ASSUMPÇÃO *et al.*, 2010):

$$\text{Cap. calorífica} = \frac{m_{\text{água}} \times c_{\text{água}} \times (T_{\text{cal+água}} - T_{\text{água}})}{(T_{\text{cal+água}} - T_{\text{cal}})} \quad (17)$$

Onde:

$m_{\text{água}}$ = massa de água ($m = \text{densidade} \times \text{volume}$);

$c_{\text{água}}$ = cap. calorífica da água ($4,182 \text{ J g}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$);

$T_{\text{cal+água}}$ = temperatura do calorímetro + água, $^\circ\text{C}$;

$T_{\text{água}}$ = temperatura da água, $^\circ\text{C}$;

T_{cal} = temperatura do calorímetro, $^\circ\text{C}$.

Após a determinação da capacidade calorífica do sistema, a entalpia de neutralização foi calculada conforme a Equação 18 (Assumpção *et al.*, 2010):

$$\Delta H = \frac{-[C_{\text{cal}} \times (T_f - T_{\text{cal}}) + m_{\text{H}} \times c_{\text{H}} \times (T_f - T_{\text{H}}) + m_{\text{OH}} \times c_{\text{OH}} \times (T_f - T_{\text{OH}})]}{n_{\text{OH}}} \quad (18)$$

Onde:

C_{cal} = capacidade calorífica do sistema (Eq. 17)

C_{H} e C_{OH} = capacidades caloríficas específicas da solução ácida e da solução básica, respectivamente, consideradas como sendo igual ao calor específico da água ($4,182 \text{ J g}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$);

T_H = temperatura inicial da solução ácida, °C;

T_{OH} = temperatura inicial da solução básica, °C;

T_f = temperatura final do calorímetro e da solução do sal, °C;

m_H = massa da solução ácida, g;

m_{OH} = massas da solução básica, g;

n_{OH} = quantidade de matéria da base na solução, mol;

Além da entalpia, determinou-se a curva de calibração referente aos valores de temperaturas das reações. Dessa forma, tiveram que ser calculados os valores de a (variação dos valores do eixo x dividido pela variação dos valores do eixo y), b (ponto do eixo y que é tocado pela reta) e o coeficiente de determinação R^2 (indica a relação entre os valores do eixo x e eixo y), conforme mostrado nas equações 19, 20 e 21, respectivamente.

$$a = \frac{n \times \sum xy - (\sum x) \times (\sum y)}{n \times \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (19)$$

Onde:

n = quantidade de pontos do gráfico;

$\sum xy$ = somas das multiplicações das variações de temperatura pelas suas respectivas concentrações, °C mol L⁻¹;

$\sum x$ = soma das 4 variações de temperatura, °C;

$\sum y$ = soma das 4 concentrações, mol L⁻¹;

$$b = \bar{y} - a \times \bar{x} \quad (20)$$

Onde:

a = valor de a da equação 19;

\bar{x} = média dos valores da variação de temperatura, °C;

\bar{y} = média dos valores da concentração, mol L⁻¹;

$$R^2 = \left(\frac{n \times (\sum xy) - (\sum x) \times (\sum y)}{\sqrt{[n \times \sum x^2 - (\sum x)^2] \times [n \times \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \right)^2 \quad (21)$$

A Tabela 11 apresenta os valores e tipos de coeficientes de determinação para uma curva de calibração (BRITO *et al.*, 2003).

Tabela 11 – Valores e tipos de coeficientes de determinação para uma curva de calibração.

Valores de determinação	Tipos de determinação
R = 1	Perfeita
0,91 < R < 0,99	Fortíssima
0,61 < R < 0,91	Forte
0,31 < R < 0,60	Média
0,01 < R < 0,30	Fraca
R = 0	Nula

Fonte: Brito *et al.*, (2013).

4.1.4 Miniaturização do sistema de análise entalpimétrica desenvolvido

Nesta etapa, as reações aconteceram na placa de Elisa, em vez do frasco de PS, ou seja, foram utilizados volumes menores de reagentes.

Inicialmente, com o uso de um pipetador multicanal, foi realizada a adição de 0,1 mL da solução de HCl (1,007 molL⁻¹) a um volume igual da solução de NaOH (1,012 molL⁻¹) e posteriormente calculou-se capacidade calorífica do sistema e entalpia. Outras atividades foram o acréscimo de 0,15 mL da solução de HCl (1 molL⁻¹) a um volume igual de NaOH (0,25, 0,5, 0,75 e 1 molL⁻¹) utilizando pipetadores monocanal e multicanal. Nestas, apenas foi determinada a curva de calibração.

4.1.5 Sistema automatizado para análise entalpimétrica utilizando câmera de infravermelho como sensor de temperatura

Inicialmente o objetivo deste trabalho era desenvolver um sistema automatizado para análise entalpimétrica, ou seja, em vez de uma pessoa adicionar os reagentes num copo ou numa placa, haveriam 2 atuadores lineares para executar este procedimento.

O sistema possuía dois atuadores lineares: um atuador com curso de 300 mm para movimentar o pipetador no sentido horizontal e outro atuador com curso de 200 mm para movimentar o pipetador no sentido vertical. Ambos atuadores têm força máxima de 1200 N, velocidade máxima de 12 mm/s, tensão de 24 V e corrente máxima de 2,5 A (MECTROL, 2013). Esses atuadores ficavam presos numa estrutura de madeira do tipo chapa MDF cru de

1,8 polegadas, cujas medidas são: 80 cm de altura, 90 cm de comprimento e 40 cm de profundidade.

O Arduino foi programado para movimentar os atuadores nos sentidos e distâncias necessárias. Porém, em virtude do Arduino funcionar com tensão de 5 volts e os atuadores com 24 volts, foi necessário ligar ambos em *drivers* Ponte H L298. O *Driver* Ponte H L298 é projetado para controlar cargas indutivas como relés, solenóides, motores DC (*direct current*) e motores de passo, permitindo o controle o sentido de rotação e a velocidade do motor. As características do *Driver* Ponte H L298 são: tensão de operação de 4 até 35 V, possibilidade de controle de 2 motores DC ou 1 motor de passo e corrente de operação máxima de 2 A por canal ou 4 A máxima (FILIPE FLOP, 2014).

Para alimentar o driver Ponte H L298 seria utilizada uma fonte de alimentação cuja tensão varia de 0 a 32 V e a corrente de 0 a 5 A. Ainda seria necessário uma *protoboard* para que a fonte pudesse alimentar os *drivers*.

Inicialmente, foram feitos os primeiros testes com o objetivo foi verificar o movimento dos atuadores. Posteriormente, o objetivo foi de testar o programa desenvolvido (Anexo A) para movimentar os atuadores e depositar os reagentes, de acordo com a maneira que é feita manualmente para fazer a titulação. Neste teste, foi utilizado um *driver* Ponte H L298 para controlar os 2 atuadores, tendo em vista que a corrente máxima de operação do driver é 4 A. Devido a uma sobrecorrente, ocorreu a queima deste *driver*.

A Figura 22 apresenta a montagem para a realização do teste do programa desenvolvido para a automação do processo.



Figura 22. Montagem para a realização do teste do programa para a automação do processo.

Fonte: Do autor.

Por questão de segurança (evitar sobrecorrente e a queima do *driver*), seriam utilizados 2 *drivers*. Cada *driver* seria responsável pelo movimento de um atuador.

A Figura 23 apresenta o esquema elétrico utilizado para o acionamento dos 2 atuadores.

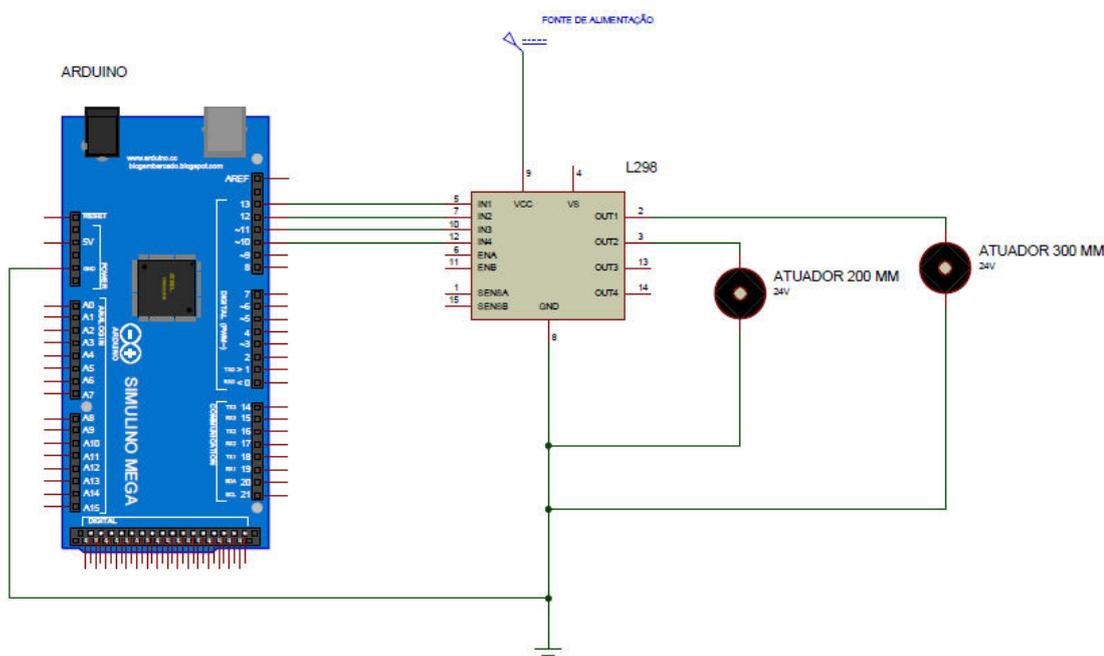


Figura 23. Esquema elétrico utilizado para o acionamento dos atuadores. Fonte: Do autor.

O próximo teste teve como objetivo instalar o pipetador de 8 canais no atuador de 200 mm. Porém, percebeu-se que seria impossível a instalação, devido à altura dos atuadores na estrutura de madeira. Foram então alteradas as posições dos atuadores na estrutura.

O próximo objetivo era criar uma peça que prendesse o pipetador ao atuador de 200 mm. Além dessa ligação, essa peça seria responsável por pressionar o botão do pipetador para que o mesmo pudesse absorver e liberar os reagentes. Também precisava ser feito algo que servisse como uma espécie de fim de curso, para que fosse acionada a peça que acionaria o botão do pipetador.

Simulando um processo de titulação em que é preciso utilizar 4 linhas da placa de Elisa para depositar os reagentes ácido e base, supondo as seguintes informações: o atuador de 200 mm precisa avançar 10 cm para absorver e liberar os reagentes, a distância entre o atuador de 300 mm e a placa é de 20 cm e o tempo de absorver e liberar o reagente é de 1 segundo. Fazendo-se os cálculos, chega-se na conclusão que, se fosse utilizado o sistema automático que foi pensado, o processo de titulação demoraria cerca de 8 minutos para ser concluído.

Foi então realizada, de forma manual, a titulação termométrica na placa de Elisa. O valor de R^2 foi de 0,95 e o processo demorou cerca de 4 minutos para ser concluído.

Com o uso dos atuadores, o valor de R^2 até poderia ser maior que 0,95. Porém, certamente, o tempo do processo seria maior. Conforme Sisbot (2011), uma das razões pelas quais a indústria investe em sistemas de automação é o aumento da qualidade e da quantidade do produto. Então, se fosse utilizada a automação com os atuadores lineares, o trabalho não atenderia aos objetivos da automação.

O Flir Tools + é o *software* próprio da câmera de infravermelho. Através dele é possível gravar um vídeo (extensão *seq*) que mostra a reação de neutralização. Com este mesmo *software*, o vídeo com extensão *seq* é convertido para um vídeo com extensão *avi*. Além disso, também se pode gerar uma planilha com extensão *csv*, na qual constam as temperaturas dos pixels de cada *frame* do vídeo gravado.

Foi desenvolvida uma interface no Matlab (mais precisamente, através do aplicativo GUIDE) que, com a qual foi possível obter o vídeo gravado pela câmera e a planilha com as temperaturas dos pixels.

Para testar e validar o programa desenvolvido no Matlab, o mesmo foi comparado com um procedimento feito manualmente.

O procedimento manual foi realizado em uma linha da placa de Elisa. Com o uso do pipetador multicanal, foram feitas 8 reações químicas em uma das linhas da placa e que foram filmadas com a câmera de infravermelho. Em relação ao programa, inicialmente, foram informados os valores, conforme equação 17, para o cálculo da capacidade calorífica. Posteriormente, o programa leu o vídeo e obteve uma planilha com as temperaturas de cada *frame* do vídeo. O vídeo foi dividido em *frames* e cada um analisado. Em cada *frame*, foi feita uma segmentação, que é uma das etapas do processamento de imagens, ou seja, a linha com as reações foi isolada do resto da imagem. Também se aplicou um pré-processamento, através de uma binarização para melhor análise das imagens.

No *frame* 75, o pipetador depositou 0,1 mL de NaOH e até o *frame* 92, mediu-se a temperatura de cada cavidade e com o valor de cada, obteve-se a média (temperatura inicial da solução). No *frame* 164, foi injetado 0,1 mL de HCl e até o 187, da mesma forma que citado anteriormente, com a temperatura de cada cavidade, calculou-se a temperatura final da solução. De posse dos valores de temperatura da solução e da capacidade calorífica, o programa determinou o valor da entalpia da reação, de acordo com a equação 18, que foi citada no item 4.1.3.

4.1.6 Materiais e equipamentos

Para o desenvolvimento deste estudo, foram utilizados diferentes tipos de equipamentos e materiais. Desde equipamento de uso geral de laboratório até equipamentos e materiais mais específicos.

A seguir serão apresentados os principais equipamentos, suas marcas e modelos, além das suas principais especificações técnicas.

Tabela 12 – Marcas, modelos e especificações técnicas dos principais equipamentos utilizados neste trabalho.

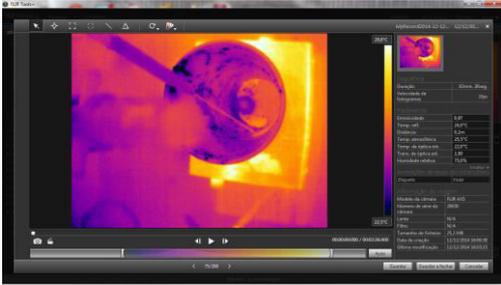
Equipamento	Marca e modelo	Principais especificações técnicas
 <p>Hardware</p>	<p>Arduino, modelo Mega 2560 R3. (http://www.arduino.cc)</p>	<p>Micro controlador: ATmega2560. Voltagem de operação: 5 V. Pinos de entrada e saídas digitais: 54. Pinos de entrada analógica: 16. Corrente DC por pino I/O: 40 mA.</p>
 <p>Bureta</p>	<p>Bureta graduada com torneira de polipropileno (http://www.prolab.com.br)</p>	<p>Capacidade: 50 ml Graduação: 1/10</p>
 <p>Agitador com pino magnético</p>	<p>Agitador magnético, modelo Q-221 (http://www.quimis.com.br)</p>	<p>Plataforma em aço inox com diâmetro de 12 cm; Motor de corrente contínua com baixo consumo; Voltagem de operação: 90 a 240 V; Potência: 50 W;</p>
 <p>Pipetador monocanal</p>	<p>Modelo LM-1000 Soft (http://www.splabor.com.br)</p>	<p>Volume variável: 100 a 1000 μL Precisão: 99,8 %</p>
 <p>Pipetador multicanal</p>	<p>modelo Transferpette S -8 (http://www.brand.de)</p>	<p>Indicação de volume de 4 dígitos; Movimento curto de apenas 12,5 mm para reduzir o risco de LER (Lesão por Esforço Repetitivo); Resistente à luz UV; Volume nominal: 300 μL; Exatidão medida: - 0,41...0,09 %;</p>

<p>Pipeta volumétrica</p> 	<p>Modelo Blaubrand ® (http://www.brand.de)</p>	<p>Capacidade: 50 mL Código de cor: vermelho Limite de erro: $\pm 0,05$ ml Capacidade: 20 mL Código de cor: amarelo Limite de erro: $\pm 0,03$ ml</p>
<p>Copo de poliestireno</p> 		<p>volume de 200 mL</p>
<p>Placa de Elisa</p> 	<p>Placa de Elisa (http://www.lfequipamentos.com.br)</p>	<p>Fabricado em poliestireno cristal (transparente); Volumes dos poços - Fundo “Chato”: 250 μL</p>
<p>Câmera de infravermelho</p> 	<p>Modelo Flir A35 (http://www.flir.com)</p>	<p>Dimensões: 40 mm (c) x 43 mm (l) x 106 mm (a); Peso: 0,2 kg; Faixa de temperatura do objeto: - 40 até + 550 °C Precisão: ± 5 °C ou ± 5 % da leitura</p>
<p>Termo-higrômetro</p> 	<p>Modelo 5203.03.0.00 (http://www.incoterm.com.br)</p>	<p>Escala: - 10 °C a + 50 °C Divisão: 1 °C Limite de erro: ± 1 °C Dimensões: 310 x 95 x 20 mm</p>

Fonte: Do autor.

Na Tabela 13 são apresentados os *softwares* utilizados neste trabalho.

Tabela 13 – Relação de *softwares* utilizados neste trabalho.

Software	Informações
<p data-bbox="421 331 552 358">Flir Tools +</p> 	<p data-bbox="774 331 1447 544"><i>Software</i> próprio da câmera de infravermelho. Através dele é gravado um vídeo (extensão <i>seq</i>) que mostra a reação de neutralização. Com esse mesmo <i>software</i>, o vídeo com extensão <i>seq</i> foi convertido para um vídeo com extensão <i>avi</i>. Além disso, foi possível gerar uma planilha com extensão <i>csv</i>, na qual constam as temperaturas dos pixels de cada <i>frame</i> do vídeo gravado.</p>
<p data-bbox="229 663 730 719"><i>Software</i> de cálculo da capacidade calorífica e da entalpia</p> 	<p data-bbox="774 663 1447 936">O programa desenvolvido no Matlab dividiu o vídeo em <i>frames</i> e analisou cada <i>frame</i> para verificar a posição (linha e coluna) dos pixels que representam os pontos onde ocorreram as reações químicas. Sabendo a posição dos pontos nos <i>frames</i>, então o próximo passo foi localizar na planilha a mesma posição que foi encontrada nos <i>frames</i> para descobrir as temperaturas iniciais e finais e calcular a variação de temperatura. Por fim, a interface no GUIDE, calculou a capacidade calorífica do sistema e a entalpia.</p>

Fonte: Do autor.

5. RESULTADOS

Neste capítulo são descritos os resultados obtidos durante a realização do presente trabalho. Os mesmos foram apresentados separadamente, de acordo com a metodologia citada no item 4.

5.1 Titulação termométrica de 5 alíquotas de 20 mL de NaOH

Os resultados obtidos no procedimento de titulação termométrica de cinco alíquotas de 20 mL de uma solução de NaOH ($\cong 1\text{molL}^{-1}$) podem ser observados na Figura 24, cujos resultados de cada teste encontram-se no Anexo B.

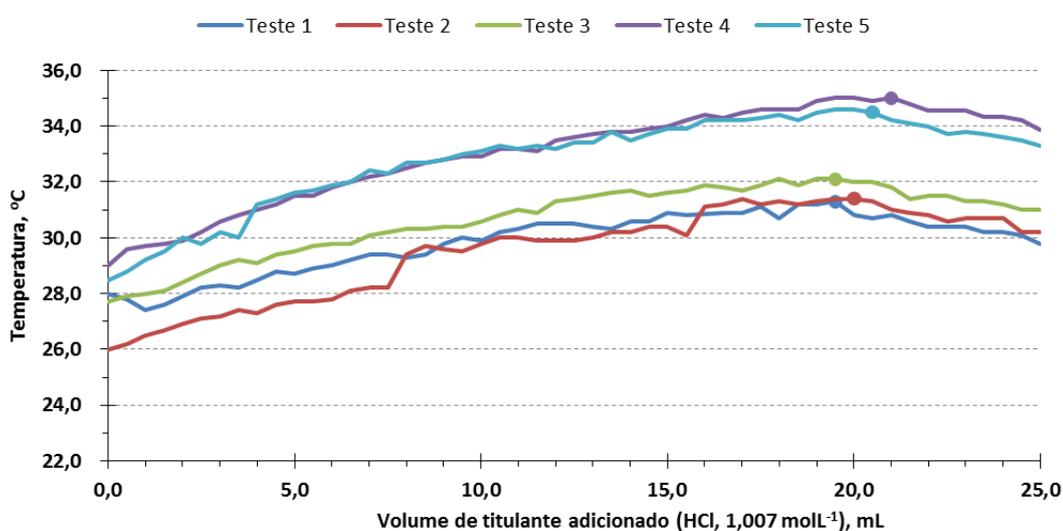


Figura 24. Curvas de titulação termométrica para 5 alíquotas de 20 mL de uma solução de NaOH ($\cong 1\text{molL}^{-1}$). Os pontos marcados indicam a temperatura máxima obtida em cada titulação. Fonte: Do autor.

O ponto final de titulação foi identificado como a temperatura máxima obtida em cada procedimento, a partir da qual qualquer adição extra do titulante produz uma redução da temperatura (SMITH, 2014).

Desta forma, nos cinco procedimentos de titulação foram consumidos, 19,5; 20,0; 19,5; 21,0 e 20,5 mL do titulante, respectivamente. Assim, a concentração da solução de hidróxido foi determinada como $1,012 \pm 0,032 \text{ molL}^{-1}$, não apresentando diferenças significativas

($P < 0,01$) quando comparada aos resultados obtidos utilizando o reagente indicador de fenolftaleína para visualização do ponto final de titulação ($1,025 \pm 0,020 \text{ molL}^{-1}$).

A Figura 25 apresenta uma sequência de imagens capturadas durante a titulação termométrica (vista superior), onde se observa o frasco de PS com 20 mL de solução de NaOH ($1,012 \text{ molL}^{-1}$), posicionado sobre um agitador magnético. Na parte superior das figuras é possível identificar a ponta de bureta utilizada para adição do titulante. Durante o procedimento de titulação a temperatura máxima dentro da circunferência foi registrada pelo *software* FLIRTools + e a planilha de resultados foi posteriormente exportada para o MSExcel®.

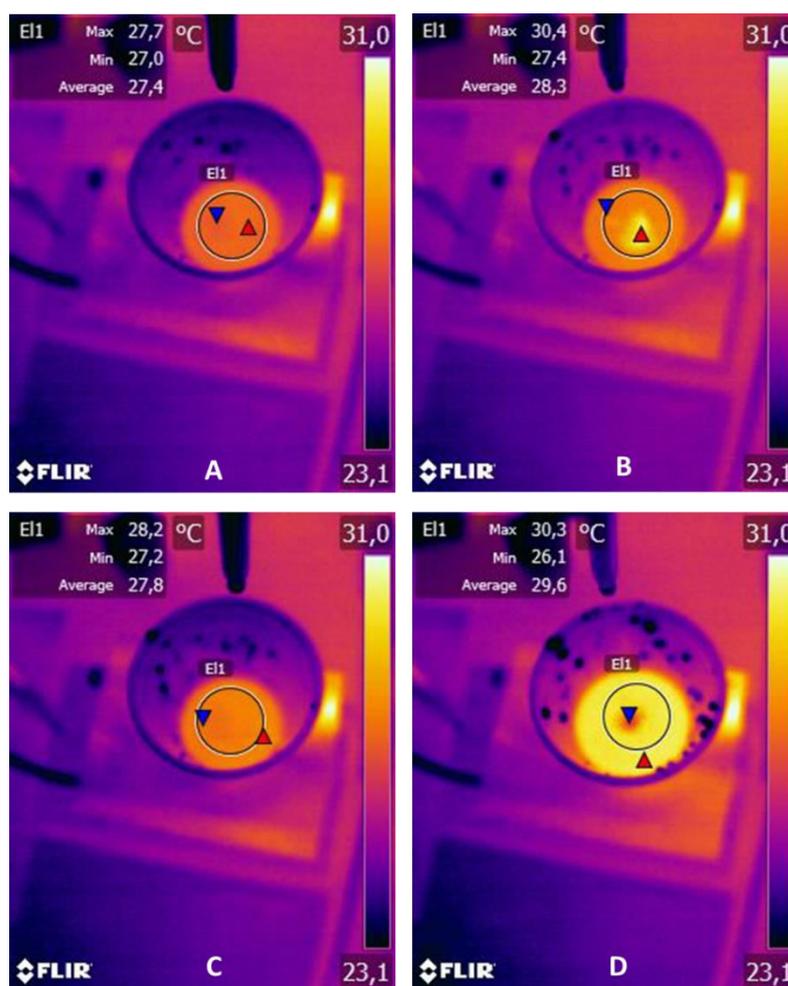


Figura 25. Sequência de imagens capturadas durante a titulação termométrica (vista superior). A) Início da titulação; B) Efeito na temperatura pela adição de uma gota da solução de HCl; C) Dissipação da temperatura, dois segundos após a adição de uma gota da solução de HCl; e D) Ponto final de titulação. As setas azul e vermelha indicam locais de temperatura mínima e máxima, respectivamente. Fonte: Do autor.

Na Figura 25A observa-se o início da titulação, cuja temperatura máxima foi determinada como 26,8 °C, e que se eleva gradativamente com a adição do titulante. A Figura 25B apresenta o instante em que uma gota do titulante foi adicionada, produzindo um aumento de temperatura no centro do frasco, a qual é rapidamente dissipada para o restante da solução, como pode ser observado na Figura 25C, capturada dois segundos após. A última imagem, Figura 25D, capturada após o ponto equivalência, permite identificar que a adição de titulante produz o resfriamento da solução, indicando o final da reação.

A Figura 26 apresenta o típico comportamento da temperatura (média, máxima e mínima) em função do tempo de reação, onde se observa um nítido decréscimo dos valores de temperatura após 50 segundos do início da reação.

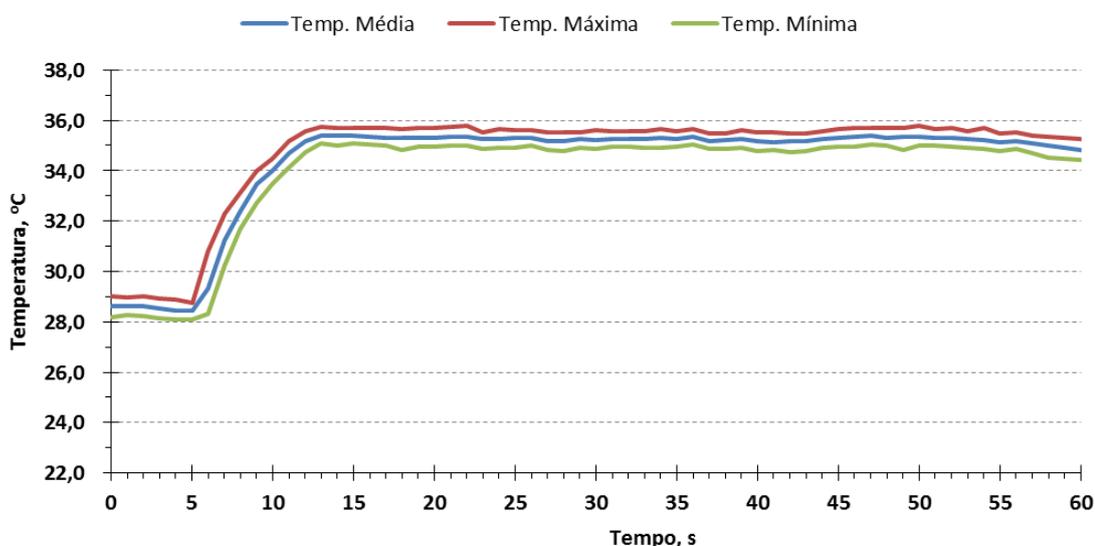


Figura 26. Resultados típicos do monitoramento de temperatura para determinação da capacidade calorífica. Fonte: Do autor.

5.2 Capacidade calorífica do copo de poliestireno

A Tabela 14 apresenta os resultados da determinação capacidade calorífica do sistema de titulação termométrica para o copo de poliestireno.

Tabela 14 – Resultados produzidos na determinação da capacidade calorífica do sistema de titulação termométrica desenvolvido utilizando copo de poliestireno.

Parâmetros	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
Capacidade calorífica da água, J g ⁻¹ °C ⁻¹	4,182	4,182	4,182	4,182	4,182
Densidade da água, g mL ⁻¹	0,986	0,986	0,986	0,986	0,986
Volume de água, mL	100	100	100	100	100
Temperatura do frasco de PS, °C	30,4	30,2	30,2	28,8	28,6
Temperatura da água, °C	50,5	51,0	50,4	52,7	51,6
Temperatura do frasco de PS com água, °C	48,2	48,7	48,2	50,0	48,9
Capacidade calorífica do sistema, J°C	53,28	51,26	50,40	52,52	54,84

Fonte: Do autor.

Os resultados obtidos permitiram determinar um valor médio para a capacidade calorífica de $52,46 \pm 1,74 \text{ J } ^\circ\text{C}^{-1}$, indicando uma sensibilidade superior a obtida por outro sistema, utilizando termômetro contendo álcool (ASSUMPCÃO *et al.*, 2010) cujo valor foi da ordem de $63,4 \text{ J } ^\circ\text{C}^{-1}$. No entanto, é importante salientar que este sistema é aberto, e estes valores de capacidade calorífica podem ser alterados significativamente se o tempo de reação for prolongado.

5.3 Resultados obtidos na determinação da entalpia de neutralização de 50 mL de solução de NaOH com 50 mL de solução de HCl

As Tabelas 15, 16 e 17 apresentam os resultados obtidos na determinação da entalpia de neutralização de cinco alíquotas de 50 mL de solução de NaOH ($1,012 \text{ molL}^{-1}$) com 50 mL de solução de HCl ($1,007 \text{ molL}^{-1}$) utilizando sensor PT-100, termômetro e câmera, respectivamente.

Tabela 15 – Resultados de entalpia de neutralização para as cinco alíquotas da solução de 50 mL de NaOH utilizando sensor PT-100.

Parâmetros		Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5
Solução de HCl	Concentração, mol L ⁻¹	1,007	1,007	1,007	1,007	1,007
	Volume, mL	50	50	50	50	50
	Densidade, g mL ⁻¹	1,017	1,017	1,017	1,017	1,017
	m, massa da solução, g	50,855	50,855	50,855	50,855	50,855
	Temperatura inicial da solução, °C	24,4	22,1	24,4	24,4	24,2
Solução de NaOH	Concentração, mol L ⁻¹	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012
	Volume, mL	50	50	50	50	50
	Densidade, g mL ⁻¹	1,068	1,068	1,068	1,068	1,068
	Massa da solução, g	53,39	53,39	53,39	53,39	53,39
	Temperatura inicial da solução, °C	24,4	22,1	24,4	24,4	24,2
	Quantidade da base, mol	0,0506	0,0506	0,0506	0,0506	0,0506
	Capacidade calorífica do sistema, J °C ⁻¹	52,46	52,46	52,46	52,46	52,46
	Capacidade calorífica da água, J g ⁻¹ °C ⁻¹	4,182	4,182	4,182	4,182	4,182
	Temperatura inicial do sistema, °C	29,64	29,64	29,64	29,64	29,64
	Temperatura final do sistema, °C	31	30,1	31,2	31,1	31,2
ΔH, kJ mol⁻¹	- 59,98	- 54,63	- 59,01	- 58,50	- 59,84	

Fonte: Do autor.

Tabela 16 – Resultados de entalpia de neutralização para as cinco alíquotas da solução de 50 mL de NaOH utilizando termômetro de mercúrio.

Parâmetros		Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5
Solução de HCl	Concentração, mol L ⁻¹	1,007	1,007	1,007	1,007	1,007
	Volume, mL	50	50	50	50	50
	Densidade, g mL ⁻¹	1,017	1,017	1,017	1,017	1,017
	m, massa da solução, g	50,855	50,855	50,855	50,855	50,855
	Temperatura inicial da solução, °C	28,1	28	27,6	27,9	28,8
Solução de NaOH	Concentração, mol L ⁻¹	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012
	Volume, mL	50	50	50	50	50
	Densidade, g mL ⁻¹	1,068	1,068	1,068	1,068	1,068
	Massa da solução, g	53,39	53,39	53,39	53,39	53,39
	Temperatura inicial da solução, °C	28	28	28	28	28
	Quantidade da base, mol	0,0506	0,0506	0,0506	0,0506	0,0506
	Capacidade calorífica do sistema, J °C ⁻¹	52,46	52,46	52,46	52,46	52,46
	Capacidade calorífica da água, J g ⁻¹ °C ⁻¹	4,182	4,182	4,182	4,182	4,182
	Temperatura inicial do sistema, °C	29	28	28,2	28,2	29
	Temperatura final do sistema, °C	34,5	34	34	34	35
ΔH, kJ mol⁻¹	- 61,28	- 57,91	- 59,39	- 58,13	- 63,17	

Fonte: Do autor.

Tabela 17 – Resultados de entalpia de neutralização para as cinco alíquotas da solução de 50 mL de NaOH utilizando câmera de infravermelho.

	Parâmetros	Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5
Solução de HCl	Concentração, mol L ⁻¹	1,007	1,007	1,007	1,007	1,007
	Volume, mL	50	50	50	50	50
	Densidade, g mL ⁻¹	1,017	1,017	1,017	1,017	1,017
	m, massa da solução, g	50,855	50,855	50,855	50,855	50,855
	Temperatura inicial da solução, °C	25,2	24,9	25,1	25	25,8
Solução de NaOH	Concentração, mol L ⁻¹	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012
	Volume, mL	50	50	50	50	50
	Densidade, g mL ⁻¹	1,068	1,068	1,068	1,068	1,068
	Massa da solução, g	53,39	53,39	53,39	53,39	53,39
	Temperatura inicial da solução, °C	25,9	25,7	25,1	25,3	24,8
	Quantidade da base, mol	0,0506	0,0506	0,0506	0,0506	0,0506
	Capacidade calorífica do sistema, J °C ⁻¹	52,46	52,46	52,46	52,46	52,46
	Capacidade calorífica da água, J g ⁻¹ °C ⁻¹	4,182	4,182	4,182	4,182	4,182
	Temperatura inicial do sistema, °C	29,5	30,3	29,8	30,1	30,2
	Temperatura final do sistema, °C	31,9	31,8	31,5	31,6	31,7
	ΔH , kJ mol ⁻¹	- 57,12	- 57,47	- 56,90	- 57,09	- 56,80

Fonte: Do autor.

Os resultados obtidos determinaram um valor médio de entalpia de neutralização de $- 61,81 \pm 4,45 \text{ kJ mol}^{-1}$ (Tabela 15), $- 59,98 \pm 2,23 \text{ kJ mol}^{-1}$ (Tabela 16) e $- 57,08 \pm 0,26 \text{ kJ mol}^{-1}$ (Tabela 17).

A Tabela 18 apresenta uma comparação dos resultados obtidos neste trabalho com os resultados dos trabalhos de outros autores.

Tabela 18 – Comparação dos valores de entalpia obtidos neste trabalho com os resultados dos trabalhos de outros autores.

	Entalpia (kJ mol ⁻¹)	Erro (kJ mol ⁻¹)
Sensor PT-100	- 61,81	- 5,97
Termômetro	- 59,98	- 4,14
Câmera de Infravermelho	- 57,08	- 1,24
Pastre <i>et al.</i> , 2012	- 53,00	+ 2,84
Assumpção <i>et al.</i> , 2010	- 59,00	- 3,16
Papee <i>et al.</i> , 1956	- 56,50	- 0,66

Fonte: Do autor.

De acordo com a Tabela 18, entre os sensores utilizados neste trabalho, a câmera apresentou o melhor valor de entalpia, além de um erro $- 1,24 \text{ kJ mol}^{-1}$ em relação ao valor teórico, de $- 55,84 \text{ kJ mol}^{-1}$ (ASSUMPCÃO *et al.*, 2010). Comparando com outros trabalhos, o sistema desenvolvido utilizando a câmera obteve melhores resultados que Pastre *et al.*, 2012 e Assumpção *et al.*, 2010, porém apresentou valores piores que Papee *et al.*, 1956.

5.4 Resultados obtidos na determinação da entalpia de neutralização de 20 mL de solução de NaOH com 20 mL de solução de HCl

A Tabela 19 apresenta os resultados obtidos na determinação da entalpia de neutralização de seis alíquotas de 20 mL de solução de NaOH ($1,012 \text{ molL}^{-1}$) com 20 mL de solução de HCl ($1,007 \text{ molL}^{-1}$) com o uso da câmera.

Tabela 19 – Resultados de entalpia de neutralização para as seis alíquotas da solução de 20 mL de NaOH utilizando câmera de infravermelho.

Parâmetros		Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5	Medição 6
Solução de HCl	Concentração, mol L^{-1}	1,007	1,007	1,007	1,007	1,007	1,007
	Volume, mL	20	20	20	20	20	20
	Densidade, g mL^{-1}	1,017	1,017	1,017	1,017	1,017	1,017
	m, massa da solução, g	20,34	20,34	20,34	20,34	20,34	20,34
	Temperatura inicial da solução, °C	23,6	27,8	28,0	23,5	28,8	29,0
Solução de NaOH	Concentração, mol L^{-1}	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012
	Volume, mL	20	20	20	20	20	20
	Densidade, g mL^{-1}	1,068	1,068	1,068	1,068	1,068	1,068
	Massa da solução, g	21,36	21,36	21,36	21,36	21,36	21,36
	Temp. inicial da solução, °C	27,6	27,6	27,0	27,6	29,9	29,9
	Quantidade da base, mol	0,0201	0,0201	0,0201	0,0201	0,0201	0,0201
Capacidade calorífica do sistema, $\text{J } ^\circ\text{C}^{-1}$		52,46	52,46	52,46	52,46	52,46	52,46
Capacidade calorífica da água, $\text{J g}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$		4,182	4,182	4,182	4,182	4,182	4,182
Temperatura inicial do sistema, °C		23,6	23,6	29,1	23,9	29,9	31,1
Temperatura final do sistema, °C		30,5	31,6	33,1	30,4	34,8	35,0
ΔH, kJ mol^{-1}		- 59,98	- 54,63	- 59,01	- 58,50	- 59,84	- 58,12

Fonte: Do autor.

Os resultados obtidos determinaram um valor médio de entalpia de neutralização de $-58,34 \pm 1,96 \text{ kJ mol}^{-1}$ para a câmera. De acordo com a Tabela 18 (citada no item 5.3) a câmera apresentou valores melhores que Pastre *et al.*, 2012 e Assumpção *et al.*, 2010.

5.5 Medidas entalpimétricas utilizando sensor PT-100, termômetro de mercúrio e câmera de infravermelho para solução de 50 mL de NaOH com solução de 50 mL de HCl

As Tabelas 20, 21 e 22 apresentam os resultados obtidos nos 4 procedimentos (em triplicata) de entalpimetria utilizando sensor PT-100, termômetro de mercúrio e câmera de infravermelho, respectivamente, para determinação da variação de temperatura.

Tabela 20 – Resultados obtidos na utilização de sensor PT-100 para determinação das variações de temperatura das reações para solução de 50 mL de NaOH com solução de 50 mL de HCl

Experimento	Volume, mL	NaOH, mol L ⁻¹	HCl, mol L ⁻¹	t _{inicial} , °C	t _{final} , °C	Δt (°C)
A1	50	0,25	1	24,9	27,3	2,4
A2	50	0,25	1	25,1	27,4	2,3
A3	50	0,25	1	24,9	27,2	2,3
A4	50	0,25	1	24,6	27	2,4
A5	50	0,25	1	24,8	27,1	2,3
			Média	24,86	27,2	2,34
			DP	0,18	0,16	0,05
B1	50	0,5	1	25,5	29,6	4,1
B2	50	0,5	1	25,5	30	4,5
B3	50	0,5	1	25,4	30	4,6
B4	50	0,5	1	25,4	30	4,6
B5	50	0,5	1	25,8	30,3	4,5
			Média	25,52	29,98	4,46
			DP	0,16	0,25	0,21
C1	50	0,75	1	25,9	30,1	4,2
C2	50	0,75	1	25,5	29,9	4,4
C3	50	0,75	1	25,3	31,2	5,9
C4	50	0,75	1	25,4	30,8	5,4
C5	50	0,75	1	25,4	29,6	4,2
			Média	25,5	30,32	4,82
			DP	0,23	0,66	0,78
D1	50	1	1	24,4	31	6,6
D2	50	1	1	22,1	30,1	8
D3	50	1	1	24,4	31,2	6,8
D4	50	1	1	24,4	31,1	6,7
D5	50	1	1	24,2	31,2	7
			Média	23,9	30,92	7,02
			DP	1,01	0,47	0,57

Fonte: Do autor.

Tabela 21 – Resultados obtidos na utilização do termômetro para determinação das variações de temperatura das reações para solução de 50 mL de NaOH com solução de 50 mL de HCl

Experimento	Volume, mL	NaOH, mol L ⁻¹	HCl, mol L ⁻¹	t _{inicial} , °C	t _{final} , °C	Δt (°C)
A1	50	0,25	1	24,5	26,54	2,04
A2	50	0,25	1	24,3	26,4	2,1
A3	50	0,25	1	24,14	26,42	2,28
A4	50	0,25	1	24,24	26,5	2,26
A5	50	0,25	1	24,85	26,2	1,35
			Média	24,406	26,412	2,006
			DP	0,28	0,13	0,38
B1	50	0,5	1	26,5	30	3,5
B2	50	0,5	1	26	29,5	3,5
B3	50	0,5	1	26	29,5	3,5
B4	50	0,5	1	26	29,5	3,5
B5	50	0,5	1	26	29,5	3,5
			Média	26,1	29,6	3,5
			DP	0,22	0,22	0,00
C1	50	0,75	1	26	31,5	5,5
C2	50	0,75	1	26	31	5
C3	50	0,75	1	26	31,5	5,5
C4	50	0,75	1	26	31	5
C5	50	0,75	1	26	31	5
			Média	26	31,2	5,2
			DP	0,00	0,27	0,27
D1	50	1	1	28	34,5	6,5
D2	50	1	1	28	34	6
D3	50	1	1	28	34	6
D4	50	1	1	28	34	6
D5	50	1	1	28	35	7
			Média	28	34,3	6,3
			DP	0,00	0,45	0,45

Fonte: Do autor.

Tabela 22 – Resultados obtidos na utilização da câmera para determinação das variações de temperatura das reações para solução de 50 mL de NaOH com solução de 50 mL de HCl

Experimento	Volume, mL	NaOH, mol L ⁻¹	HCl, mol L ⁻¹	t _{inicial} , °C	t _{final} , °C	Δt (°C)
A1	50	0,25	1	25,2	27,6	2,4
A2	50	0,25	1	25,1	27,8	2,7
A3	50	0,25	1	25,4	28	2,6
A4	50	0,25	1	25,1	27,5	2,4
A5	50	0,25	1	25,5	27,7	2,2
			Média	25,26	27,72	2,46
			DP	0,18	0,19	0,19
B1	50	0,5	1	25,6	29,4	3,8
B2	50	0,5	1	25,1	28,8	3,7
B3	50	0,5	1	25,2	29,1	3,9
B4	50	0,5	1	25,1	28,9	3,8
B5	50	0,5	1	25,5	29,2	3,7
			Média	25,3	29,08	3,78
			DP	0,23	0,24	0,08
C1	50	0,75	1	25,3	30,2	4,9
C2	50	0,75	1	25,1	30,6	5,5
C3	50	0,75	1	26,1	30,8	4,7
C4	50	0,75	1	25,8	30,9	5,1
C5	50	0,75	1	25,7	30,8	5,1
			Média	25,6	30,66	5,06
			DP	0,40	0,28	0,30
D1	50	1	1	25,9	31,9	6
D2	50	1	1	25,7	31,8	6,1
D3	50	1	1	25,1	31,5	6,4
D4	50	1	1	25,3	31,6	6,3
D5	50	1	1	24,8	31,7	6,9
			Média	25,36	31,7	6,34
			DP	0,44	0,16	0,35

Fonte: Do autor.

A Figura 27 mostra as curvas de calibração do sensor PT-100, termômetro de mercúrio e câmera de infravermelho, de acordo com os resultados obtidos nos 4 procedimentos (em triplicata) de entalpimetria, para determinação da variação de temperatura.

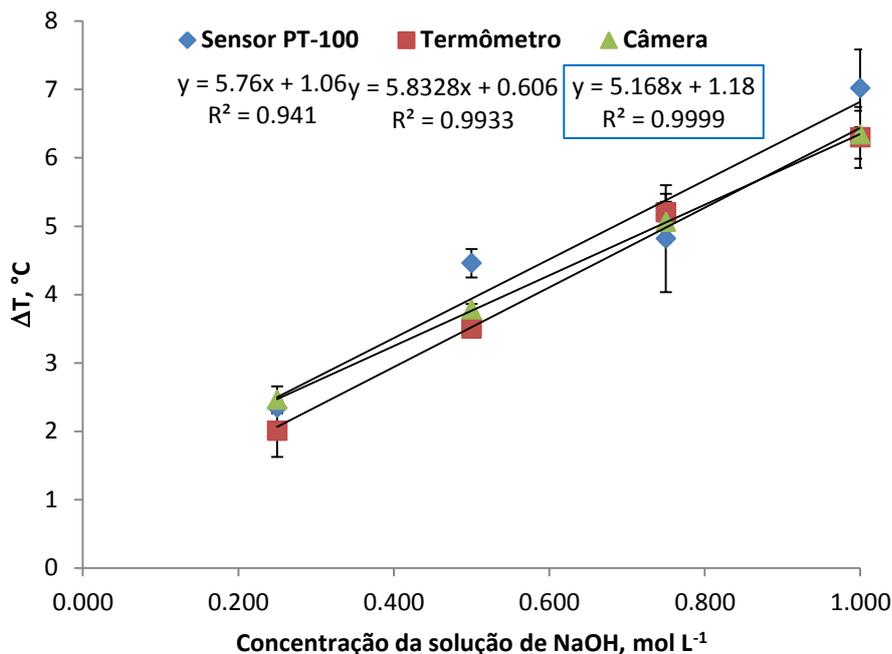


Figura 27. Curvas de calibração do sensor PT-100, termômetro de mercúrio e câmera de infravermelho, de acordo com os resultados obtidos nos 4 procedimentos (em triplicata) de entalpiometria, para determinação da variação de temperatura. Fonte: Do autor.

Conforme a Figura 27, a câmera apresentou o maior valor de R^2 . Em virtude disso, ela é a mais apropriada para determinação das variações de temperatura das reações para solução de 50 mL de NaOH (0,25; 0,5; 0,75 e 1 molL⁻¹) com solução de 50 mL de HCl (1 molL⁻¹).

5.6 Capacidade calorífica da Placa de Elisa

A Tabela 23 apresenta os resultados da determinação capacidade calorífica do sistema de titulação termométrica para a Placa de Elisa.

Tabela 23 – Resultados produzidos na determinação da capacidade calorífica do sistema de titulação termométrica desenvolvido utilizando Placa de Elisa.

Parâmetros	Teste 1	Teste 2	Teste 3
Densidade da água, g mL ⁻¹	0,986	0,986	0,986
Volume de água, mL	0,2	0,2	0,2
Capacidade calorífica da água, J g ⁻¹ °C ⁻¹	4,182	4,182	4,182
Temperatura da placa de Elisa, °C	26,3	26,3	26,3
Temperatura da água, °C	35,14	35,16	33,25
Temperatura da placa de Elisa com água, °C	32,45	32,61	31,51
Capacidade calorífica do sistema, J°C	0,36	0,33	0,28

Fonte: Do autor.

Os resultados obtidos permitiram determinar um valor médio para a capacidade calorífica de $0,32 \pm 0,04 \text{ J } ^\circ\text{C}^{-1}$. Esse valor é considerado baixo, quando comparado com (Assumpção *et al.*, 2010) cujo valor foi da ordem de $63,4 \text{ J } ^\circ\text{C}^{-1}$. Porém, este experimento foi realizado com volumes menores, que acarretou em baixa capacidade calorífica.

5.7 Resultados obtidos na determinação da entalpia de neutralização de 0,1 mL de solução de NaOH com 0,1 mL de solução de HCl

A Tabela 24 apresenta os resultados obtidos na determinação da entalpia de neutralização de cinco alíquotas de 0,1 mL de solução de NaOH ($1,012 \text{ molL}^{-1}$) com 0,1 mL de solução de HCl ($1,007 \text{ molL}^{-1}$) utilizando a câmera.

Tabela 24 – Resultados de entalpia de neutralização para as seis alíquotas da solução de 0,1 mL de NaOH utilizando câmera de infravermelho.

Parâmetros		Medição 1	Medição 2	Medição 3	Medição 4	Medição 5
Solução de HCl	Concentração, mol L^{-1}	1,007	1,007	1,007	1,007	1,007
	Volume, mL	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Densidade, g mL^{-1}	1,017	1,017	1,017	1,017	1,017
	Massa da solução, g	0,10171	0,10171	0,10171	0,10171	0,10171
	Temperatura inicial da solução, $^\circ\text{C}$	24,08	24,21	24,14	24,23	24,26
Solução de NaOH	Concentração, mol L^{-1}	1,012	1,012	1,012	1,012	1,012
	Volume, mL	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Densidade, g mL^{-1}	1,068	1,068	1,068	1,068	1,068
	Massa da solução, g	0,10678	0,10678	0,10678	0,10678	0,10678
	Temperatura inicial da solução, $^\circ\text{C}$	24,125	24	24	23,9375	23,925
	Quantidade da base, mol	0,0001012	0,0001012	0,0001012	0,0001012	0,0001012
Capacidade calorífica do sistema, $\text{J } ^\circ\text{C}^{-1}$		52,46	52,46	52,46	52,46	52,46
Capacidade calorífica da água, $\text{J g}^{-1} ^\circ\text{C}^{-1}$		4,182	4,182	4,182	4,182	4,182
Temperatura inicial do sistema, $^\circ\text{C}$		26,3	26,3	26,3	26,3	26,3
Temperatura final do sistema, $^\circ\text{C}$		29,5125	29,45	29,8625	30	29,85
ΔH, kJ mol^{-1}		- 56,85	- 56,16	- 61,28	- 62,81	- 60,96

Fonte: Do autor.

Os resultados obtidos determinaram um valor médio de entalpia de neutralização de $-59,61 \pm 2,94 \text{ kJ mol}^{-1}$, além de um erro de $-3,77 \text{ kJ mol}^{-1}$. Comparando com os valores dos erros dos trabalhos de Pastre *et al.*, 2012 (erro de $+2,84 \text{ kJ mol}^{-1}$), Assumpção *et al.*, 2010 (erro de $-3,16 \text{ kJ mol}^{-1}$) e Papee *et al.*, 1956 (erro de $-0,66 \text{ kJ mol}^{-1}$), o sistema desenvolvido utilizando câmera de IR apresentou o maior valor de erro.

5.8 Medidas entalpimétricas utilizando sensor PT-100 e câmera de infravermelho com um pipetador monocanal

Os resultados obtidos nos ensaios entalpimétricos em micro escala utilizando um pipetador monocanal estão organizados nas Tabelas 25 e 26.

Tabela 25 – Resultados obtidos na utilização de sensor PT-100 para determinação das variações de temperatura das reações para solução de 0,15 mL de NaOH com solução de 0,15 mL de HCl utilizando pipetador monocanal

Experimento	Volume, mL	NaOH, molL ⁻¹	HCl, molL ⁻¹	t _{inicial} , °C	t _{final} , °C	Δt (°C)
A1	0,15	0,25	1,0	23,7	24,5	0,8
A2	0,15	0,25	1,0	23,6	24,5	0,9
A3	0,15	0,25	1,0	24	24,4	0,4
			Média	23,77	24,47	0,7
			DP	0,21	0,06	0,26
B1	0,15	0,5	1,0	21,1	25,1	4,0
B2	0,15	0,5	1,0	18,8	23,6	4,8
B3	0,15	0,5	1,0	19,1	22,6	3,5
			Média	19,67	23,77	4,1
			DP	1,25	1,26	0,66
C1	0,15	0,75	1,0	19,0	25	6,0
C2	0,15	0,75	1,0	19,5	25,1	5,6
C3	0,15	0,75	1,0	19,7	24,6	4,9
			Média	19,4	24,9	5,5
			DP	0,36	0,26	0,56
D1	0,15	1,0	1,0	20,2	26,3	6,1
D2	0,15	1,0	1,0	19,6	26	6,4
D3	0,15	1,0	1,0	20	26,3	6,3
			Média	19,93	26,2	6,27
			DP	0,31	0,17	0,15

Fonte: Do autor.

Tabela 26 – Resultados obtidos na utilização de câmera de infravermelho para determinação das variações de temperatura das reações para solução de 0,15 mL de NaOH com solução de 0,15 mL de HCl utilizando pipetador monocanal

Experimento	Volume, mL	NaOH, molL ⁻¹	HCl, molL ⁻¹	t _{inicial} , °C	t _{final} , °C	Δt (°C)
A1	0,15	0,25	1,0	21,9	23,8	1,9
A2	0,15	0,25	1,0	21,9	23,6	1,7
A3	0,15	0,25	1,0	22	24	2,0
			Média	21,93	23,8	1,87
			DP	0,06	0,20	0,15
B1	0,15	0,5	1,0	22,4	25,6	3,2
B2	0,15	0,5	1,0	22,4	26,5	4,1
B3	0,15	0,5	1,0	22,9	26,8	3,9
			Média	22,57	26,3	3,73
			DP	0,29	0,62	0,47
C1	0,15	0,75	1,0	22,1	27,3	5,2
C2	0,15	0,75	1,0	23,3	28,6	5,3
C3	0,15	0,75	1,0	25,3	29,4	4,1
			Média	23,57	28,43	4,87
			DP	1,62	1,06	0,67
D1	0,15	1,0	1,0	22,9	29,6	6,7
D2	0,15	1,0	1,0	23,2	29,9	6,7
D3	0,15	1,0	1,0	23,3	29,9	6,6
			Média	23,13	29,8	6,67
			DP	0,21	0,17	0,06

Fonte: Do autor.

A Figura 28 mostra as curvas de calibração do sensor PT-100 e da câmera de infravermelho, de acordo com os resultados obtidos nos 4 procedimentos (em triplicata) de entalpiometria, para determinação da variação de temperatura, utilizando pipetador monocanal.

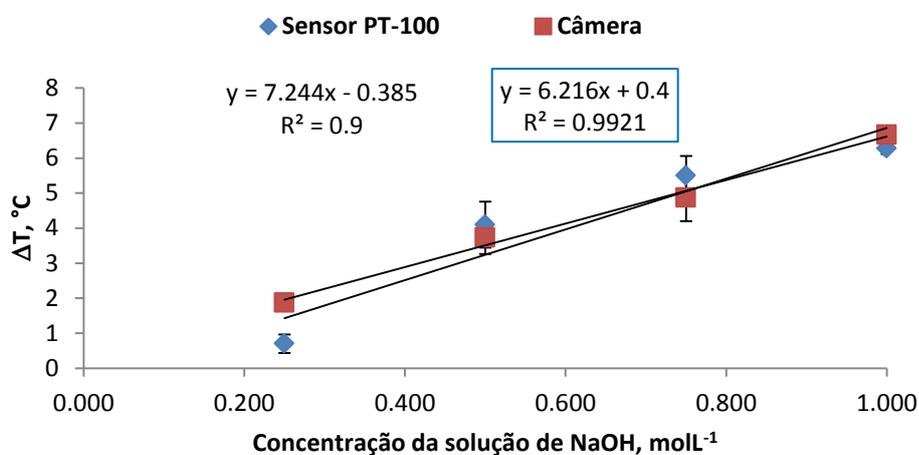


Figura 28. Curvas de calibração do sensor PT-100 e da câmera de infravermelho, de acordo com os resultados obtidos nos 4 procedimentos (em triplicata) de entalpiometria, para determinação da variação de temperatura, utilizando pipetador monocanal. Fonte: Do autor.

Conforme a Figura 28, a câmara apresentou o maior coeficiente de determinação (R^2), cerca de 10,23 % maior que o coeficiente apresentado pelo sensor, se tornando a melhor opção para determinação da variação de temperatura, utilizando pipetador monocanal.

5.9 Medidas entalpimétricas utilizando sensor PT-100 e câmara de infravermelho com um pipetador multicanal

A vantagem da utilização de um pipetador multicanal (8 canais), com uma placa de Elisa de 96 cavidades é que ele permite a realização simultânea de 8 replicatas de cada experimento. Desta forma, a Tabela 27 apresenta os resultados médios ($n = 24$) de cada experimento, cujos resultados individuais encontram-se no Anexo C.

Tabela 27 – Resultados obtidos para determinação das variações de temperatura das reações para solução de 0,15 mL de NaOH com solução de 0,15 mL de HCl utilizando pipetador multicanal

Experimento	Volume, mL	NaOH, molL ⁻¹	HCl, molL ⁻¹	Sensor Pt-100		Câmera de IR	
				Média	DP	Média	DP
A1-A24	0,1	0,25	1,0	0,98	0,45	0,60	0,28
B1-B24	0,1	0,50	1,0	2,14	0,32	1,81	0,30
C1-C24	0,1	0,75	1,0	2,71	0,22	2,37	0,24
D1-D24	0,1	1,0	1,0	3,24	0,43	3,14	0,40

Fonte: Do autor.

A Figura 29 mostra as curvas de calibração do sensor PT-100 e da câmara de infravermelho, de acordo com os resultados obtidos nos 4 procedimentos (em triplicata) de entalpimetria, para determinação da variação de temperatura, utilizando pipetador multicanal.

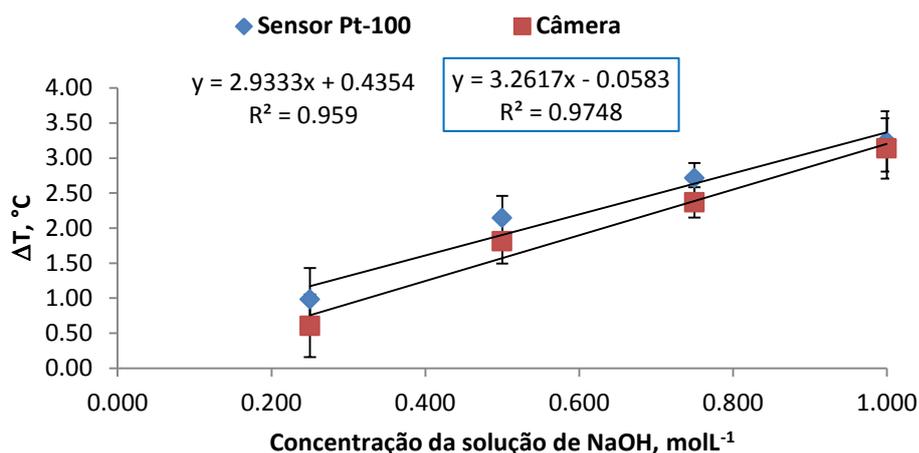


Figura 29. Curvas de calibração do sensor PT-100 e da câmera de infravermelho, de acordo com os resultados obtidos nos 4 procedimentos (em triplicata) de entalpimetria, para determinação da variação de temperatura, utilizando pipetador multicanal. Fonte: Do autor.

De acordo com a Figura 29, da mesma forma que com o pipetador monocanal, a câmera apresentou o maior coeficiente de determinação (R^2), cerca de 1,65 % maior que o coeficiente do sensor, se tornando a melhor opção para análises entalpimétricas da reação química, utilizando pipetador multicanal.

5.10 Comparação dos valores obtidos pelo programa com os obtidos manualmente

Como forma de testar e validar o programa desenvolvido no Matlab, o mesmo foi comparado com um procedimento feito manualmente.

A Figura 30 apresenta um *frame* no qual foi aplicado o método de binarização.

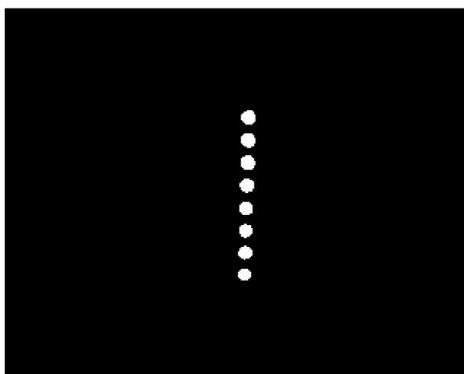


Figura 30. Imagem na qual foi aplicada a binarização e que apresenta as reações químicas acontecendo em 8 cavidades na placa de Elisa. Fonte: Do autor.

No Anexo D consta a parte do programa que processa o vídeo com a reação química e após, calcula a capacidade calorífica do sistema e a entalpia de neutralização.

A Figura 31 apresenta a tela do programa com os valores calculados.

Cálculo da capacidade calorífica		Cálculo da entalpia	
Densidade da água:	0,996 g/mL	Solução de ácido	
Volume de água:	0,2 mL	Densidade:	1,017 g/mL
Capacidade calorífica da água:	4,182 J/g°C	Volume:	0,1 mL
Temperatura do calorímetro:	26,3 °C	Concentração:	1,007 mol/L
Temperatura da água:	34,52 °C	Temperatura inicial da solução:	24,26 °C
Temperatura do calorímetro com água:	32,19 °C	Solução de base	
		Densidade:	1,068 g/mL
		Volume:	0,1 mL
		Concentração:	1,012 mol/L
		Temperatura inicial da solução:	24,3152 °C
		Temperatura final da reação:	29,7052 °C
Capacidade calorífica do sistema:	0,32624 J/°C	Entalpia de Neutralização:	-57,6478 kJ/mol

Figura 31. Tela do programa que apresenta os valores da capacidade calorífica e da entalpia das reações químicas na placa de Elisa. Fonte: Do autor.

A Tabela 28 apresenta os valores de temperatura e de entalpia obtidos de forma manual e através do programa.

Tabela 28 – Comparação dos valores de temperatura e de entalpia obtidas de forma manual e com o uso do programa desenvolvido no Matlab.

Experimento	Volume, mL	NaOH, mol L ⁻¹	HCl, mol L ⁻¹	Manual		Programa	
				t inicial, °C	t final, °C	t inicial, °C	t final, °C
A1	0,2	1,012	1,007	24,00	30,20	24,44	29,99
A2	0,2	1,012	1,007	24,10	29,90	24,39	29,69
A3	0,2	1,012	1,007	24,10	30,20	24,32	29,91
A4	0,2	1,012	1,007	23,80	29,80	24,23	29,64
A5	0,2	1,012	1,007	24,00	29,80	24,24	29,59
A6	0,2	1,012	1,007	23,70	29,60	24,27	29,62
A7	0,2	1,012	1,007	23,80	29,70	24,29	29,56
A8	0,2	1,012	1,007	23,90	29,60	24,35	29,64
Média				23,93	29,85	24,32	29,71
Desvio padrão				0,15	0,24	0,07	0,16
Entalpia, kJ mol⁻¹					- 60,96		- 57,65

Fonte: Do autor.

A Tabela 28 mostra que o programa apresentou melhor valor de entalpia do que a análise feita de forma manual. Mesmo com erro de $1,81 \text{ kJ mol}^{-1}$, com o uso do programa foi possível obter um valor mais aproximado ao valor teórico de $-55,84 \text{ kJ mol}^{-1}$ (ASSUMPÇÃO *et al.*, 2010).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um sistema para análise entalpimétrica utilizando câmera por infravermelho como sensor de temperatura. Além da câmera, utilizaram-se sensor PT-100 e termômetro de mercúrio e os valores medidos por cada um comparados para determinar qual o melhor equipamento para análise entalpimétrica.

Na montagem do sistema para titulação termométrica utilizando câmera de infravermelho como sensor de temperatura a concentração da solução de hidróxido foi determinada como $1,012 \pm 0,032 \text{ molL}^{-1}$ e foi possível, através de gráficos, visualizar o ponto final de titulação sem precisar utilizar reagente indicador de fenolftaleína.

Na aplicação do sistema para análise entalpimétrica, a capacidade calorífica do copo de poliestireno foi de $52,46 \pm 1,74 \text{ J } ^\circ\text{C}^{-1}$, indicando uma sensibilidade superior a obtida por outro sistema, utilizando termômetro contendo álcool (Assumpção *et al.*, 2010) cujo valor foi da ordem de $63,4 \text{ J } ^\circ\text{C}^{-1}$. Os resultados obtidos na determinação da entalpia de neutralização de cinco alíquotas de 50 mL de solução de NaOH ($1,012 \text{ molL}^{-1}$) com 50 mL de solução de HCl ($1,007 \text{ molL}^{-1}$) foram de $- 61,81 \pm 4,45 \text{ kJ mol}^{-1}$ (sensor PT-100), $- 59,98 \pm 2,23 \text{ kJ mol}^{-1}$ (termômetro de mercúrio) e $- 57,08 \pm 0,26 \text{ kJ mol}^{-1}$ (câmera de infravermelho).

Entre os sensores utilizados neste trabalho, a câmera apresentou o melhor valor de entalpia e comparando com outros trabalhos, o sistema desenvolvido utilizando a câmera obteve melhor resultado que Pastre *et al.*, 2012 e Assumpção *et al.*, 2010, porém apresentou valor pior que Papee *et al.*, 1956. A determinação da entalpia de neutralização de seis alíquotas de 20 mL de solução de NaOH ($1,012 \text{ molL}^{-1}$) com 20 mL de solução de HCl ($1,007 \text{ molL}^{-1}$) utilizando a câmera resultou num valor de $- 58,34 \pm 1,96 \text{ kJ mol}^{-1}$, o qual ficou acima só da medida obtida por Papee *et al.*, 1956. Além da entalpia, determinou-se a curva de calibração e coeficiente R^2 referente aos valores de temperaturas das reações. Os valores de R^2 foram de 0,941 (PT-100), 0,9933 (termômetro) e 0,9999 (câmera), tornando a câmera o equipamento mais apropriado para determinação das variações de temperatura das reações para solução de 50 mL de NaOH (0,25; 0,5; 0,75 e 1 molL^{-1}) com solução de 50 mL de HCl (1 molL^{-1}).

No sistema de análise entalpimétrica miniaturizado, os resultados determinaram um valor médio de entalpia de neutralização de $- 59,61 \pm 2,94 \text{ kJ mol}^{-1}$, além de um erro de $- 3,77 \text{ kJ mol}^{-1}$. Neste caso, o sistema com a câmera apresentou o maior valor de erro se comparada com trabalhos de Pastre *et al.*, 2012, Assumpção *et al.*, 2010 e Papee *et al.*, 1956. Os valores

de R^2 foram de 0,9 (PT-100) e 0,9921 (câmera) com pipetador monocanal e 0,959 (PT-100) e 0,9748 (câmera) para pipetador multicanal. Diante desses valores, a câmera é o equipamento mais apropriado para análises entalpimétricas, tanto com pipetador monocanal quanto com multicanal.

Na última etapa, que foi o desenvolvimento um sistema automatizado para análise entalpimétrica, quando analisado de forma manual, o valor da entalpia foi de $-60,96 \text{ kJ mol}^{-1}$ e com o uso do programa, a entalpia passou a ser $-57,65 \text{ kJ mol}^{-1}$.

Por fim, pode-se afirmar que a câmera de infravermelho é o melhor equipamento para se determinar a entalpia das reações químicas de neutralização. Apesar de alguns valores ficarem mais longe do valor teórico, se comparados com outros trabalhos, o objetivo deste trabalho foi comparar a câmera com sensor PT-100 e com termômetro de mercúrio e em todos os procedimentos a câmera apresentou melhores resultados. Além disso, é fundamental um programa que analise valores de temperatura e calcule a entalpia, pois a chance de erro é menor do que se análise e cálculo forem feitas manualmente.

Em relação a trabalhos futuros, uma possibilidade é automatizar esse sistema de determinação entalpimétrica por infravermelho. Para isso, o aconselhável seria utilizar atuadores com alta velocidade e que não gerem ruído. Outra alternativa seria desenvolver um *software* que tenha as mesmas funcionalidades do Flir Tools + e do Matlab, ou seja, visualizar a reação em tempo real, permitindo marcar os pontos que serão utilizados para análise, visualizar a temperatura de determinada região da imagem e gravar um vídeo com a reação, além de calcular e mostrar a entalpia e possivelmente, gerar a curva e equação de calibração da reação.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, B.; CORREA, J.; OSDARLAN, C. *Análises termogramas utilizando termovisores*. Bolsista de Valor, v. 1, p. 199-201, 2010.
- AMARAL, E. R.; GARCIA, F. A. C.; CAMAPUM, J. F. *Desenvolvimento de uma ferramenta computacional em ambiente Matlab para auxílio ao ensino de processamento digital de imagens*. In: Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 34°, 2006, Passo Fundo, Anais, p. 1537-1550. 2006.
- ANDRIANESIS, K.; TZES, A. *Development and control of a multifunctional prosthetic hand with shape memory alloy actuators*. J. Intell. Robot. Syst., p. 1-33, 2014.
- ARAÚJO, E. Q.; LAMIM FILHO, P. C. M.; CHRISTOFORO, A. L.; BRITO, J. N. *Acompanhamento preditivo de equipamentos industriais através da análise termométrica*. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Metalúrgica e Industrial, 11°, 2011, Porto Alegre, Anais, p. 1-9, 2011.
- ARAÚJO, L. R.; ALMEIDA, R. N. C.; PINTO, V. P.; OLIVEIRA, J. C.; CORREIA, W. B. *Interface Matlab/Guide como ferramenta no ensino de cálculo diferencial e integral nos cursos de engenharia*. In: Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 40°, 2012, Belém, Anais, p. 1-10, 2012.
- ARDUINO. *Homepage Arduino*. Disponível em www.arduino.cc. Acesso em 10 set. 2013.
- ASSUMPÇÃO, M. H. M. T.; WOLF, L. D.; BONIFÁCIO, V. G.; FATIBELLO-FILHO, O. *Construção de um calorímetro de baixo custo para a determinação de entalpia de neutralização*. Eclética Química, v. 35, n. 2, p. 63-69, 2010.
- AZEVEDO, L. C. S.; SILVA JUNIOR, A. M. G. *Uso da termografia na manutenção preditiva*. Bolsista de Valor, v. 2, p. 155-158, 2012.
- BALBINOT, A.; BRUSAMARELLO, V. J. *Instrumentação e fundamentos de medidas*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010. 385 p.
- BARIN, J., S.; TISCHER, B.; DONADEL, J., Z.; BITTENCOURT, M., F.; OLIVEIRA, A., S.; MARQUES, I., E.; WAGNER, R.; COSTA, A., B., da. *Entalpiometria assistida por termografia no infravermelho: um novo método analítico aplicado à determinação da acidez de vinhos*. In: Encontro Nacional de Química Analítica, 17°, 2013, Belo Horizonte. Anais, 2013.
- BARREIRA, E. S. B. M. *Aplicação da termografia ao estudo do comportamento higratérmico dos edifícios*. 2004. 196 f. Dissertação (Departamento de Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2004.
- BASTOS, A. C. L. M.; RODRIGUES, E. M. S.; SOUZA, J. P. I. *Físico-Química*. Belém: UFPA, 2011. 302 p.
- BEGA, E. A. *Instrumentação industrial*. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. 668 p.
- BONJORNO, J. R.; BONJORNO, R. A.; BONJORNO, V.; RAMOS, C. M. *Física fundamental: novo: volume único*. São Paulo: FTD, 1999. 671 p.
- BRITO, J. N.; LAMIM FILHO, P. C. M.; ALVES, P. A. S. *Implantação do programa de manutenção preditiva e painéis elétricos através da análise termoelétrica*. In: Seminário Brasileiro de Manutenção Preditiva e Inspeção de Equipamentos, 11°, 2005, São Paulo, Anais, p. 1-8. 2005.

- BRITO, N. M.; AMARANTE JUNIOR, O. P.; POLESE, L.; RIBEIRO, M. L. *Validação de métodos analíticos: estratégia e discussão*. Pesticidas: R. Ecotoxicol. E Meio Ambiente, v. 13, p. 129-146, 2003.
- BURNS, J. *Resistive Thermometers*. In: WEBSTER, J. G. *The Measurement Instrumentation and Sensors Handbook*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1999. p. 964-976.
- CANATA, T., F.; MARTELLO, L., S.; OLIVEIRA, C., E., L.; LEME, P., R.; SILVA NETO, P., Z.; SOUZA, J., L., F. *Uso da Imagem Termograma para Análise de Variação da Temperatura de Superfície de Bovinos Nelore*. In: Simpósio Internacional de Iniciação Científica, 18°, 2010, São Paulo, Anais, 2010.
- CANSADO, J. C. A.; SARAIVA, A. M. *Agrilogic – Sistema experimental para controle climático de casas de vegetação*. In: Congresso Brasileiro da Sociedade Brasileira de Informática Aplicada à Agropecuária e à Agroindústria, 4°, 2003, Porto Seguro, Anais, p. 1-4. 2003.
- CANTHERM. *Pearl-Shaped Precision NTC Thermistor for Temperature Measurement – Folha de Dados*. Disponível em <http://www.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/1868/MF52A2103J3470-pdf.php>. Acesso em 27 jan. 2015.
- CARNEIRO, M., J., D; FERES JÚNIOR, M. A.; GODINHO, O., E., S.; *Determination of the Acidity of Oils Using Paraformaldehyde as a Thermometric End-Point Indicator*. J. Braz. Chem. Soc., v. 13, n. 5, p. 692-694, 2002.
- CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C.; MOLISANI, E. *Física com arduino para iniciantes*. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 33, n. 4, p. 4503-1-4503-9, 2011.
- CHAPMAN, S. J. *Matlab ® Programming for Engineers*. 4. ed. Toronto, Ontario: Thomson Learning, 2008.
- CHEN, C. *Evaluation of resistance-temperature calibration equations for NTC thermistors*. Measurement, v. 42, p. 1103-1111, 2009.
- CITOLIN, R. S. *Sistema de termometria para silos*. 2012. 109 f. Projeto de Diplomação (Departamento de Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.
- CNI – Confederação Nacional da Indústria. *Metrologia Conhecendo e Aplicando na sua Empresa*. 2. ed. rev. Brasília: CNI, 2002. 88 p.
- COCIAN, L., F., E. *Manual da linguagem C*. 3. ed. Canoas: Ulbra, 2004. 500 p.
- COUTINHO, R. *Stress térmico na atividade de panificação com auxílio da termografia: um estudo de caso*. 2013. 66 f. Monografia (Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- DANTAS, C. M. *Desenvolvimento de um protótipo de garra instrumentada para a soldagem robotizada com eletrodo revestido*. 2006. 101 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- FARIA, U. C.; CARVALHO, A. A. *Desenvolvimento de um programa em LabVIEW e de um circuito de condicionamento para medir os esforços dos membros superiores e inferiores de pacientes paraplégicos*. Bioingeniería y Física Cubana, v. 3, n. 1, p. 27-33, 2002.
- FARNELL. *General purpose stainless steel Pt100 probe – Folha de Dados*. Disponível em <http://www.farnell.com/datasheets/77423.pdf>. Acesso em 27 jan. 2015.

- FIALHO, A. B. *Instrumentação industrial: conceitos, aplicações e análises*. 3. ed. São Paulo: Érica, 2005. 276 p.
- FILIFEFLOP. *Homepage da empresa FilipeFlop*. Disponível em <http://www.filipeflop.com>. Acesso em 03 jul. 2014.
- FLIR. *Homepage da empresa Flir*. Disponível em <http://support.flir.com>. Acesso em 24 mai. 2013.
- FONSECA, E. G. P.; LA VEGA, A. S. *Tutorial sobre introdução a projetos utilizando o kit de desenvolvimento arduino*. In: Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 39°, 2011, Blumenau, Anais, p. 1-7. 2011.
- FONTES, J. *Temperature Sensors*. In: WEBSTER, J. G. *The Measurement Instrumentation and Sensors Handbook*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1999. p. 531-561.
- FRADEN, J. *Handbook of modern sensors – Physics, Designs and Applications*. 4. ed. New York: Editora LLC, 2010.
- GOMES, O. F. M. *Processamento e análise de imagens aplicados à caracterização automática de materiais*. 2001. 141 f. Dissertação (Departamento de Ciência de Materiais e Metalurgia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.
- GONZALEZ, Rafael C.; WOODS, Richard E. *Processamento de imagens digitais*. São Paulo: E. Blücher, 2000. 509 p.
- GUADAGNINI, P. H.; BARLETTE, V. E. *Um termômetro eletrônico de leitura direta com termistor*. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 27, n. 3, p. 369-375, 2005.
- GUDWIN, R. R. *Linguagens de programação*. Campinas: DCA/FEEC/UNICAMP, 1997. Disponível em http://www.eng.uerj.br/~araujo/disciplinas/Caract/ling_prog.pdf. Acesso em 10 set. 2013.
- HANSELMAN, D. C.; LITTLEFIELD, B. *MATLAB 6: curso completo*. São Paulo: Prentice Hall, 2003. 676 p.
- HANSMAN JR., R. J. *Characteristics of Instrumentation*. In: WEBSTER, J. G. *The Measurement Instrumentation and Sensors Handbook*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1999. p. 25-32.
- INCOTERM. *Homepage da empresa Incoterm*. Disponível em <http://www.incoterm.com.br>. Acesso em 30 jan. 2015.
- JEE, S. W.; LEE, C. H.; KIM, S. K.; LEE, J. J.; KIM, P. Y. *Development of a traceable fire alarm system based on the conventional fire alarm system*. Fire Technology, v. 50, p. 805-822, 2014.
- KAMOGAWA, M. Y.; MIRANDA, J. C. *Uso de hardware de código fonte aberto arduino para acionamento de dispositivo solenoide em sistemas de análises em fluxo*. Química Nova, v. 36, n. 8, p. 1232-1235, 2013.
- KAMOGAWA, M. Y.; TEIXEIRA, M. A. *Autoamostrador de baixo custo para análise por injeção em fluxo*. Química Nova, v. 32, n. 6, p. 1644-1646, 2009.
- KIM, J.; KIM, J. D. *Voltage divider resistance for high-resolution of the thermistor temperature measurement*. Measurement, v. 44, p. 2054-2059, 2011.
- LABFACILITY. *The new labfacility temperature handbook*. Disponível em <http://www.labfacility.co.uk>. Acesso em 07 jun. 2014.

- LIMA, R. S.; SANTOS, V. B.; GUERREIRO, T. B.; ARAÚJO, M. C. *Um sistema microcontrolado para o monitoramento on-line, in situ e remoto de pH, condutividade e temperatura de águas*. Química Nova, v. 34, n. 1, p. 135-139, 2011.
- MALDAGUE, X. *Introduction to NDT by active infrared thermography*. *Materiais Evaluation*, v. 6, p. 1060-1073, 2002.
- MANIÇOBA, G. G. C. *Controle de temperatura do sistema de refrigeração a água de uma tocha plasmática indutiva utilizando lógica fuzzy*. 2013. 59 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e da Computação) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.
- MARINS, A. P. O.; MELO, R. A. S.; ANDRETTI, G. F. *Termografia na inspeção preditiva*. *Bolsista de Valor*, v. 2, n. 1, p. 95-99, 2012.
- MATA, R. S. *Instrumentação Básica – Parte 1 – Medição de Temperatura*. *Mecatrônica Atual*, n. 4, 2006.
- MATHWORKS. *Homepage Matlab*. Disponível em <http://www.mathworks.com>. Acesso em 06 out. 2014.
- McROBERTS, M. *Arduino Básico*. São Paulo: Novatec Editora, 2011. 456 p.
- MECTROL. *Homepage da empresa Mectrol*. Disponível em <http://www.mectrol.com.br>. Acesso em 25 jun. 2013.
- MELO, A. G. B. *Inspeção em juntas coladas de tubos feitos por compósitos por termografia ativa pulsada*. 2009. 63 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- MENDES, A. F. *Determinação entalpimétrica de cálcio e magnésio em calcários usando-se um entalpímetro de fluxo contínuo*. 1986. 81 f. Tese de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1986.
- MUÑOZ, D. R.; MONTERO, E. C.; MORENO, J. S.; BERGA, S. C.; ANTÓN, A. E. N.; BARRIO, J. F.; MUSTELIER, A. S. *Difference temperature-to-time electronic interface based on a thermistor-to-generalized impedance converter*. *Measurement*, v. 43, p. 1668-1675, 2010.
- NEVES, S. C. M.; PELAES, E. G. *Estudo e implementação de técnicas de segmentação de imagens*. *Revista Virtual de Iniciação Acadêmica da UFPA*, v. 1, n. 2, p. 1-11, 2001.
- NICHOLAS, J. V. *Liquid-In-Glass Thermometers*. In: WEBSTER, J. G. *The Measurement Instrumentation and Sensors Handbook*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1999. p. 1068-1079.
- OLIVEIRA, G. F. P. *Potencialidades da termografia para o diagnóstico de patologias associadas à humidade*. 2013. 194 f. Dissertação (Departamento de Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2013.
- OLIVEIRA, J. H. E.; LAGES, W. F. *Inspeção robotizada em linhas de transmissão utilizando visão infravermelha*. In: *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 10º, 2011, São João del Rei, Anais*, p. 253-258. 2011.
- OLIVEIRA, W. A.; PASQUINI, C. *Determination of water in ethanol and acetone by injection enthalpimetry based on the heat of dilution*. *Talanta*, v. 31, n. 1, p. 82-84, 1984.

- PAPEE, H. M.; CANADY, W. J.; LAIDLER, K. J. *The heat of neutralization of strong acids and bases in highly dilute aqueous solutions*. Canadian Journal of Chemistry, v. 34, p. 1677-1682, 1956.
- PASTRE, I. A.; PLICAS, L. M. A.; TIERA, V. A. O. *Reações ácido-base: conceito, representação e generalização a partir das energias envolvidas nas transformações*. Quím. Nova, v. 35, n. 10, p. 2072-2075, 2012.
- PEDRINI, H.; SCHWARTZ, W. R. *Análise de imagens digitais: princípios, algoritmos e aplicações*. São Paulo: Thomson, 2008. 508 p.
- PERIN, A. L. *Desenvolvimento de um equipamento para medição de emissividade*. 2009. 115 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- PIRES, D. P. L.; AFONSO, J. C.; CHAVES, F. A. B. *A termometria nos séculos XIX e XX*. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 28, n. 1, p. 101-114, 2006.
- ROCHA, H. S. C. *Metodologia de registro de imagens termogramas para equipamentos elétricos*. 2006. 59 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.
- SANCHES, I. J. *Sobreposição de imagens de termografia e ressonância magnética: uma nova modalidade de imagem médica tridimensional*. 2009. 168 f. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- SANTOS, A. R. *Metodologia Científica: A construção de conhecimento*. 3 ed. Rio de Janeiro: DP&A., 2000.
- SAPOFF, M. Thermistor Thermometers. In: WEBSTER, J. G. *The Measurement Instrumentation and Sensors Handbook*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1999. p. 976-992.
- SARDELLA, A.; MATEUS, E. *Curso de química*. 3. ed. São Paulo: Ática, 1986. 3 v.
- SILVA, R. N. T.; MAGNANI, F. S.; HORA, A. L. A. *Sensitivity analysis applied in estimation of geometric parameters from data obtained by infrared thermography during sample cooling*. In: Brazilian Congresso of Thermal Sciences and Engineering, 13°, 2010, Uberlândia, Anais, p. 1-10. 2010.
- SILVA FILHO, E. A.; VOLPE, P. L. O. *Estudo calorimétrico da interação de alcoóis com saccharomyces cerevisiae a 298 K*. Química Nova, v. 22, n. 3, p. 309-311, 1999.
- SISBOT, S. *Execution and Evaluation of Complex Industrial Automation and Control Projects Using the Systems Engineering Approach*. Systems Engineering, v. 14, n. 2, p. 193-207, 2011.
- SKOOG, D.A; WEST, D.M; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. *Fundamentos da Química Analítica, Tradução da 8ª edição norte americana*. São Paulo, Ed. Thomson, 2007.
- SMITH, T. *Practical thermometric titrimetry*. Disponível em: <http://www.metrohm.com/com/downloads/Dokumente/ThermometricTitration.pdf>. Acesso em 20 de Dez. 2014.
- SOUZA, L., F., R. *Aplicação de Termografia no Estudo do Isolamento Térmico de Edifícios*. 2010. 102 f. Dissertação (Departamento de Engenharia Mecânica) – Universidade de Aveiro, Aveiro, 2010.

- SOUZA, R. Q. *Metodologia e desenvolvimento de um sistema de manutenção preditiva visando à melhoria da confiabilidade de ativos de usinas hidrelétricas*. 2008. 172 f. Dissertação (Departamento de Engenharia Mecânica) – Universidade de Brasília, Brasília, 2008.
- STAHL, J. W. *Nomenclature of Thermometric and Enthalpimetric Methods in Chemical Analysis*. Pure & Appl. Chem., v. 66, n. 12, p. 2487-2492, 1994.
- STEINHART, J. S.; HART, S. R. *Calibration curves for thermistors*. Deep-Sea Research, v. 15, p. 497-503, 1968.
- SUNG, W. T.; CHEN, J. H.; HSIAO, C. L. *Data fusion for PT100 temperature sensing system heating control model*. Measurement, v. 52, p. 94-101, 2014.
- TEIXEIRA, H. T.; SALLES, J. L. F. *Desenvolvimento de uma interface com o usuário no Matlab para controle e monitoramento de processos para o laboratório de ensino de controle da UFES*. In: Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 37°, 2009, Recife, Anais, p. 1-10. 2009.
- THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. *Sensores industriais: fundamentos e aplicações*. 6. ed. rev. e atual. São Paulo: Érica, 2009. 220 p.
- USBERCO, J.; SALVADOR, E. *Química: volume único*. 7. ed., ref. São Paulo: Saraiva, 2006. 672 p.
- VAREJÃO, F. M. *Linguagem de programação: conceitos e técnicas*. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2004.
- VON BECKERATH, A., EBERLEIN, A., JULIEN, H., KERSTEIN, P., KREUTZER, J., WIKA *Handbook on Pressure and Temperature Measurement*, U.S. ed., Lawrenceville, GA: Wika Instrument Corp., 1998.
- WEISS, A.; MAÇANEIRO, M. *Aplicando a camada de controle do modelo MVC em um ambiente virtual*. Revista Caminhos, n. 8, p. 7-22, 2013.
- WILSON, J. S. *Sensor Technology Handbook*. Burlington, MA, USA: Elsevier/Newnes, 2005.

ANEXO A

Programa desenvolvido para movimentar os atuadores e depositar os reagentes na Placa de Elisa.

```

int distancia_reagente1_linha = 3;    //distância entre reagente 1 e 1ª linha da placa
int distancia_reagente2_linha = 2;    //distância entre reagente 2 e 1ª linha da placa
int velocidade_avanco_atuador_maior = 12; //velocidade de avanço do atuador curso 300 mm
int velocidade_recuo_atuador_maior = 12; //velocidade de recuo do atuador curso 300 mm
int velocidade_avanco_atuador_menor = 12; //velocidade de avanço do atuador curso 200 mm
int velocidade_recuo_atuador_menor = 12; //velocidade de recuo do atuador curso 200 mm
int distancia_linhas = 1;             //distância entre as linhas da placa
int altura_atuador_placa = 10;       //altura do atuador curso 200 mm
float tempo_avanco_atuador_maior = 0; //tempo de avanço atuador curso 300 mm
float tempo_recuo_atuador_maior = 0;  //tempo de recuo atuador curso 300 mm
float tempo_avanco_atuador_menor = 0; //tempo de avanço atuador curso 200 mm
float tempo_recuo_atuador_menor = 0;  //tempo de recuo atuador curso 200 mm
int distancia = 0;                    //valor de deslocamento do atuador de curso 300 mm
int contador = 0;                    //conta número de linhas da placa
int IN1=13;                          //pino 13 do Arduino ligado no pino IN1 do L298. led verde
int IN2=12;                          //pino 12 do Arduino ligado no pino IN2 do L298. led vermelho
int IN3=11;                          //pino 11 do Arduino ligado no pino IN3 do L298. led verde
int IN4=10;                          //pino 10 do Arduino ligado no pino IN4 do L298. led vermelho

void setup()
{
  pinMode(IN1,OUTPUT);                //declara pino 13 como saída
  pinMode(IN2,OUTPUT);                //declara pino 12 como saída
  pinMode(IN3,OUTPUT);                //declara pino 11 como saída
  pinMode(IN4,OUTPUT);                //declara pino 10 como saída
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Inicio");
  pega_reagente1(); //atuador de 200 mm pega o reagente 1
  for (contador = 0; contador < 12; contador ++) //contagem do número de linhas da placa
  {
    movimento_reagente1(); //movimenta o reagente 1 para a placa
    deposita_reagente1(); //deposita o reagente 1 na placa
    retorna2();           //atuador de 300 mm volta para pegar reagente 2
    pega_reagente2();     //atuador de 200 mm pega o reagente 2
    movimento_reagente2(); //movimenta o reagente 2 para a placa
    deposita_reagente2(); //deposita o reagente 2 na placa
    retorna1();           //atuador de 300 mm volta para pegar reagente 1
    Serial.print("Contador: ");
    Serial.println(contador);
  }
  if (contador = 12)
  {
    Serial.print("Contador: ");
    Serial.println(contador);
    retorna_inicio(); //retorna para a posição inicial
  }
}

void loop()
{
}

```

```

void pega_reagente1()
{
    tempo_avanco_atuador_menor = (float) altura_atuador_placa / velocidade_avanco_atuador_menor;
//tempo de avanço do atuador curso 200 mm
    tempo_recuo_atuador_menor = (float) altura_atuador_placa / velocidade_recuo_atuador_menor;
//tempo de recuo do atuador curso 200 mm
    digitalWrite(IN1,LOW);
    digitalWrite(IN2,LOW);
    digitalWrite(IN3,HIGH);
    digitalWrite(IN4,LOW);
    delay(tempo_avanco_atuador_menor*1000);

    digitalWrite(IN1,LOW);
    digitalWrite(IN2,LOW);
    digitalWrite(IN3,LOW);
    digitalWrite(IN4,HIGH);
    delay(tempo_recuo_atuador_menor*1000);
}

void movimento_reagente1()
{
    distancia = distancia_reagente1_linha + (distancia_linhas*contador);
    tempo_avanco_atuador_maior = (float) distancia / velocidade_avanco_atuador_maior;
    digitalWrite(IN1,HIGH);
    digitalWrite(IN2,LOW);
    digitalWrite(IN3,LOW);
    digitalWrite(IN4,LOW);
    delay(tempo_avanco_atuador_maior*1000);
}

void deposita_reagente1()
{
    tempo_avanco_atuador_menor = (float) altura_atuador_placa / velocidade_avanco_atuador_menor;
//tempo de avanço do atuador curso 200 mm
    tempo_recuo_atuador_menor = (float) altura_atuador_placa / velocidade_recuo_atuador_menor;
//tempo de recuo do atuador curso 200 mm
    digitalWrite(IN1,LOW);
    digitalWrite(IN2,LOW);
    digitalWrite(IN3,HIGH);
    digitalWrite(IN4,LOW);
    delay(tempo_avanco_atuador_menor*1000);

    digitalWrite(IN1,LOW);
    digitalWrite(IN2,LOW);
    digitalWrite(IN3,LOW);
    digitalWrite(IN4,HIGH);
    delay(tempo_recuo_atuador_menor*1000);
}

void retorna2()
{
    distancia = distancia_reagente2_linha + (distancia_linhas*contador);
    tempo_recuo_atuador_maior = (float) distancia / velocidade_recuo_atuador_maior;
    digitalWrite(IN1,LOW);
    digitalWrite(IN2,HIGH);
    digitalWrite(IN3,LOW);
    digitalWrite(IN4,LOW);
    delay(tempo_recuo_atuador_maior*1000);
}

```

```

void pega_reagente2()
{
    tempo_avanco_atuador_menor = (float) altura_atuador_placa / velocidade_avanco_atuador_menor;
//tempo de avanço do atuador curso 200 mm
    tempo_recuo_atuador_menor = (float) altura_atuador_placa / velocidade_recuo_atuador_menor;
//tempo de recuo do atuador curso 200 mm
    digitalWrite(IN1,LOW);
    digitalWrite(IN2,LOW);
    digitalWrite(IN3,HIGH);
    digitalWrite(IN4,LOW);
    delay(tempo_avanco_atuador_menor*1000);

    digitalWrite(IN1,LOW);
    digitalWrite(IN2,LOW);
    digitalWrite(IN3,LOW);
    digitalWrite(IN4,HIGH);
    delay(tempo_recuo_atuador_menor*1000);
}

void movimento_reagente2()
{
    distancia = distancia_reagente2_linha + (distancia_linhas*contador);
    tempo_avanco_atuador_maior = (float) distancia / velocidade_avanco_atuador_maior;
    digitalWrite(IN1,HIGH);
    digitalWrite(IN2,LOW);
    digitalWrite(IN3,LOW);
    digitalWrite(IN4,LOW);
    delay(tempo_avanco_atuador_maior*1000);
}

void deposita_reagente2()
{
    tempo_avanco_atuador_menor = (float) altura_atuador_placa / velocidade_avanco_atuador_menor;
//tempo de avanço do atuador curso 200 mm
    tempo_recuo_atuador_menor = (float) altura_atuador_placa / velocidade_recuo_atuador_menor;
//tempo de recuo do atuador curso 200 mm
    digitalWrite(IN1,LOW);
    digitalWrite(IN2,LOW);
    digitalWrite(IN3,HIGH);
    digitalWrite(IN4,LOW);
    delay(tempo_avanco_atuador_menor*1000);

    digitalWrite(IN1,LOW);
    digitalWrite(IN2,LOW);
    digitalWrite(IN3,LOW);
    digitalWrite(IN4,HIGH);
    delay(tempo_recuo_atuador_menor*1000);
}

void retorna1()
{
    distancia = distancia_reagente1_linha + (distancia_linhas*contador);
    tempo_recuo_atuador_maior = (float) distancia / velocidade_recuo_atuador_maior;
    digitalWrite(IN1,LOW);
    digitalWrite(IN2,HIGH);
    digitalWrite(IN3,LOW);
    digitalWrite(IN4,LOW);
    delay(tempo_recuo_atuador_maior*1000);
}

```

```
void retorna_inicio()
{
  distancia = distancia_reagente1_linha + (distancia_linhas*contador);
  tempo_recuo_atuador_maior = (float) distancia / velocidade_recuo_atuador_maior;
  digitalWrite(IN1,LOW);
  digitalWrite(IN2,HIGH);
  digitalWrite(IN3,LOW);
  digitalWrite(IN4,LOW);
  delay(tempo_recuo_atuador_maior*1000);

  digitalWrite(IN1,LOW);
  digitalWrite(IN2,LOW);
  digitalWrite(IN3,LOW);
  digitalWrite(IN4,LOW);
}
```

ANEXO B

Resultados obtidos no procedimento de titulação termométrica de cinco alíquotas de 20 mL de uma solução de NaOH.

Volume HCl (mL)	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5
0,0	28,00	26,00	27,70	29,00	28,50
0,5	27,80	26,20	27,90	29,60	28,80
1,0	27,40	26,50	28,00	29,70	29,20
1,5	27,60	26,70	28,10	29,80	29,50
2,0	27,90	26,90	28,40	29,90	30,00
2,5	28,20	27,10	28,70	30,20	29,80
3,0	28,30	27,20	29,00	30,60	30,20
3,5	28,20	27,40	29,20	30,80	30,00
4,0	28,50	27,30	29,10	31,00	31,20
4,5	28,80	27,60	29,40	31,20	31,40
5,0	28,70	27,70	29,50	31,50	31,60
5,5	28,90	27,70	29,70	31,50	31,70
6,0	29,00	27,80	29,80	31,80	31,90
6,5	29,20	28,10	29,80	32,00	32,00
7,0	29,40	28,20	30,10	32,20	32,40
7,5	29,40	28,20	30,20	32,30	32,30
8,0	29,30	29,40	30,30	32,50	32,70
8,5	29,40	29,70	30,30	32,70	32,70
9,0	29,80	29,60	30,40	32,80	32,80
9,5	30,00	29,50	30,40	32,90	33,00
10,0	29,90	29,80	30,60	32,90	33,10
10,5	30,20	30,00	30,80	33,20	33,30
11,0	30,30	30,00	31,00	33,20	33,20
11,5	30,50	29,90	30,90	33,10	33,30
12,0	30,50	29,90	31,30	33,50	33,20
12,5	30,50	29,90	31,40	33,60	33,40
13,0	30,40	30,00	31,50	33,70	33,40
13,5	30,30	30,20	31,60	33,80	33,80
14,0	30,60	30,20	31,70	33,80	33,50
14,5	30,60	30,40	31,50	33,90	33,70
15,0	30,90	30,40	31,60	34,00	33,90
15,5	30,80	30,10	31,70	34,20	33,90
16,0	30,85	31,10	31,90	34,40	34,20
16,5	30,90	31,20	31,80	34,30	34,20
17,0	30,90	31,40	31,70	34,50	34,20
17,5	31,10	31,20	31,90	34,60	34,30
18,0	30,70	31,30	32,10	34,60	34,40
18,5	31,20	31,20	31,90	34,60	34,20
19,0	31,20	31,30	32,10	34,90	34,50
19,5	31,30	31,40	32,10	35,00	34,60
20,0	30,80	31,40	32,00	35,00	34,60
20,5	30,70	31,30	32,00	34,89	34,50
21,0	30,80	31,00	31,80	35,00	34,20
21,5	30,60	30,90	31,40	34,77	34,10
22,0	30,40	30,80	31,50	34,55	34,00
22,5	30,40	30,60	31,50	34,55	33,70
23,0	30,40	30,70	31,30	34,55	33,80
23,5	30,20	30,70	31,30	34,32	33,70
24,0	30,20	30,70	31,20	34,32	33,60
24,5	30,10	30,20	31,00	34,20	33,50
25,0	29,80	30,20	31,00	33,86	33,30

ANEXO C

Resultados obtidos para determinação das variações de temperatura das reações para solução de 0,15 mL de NaOH com solução de 0,15 mL de HCl utilizando pipetador multicanal.

Experimento	Volume, mL	NaOH, molL ⁻¹	HCl, molL ⁻¹	Sensor PT-100			Câmera de IR		
				t _{inicial} , °C	t _{final} , °C	Δt (°C)	t _{inicial} , °C	t _{final} , °C	Δt (°C)
A1	0,1	0,25	1	22,70	23,00	0,30	25,60	26,00	0,40
A2	0,1	0,25	1	22,70	23,10	0,40	25,80	26,00	0,20
A3	0,1	0,25	1	22,70	23,10	0,40	25,30	26,10	0,80
A4	0,1	0,25	1	22,70	23,00	0,30	25,20	26,00	0,80
A5	0,1	0,25	1	22,70	23,00	0,30	25,20	26,00	0,80
A6	0,1	0,25	1	22,70	23,20	0,50	25,00	25,80	0,80
A7	0,1	0,25	1	22,70	23,30	0,60	24,90	25,80	0,90
A8	0,1	0,25	1	22,70	23,30	0,60	24,70	25,50	0,80
A9	0,1	0,25	1	22,10	23,00	0,90	26,60	27,10	0,50
A10	0,1	0,25	1	22,10	23,30	1,20	26,50	27,40	0,90
A11	0,1	0,25	1	22,10	23,40	1,30	26,40	26,90	0,50
A12	0,1	0,25	1	22,10	23,60	1,50	26,50	26,80	0,30
A13	0,1	0,25	1	22,10	23,50	1,40	26,30	26,80	0,50
A14	0,1	0,25	1	22,10	23,50	1,40	26,00	26,90	0,90
A15	0,1	0,25	1	22,10	23,60	1,50	25,80	26,80	1,00
A16	0,1	0,25	1	22,10	23,70	1,60	25,70	26,50	0,80
A17	0,1	0,25	1	22,10	23,20	1,10	25,90	26,00	0,10
A18	0,1	0,25	1	22,10	23,00	0,90	25,50	25,70	0,20
A19	0,1	0,25	1	22,10	23,20	1,10	25,40	26,00	0,60
A20	0,1	0,25	1	22,10	23,10	1,00	25,20	25,90	0,70
A21	0,1	0,25	1	22,10	23,20	1,10	25,10	25,30	0,20
A22	0,1	0,25	1	22,10	23,50	1,40	25,10	25,40	0,30
A23	0,1	0,25	1	22,10	23,50	1,40	24,70	25,60	0,90
A24	0,1	0,25	1	22,10	23,50	1,40	24,90	25,50	0,60
Média				22,30	23,28	0,98	25,55	26,16	0,60
DP				0,29	0,22	0,45	0,59	0,59	0,28
B1	0,1	0,5	1	21,50	23,20	1,70	23,60	25,40	1,80
B2	0,1	0,5	1	21,50	23,50	2,00	23,60	25,70	2,10
B3	0,1	0,5	1	21,50	23,60	2,10	23,70	25,20	1,50
B4	0,1	0,5	1	21,50	23,90	2,40	23,50	25,60	2,10
B5	0,1	0,5	1	21,50	23,80	2,30	23,50	25,50	2,00
B6	0,1	0,5	1	21,50	23,80	2,30	23,40	25,50	2,10
B7	0,1	0,5	1	21,50	23,90	2,40	23,30	25,10	1,80
B8	0,1	0,5	1	21,50	23,90	2,40	23,20	24,70	1,50
B9	0,1	0,5	1	22,10	23,70	1,60	24,00	26,10	2,10
B10	0,1	0,5	1	22,10	23,90	1,80	24,20	26,00	1,80
B11	0,1	0,5	1	22,10	23,80	1,70	24,30	25,80	1,50
B12	0,1	0,5	1	22,10	23,80	1,70	23,90	26,00	2,10
B13	0,1	0,5	1	22,10	24,00	1,90	23,90	25,70	1,80
B14	0,1	0,5	1	22,10	24,00	1,90	24,10	25,50	1,40
B15	0,1	0,5	1	22,10	24,00	1,90	23,90	25,70	1,80
B16	0,1	0,5	1	22,10	24,10	2,00	24,00	25,80	1,80
B17	0,1	0,5	1	21,70	23,70	2,00	24,00	26,20	2,20
B18	0,1	0,5	1	21,70	24,10	2,40	23,90	26,00	2,10
B19	0,1	0,5	1	21,70	24,20	2,50	24,10	25,40	1,30
B20	0,1	0,5	1	21,70	24,00	2,30	23,80	26,10	2,30
B21	0,1	0,5	1	21,70	24,10	2,40	23,70	25,60	1,90
B22	0,1	0,5	1	21,70	24,20	2,50	23,90	25,30	1,40
B23	0,1	0,5	1	21,70	24,20	2,50	23,70	25,50	1,80

B24	0,1	0,5	1	21,70	24,40	2,70	23,60	24,90	1,30
Média				21,77	23,91	2,14	23,78	25,60	1,81
DP				0,25	0,26	0,32	0,28	0,38	0,3
C1	0,1	0,75	1	22,00	24,30	2,30	25,00	27,70	2,70
C2	0,1	0,75	1	22,00	24,80	2,80	25,50	27,70	2,20
C3	0,1	0,75	1	22,00	24,70	2,70	25,40	27,80	2,40
C4	0,1	0,75	1	22,00	24,80	2,80	25,60	27,70	2,10
C5	0,1	0,75	1	22,00	24,80	2,80	25,50	27,80	2,30
C6	0,1	0,75	1	22,00	24,90	2,90	25,30	27,80	2,50
C7	0,1	0,75	1	22,00	24,60	2,60	25,00	27,60	2,60
C8	0,1	0,75	1	22,00	24,90	2,90	25,00	27,70	2,70
C9	0,1	0,75	1	22,10	24,60	2,50	25,60	28,00	2,40
C10	0,1	0,75	1	22,10	24,70	2,60	25,70	28,20	2,50
C11	0,1	0,75	1	22,10	24,70	2,60	25,60	28,00	2,40
C12	0,1	0,75	1	22,10	25,10	3,00	25,50	28,00	2,50
C13	0,1	0,75	1	22,10	25,20	3,10	25,70	27,80	2,10
C14	0,1	0,75	1	22,10	25,10	3,00	25,20	28,00	2,80
C15	0,1	0,75	1	22,10	24,80	2,70	25,10	27,80	2,70
C16	0,1	0,75	1	22,10	24,90	2,80	25,30	27,70	2,40
C17	0,1	0,75	1	22,30	24,50	2,20	25,30	27,80	2,50
C18	0,1	0,75	1	22,30	24,90	2,60	25,30	27,70	2,40
C19	0,1	0,75	1	22,30	24,80	2,50	25,50	27,60	2,10
C20	0,1	0,75	1	22,30	24,90	2,60	25,50	27,50	2,00
C21	0,1	0,75	1	22,30	24,90	2,60	25,60	27,70	2,10
C22	0,1	0,75	1	22,30	25,10	2,80	25,30	27,50	2,20
C23	0,1	0,75	1	22,30	25,20	2,90	25,50	27,60	2,10
C24	0,1	0,75	1	22,30	25,10	2,80	25,40	27,50	2,10
Média				22,13	24,85	2,71	25,39	27,76	2,37
DP				0,13	0,22	0,22	0,21	0,18	0,24
D1	0,1	1	1	22,10	25,20	3,10	24,00	27,20	3,20
D2	0,1	1	1	22,10	25,70	3,60	23,80	27,60	3,80
D3	0,1	1	1	22,10	25,70	3,60	23,90	26,30	2,40
D4	0,1	1	1	22,10	26,10	4,00	23,80	27,10	3,30
D5	0,1	1	1	22,10	25,90	3,80	23,70	27,30	3,60
D6	0,1	1	1	22,10	25,70	3,60	23,70	26,90	3,20
D7	0,1	1	1	22,10	26,20	4,10	23,60	27,00	3,40
D8	0,1	1	1	22,10	25,90	3,80	23,60	26,70	3,10
D9	0,1	1	1	22,70	25,30	2,60	24,60	28,00	3,40
D10	0,1	1	1	22,70	25,70	3,00	24,40	28,00	3,60
D11	0,1	1	1	22,70	25,90	3,20	24,50	27,00	2,50
D12	0,1	1	1	22,70	26,10	3,40	24,30	27,70	3,40
D13	0,1	1	1	22,70	26,00	3,30	24,30	27,50	3,20
D14	0,1	1	1	22,70	25,90	3,20	24,20	27,30	3,10
D15	0,1	1	1	22,70	26,00	3,30	24,30	27,50	3,20
D16	0,1	1	1	22,70	25,90	3,20	24,40	27,40	3,00
D17	0,1	1	1	23,10	25,60	2,50	25,00	28,20	3,20
D18	0,1	1	1	23,10	25,90	2,80	25,00	28,10	3,10
D19	0,1	1	1	23,10	26,00	2,90	25,00	27,80	2,80
D20	0,1	1	1	23,10	25,90	2,80	24,70	28,40	3,70
D21	0,1	1	1	23,10	25,90	2,80	24,80	27,90	3,10
D22	0,1	1	1	23,10	26,10	3,00	24,70	26,80	2,10
D23	0,1	1	1	23,10	26,10	3,00	24,70	27,60	2,90
D24	0,1	1	1	23,10	26,20	3,10	24,60	27,60	3,00
Média				22,63	25,87	3,24	24,32	27,45	3,14
DP				0,42	0,25	0,43	0,46	0,52	0,40

ANEXO D

Trecho do programa desenvolvido no Matlab que processa o vídeo da reação química e calcula capacidade calorífica e entalpia de neutralização da reação.

```
function botao_Callback(hObject, eventdata, handles)
d_agua = 0.986;
v_agua = get(handles.edit2,'String');
v_agua = str2num(v_agua);
c_agua = 4.182;
t_calorimetro = get(handles.edit4,'String');
t_calorimetro = str2num(t_calorimetro);
t_agua = get(handles.edit5,'String');
t_agua = str2num(t_agua);
t_sistema = get(handles.edit6,'String');
t_sistema = str2num(t_sistema);

%Cálculo da Capacidade calorífica do sistema
c_sistema = (d_agua * v_agua * c_agua * (t_sistema - t_agua))/(t_calorimetro - t_sistema)
c_sistema = num2str(c_sistema);
set(handles.edit7,'String',c_sistema); %Mostra valor da Capacidade calorífica do sistema

% Criação de uma variável que lê o vídeo em análise
arquivo = 'videoplaca.avi';
video = VideoReader(arquivo);
% Comando que permite obter informações sobre o vídeo
get(video);
framessegundo = get(video,'FrameRate');
totalframes = get(video, 'NumberOfFrames');
larguraframes = get(video, 'Width');
alturaframes = get(video, 'Height');

tabela = xlsread('temperaturas.xls'); %temperaturas dos pixels de cada frame

media_t1 = 0; %média valores de temperatura da cavidade 1
maior_t1 = 0; %maior valor de temperatura da cavidade 1 entre os frames 72 e 95
media_t2 = 0; %média valores de temperatura da cavidade 2
maior_t2 = 0; %maior valor de temperatura da cavidade 2 entre os frames 72 e 95
media_t3 = 0; %média valores de temperatura da cavidade 3
maior_t3 = 0; %maior valor de temperatura da cavidade 3 entre os frames 72 e 95
media_t4 = 0; %média valores de temperatura da cavidade 4
maior_t4 = 0; %maior valor de temperatura da cavidade 4 entre os frames 72 e 95
media_t5 = 0; %média valores de temperatura da cavidade 5
maior_t5 = 0; %maior valor de temperatura da cavidade 5 entre os frames 72 e 95
media_t6 = 0; %média valores de temperatura da cavidade 6
maior_t6 = 0; %maior valor de temperatura da cavidade 6 entre os frames 72 e 95
media_t7 = 0; %média valores de temperatura da cavidade 7
maior_t7 = 0; %maior valor de temperatura da cavidade 7 entre os frames 72 e 95
media_t8 = 0; %média valores de temperatura da cavidade 8
maior_t8 = 0; %maior valor de temperatura da cavidade 8 entre os frames 72 e 95
linha_t = 1; %linha da tabela de temperatura
coluna_t = 1; %coluna da tabela de temperatura

for k = 72:95
    frame = read(video,k);
    framecinza = rgb2gray(frame);
    framecinzaroi = framecinza;
```

```

[linha coluna] = size(framecinza);
for l=1:linha           % para 1 até número de linhas
  for c=1:158           % para 1 até número de colunas do início do roi
    framecinzaroi (l,c) = 255; % transforma todos os pixels em branco
  end;
end;
for l=1:linha           % para 1 até número de linhas
  for c=173:coluna      % para 173 até número de colunas final
    framecinzaroi (l,c) = 255; % transforma todos os pixels em branco
  end;
end;
imagemfinal = framecinzaroi;
[M N] = size(framecinzaroi); % M recebe linhas e N recebe colunas da imagem em cinza
for y=1:M               % para 1 até número de linhas
  for z=1:N              % para 1 até número de colunas
    if(framecinzaroi(y,z) <= 70)
      imagemfinal(y,z) = 255; % pixel recebe cor branca
    else
      imagemfinal(y,z) = 0; % pixel recebe cor preta
    end;
  end;
end;
end;
soma_t1 = 0;
soma_t2 = 0;
soma_t3 = 0;
soma_t4 = 0;
soma_t5 = 0;
soma_t6 = 0;
soma_t7 = 0;
soma_t8 = 0;
cont1 = 0;
cont2 = 0;
cont3 = 0;
cont4 = 0;
cont5 = 0;
cont6 = 0;
cont7 = 0;
cont8 = 0;

%cavidade 1
for lr1 = 70:81 %linhas do frame
  for cr1 = 159:172 %colunas do frame
    if (imagemfinal(lr1,cr1) == 255)
      soma_t1 = soma_t1 + tabela(linha_t,coluna_t);
      cont1 = cont1 + 1;
    end;
    coluna_t = coluna_t + 1;
  end;
  linha_t = linha_t + 1;
  coluna_t = 1;
end;
media_t1 = soma_t1/cont1;
if (media_t1 > maior_t1)
  maior_t1 = media_t1;
end;
linha_t = linha_t + 3;

%cavidade 2
for lr1 = 85:97 %linhas do frame
  for cr1 = 159:172 %colunas do frame

```

```

    if (imagemfinal(lr1,cr1) == 255)
        soma_t2 = soma_t2 + tabela(linha_t,coluna_t);
        cont2 = cont2 + 1;
    end;
    coluna_t = coluna_t + 1;
end;
linha_t = linha_t + 1;
coluna_t = 1;
end;
media_t2 = soma_t2/cont2;
if (media_t2 > maior_t2)
    maior_t2 = media_t2;
end;
linha_t = linha_t + 3;

%cavidade 3
for lr1 = 101:112 %linhas do frame
    for cr1 = 159:172 %colunas do frame
        if (imagemfinal(lr1,cr1) == 255)
            soma_t3 = soma_t3 + tabela(linha_t,coluna_t);
            cont3 = cont3 + 1;
        end;
        coluna_t = coluna_t + 1;
    end;
    linha_t = linha_t + 1;
    coluna_t = 1;
end;
media_t3 = soma_t3/cont3;
if (media_t3 > maior_t3)
    maior_t3 = media_t3;
end;
linha_t = linha_t + 4;

%cavidade 4
for lr1 = 117:128 %linhas do frame
    for cr1 = 159:172 %colunas do frame
        if (imagemfinal(lr1,cr1) == 255)
            soma_t4 = soma_t4 + tabela(linha_t,coluna_t);
            cont4 = cont4 + 1;
        end;
        coluna_t = coluna_t + 1;
    end;
    linha_t = linha_t + 1;
    coluna_t = 1;
end;
media_t4 = soma_t4/cont4;
if (media_t4 > maior_t4)
    maior_t4 = media_t4;
end;
linha_t = linha_t + 3;

%cavidade 5
for lr1 = 132:143 %linhas do frame
    for cr1 = 159:172 %colunas do frame
        if (imagemfinal(lr1,cr1) == 255)
            soma_t5 = soma_t5 + tabela(linha_t,coluna_t);
            cont5 = cont5 + 1;
        end;
        coluna_t = coluna_t + 1;
    end;

```

```

    linha_t = linha_t + 1;
    coluna_t = 1;
end;
media_t5 = soma_t5/cont5;
if (media_t5 > maior_t5)
    maior_t5 = media_t5;
end;
linha_t = linha_t + 4;

%cavidade 6
for lr1 = 148:159 %linhas do frame
    for cr1 = 159:172 %colunas do frame
        if (imagemfinal(lr1,cr1) == 255)
            soma_t6 = soma_t6 + tabela(linha_t,coluna_t);
            cont6 = cont6 + 1;
        end;
        coluna_t = coluna_t + 1;
    end;
    linha_t = linha_t + 1;
    coluna_t = 1;
end;
media_t6 = soma_t6/cont6;
if (media_t6 > maior_t6)
    maior_t6 = media_t6;
end;
linha_t = linha_t + 4;

%cavidade 7
for lr1 = 164:174 %linhas do frame
    for cr1 = 159:172 %colunas do frame
        if (imagemfinal(lr1,cr1) == 255)
            soma_t7 = soma_t7 + tabela(linha_t,coluna_t);
            cont7 = cont7 + 1;
        end;
        coluna_t = coluna_t + 1;
    end;
    linha_t = linha_t + 1;
    coluna_t = 1;
end;
media_t7 = soma_t7/cont7;
if (media_t7 > maior_t7)
    maior_t7 = media_t7;
end;
linha_t = linha_t + 3;

%cavidade 8
for lr1 = 178:188 %linhas do frame
    for cr1 = 159:172 %colunas do frame
        if (imagemfinal(lr1,cr1) == 255)
            soma_t8 = soma_t8 + tabela(linha_t,coluna_t);
            cont8 = cont8 + 1;
        end;
        coluna_t = coluna_t + 1;
    end;
    linha_t = linha_t + 1;
    coluna_t = 1;
end;
media_t8 = soma_t8/cont8;
if (media_t8 > maior_t8)
    maior_t8 = media_t8;
end;

```

```

    end;
end;
%temperatura inicial
t_inicial = (maior_t1 + maior_t2 + maior_t3 + maior_t4 + maior_t5 + maior_t6 + maior_t7 + maior_t8)/8;
t_inicial = num2str(t_inicial);
set(handles.edit15,'String',t_inicial);

media2_t1 = 0; %média valores de temperatura da cavidade 1
maior2_t1 = 0; %maior valor de temperatura da cavidade 1 entre os frames 164 e 187
media2_t2 = 0; %média valores de temperatura da cavidade 2
maior2_t2 = 0; %maior valor de temperatura da cavidade 2 entre os frames 164 e 187
media2_t3 = 0; %média valores de temperatura da cavidade 3
maior2_t3 = 0; %maior valor de temperatura da cavidade 3 entre os frames 164 e 187
media2_t4 = 0; %média valores de temperatura da cavidade 4
maior2_t4 = 0; %maior valor de temperatura da cavidade 4 entre os frames 164 e 187
media2_t5 = 0; %média valores de temperatura da cavidade 5
maior2_t5 = 0; %maior valor de temperatura da cavidade 5 entre os frames 164 e 187
media2_t6 = 0; %média valores de temperatura da cavidade 6
maior2_t6 = 0; %maior valor de temperatura da cavidade 6 entre os frames 164 e 187
media2_t7 = 0; %média valores de temperatura da cavidade 7
maior2_t7 = 0; %maior valor de temperatura da cavidade 7 entre os frames 164 e 187
media2_t8 = 0; %média valores de temperatura da cavidade 8
maior2_t8 = 0; %maior valor de temperatura da cavidade 8 entre os frames 164 e 187
coluna_t = 1; %coluna da tabela de temperatura

for k = 164:187
    frame = read(video,k);
    framecinza = rgb2gray(frame);
    framecinzaroi = framecinza; % carrega a figura "framecinza" em "framecinzaroi"
    [linha coluna] = size(framecinza);
    for l=1:linha % para 1 até número de linhas
        for c=1:158 % para 1 até número de colunas do início do roi
            framecinzaroi(l,c) = 0; % transforma todos os pixels em preto
        end;
    end;
    for l=1:linha % para 1 até número de linhas
        for c=173:coluna % para 173 até número de colunas final
            framecinzaroi(l,c) = 0; % transforma todos os pixels em preto
        end;
    end;
    imagemfinal = framecinzaroi;
    [M N] = size(framecinzaroi); % M recebe linhas e N recebe colunas da imagem em cinza
    for y=1:M % para 1 até número de linhas
        for z=1:N % para 1 até número de colunas
            if(framecinzaroi(y,z) >= 200)
                imagemfinal(y,z) = 255; % pixel recebe cor branca
            else
                imagemfinal(y,z) = 0; % pixel recebe cor preta
            end;
        end;
    end;
end;
end;
soma2_t1 = 0;
soma2_t2 = 0;
soma2_t3 = 0;
soma2_t4 = 0;
soma2_t5 = 0;
soma2_t6 = 0;
soma2_t7 = 0;
soma2_t8 = 0;
cont1 = 0;

```

```

cont2 = 0;
cont3 = 0;
cont4 = 0;
cont5 = 0;
cont6 = 0;
cont7 = 0;
cont8 = 0;

%cavidade 1
for lr1 = 70:81 %linhas do frame
    for cr1 = 159:172 %colunas do frame
        if (imagemfinal(lr1,cr1) == 255)
            soma2_t1 = soma2_t1 + tabela(linha_t,coluna_t);
            cont1 = cont1 + 1;
        end;
        coluna_t = coluna_t + 1;
    end;
    linha_t = linha_t + 1;
    coluna_t = 1;
end;
media2_t1 = soma2_t1/cont1;
if (media2_t1 > maior2_t1)
    maior2_t1 = media2_t1;
end;
linha_t = linha_t + 3;

%cavidade 2
for lr1 = 85:97 %linhas do frame
    for cr1 = 159:172 %colunas do frame
        if (imagemfinal(lr1,cr1) == 255)
            soma2_t2 = soma2_t2 + tabela(linha_t,coluna_t);
            cont2 = cont2 + 1;
        end;
        coluna_t = coluna_t + 1;
    end;
    linha_t = linha_t + 1;
    coluna_t = 1;
end;
media2_t2 = soma2_t2/cont2;
if (media2_t2 > maior2_t2)
    maior2_t2 = media2_t2;
end;
linha_t = linha_t + 3;

%cavidade 3
for lr1 = 101:112 %linhas do frame
    for cr1 = 159:172 %colunas do frame
        if (imagemfinal(lr1,cr1) == 255)
            soma2_t3 = soma2_t3 + tabela(linha_t,coluna_t);
            cont3 = cont3 + 1;
        end;
        coluna_t = coluna_t + 1;
    end;
    linha_t = linha_t + 1;
    coluna_t = 1;
end;
media2_t3 = soma2_t3/cont3;
if (media2_t3 > maior2_t3)
    maior2_t3 = media2_t3;
end;

```

```

linha_t = linha_t + 4;

%cavidade 4
for lr1 = 117:128 %linhas do frame
    for cr1 = 159:172 %colunas do frame
        if (imagemfinal(lr1,cr1) == 255)
            soma2_t4 = soma2_t4 + tabela(linha_t,coluna_t);
            cont4 = cont4 + 1;
        end;
        coluna_t = coluna_t + 1;
    end;
    linha_t = linha_t + 1;
    coluna_t = 1;
end;
media2_t4 = soma2_t4/cont4;
if (media2_t4 > maior2_t4)
    maior2_t4 = media2_t4;
end;
linha_t = linha_t + 3;

%cavidade 5
for lr1 = 132:143 %linhas do frame
    for cr1 = 159:172 %colunas do frame
        if (imagemfinal(lr1,cr1) == 255)
            soma2_t5 = soma2_t5 + tabela(linha_t,coluna_t);
            cont5 = cont5 + 1;
        end;
        coluna_t = coluna_t + 1;
    end;
    linha_t = linha_t + 1;
    coluna_t = 1;
end;
media2_t5 = soma2_t5/cont5;
if (media2_t5 > maior2_t5)
    maior2_t5 = media2_t5;
end;
linha_t = linha_t + 4;

%cavidade 6
for lr1 = 148:159 %linhas do frame
    for cr1 = 159:172 %colunas do frame
        if (imagemfinal(lr1,cr1) == 255)
            soma2_t6 = soma2_t6 + tabela(linha_t,coluna_t);
            cont6 = cont6 + 1;
        end;
        coluna_t = coluna_t + 1;
    end;
    linha_t = linha_t + 1;
    coluna_t = 1;
end;
media2_t6 = soma2_t6/cont6;
if (media2_t6 > maior2_t6)
    maior2_t6 = media2_t6;
end;
linha_t = linha_t + 4;

%cavidade 7
for lr1 = 164:174 %linhas do frame
    for cr1 = 159:172 %colunas do frame
        if (imagemfinal(lr1,cr1) == 255)

```

```

        soma2_t7 = soma2_t7 + tabela(linha_t,coluna_t);
        cont7 = cont7 + 1;
    end;
    coluna_t = coluna_t + 1;
end;
linha_t = linha_t + 1;
coluna_t = 1;
end;
media2_t7 = soma2_t7/cont7;
if (media2_t7 > maior2_t7)
    maior2_t7 = media2_t7;
end;
linha_t = linha_t + 3;

%cavidade 8
for lr1 = 178:188 %linhas do frame
    for cr1 = 159:172 %colunas do frame
        if (imagemfinal(lr1,cr1) == 255)
            soma2_t8 = soma2_t8 + tabela(linha_t,coluna_t);
            cont8 = cont8 + 1;
        end;
        coluna_t = coluna_t + 1;
    end;
    linha_t = linha_t + 1;
    coluna_t = 1;
end;
media2_t8 = soma2_t8/cont8;
if (media2_t8 > maior2_t8)
    maior2_t8 = media2_t8;
end;
end;

%temperatura final
t_final = (maior2_t1 + maior2_t2 + maior2_t3 + maior2_t4 + maior2_t5 + maior2_t6 + maior2_t7 +
maior2_t8)/8;
t_final = num2str(t_final);
set(handles.edit16,'String',t_final);

d_agua = 0.986;
v_agua = get(handles.edit2,'String');
v_agua = str2num(v_agua);
c_agua = 4.182;
t_calorimetro = get(handles.edit4,'String');
t_calorimetro = str2num(t_calorimetro);
t_agua = get(handles.edit5,'String');
t_agua = str2num(t_agua);
t_sistema = get(handles.edit6,'String');
t_sistema = str2num(t_sistema);
c_sistema = get(handles.edit7,'String');
c_sistema = str2num(c_sistema);

d_acido = 1.0171;
v_acido = get(handles.edit9,'String');
v_acido = str2num(v_acido);
t_acido = get(handles.edit11,'String');
t_acido = str2num(t_acido);
d_base = 1.0678;
v_base = get(handles.edit13,'String');
v_base = str2num(v_base);
c_base = get(handles.edit14,'String');
c_base = str2num(c_base);

```

```
t_inicial = get(handles.edit15,'String');
t_inicial = str2num(t_inicial);
t_final = get(handles.edit16,'String');
t_final = str2num(t_final);

entalpia = -((c_sistema*(t_final-t_calorimetro))+(d_acido*v_acido*4.182*(t_final-
t_acido))+(d_base*v_base*4.182*(t_final-t_inicial)))/(v_base*c_base);
entalpia = num2str(entalpia);
set(handles.edit17,'String',entalpia);
```