



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Mestrado - Doutorado

ANÁLISE DO CAMPO DE TEMPERATURA PARA CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DA CONCENTRAÇÃO DA MISTURA ÁGUA-ÁLCOOL

Por

Pedro Granville Gonçalves

*Tese submetida à Universidade Federal da Paraíba para obtenção
do título de Doutor*

PEDRO GRANVILLE GONÇALVES

**ANÁLISE DO CAMPO DE TEMPERATURA PARA
CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DA
CONCENTRAÇÃO DA MISTURA ÁGUA-ÁLCOOL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Título de Doutor.

Orientador: Professor Dr. Francisco Antônio Belo

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

G635a Gonçalves, Pedro Granville.

ANÁLISE DO CAMPO DE TEMPERATURA PARA CARACTERIZAÇÃO
EXPERIMENTAL DA CONCENTRAÇÃO DA MISTURA ÁGUA-ÁLCOOL /
Pedro Granville Gonçalves. - João Pessoa, 2020.
84 f. : il.

Orientação: Francisco Antônio Belo.
Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Campo de temperatura periódico. 2. Método de
Angstrom. 3. concentração da mistura água-álcool. 4.
GITT. I. Belo, Francisco Antônio. II. Título.

UFPB/BC

ANÁLISE DO CAMPO DE TEMPERATURA PARA CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DA CONCENTRAÇÃO DA MISTURA ÁGUA-ÁLCOOL

Por

Pedro Granville Gonçalves

Tese de Doutorado apresentada em 30 de junho de 2020

Período letivo 2020.1



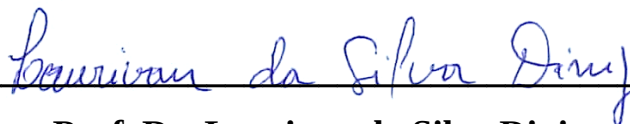
Prof. Dr. Francisco Antônio Belo

Orientador – UFPB/CT



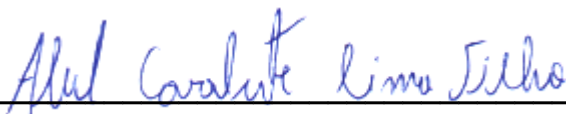
Prof. Dr. Jean Pierre Veronese

Examinador Externo ao PPGEM – UFPB



Prof. Dr. Laurivan da Silva Diniz

Examinador Externo ao PPGEM – IFPB/JP



Prof. Dr. Abel Cavalcante Lima Filho

Examinador Interno ao PPGEM – UFPB/CT



Prof. Dr. Carlos Antônio Cabral dos Santos

Examinador Interno ao PPGEM – UFPB/CT

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus pais, Roberto *in memoriam* e Roberta, meus maiores exemplos de força, dedicação e superação.

Às minhas queridas irmãs Fernanda e Rachel por estarem sempre presentes em nossas vidas.

À minha mulher e companheira de todos os momentos, Manaíra.

Ao meu pequeno e amado filho Gael.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Francisco Antônio Belo pela sua grande contribuição em repassar seus valiosos conhecimentos e pela disponibilidade em ajudar sempre que necessário.

Ao professor Abel Cavalcante Lima pelas suas sugestões e por compartilhar seus conhecimentos.

Aos professores Laurivan Diniz, Jean Pierre e Carlos Antônio Cabral por terem aceitado a fazer parte da banca e por suas sinceras contribuições neste trabalho de tese.

Aos amigos e parceiros de pesquisa Fábio Araújo, Dhiego Veloso, Gustavo Assad e Allan Giuseppe pelas contribuições dadas durante o projeto.

Ao amigo Jobson Silva pelas relevantes contribuições dadas durante desenvolvimento experimental do projeto.

Ao meu amigo e técnico em eletrônica, Diógenes Silva pela colaboração, apoio e incentivo constante.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo suporte financeiro.

ANÁLISE DO CAMPO DE TEMPERATURA PARA CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DA CONCENTRAÇÃO DA MISTURA ÁGUA-ÁLCOOL

RESUMO

A caracterização de misturas contendo água e um soluto anfifílico tem sido amplamente estudada nos últimos anos. As aplicações deste estudo desempenham um papel importante em muitas aplicações de engenharia. Este trabalho tem como proposta a determinação da concentração água-álcool utilizando um campo de temperatura periódico. Para isto, foi construído um dispositivo experimental com princípio de funcionamento no método de Angstrom, o qual faz uso de um fluxo de calor periódico de uma fonte controlada, gerando assim, um campo de temperatura periódico na amostra de teste. Termopares foram instalados na amostra e num ponto de referência para captar o sinal de temperatura gerado pelo fluxo de calor periódico. A amplitude e a fase destes sinais serão obtidas por meio de um sistema de aquisição de dados. O termopar posicionado na parede do tubo foi adotado como referência em relação ao sinal térmico adquirido pelo termopar da amostra. Foram realizadas simulações computacionais com base no modelo matemático teórico, considerando a condução de calor unidimensional para obter a resposta periódica da temperatura medida no centro do tubo cilíndrico. A Técnica da Transformada Integral Generalizada (GITT) foi utilizada para resolver o problema de difusão de calor e determinar o campo de temperatura, gerando resultados de teóricos. As amostras utilizadas neste trabalho foram preparadas com frações volumétricas de 0,3, 4,2, 8,2, 12,1, 16,2 e 19,7 %m/m de álcool etílico misturadas com água destilada. O modelo teórico desenvolvido foi utilizado como referência para construção do dispositivo experimental.

Palavras chaves – Campo de temperatura periódico, Método de Angstrom, concentração da mistura água-álcool, GITT.

ANALYSIS OF THE TEMPERATURE FIELD FOR EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF THE CONCENTRATION OF THE WATER-ALCOHOL MIXTURE

ABSTRACT

The characterization of mixtures containing water and an amphiphilic solute has been widely studied in recent years. The applications in this study play an important role in many engineering applications. This work proposes the determination of the water-alcohol concentration using a periodic temperature field. For this, an experimental device was built with the operating principle in the Angstrom method, which makes use of a periodic heat flow from a controlled source, thus generating a periodic temperature field in the test sample. Thermocouples were installed in the sample and at a reference point to capture the temperature signal generated by the periodic heat flow. The amplitude and phase of these signals will be obtained through a data acquisition system. The thermocouple positioned on the tube wall was adopted as a reference in relation to the thermal signal acquired by the sample thermocouple. Computer simulations were performed based on the theoretical mathematical model, considering the one-dimensional heat conduction to obtain the periodic temperature response measured at the center of the cylindrical tube. The Generalized Integral Transform Technique (GITT) was used to solve the problem of heat diffusion and determine the temperature field, generating theoretical results. The samples used in this work were prepared with volumetric fractions of 0.3, 4.2, 8.2, 12.1, 16.2 and 19.7 %m/m ethyl alcohol mixed with distilled water. The theoretical model developed was used as a reference for the construction of the experimental device.

Keywords – Periodic temperature field, Angstrom method, concentration of water-alcohol mixture, GITT.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	16
1. INTRODUÇÃO	16
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO.....	16
1.2 VISÃO GERAL DO SISTEMA PROPOSTO	17
1.3 OBJETIVOS.....	18
1.3.1 Objetivo geral	18
1.3.2 Objetivos específicos.....	19
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	19
CAPÍTULO II.....	20
2. ESTADO DA ARTE	20
2.1 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS ...	20
2.1.1 Ultrassom	20
2.1.2 Oscilação harmônica	21
2.1.3 Coriolis	23
2.1.4 Medida de mistura através da capacitância.....	27
2.2 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES TÉRMICAS	28
2.2.1 Fio quente.....	28
2.2.2 Método <i>Flash</i>	30
2.2.3 Método do fluxo de calor periódico	32
CAPÍTULO III	35
3. PROBLEMA FÍSICO E MODELO MATEMÁTICO.....	35
3.1 PROBLEMA FÍSICO.....	35
3.2 MODELO MATEMÁTICO.....	36
3.2.1 Adimensionalização do problema	37
3.2.2 Problema auxiliar de autovalor na direção radial	37
3.2.3 Transformação integral para o campo de temperatura	38

CAPÍTULO IV	40
4. MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1 AMOSTRAS	40
4.1.1 Preparação das misturas.....	40
4.1.2 Medidas de massa específica	40
4.1.3 Medidas de grau alcoólico	41
4.1.4 Medidas de propriedades termofísicas	42
4.2 CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL	43
4.2.1 Elementos eletrônicos.....	44
4.3 CONTROLE DE TEMPERATURA	45
4.3.1 Controlador PID.....	45
4.3.2 Estrutura do controlador PID.....	46
4.3.3 Método heurístico de Ziegler-Nichols.....	47
4.4 SOFTWARE	48
CAPÍTULO V	50
5. RESULTADOS.....	50
5.1 INTRODUÇÃO	50
5.2 RESULTADOS TÉORICOS	50
5.2.1 Difusividade térmica	50
5.2.2 Análise paramétrica	51
5.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS MISTURAS.....	60
5.3.1 Caracterização das amostras.....	60
5.3.2 Análise experimental.....	61
5.3.3 Comparação entre as variações de temperatura de pico e ângulo de fase experimental e teórico.....	65
5.3.4 Comparação entre as variações de temperatura de pico e ângulo de fase com grau alcoólico.....	68
5.3.5 Avaliação das medidas experimentais	69
5.3.6 Incerteza das medidas experimentais	72
CAPÍTULO VI	73
6. CONCLUSÕES	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75
ANEXO A.....	80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Sequência de determinação da mistura.	18
Figura 2.1: Modelo massa-mola aproximado de um tubo em U posto a oscilar. Fonte: Adaptado de LIPTÁK (2003).	22
Figura 2.2: Os componentes típicos de um densímetro de Coriolis. Fonte: Adaptado de LIPTÁK (2003).	24
Figura 2.3: Ilustração padrão de um densímetro de Coriolis. Fonte: Adaptado de LIPTÁK (2003).	24
Figura 2.4: Princípio de medição através do método do fio quente. a) Fluxo de calor radial e unidimensional na amostra. b) Corrente elétrica de intensidade fixa passa através do fio quente. Fonte: Adaptado de FRANCO (2007).	29
Figura 2.5: a) Princípio de medição do método <i>Flash</i> . b) Curva de aumento da temperatura na parte traseira da amostra. Fonte: Adaptado de CAMPBELL <i>et al.</i> (1999).	31
Figura 3.1: Representação do problema físico.	35
Figura 4.1: <i>Software</i> de tabelas alcoolométricas.	42
Figura 4.2: Bancada experimental.	43
Figura 4.3: Configuração dos termopares no tubo: (1) termopar da parede e (2) termopar da amostra.	43
Figura 4.4: Elementos eletrônicos do sistema: (1) computador, (2) módulo <i>ethernet</i> , (3) arduino mega, (4) módulo de aquisição de dados, (5) amplificadores de instrumentação, (6) termopares, (7) fonte de alimentação, (8) drive de potência tipo ponte-h, (9) Peltier's e (10) fonte de potência.	44
Figura 4.5: Oscilação sustentada com P_{cr} (P_{cr} é medido em minutos).	48
Figura 4.6: Painel frontal em LabVIEW.	49
Figura 5.1: Curvas de difusividade térmica pela concentração para diferentes temperaturas.	51

Figura 5.2: Curvas de temperatura em função do tempo para amplitude 5,5 °C, raio de 4 mm, frequência de 0,012 Hz e difusividade térmica de $1,45 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.	52
Figura 5.3: Curvas de temperatura em função do grau alcoólico para amplitude de 3,0°C.	54
Figura 5.4: Curvas de temperatura em função do grau alcoólico para amplitude de 6,0°C.	54
Figura 5.5: Curvas de temperatura em função do grau alcoólico para amplitude de 9,0°C.	55
Figura 5.6: Variação da temperatura de pico em função do grau alcoólico para um tubo com raio de 4 mm, frequência de 0,012Hz e amplitude de 9,0°C.	56
Figura 5.7: Variação da temperatura de pico em função do grau alcoólico para um tubo com raio de 4 mm, frequência de 0,024Hz e amplitude de 9,0°C.	57
Figura 5.8: Variação da temperatura em função do grau alcoólico para um tubo com raio de 6 mm, frequência de 0,012Hz e amplitude de 9,0°C.	58
Figura 5.9: Variação da temperatura de pico em função do grau alcoólico para um tubo com raio de 8 mm, frequência de 0,012Hz e amplitude de 9,0°C.	59
Figura 5.10: Curvas de $\Delta T_p - a$ e $\Delta \theta_p - a$ em função da densidade com frequência de 0,0059Hz e amplitude de 7,7°C.	62
Figura 5.11: Curvas de $\Delta T_p - a$ e $\Delta \theta_p - a$ em função da concentração de álcool com frequência de 0,0119Hz e amplitude de 5,5°C.	62
Figura 5.12: Curvas de $\Delta T_p - a$ e $\Delta \theta_p - a$ em função da concentração de álcool com frequência de 0,0238Hz e amplitude de 3,8°C.	63
Figura 5.13: Curvas dos valores de $\Delta T_p - a$ estimadas e experimental em função do grau alcoólico.	66
Figura 5.14: Curvas dos valores de $\Delta \theta_p - a$ estimadas e experimental em função do grau alcoólico.	66
Figura 5.15: Curvas dos valores de $\Delta T_p - a$ e grau alcoólico de referência para cada amostra.	68
Figura 5.16: Curvas dos valores de $\Delta \theta_p - a$ e grau alcoólico de referência para cada amostra.	69
Figura 5.17: Correlação entre grau alcoólico e $\Delta T_p - a$.	70
Figura 5.18: Correlação entre grau alcoólico e $\Delta \theta_p - a$.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1: Especificações do AEHC e do AEA grau PA, segundo ANP.	40
Tabela 4.2: Especificações técnicas do densímetro.	41
Tabela 4.3: Especificações técnicas do termômetro.	41
Tabela 4.4: Valores das propriedades termofísicas para diferentes frações da mistura água-álcool obtidas com o auxílio do software (EES).	42
Tabela 4.5: Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada no ganho crítico Kcr e no período crítico Pcr.	48
Tabela 5.1: Processo de dimensionalização da temperatura.	53
Tabela 5.2: Processo de dimensionalização do raio.	53
Tabela 5.3: Processo de dimensionalização do tempo.	53
Tabela 5.4: Valores de $\Delta T_{\text{máx}}$ e $\Delta \theta_{\text{máx}}$ no centro do tubo em função da variação da amplitude.	55
Tabela 5.5: Valores de $\Delta T_{\text{máx}}$ e $\Delta \theta_{\text{máx}}$ no centro do tubo em função da frequência. .	57
Tabela 5.6: Valores de $\Delta T_{\text{máx}}$ e $\Delta \theta_{\text{máx}}$ no centro do tubo em função da variação do raio.	60
Tabela 5.7: Caracterização das amostras preparada com AEA grau PA e água destilada.	61
Tabela 5.8: Valores experimentais de $\Delta T_p - a$ e $\Delta \theta_p - a$ na amostra em função da variação da frequência e amplitude.	64
Tabela 5.9: Valores experimentais de $\Delta T_p - a$ e $\Delta \theta_p - a$ na amostra em função da variação da frequência e amplitude.	64
Tabela 5.10: Valores experimentais de $\Delta T_p - a$ e $\Delta \theta_p - a$ na amostra em função da variação da frequência e amplitude.	64
Tabela 5.11: Valores de $\Delta \theta_{\text{máx}}$ e $\Delta T_{\text{máx}}$ na amostra em função da variação da frequência e amplitude.	65

Tabela 5.12: Valores de ΔT_p – a experimental e estimado em função do teor alcoólico.	67
Tabela 5.13: Valores de $\Delta \theta_p$ – a experimental e estimado em função do teor alcoólico.	67
Tabela 5.14: Resultado das análises do grau alcoólico das misturas a partir do modelo quadrático com ΔT_p – a.....	71
Tabela 5.15: Resultado das análises do grau alcoólico das misturas a partir do modelo quadrático com $\Delta \theta_p$ – a.....	71
Tabela 5.16: Incerteza padrão e expandida das medidas de mistura a partir de ΔT_p – a.	72
Tabela 5.17: Incerteza padrão e expandida das medidas de mistura a partir de $\Delta \theta_p$ – a.	72

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área [m ²]
c_p	Calor Específico [J/Kg.K]
D_h	Diâmetro Hidráulico do Tubo [mm]
k	Condutividade Térmica [W/mK]
K_d	Ganho derivativo
K_i	Ganho integrativo
K_p	Ganho proporcional
m	Metro
mm	Milímetro
P_{cr}	Período Crítico [min]
r	Raio [mm]
R	Raio Adimensional
t_d	Tempo Derivativo [min]
t_i	Tempo Integral [min]
T_p	Amplitude térmica na parede [°C]
T₀	Temperatura de Inicial do Fluido [°C]
T_w	Temperatura Média [°C]
ΔT_{p-a}	Variação da Temperatura de Pico entre Amostra e parede [°C]
Δθ_{p-a}	Variação do Ângulo de Fase entre Amostra e Parede [°C]

$\Delta T_{\text{máx}}$	Variação Máxima das Temperaturas de pico entre as Amostras [°C]
$\Delta \theta_{\text{máx}}$	Variação Máxima dos Ângulos de Fase entre as Amostras [°C]
α	Difusividade Térmica [m ² /s]
τ_d	Constante de tempo derivativo
τ_i	Constante de tempo integrativo
θ	Temperatura Adimensional
ρ	Massa Específica [kg/m ³]
°C	Graus Celsius [°C]

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AI	Abreviatura do Inglês <i>Analog Input</i> [= Entrada Analógica]
AO	Abreviatura do Inglês <i>Analog Output</i> [= Saída Analógica]
CCP	Condição de Contorno na Parede
CPU	Abreviatura do Inglês <i>Central Processing Unit</i> [= Unidade Central de Processamento]
DEV	Abreviatura do Inglês <i>Development</i> [= Desenvolvimento]
EXP	Experimental
EES	<i>Engineering Equation Solver</i>
FORTTRAN	<i>Formula Translation System</i>
GITT	Abreviatura do Inglês <i>Generalized Integral Transform Technique</i> [= Técnica da Transformada Integral Generalizada]
GPICEEMA	Grupo de Pesquisa em Instrumentação e Controle em Estudo de Energia e Meio Ambiente
I	Integral
LabVIEW	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
MM	Modelamento Matemático
P	Proporcional
PCS	Abreviatura do Inglês <i>Process Control System</i> [= Sistema de Controle de Processo]
PD	Proporcional Derivativo
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo

PPGEM	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
PPM	Partes Por Milhão
PT	Abreviatura do Inglês <i>Platinum Thin</i> [= Platina Fina]
PWM	Abreviatura do Inglês <i>Pulse Width Modulation</i> [= Modulação por Largura de Pulso]
SINST/PADCT	Seminário de Instrumentação e Exposição de Protótipos
TEM	Abreviatura do Inglês <i>Thermoelectric Module</i> [= Módulo Termoelétrico]
USB	Abreviatura do Inglês <i>Universal Serial Bus</i> [= Porta Universal]

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

As misturas contendo água e um soluto anfifílico tem sido amplamente estudada nos últimos anos. Conforme pode ser observado em (AKPA *et al.*, 2012; HILSER, 2011; BALL, 2008 and PALO *et al.*, 2007). As aplicações deste estudo desempenham um papel importante em muitas aplicações na engenharia, como por exemplo: a determinação de propriedades termofísicas de materiais sólidos e líquidos, como também, a caracterização de misturas líquidas (BELO 2002, BELO *et al.*, 2012, BELO *et al.*, 2015).

No processo de produção de etanol é de grande interesse mensurar com precisão o teor alcoólico. A partir do monitoramento dos parâmetros acústicos medidos é possível detectar a qualidade do produto, a eficiência do processo e economizar energia (KRAUSEA *et al.*, 2011).

Em misturas binárias, isto é, mistura de dois líquidos completamente miscíveis entre si, a técnica mais utilizada para determinar sua concentração é através da medida da densidade. Com a medida da densidade e da temperatura, através de uma tabela ou uma função destas duas variáveis, encontra-se o valor correspondente da participação de cada componente. Através de um transdutor eletrônico como o ultrassônico, transforma-se o valor da densidade em um sinal elétrico, obtendo um medidor eletrônico de densidade.

Outra técnica de medida da densidade, que apresenta em sua reposta o sinal elétrico, é baseado na lei da oscilação harmônica. Esta técnica utiliza um tubo de borossilicato em uma forma de U e posto a oscilar em um ambiente de temperatura controlada com alta precisão. A medida eletrônica da frequência de oscilação do tubo

determina a densidade. Esta técnica permite determinar valores de densidades com elevada exatidão.

O método baseado na oscilação harmônica é amplamente utilizado em processos industriais do petróleo para medir densidade devido à sua precisão e velocidade com que os resultados podem ser obtidos (ASHCROFT, 1990).

Técnicas complexas como a cromatografia, podem ser utilizadas para medida dos percentuais das misturas, tanto daquelas feitas por densidade como daquelas feitas por Karl Fisher. Este método geralmente só é utilizado quando necessita saber a concentração de vários componentes.

Uma técnica de medida de concentração de misturas em um processo pode ser realizada através do medidor de vazão mássica de Coriolis. Tal como o densímetro, estas medidas são somente para componentes binários. Através da medida da temperatura, da vazão mássica, através de uma tabela ou uma função destas duas variáveis, encontra-se o valor correspondente da participação de cada componente.

O medidor de vazão mássica Coriolis é um método consagrado para medição de vazão em processos industriais. Através da análise de resposta vibratória, pode ser usado para calcular a densidade do fluido em processo (HENRY *et al.*, 2003).

No presente trabalho, abordamos a solução de um problema de difusão de calor - radial e periódico - via GITT, descrevendo o comportamento da dinâmica de temperatura dentro de um tubo cilíndrico preenchido com frações volumétricas de 0,3, 4,2, 8,2, 12,1, 16,2 e 19,7 %m/m de álcool etílico misturadas com água destilada. Também é proposto a construção de um dispositivo experimental capaz de determinar o teor alcoólico da mistura água-álcool para misturas com até 20% de teor alcoólico, baseado na medida da oscilação harmônica térmica. A aplicação do método proposto pode ser estendida para caracterização de outras misturas como por exemplo: processos de fermentação e bebidas com baixo teor alcoólico. Os estudos que serão apresentados foram realizados a partir de simulações computacionais e procedimentos experimentais.

1.2 VISÃO GERAL DO SISTEMA PROPOSTO

O sistema proposto se refere a estudos teóricos e experimentais da medida da concentração da mistura água-álcool através do método da oscilação harmônica térmica implementando por um sistema de instrumentação e controle eletrônico. A porcentagem em massa da concentração é representada pela massa do soluto (m_1) em relação à massa

da solução inteira ($m = m_1 + m_2$). A medida da concentração é obtida a partir da variação dos valores de temperatura de pico e ângulo de fase de cada amostra analisada tendo como referência a temperatura da parede do tubo. O instrumento é formado por associação de sensores e controladores eletrônicos capazes de produzir uma oscilação harmônica térmica bem determinada baseado em um sistema de instrumentação. As medidas de temperatura de pico e ângulo de fase entram nas funções matemáticas de correlação que determina o teor alcoólico da amostra. A Figura 1.1 ilustra um fluxograma simplificado da sequência do instrumento medidor da mistura.

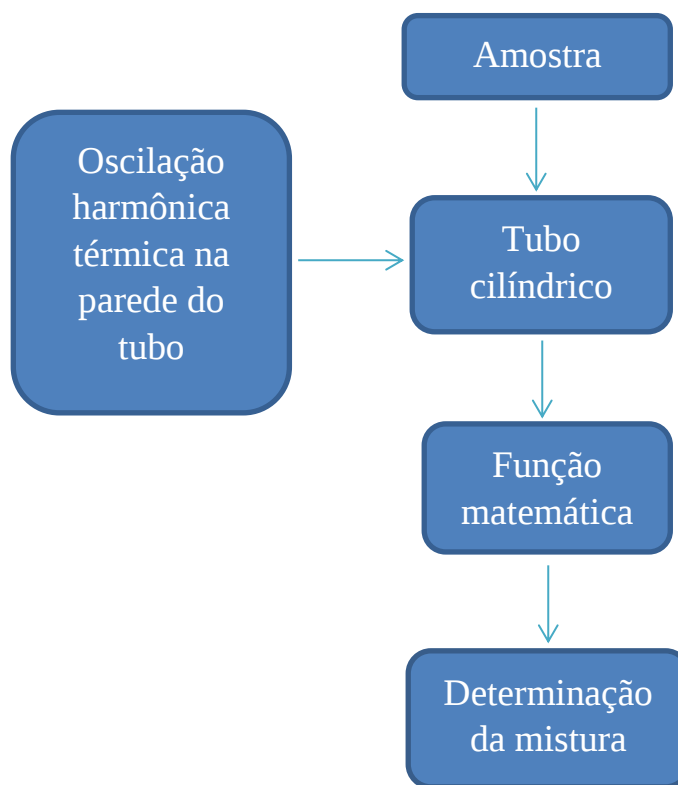


Figura 1.1: Sequência de determinação da mistura.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Desenvolver estudos teóricos e experimentais na fronteira do conhecimento nas áreas de ciências térmicas, instrumentação e controle. Desenvolver elementos materiais que levem estes estudos teóricos e experimentais a inovação tecnológica.

1.3.2 Objetivos específicos

- Integrar os elementos de eletrônicas empregados na instrumentação do protótipo;
- Desenvolvimento de um Sistema de Controle de Processo - SCP (software, hardware, modelagem e planta);
- Aplicar a Técnica da Transformada Integral Generaliza (GITT), na solução do modelo matemático para concepção do dimensionamento mecânico e validação das medidas de teor alcoólico da mistura;
- Realizar simulações computacionais para concepção do melhor dimensionamento mecânico e validação das medidas de teor alcoólico da mistura;
- Estimar o teor alcoólico para mistura de água-álcool para misturas com até 20 %m/m de álcool baseado em procedimento experimental.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho de tese é composto de cinco capítulos e segue a estrutura descrita a seguir.

No primeiro capítulo, é abordado em linhas gerais o contexto em que ele se encontra inserido e a sua importância no desenvolvimento tecnológico atual, além dos objetivos e a apresentação.

No segundo capítulo, versa de forma abrangente o estado da arte do presente trabalho, ou seja, os métodos de análise de misturas que são atualmente empregados.

O terceiro capítulo apresenta a modelagem matemática utilizada na determinação do campo de temperatura, como também, o procedimento empregado para resolução através da GITT.

O quarto capítulo expõe a metodologia empregada e a montagem experimental de forma detalhada de todo hardware e software que compõem o sistema. Apresenta também os procedimentos para a montagem experimental.

O quinto capítulo contém os resultados teóricos preliminares obtidos a partir da simulação do modelo numérico-analítico.

No sexto capítulo é apresentada a conclusão do trabalho de tese com obtenção dos resultados experimentais necessários à comprovação das simulações baseadas no modelo teórico.

CAPÍTULO II

2. ESTADO DA ARTE

2.1 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS

Neste capítulo serão descritas as principais técnicas utilizadas para determinar propriedades físicas de misturas líquidas.

2.1.1 Ultrassom

A tecnologia do ultrassônica está presente em muitas aplicações de processos industriais. Uma de suas características mais interessantes é oferecer a possibilidade de medição não invasiva. Esta tecnologia é, principalmente, utilizada para medir parâmetros físicos, em vez de composição, embora no caso de misturas binárias e soluções, a concentração pode ser medida por meio da medida da densidade. As principais aplicações que são encontradas em processos industriais incluem medição de nível, vazão e determinação da densidade (MCLENNAN; KOWALSKI, 1995).

O ultrassom é um termo usado para definir ondas mecânicas que se propagam em meio elástico como em gases, líquidos ou sólidos em frequências acima do alcance do ouvido humano (isto é geralmente considerado como sendo acima de 20 KHz). Ondas acústicas, com frequências muito altas, são atenuadas na maioria dos materiais. Para a maioria das aplicações 10 MHz é o limite superior (MCLENNAN; KOWALSKI, 1995).

De acordo com o tipo de propagação, as ondas ultrassônicas se classificam em ondas longitudinais e transversais. Para as ondas longitudinais, o movimento das moléculas está na mesma direção que o da propagação da onda. Em ondas transversais, o

movimento das moléculas é perpendicular em relação à direção de propagação (OLYMPUS, 2006).

O princípio de funcionamento do ultrassom é baseado no efeito de um transdutor piezelétrico. Aparelhos de ultrassom que usam transmissão de onda contínua exigem um transdutor e um receptor separados, enquanto muitos dispositivos pulsados usam receptor e transmissor combinados em um único elemento. As medições geralmente dependem da medida da velocidade acústica (taxa de trânsito) que um pulso do ultrassom se desloca entre dois pontos ou pela atenuação do sinal. Para líquidos que apresenta uma única fase, as medidas baseiam-se na velocidade ultrassônica. Para escoamento multifásico, as medições de atenuação fornecem um meio de se obter a participação de cada fase (MCLENNAN; KOWALSKI, 1995).

A densidade ρ de um líquido é obtida a partir de sua impedância acústica Z e a velocidade do som através da relação $\rho = \frac{Z}{c}$. A velocidade do som c é calculada pela taxa de trânsito do pulso ultrassônico ao longo de uma distância conhecida. A impedância acústica Z pode ser calculada através da medida do coeficiente de reflexão R do som na interface do material com impedância acústica conhecida (material de referência) e o líquido desconhecido (PUTTMER, 2000).

2.1.2 Oscilação harmônica

O princípio de funcionamento de um medidor de densidade pela oscilação é baseado na lei de oscilação harmônica, em que um tubo em U é completamente preenchido com a amostra a ser analisada e é submetido a uma força eletromagnética. A medição da frequência e da duração da vibração do tubo cheio com a amostra permite a determinação do valor da densidade da amostra. Este princípio de medição é baseado no modelo massa-mola (LIPTÁK, 2003).

Um dos princípios amplamente utilizados e precisos, de densímetros, é baseado na exploração do fenómeno de que a frequência natural de oscilação varia com a massa do corpo oscilante. Portanto, se a massa varia com a densidade, a frequência de oscilação pode ser usada para medir a densidade (LIPTÁK, 2003). A Figura 2.1 apresenta um modelo massa-mola deste princípio.

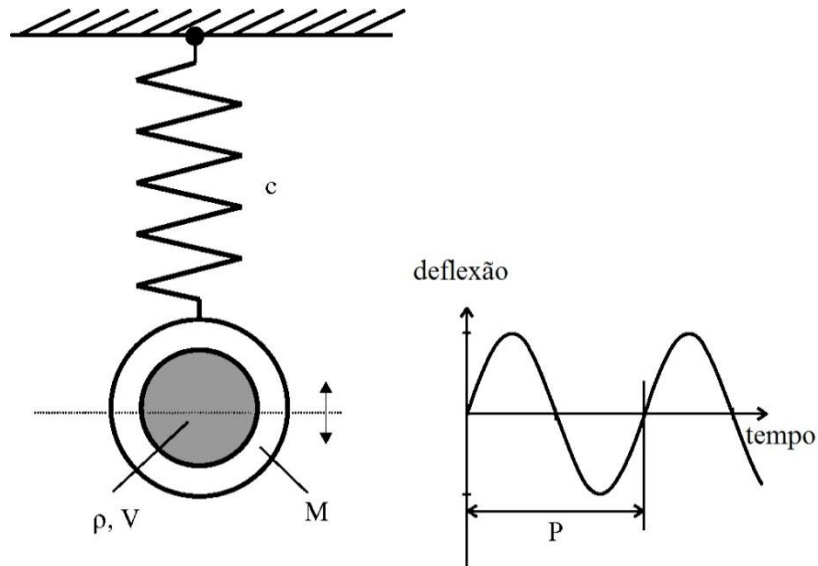


Figura 2.1: Modelo massa-mola aproximado de um tubo em U posto a oscilar. Fonte: Adaptado de LIPTÁK (2003).

O período P da oscilação ressonante de um modelo massa-mola com massa m e constante elástica c é dado pela Eq. (2.1):

$$P = 2\pi \sqrt{\frac{\rho v + m}{c}} \quad (2.1)$$

A massa oscilante de um densímetro em vibração consiste em: a massa do elemento oscilante M e a massa do fluido que participam da oscilação, sendo o volume do fluido participante V multiplicado pela sua densidade ρ , exibida na Eq. (2.2).

$$m = M + \rho \cdot V \quad (2.2)$$

Substituindo a massa m na Equação (2.3) e efetuando algumas operações matemática, temos:

$$\rho = \frac{c}{4\pi^2 V} \cdot P^2 - \frac{M}{V} \quad (2.3)$$

A Equação 2.3 relaciona o período de oscilação de um densímetro em vibração com a densidade do fluido medido.

2.1.3 Coriolis

A medição de vazão mássica pelo efeito Coriolis é um método bem estabelecido para medição de vazão industrial. O princípio básico de medição é um tubo onde existe uma massa em movimento levados a oscilar de forma senoidal na frequência natural através de um ou mais indutores, enquanto dois sensores monitoram a oscilação (HENRY *et al.*, 2003). Esta frequência é em função da massa do objeto. No caso de um densímetro de Coriolis, a massa do objeto é a soma da vibração do tubo, o fluido no interior do tubo, e a massa dos indutores e sensores. Por conseguinte, uma vez que as massas dos tubos, condutor, e sensores são constantes, uma mudança na frequência natural, é uma indicação direta de uma mudança na densidade do processo (LIPTÁK, 2003).

A geometria do tubo e o posicionamento do sensor estão dispostos de modo que a frequência de oscilação pode ser utilizada para calcular a densidade do fluido do processo, enquanto a diferença de fase entre os dois sinais do sensor fornece a vazão mássica. Um dos principais benefícios é a medição direta do fluxo massa e não do volume (HENRY *et al.*, 2003).

As ilustrações do densímetro de Coriolis são apresentadas nas Figuras 2.2 e 2.3. Este sensor de densidade é composto por dois tubos de fluxo, uma bobina magnética para gerar oscilações nos tubos, detectores da medida da frequência natural e um sensor de temperatura (LIPTÁK, 2003).

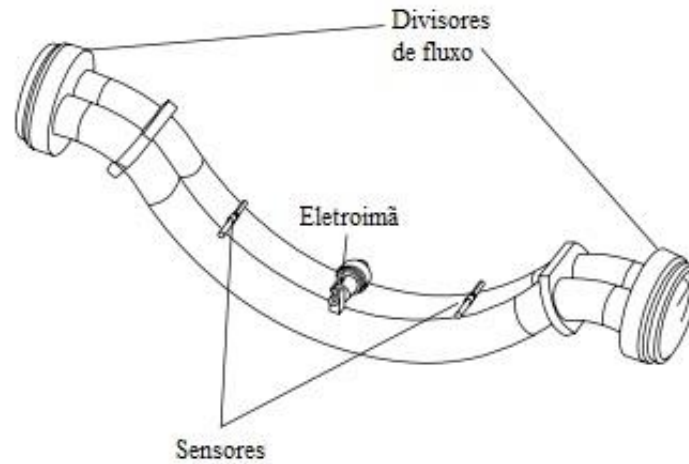


Figura 2.2: Os componentes típicos de um densímetro de Coriolis. Fonte: Adaptado de LIPTÁK (2003).

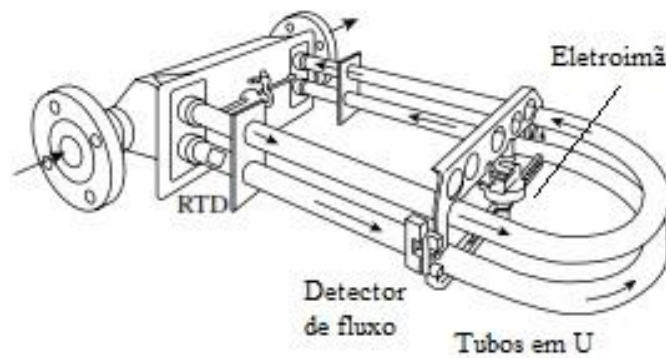


Figura 2.3: Ilustração padrão de um densímetro de Coriolis. Fonte: Adaptado de LIPTÁK (2003).

O fluido de processo é dividido em dois fluxos nos tubos. Uma bobina magnética faz com que os tubos oscilem em direção oposta na sua frequência natural. A oscilação dos tubos faz com que os detectores de fluxo produzam um sinal de tensão senoidal que referente a esse movimento. A frequência do sinal de tensão senoidal representa a frequência natural da vibração dos tubos (LIPTÁK, 2003).

Mudanças na densidade do fluido de processo modifica a massa do conjunto – tubo e fluido – alterando a frequência natural do sistema. Através da medida da variação da frequência da tensão senoidal, a densidade do fluido do processo é determinada (LIPTÁK, 2003).

A temperatura dos tubos afeta sua frequência natural de vibração. Se a temperatura do tubo aumentar, o tubo se torna mais elástico, o que ocasiona uma diminuição no valor da frequência natural mesmo embora a massa do sistema não mude. A medida de temperatura dos tubos é usada para corrigir a frequência natural dada pela mudança no módulo de elasticidade do tubo de fluxo. Um sensor de temperatura geralmente é usado para medição de temperatura (LIPTÁK, 2003).

A frequência natural de vibração é descrita pela Eq. (2.4):

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.5)$$

Onde:

ω_n = frequência natural, rads/s;

k = constante da mola, N/m;

m = massa do sistema, kg.

Para o medidor de Coriolis, a massa do sistema é a combinação da massa do fluido e da massa do tubo de fluxo e pode ser expressa pela Eq. (2.6).

$$m = \rho_f A_f l_t + \rho_t A_t l_t \quad (2.6)$$

Onde:

ρ_f = densidade do fluido, g/cm³;

ρ_t = densidade do material do tubo, g/cm³;

A_f = área da secção interna do tubo, cm²;

A_t = área da secção transversal do tubo, cm²;

l_t = comprimento do tubo, cm.

A constante da mola k , da Eq. (2.4), é uma função da geometria do material e das propriedades do material e determinada pela Eq. (2.7).

$$k = \frac{MEI}{I_t^3} \quad (2.7)$$

Onde:

M = constante modal;

E = modulo de elasticidade, kPa;

I = momento de inércia, cm^4 .

A frequência natural ω_n , da Eq. (2.4), também pode ser expressa como na Eq. (2.8).

$$\omega_n = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (2.8)$$

Onde:

f = frequência de oscilação, ciclos/seg;

T = período do tubo, seg.

Substituindo as Eq. (2.6), (2.7) e (2.8) na Eq. (2.6) e resolvendo em função de ρ_f , obtemos a Eq. (2.9).

$$\rho_f = \left(\frac{MEI}{4\pi^2 I_t^3 l_t A_f} \right) T^2 - \frac{\rho_t A_t}{A_f} \quad (2.9)$$

As variáveis que dependem da geometria do tubo e das propriedades dos materiais podem ser combinadas para obter as constantes de calibração, exibidas nas Eq. (2.10) e (2.11).

$$K_1 = \frac{(MEI)}{4\pi^2 I_t^3 l_t A_f} \quad (2.10)$$

$$K_2 = \frac{\rho_t A_t}{A_f} \quad (2.11)$$

Um fator de correção C_t é usado para compensar a variação no módulo de elasticidade do material E com a temperatura. A Eq. (2.9) pode ser reescrita como:

$$\rho_f = K_1 C_t T^2 - K_2 \quad (2.12)$$

Os valores das constantes de calibração são determinados pela medida do período de oscilação do tubo com dois fluidos de densidades conhecidas. Com as densidades dos fluidos e seus respectivos períodos de oscilação, um sistema de duas equações e duas incógnitas pode ser resolvido para obter K_1 e K_2 . O valor de C_t depende do material do tubo e é determinado pelo fabricante através de dados experimentais (LIPTÁK, 2003).

2.1.4 Medida de mistura através da capacitância

A capacitância é uma grandeza muito aplicada a sensores comerciais como acelerômetros e sensores de pressão, no entanto, muitos pesquisadores vêm trabalhando no desenvolvimento de sensores que utilizam a capacitância como princípio de medição. As áreas de pesquisa que se destacam na aplicação da medida da capacitância são: fração das fases ou visualização tomográfica de escoamento multifases e análise de misturas.

Nas análises de mistura homogêneas, especialmente em que um dos componentes é material polar, o GPICEEMA foi o pioneiro nestas pesquisas iniciadas em 1980. O primeiro pedido de patente foi realizado por BELO *et al.* (1982). Ainda em 1982 foi apresentado na II FEBRAN, conforme BELO *et al.* (1982). Em 1988 foi apresentado no seminário de instrumentação do PADCT – CNPQ conforme BELO *et al.* (1987). Em 1993 foi apresentado na SAE, conforme BELO e FONTES (1993). Foi apresentado na feira mundial de petróleo em 2004 e em 2012, conforme BELO *et al.* (2004) e BELO *et al.* (2012).

MENDONÇA (2008) utilizou um sensor capacitivo do tipo eletrodos interdigitados para avaliar a qualidade de combustíveis automotivos. O sensor é mergulhado na mistura de modo que a mesma preencha seus espaçamentos funcionando como seu dielétrico. O trabalho foi capaz de caracterizar amostras contendo misturas álcool e água, gasolina e álcool e gasolina e querosene.

LIBERT (2013) propôs um sensor capacitivo de placas côncavas não invasivo para determinar a fração de vazio em escoamentos bifásicos. Esses escoamentos são caracterizados pelo fluxo de duas substâncias imiscíveis. Valores de fração de vazio foram obtidos para escoamentos ar-água em uma bancada de testes.

QUEIROZ (2009) apresentou um sensor capacitivo do tipo eletrodos interdigitados tendo como objetivo principal a medida da capacitância elétrica em função da frequência em misturas de etanol e água. Os resultados mostraram a potencialidade da técnica ao diferenciar amostras em diferentes concentrações.

SOUZA (2013) estudou a qualidade da gasolina, comercializada nos postos revendedores de combustível, no que diz respeito à concentração de álcool etílico anidro combustível. As análises foram realizadas através de medidas da constante dielétrica utilizando um sensor capacitivo formado por dois cilindros concêntricos mergulhado na amostra. O método mostrou ser uma eficiente ferramenta para determinação do teor de álcool na gasolina.

2.2 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES TÉRMICAS

Neste capítulo serão descritas as principais técnicas utilizadas para determinar propriedades térmicas de sólidos e líquidos.

2.2.1 Fio quente

O método de fio quente é uma técnica que emprega um fluxo de calor transitório e mede o aumento de temperatura a uma distância conhecida de uma fonte de calor linear imerso na amostra de teste. STALHANE e PYK empregaram este método em 1931 para medir a condutividade térmica de sólidos e pós (STALHANE, 1931). O método assume um fluxo de calor radial unidimensional idealizado dentro da amostra isotrópica e homogênea, que é baseado na suposição de que a fonte de calor linear tem comprimento infinito e diâmetro infinitesimal como mostrado na Figura 2.4: Princípio de medição

através do método do fio quente. a) Fluxo de calor radial e unidimensional na amostra. b) Corrente elétrica de intensidade fixa passa através do fio quente. Quando uma corrente elétrica de intensidade constante passa através do fio quente, a condutividade térmica da amostra pode ser determinada a partir da temperatura resultante a uma distância conhecida do fio quente ao longo de um intervalo de tempo conhecido. O método do fio quente é comumente utilizado para medir materiais de baixa condutividade térmica (ABU-HAMDEH, 2001). Este método também tem sido utilizado para medir a condutividade térmica de líquidos.

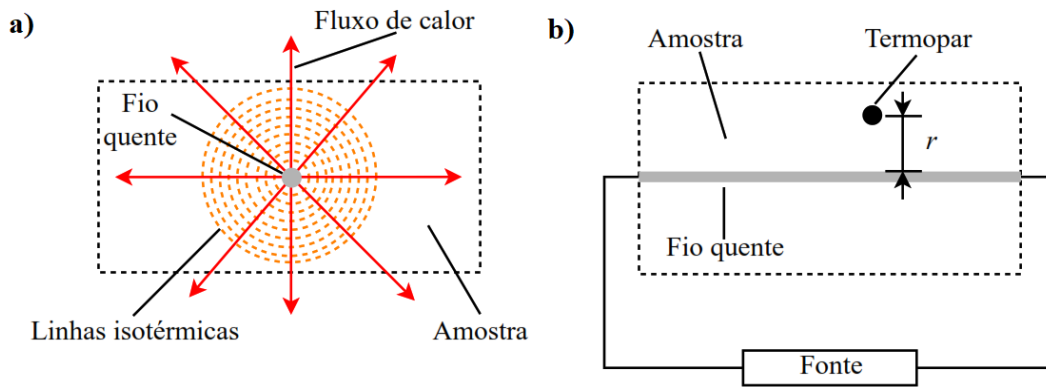


Figura 2.4: Princípio de medição através do método do fio quente. a) Fluxo de calor radial e unidimensional na amostra. b) Corrente elétrica de intensidade fixa passa através do fio quente. Fonte: Adaptado de FRANCO (2007).

O fio quente gera um pulso térmico por um tempo determinado com poder de aquecimento constante, isso produz linhas isotérmicas em um meio homogêneo infinito inicialmente em equilíbrio térmico. A temperatura transitória por um tempo suficientemente longo desde o início do aquecimento, pode ser expressa com boa aproximação por (FRANCO, 2007):

$$T(r, t) = \frac{p}{4\pi kL} \left[\ln \left(\frac{4\alpha t}{r^2} \right) \frac{r^2}{4\alpha t} - \frac{1}{4} \left(\frac{r^2}{4\alpha t} \right) - \dots - \gamma \right] \quad (2.13)$$

Para valores suficientemente grandes do tempo t , os termos $r^2/4\alpha t$ dentro do parêntese são insignificantes porque são muito menores que 1. A equação acima pode ser simplificada para:

$$T(r, t) = \frac{p}{4\pi kL} \left[\ln \left(\frac{4\alpha t}{r^2} \right) - \gamma \right] \quad (2.14)$$

O aumento de temperatura num ponto da amostra do tempo t_1 a t_2 é dado por:

$$\Delta T = T(t_2) - T(t_1) = \frac{p}{4\pi kL} \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (2.15)$$

A condutividade térmica é então obtida a partir da diferença de temperatura ΔT pelo logaritmo do tempo $\ln(t)$ expresso abaixo:

$$k = \frac{p}{4\pi [T(t_2) - T(t_1)]L} \ln \left(\frac{t_2}{t_1} \right) \quad (2.16)$$

Os atuais instrumentos de método de fio quente permitem mais de 1000 leituras de dados do aumento transitório da temperatura de tempos inferiores a 1ms até 1s (ou 10s, no caso de sólidos), juntamente com métodos de elementos finitos para estabelecer uma incerteza muito baixa (ASSAEL, 2010). Se aplicado corretamente, pode atingir incertezas abaixo de 1% para gases, líquidos e sólidos, e abaixo de 2% para nanofluidos (ASSAEL, 2010).

2.2.2 Método *Flash*

A resistência térmica do contato é uma importante fonte de erro nas medições de temperatura. O método *flash* emprega sensor de temperatura sem contato e não destrutivo para obter alta precisão (MIN, 2007). O método foi introduzido pela primeira vez por PARKER *et al.* (1961). Utiliza o aquecimento óptico como fonte instantânea de aquecimento, juntamente com uma técnica termográfica para detecção rápida de temperatura não invasiva. A amostra de teste é geralmente um material sólido em forma plana quando se quer medir a condutividade térmica ou, pode ser, uma estrutura multicamadas quando se deseja caracterizar a resistência de contato térmico.

Uma configuração de medição padrão para o método *flash* é mostrada na Figura 2.5a. Uma fonte de luz instantânea é usada para aquecer uniformemente o lado frontal da amostra e um detector mede a elevação de temperatura dependente do tempo na parte traseira. Assume-se que a condução de calor é unidimensional. A amostra é geralmente preparada pulverizando uma camada de grafite em ambos os lados para agir como um absorvente na parte frontal e como um emissor na parte traseira para detecção de temperatura (RUOHO, 2015). O termômetro de radiação infravermelha do lado traseiro deve ser rápido o suficiente para responder aos sinais de emissão, e a precisão da calibração de temperatura é geralmente de $\pm 0,2$ K (TONG, 2011). A curva de resposta dinâmica da temperatura na parte traseira (Figura 2.5b) é usada para ajustar a difusividade térmica. Quanto maior a difusividade térmica da amostra, mais rápida a transferência de calor e aumento de temperatura na parte traseira.

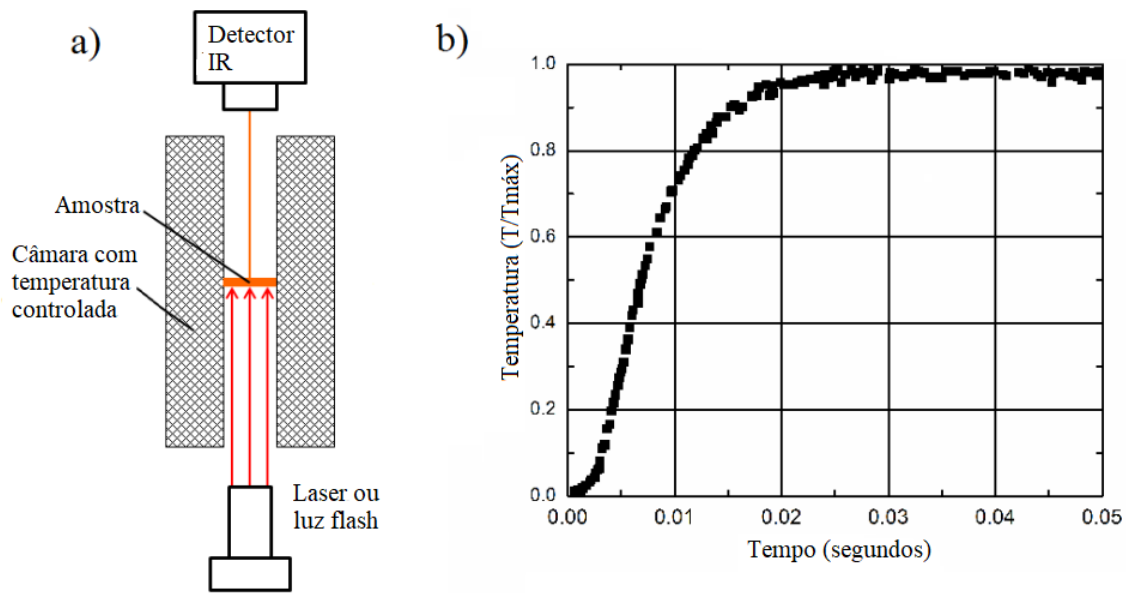


Figura 2.5: a) Princípio de medição do método *Flash*. b) Curva de aumento da temperatura na parte traseira da amostra. Fonte: Adaptado de CAMPBELL *et al.* (1999).

Teoricamente, a elevação da temperatura na amostra em função do tempo pode ser escrita como (PARKER, 1961):

$$T(t) = \frac{q}{\rho c_p d} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp\left(-\frac{n^2 \pi^2}{d^2} \alpha t\right) \right] \quad (2.17)$$

onde d é a espessura da amostra e α é a difusividade térmica. Para simplificar a equação Eq. 2.16, dois parâmetros adimensionais W e η podem ser definidos:

$$W(t) = \frac{T(t)}{T_{\text{máx}}} \quad (2.18)$$

$$\eta = \frac{\pi^2 \alpha t}{d^2} \quad (2.19)$$

$T_{\text{máx}}$ é a temperatura máxima na parte de traseira da amostra. Combinando as Eq. (2.16-2.18), tem-se:

$$W = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \exp(-n^2 \eta) \quad (2.20)$$

Quando W é igual a 0,5, significa que a temperatura da face posterior da amostra atinge metade de sua temperatura máxima, η é igual a 1,38, logo, a difusividade térmica α é calculada por (PARKER, 1961):

$$\alpha = \frac{1.38 d^2}{\pi^2 t_{1/2}} \quad (2.21)$$

Onde $t_{1/2}$ é o tempo que leva para a amostra aquecer até a metade da temperatura máxima na superfície traseira.

2.2.3 Método do fluxo de calor periódico

De acordo com SANTUCCI *et al.* (1986) este método foi proposto pela primeira vez por A.J. Angstrom, em 1863. Angstrom apresentou uma técnica experimental para determinação da condutividade térmica do cobre e do ferro. No método de Angstrom uma extremidade de uma barra longa, com seção transversal pequena, foi sujeita a uma

variação periódica na temperatura, sendo alternadamente aquecida e resfriada, em intervalos de tempos equivalentes. Da temperatura adquirida em dois pontos distintos do material, mensura-se a difusividade térmica. Desde então, pesquisadores vem desenvolvendo trabalhos baseados na técnica apresentada por Angstrom.

Em BHATTACHARYA *et al.* (2006) apresentou-se uma técnica baseada no método de Angstrom para determinação da condutividade da água pura. O trabalho proposto por (BHATTACHARYA, 2006) consiste em medir a diferença de temperatura, em diferentes pontos, de um cilindro preenchido com água. As variações de temperatura nas extremidades e em pontos no interior do cilindro dão origem ao valor da difusividade térmica. Logo, conhecendo a densidade e o calor específico do material, calcula-se a condutividade térmica.

SANTOS *et al.* (2010) propôs uma variação do método de Angstrom em procedimentos experimentais para determinação da difusividade térmica de determinados polímeros. Os resultados obtidos através destes experimentos atingiram uma boa precisão, entre 0,1 e 1 %, quando comparados aos valores identificados através dos métodos do fio-quente e flash.

SILVA (2014) desenvolveu dispositivo experimental capaz de gerar ondas térmicas com o objetivo de determinar a condutividade térmica dos materiais: aço ASTM A36, nylon e quartzo. Uma análise comparativa realizada entre os resultados adquiridos e os as propriedades térmicas determinadas pelos fabricantes dos materiais serviu de referência para validação do experimento.

ZHU (2016) apresentou um método modificado para medição simultânea da difusividade e condutividade térmica com alta precisão, levando em consideração o termo da perda de calor na equação de difusão de calor. As propriedades térmicas medidas em chapas de grafite comercial apresentaram boa concordância com seu valor nominal.

OLIVEIRA (2017) utilizou um método baseado na técnica de Angstrom, na qual fez-se o uso de um fluxo de calor periódico na amostra, destinado à identificação da difusividade térmica do aço inox AISI 304, do aço inox AISI 316 e de uma Liga com Memória de Forma (LMF) de NiTi. Um dispositivo experimental foi desenvolvido para aplicação do método. Os resultados obtidos, quando confrontados à literatura, podem ser considerados de boa precisão, tendo em vista que as diferenças percentuais ficaram abaixo de 10%.

PRASAD (2018) apresentou critérios para medir, com precisão, a difusividade térmica de materiais sólidos usando o método de Angstrom. São apresentados critérios

para os parâmetros importantes de medição, como potência do sistema térmico, forma de onda e frequência. Com base nesses critérios, o experimento foi realizado com uma variedade de materiais que apresentam baixas a altas difusividades térmicas, como: Teflon, G10, Liga de titânio (Ti6Al4V), aço inoxidável (SS316) e liga de alumínio (Al6061-T6). Os resultados indicaram que os valores de difusividade térmica medidos divergem dos dados da literatura em menos de 2,1%.

ZHANG (2019) desenvolveu dispositivo experimental, com base na teoria matemática de Angstrom, capaz de gerar um sinal de temperatura senoidal preciso a partir de um módulo termoeletrico. Neste estudo, foram utilizados cinco materiais de diferentes propriedades térmicas. Da substituição dos resultados experimentais no modelo matemático de Angstrom, foi calculada a difusividade e condutividade térmica dos materiais: cobre, prata, latão, alumínio e nitrato de alumínio, obtendo resultados com erro abaixo de 10%.

CAPÍTULO III

3. PROBLEMA FÍSICO E MODELO MATEMÁTICO

3.1 PROBLEMA FÍSICO

O sistema físico, em questão, é composto por um tubo cilíndrico de raio interno r_0 , preenchido com uma mistura de água-álcool que possui uma temperatura inicial uniforme (T_0). A parede externa do tubo está submetida a um fluxo de calor periódico imposto por um sistema de controle de temperatura que se propaga pela mistura gerando um campo de temperatura periódico na região amostra com atenuação da temperatura de pico e um ângulo de defasem em relação ao sinal de temperatura da parede. A Figura 3.1 ilustra a representação do problema físico

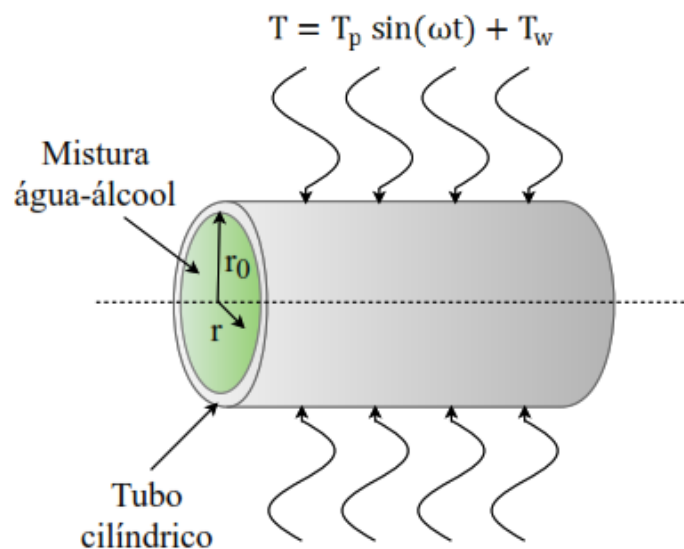


Figura 3.1: Representação do problema físico.

3.2 MODELO MATEMÁTICO

A equação da energia, que governa o problema, foi resolvida pela técnica da transformada integral generalizada (GITT), que se apresenta como um consagrado método para resolução de problemas de difusão de calor e massa.

O problema a ser resolvido ponderando as descrições expostas do sistema físico e adotando as considerações seguintes com o objetivo de simplificar o modelo:

- Equação de condução de calor em coordenadas cilíndricas;
- O sistema é isolado e negligencia os efeitos das perdas no ambiente;
- Inicialmente em equilíbrio térmico;
- Gradientes de temperatura nas direções longitudinal e angular não foram levados em consideração;
- Propriedades térmicas constantes;
- O comprimento do cilindro é considerado muito maior do que seu raio.

De acordo com as suposições acima, pode-se escrever a equação da energia, as condições de contorno e inicial, respectivamente, da seguinte forma:

Equação da energia:

$$\rho c_p \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = k \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right); \quad 0 < r < r_0, t > 0 \quad (3.1)$$

Condições de contorno:

$$r = 0 \rightarrow \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} = 0; \quad t > 0 \quad (3.2)$$

$$r = r_0 \rightarrow T(r, t) = T_p \sin(\omega t) + T_w; \quad t > 0 \quad (3.3)$$

Condição inicial:

$$t = 0 \rightarrow T(r, 0) = T_0 \quad (3.4)$$

3.2.1 Adimensionalização do problema

Os grupos adimensionais empregados nas equações acima são:

$$R = \frac{r}{r_0} \quad ; \quad \tau = \frac{\alpha t}{r_0^2} \quad ; \quad \theta(R, \tau) = \frac{T(r, t) - T_w}{T_0 - T_w} \quad (3.5a-c)$$

Os parametros adimensionais foram aplicados nas Equações 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4.

As equações adimensionalizadas tornaram-se:

Equação da energia adimensionalizada:

$$\frac{\partial \theta(R, \tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left[R \frac{\partial \theta(R, \tau)}{\partial R} \right]; \quad 0 < R < 1, \tau > 0 \quad (3.6)$$

Condições de contorno adimensionalizadas:

$$R = 0 \rightarrow \frac{\partial \theta(R, \tau)}{\partial R} = 0; \quad \tau > 0 \quad (3.7)$$

$$R = 1 \rightarrow \theta(1, \tau) = \theta_p(\tau) = \frac{T_p \sin\left(\frac{\omega r_0^2 \tau}{\alpha}\right)}{T_0 - T_w}; \quad \tau > 0 \quad (3.8)$$

Condição inicial adimensional:

$$\tau = 0 \rightarrow \theta(R, 0) = 1 \quad (3.9)$$

3.2.2 Problema auxiliar de autovalor na direção radial

O problema auxiliar, ou de Sturm-Liouville, para o campo de temperatura pode ser escrito por um sistema de equações diferenciais de segunda ordem com as respectivas condições de contorno abaixo:

$$\frac{1}{R} \frac{d}{dR} \left[R \frac{d\psi_i(R)}{dR} \right] + \mu_i^2 \psi_i(R) = 0 \quad (3.10)$$

$$R = 0 \rightarrow \frac{d\psi_i(R)}{dR} = 0 \quad (3.11)$$

$$R = 1 \rightarrow \psi_i(R) = 0 \quad (3.12)$$

O método da contagem de sinal desenvolvido por (Mikhailov e Vulchanov, 1983) foi utilizado para a determinação dos autovalores (μ_i), das autofunções, $\psi(R)$, e das normas (N_i).

3.2.3 Transformação integral para o campo de temperatura

O par transformada-inversa é dado por:

$$\bar{\theta}_i(\tau) = \frac{1}{N_i^{1/2}} \int_0^1 R \psi_i(R) \theta(R, \tau) dR \quad \text{Transformada} \quad (3.13)$$

$$\theta(R, \tau) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\psi_i(R) \bar{\theta}_i(\tau)}{N_i^{1/2}} \quad \text{Inversa} \quad (3.14)$$

Após tratamento analítico da Eq. (3.6) por operadores integrais, usando a definição da transformada integral, dada pela Eq. (3.13), bem como o problema auxiliar definido pelas Eq. (3.10, 3.11 e 3.12), pode-se transformar o problema original em um sistema infinito de equações diferenciais ordinárias desacopladas da forma:

$$\frac{d\bar{\theta}_i(\tau)}{d\tau} + \mu_i^2 \bar{\theta}_i(\tau) = - \frac{1}{N_i^{1/2}} \frac{d\psi_i(1)}{dR} \theta(1, \tau) \quad (3.15)$$

O sistema de equações diferenciais ordinárias da Eq. (3.15), com condição inicial dado pela Eq. (3.9) tem como solução formal:

$$\begin{aligned}
& \bar{\theta}_i(\tau) \\
&= \bar{\theta}_i(0)e^{-\mu_i^2\tau} \\
&- \frac{1}{N_i^{1/2}} \frac{d\psi_i(1)}{dR} \left(\frac{T_p}{T_0 - T_w} \right) \left[\frac{-\frac{\omega r_0^2}{\alpha} \cos\left(\frac{\omega r_0^2 \tau}{\alpha}\right) + \mu_i^2 \sin\left(\frac{\omega r_0^2 \tau}{\alpha}\right) + \frac{\omega r_0^2}{\alpha} e^{-\mu_i^2 \tau}}{\frac{\omega^2 r_0^4}{\alpha^2} + \mu_i^4} \right] \quad (3.16)
\end{aligned}$$

Transformação integral aplicada na condição inicial dada pela Eq. (3.9):

$$\bar{\theta}_i(0) = \bar{f}_i = \int_0^1 \frac{R\psi_i(R)}{N_i^{1/2}} dR \quad (3.17)$$

A solução geral do campo de temperatura pode agora ser obtida a partir da fórmula da inversa Eq. (3.14).

CAPÍTULO IV

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 AMOSTRAS

Para realização deste trabalho, foram utilizadas amostras de álcool etílico anidro (AEA) grau PA e água destilada. O AEA grau PA e a água destilada foram adquiridos em lojas de produtos químicos. As especificações do AEA grau PA, de acordo com nota técnica Agência Nacional do Petróleo (ANP), são apresentados pela Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Especificações do AEHC e do AEA grau PA, segundo ANP.

Substância	Densidade (kg.m ³)	Teor alcoólico (%m/m)	Temperatura (°C)
AEA grau PA	791,5 máx.	99,5 mín.	20

4.1.1 Preparação das misturas

As amostras foram preparadas com frações volumétricas de aproximadamente: 0,3, 4,2, 8,2, 12,1, 16,2 e 19,7 % de AEA grau PA misturado com água destilado, totalizando um volume aproximado de 1000 ml para cada amostra. Para o preparo das amostras, foi utilizada uma proveta para medição volumétrica de seus componentes.

4.1.2 Medidas de massa específica

As densidades das amostras foram determinadas a partir de um densímetro, um termômetro e uma proveta. O densímetro é calibrado para realizar medidas na temperatura

de 20°C, para medição em temperatura ambiente é necessário realizar a correção da medição através da medida de temperatura.

O instrumento de medição da densidade foi um densímetro de vidro de haste interna graduada fabricado pela Incoterm, conforme especificações da Portaria INMETRO: n°124 de 01/08/2005. As especificações do densímetro são apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Especificações técnicas do densímetro.

Escala (g/ml)	0,950 a 1,000
Divisão (g/ml)	0,0005
Limite de erro (g/ml)	$\pm 0,0005$

Para medida de temperatura foi utilizado um termômetro tipo espeto Incoterm 6132. Com características técnicas especificadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Especificações técnicas do termômetro.

Faixa de medição (°C)	-45 a +230
Resolução (°C)	0,1
Exatidão (°C)	1

4.1.3 Medidas de grau alcoólico

As medidas de teor alcoólico serão obtidas através de um software de tabelas alcoolométricas desenvolvido pela Gatec, em parceria com a Única (União da Indústria de Cana-de-Açúcar). A interface do programa é exibida na Figura 4.1.

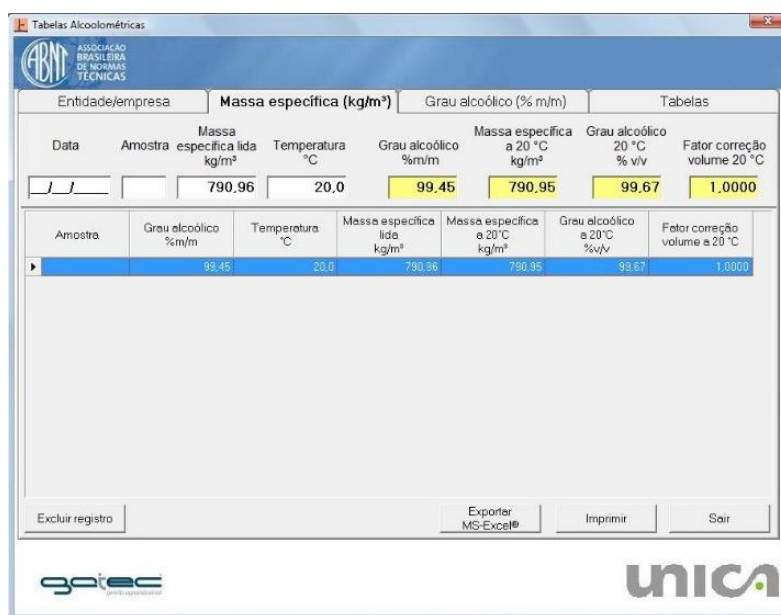


Figura 4.1: *Software* de tabelas alcoométricas.

Os parâmetros de entrada do programa são a massa específica em kg/m^3 e a temperatura em $^{\circ}\text{C}$. O programa calcula o valor do grau alcoólico em massa $\% \text{m/m}$ e volume $\% \text{v/v}$.

4.1.4 Medidas de propriedades termofísicas

Os valores teóricos das difusividades térmicas das misturas, adotados como parâmetro para simulação computacional, foram obtidos do software solucionador de equações de engenharia (EES). A tabela abaixo contém os valores de difusividade térmica para cada concentração analisada. Nas faixas de temperaturas avaliadas no presente trabalho de 36°C a 52°C , observou-se uma pequena variação nos valores de difusividade térmica, de modo que os consideramos constante a partir de um valor médio.

Tabela 4.4: Valores das propriedades termofísicas para diferentes frações da mistura água-álcool obtidas com o auxílio do software (EES).

Concentração (%)	Difusividade média (m^2/s)
0	$1,51 \times 10^{-7}$
4	$1,45 \times 10^{-7}$
8	$1,37 \times 10^{-7}$
12	$1,30 \times 10^{-7}$
16	$1,24 \times 10^{-7}$
20	$1,18 \times 10^{-7}$

4.2 CONFIGURAÇÃO EXPERIMENTAL

Este trabalho envolve estudos teóricos e experimentais a partir do desenvolvimento de um controle térmico e eletrônica de transdução. Para realização experimental deste estudo foi desenvolvido um aparato experimental capaz de determinar o teor alcoólico para misturas com teor de até 20% de álcool. Uma fotografia do equipamento de ensaio com seus elementos é apresentada na Figura 4.2. Esses elementos são: bloco do equipamento (1) com as pastilhas Peltiers (2) para controle de arrefecimento e aquecimento, um recipiente (3) contendo a amostra a ser analisada, uma bomba (4), situada na entrada do equipamento, capaz de aspirar a amostra que irá preencher todo o tubo e um recipiente (5) de descarte da amostra analisada.

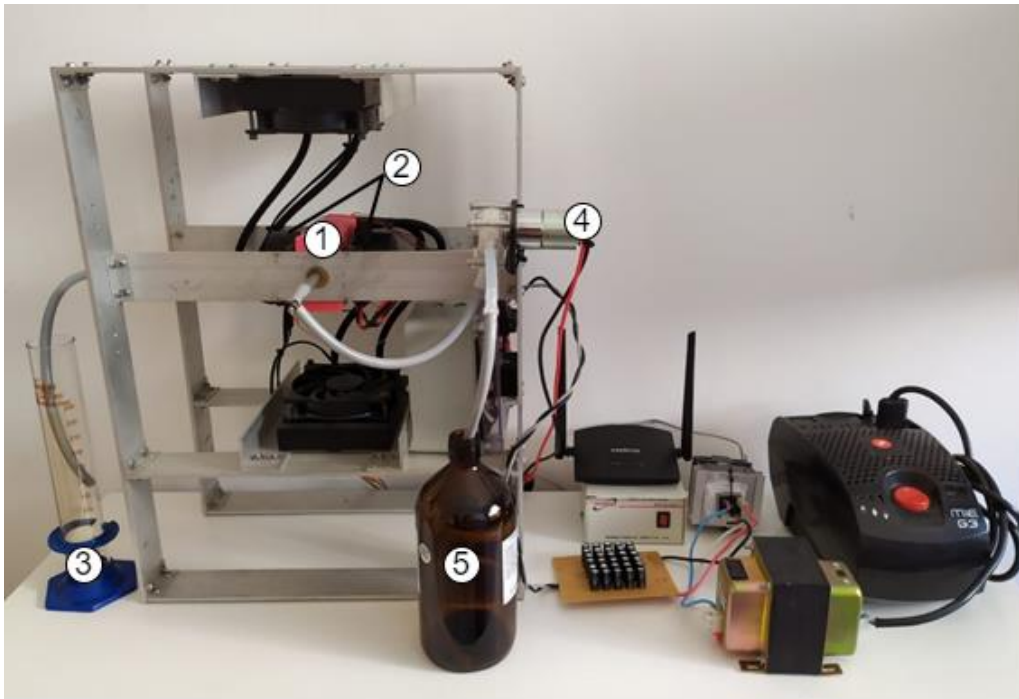


Figura 4.2: Bancada experimental.

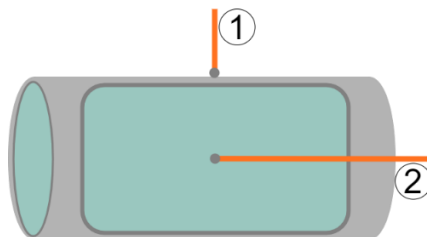


Figura 4.3: Configuração dos termopares no tubo: (1) termopar da parede e (2) termopar da amostra.

O Figura 4.3 ilustra a região do tubo onde a amostra é caracterizada. Para realizar as medidas do grau alcoólico, a bomba é ligada por um instante de tempo suficiente para expulsar bolha e resíduos na parede interna do tubo e preencher completamente o sistema com a amostra. Uma dada mistura específica terá um valor característico de difusividade térmica. De modo que diferentes concentrações destas misturas apresentam valores diferentes de difusividade térmica.

4.2.1 Elementos eletrônicos

A Figura 4.4 ilustra os elementos eletrônicos que compõem o equipamento experimental para realização dos ensaios.

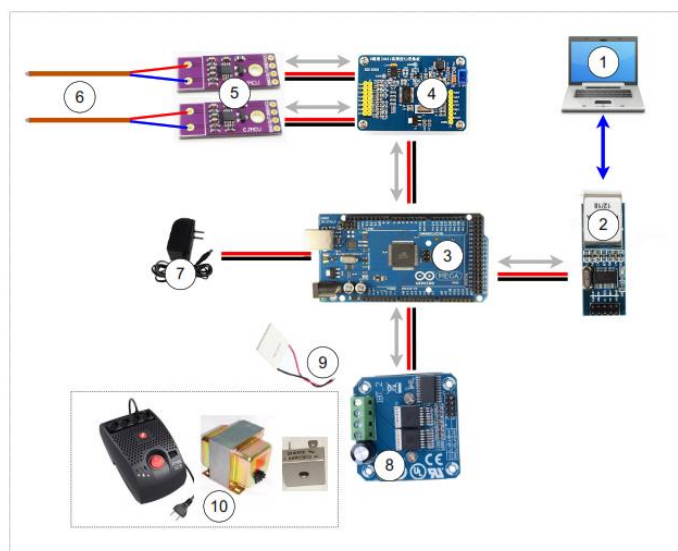


Figura 4.4: Elementos eletrônicos do sistema: (1) computador, (2) módulo *ethernet*, (3) arduino mega, (4) módulo de aquisição de dados, (5) amplificadores de instrumentação, (6) termopares, (7) fonte de alimentação, (8) drive de potência tipo ponte-h, (9) Peltier's e (10) fonte de potência.

Os sensores de temperatura empregados foram termopares tipo T (6), devido à sua sensibilidade na faixa de temperatura de interesse, intervalo de 10 a 80° C, e, também, pela sua velocidade de reposta. Para condicionamento dos sinais de temperatura, foram utilizados amplificadores de instrumentação (5), de precisão, para termopar com compensação interna da junção fria de fabricação da *Analog Devices* (ad8495). A aquisição dos dados de temperatura foi realizada através do módulo de aquisição de dados

(4) composto por um conversor analógico digital (ads1256 de fabricação da *Texas Instruments*) com resolução de 24 bits de alta precisão. No arduino mega (3), alimentado com fonte linear (7), foi implementado um módulo de *real time* dividido em três *tasks*: a primeira para obter os dados do módulo de aquisição; a segunda, responsável pela gerência do controle do sistema térmico; e a terceira destinada a comunicação que envia pacotes dados através do módulo *ethernet* (2) para o computador (1), onde os dados são analisados. Para controle dos atuadores de aquecimento e arrefecimento do sistema térmico utilizou-se um circuito de potência (tipo ponte-h) (8) com duas entradas de sinais que controlam a tensão e o sentido da corrente de saída de potência, onde são ligados os elementos atuadores Peltier's (9). O circuito é alimentado com uma fonte de potência (10) de tensão de 12VDC, capaz de fornecer corrente de até 20A.

4.3 CONTROLE DE TEMPERATURA

Foi desenvolvido um sistema de controle térmico capaz de impor um fluxo de calor periódico na parede do tubo do aparato experimental. Para isso, foi utilizado um controlador PID.

4.3.1 Controlador PID

O controlador PID está entre um dos mais utilizados atualmente. Cerca de 90 a 95% de todos os problemas de controle são resolvidos com este tipo de controle. Ele se tornou um componente fundamental para o controle de processos. O controlador PID passou por muitas mudanças de tecnologia. Os primeiros controladores foram baseados em relés, posteriormente foram substituídos por circuitos eletrônicos e ultimamente por microprocessadores. Embora os controladores PID sejam muito comuns, eles nem sempre são utilizados da forma correta. Os controladores são muitas vezes mal sintonizados. Um dos motivos que contribuem para uma má sintonia se deve ao fato de que se torna mais difícil ajustar três parâmetros por tentativa e erro (LEVINE, 1999).

4.3.2 Estrutura do controlador PID

Em um controlador PID o sinal de controle é gerado pela soma de três termos. A lei de controle que descreve o controlador é:

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (4.1)$$

Onde u é a variável de controle e e é o erro. A variável de controle é então a soma de três termos: o termo proporcional P (proporcional ao erro), o termo I (proporcional a integral do erro) e o termo D (proporcional à derivada do erro). Os parâmetros do controlador são: o ganho proporcional K , tempo integral T_i e tempo derivativo T_d (ASTROM, 1995).

No caso de um controle puramente proporcional, a equação de controle pode ser representada da seguinte forma:

$$u(t) = K e(t) + u_b \quad (4.2)$$

A ação proporcional do sinal de controle é simplesmente proporcional ao erro. A variável u_b é um desvio. Quando o erro e é igual a zero, a variável de controle recebe o valor $u(t) = u_b$. O desvio u_b é frequentemente fixado em $(u_{max} - u_{min})/2$, mas pode ser ajustado manualmente para que o erro de estado estacionário seja zero na referência desejada.

A principal função da ação integral é certificar que a saída do processo esteja de acordo com o valor desejado no estado estacionário. O controle proporcional frequentemente apresenta um erro de estado estacionário. Com a ação integral, um pequeno erro positivo irá sempre aumentar o sinal de controle e um pequeno erro negativo irá sempre diminuir o sinal de controle não importando o quão pequeno que seja o erro. Este simples argumento revela que o erro de estado estacionário será sempre zero com a ação integral. A ação integral tem a seguinte forma (ASTROM, 1995):

$$u(t) = \frac{K}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (4.3)$$

O propósito da ação derivativa é melhorar a estabilidade em malha fechada. A instabilidade poder ser entendida da seguinte forma, devido à dinâmica do processo, poderá levar tempo para que uma mudança na variável de controle seja percebida na saída do processo. Então, o termo derivativo corrige o erro em função do atraso do sistema de controle. A ação de um controlador proporcional e derivativo pode ser interpretada como sendo um controlador proporcional atuando antecipadamente na saída do processo, onde a predição é baseada na extrapolação linear do erro por uma curva tangente ao erro. A estrutura básica de um controlador PD é (ASTROM, 1995):

$$u(t) = K \left(e(t) + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (4.4)$$

4.3.3 Método heurístico de Ziegler-Nichols

Quando o modelo matemático de uma planta pode ser facilmente obtido, é possível aplicar várias técnicas para determinar os parâmetros do controlador para se conhecer a resposta transitória e permanente de um sistema de controle em malha fechada. Entretanto, se a planta é extremamente complexa de modo que seu modelo matemático não possa ser facilmente determinado, então não é possível encontrar uma solução analítica para o projeto do controlador PID, diante disto, podemos recorrer à uma aproximação experimental para sintonia do controlador PID (OGATA, 2010).

O processo de seleção dos parâmetros do controlador para se conhecer o desempenho do sistema é conhecido como sintonia do controlador. Ziegler-Nichols determinaram regras para sintonia de controladores PID, ou seja, encontrar os valores de K_p , T_i e T_d , baseado experimentalmente na resposta ao degrau ou baseado no valor de K_p que resulta na estabilidade marginal quando apenas o ganho proporcional é utilizado. As regras de sintonia apresentadas por Ziegler-Nichols são muito convenientes quando o modelo matemático da planta não é conhecido, mas elas também podem ser aplicadas a sistemas onde se conhece o modelo matemático (OGATA, 2010).

Ziegler-Nichols propôs regras para determinar os valores do ganho proporcional, tempo integral e tempo derivativo com base nas características da resposta transiente de uma dada planta. Tal determinação dos parâmetros de controle PID ou sintonia de controlador PID pode ser realizada por engenheiros em campo através de experimentos na planta (OGATA, 2010).

O método proposto por Ziegler-Nichols baseia-se apenas na ação do controle proporcional, aumenta-se o ganho K_p (de 0 até um valor crítico K_{cr}), no qual a saída exibirá uma oscilação com amplitude sustentada, como exibido na Figura 4.5.

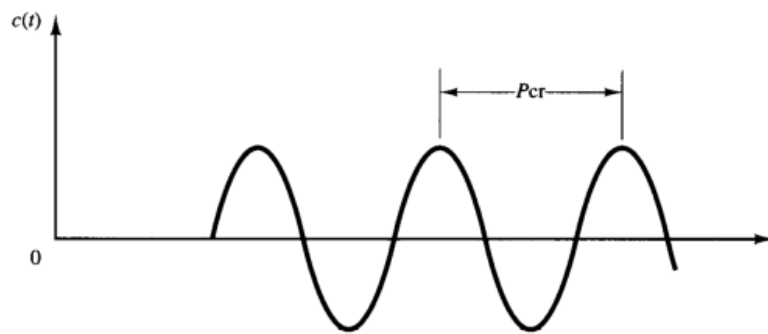


Figura 4.5: Oscilação sustentada com P_{cr} (P_{cr} é medido em minutos).

Ziegler-Nichols sugerem que os valores atribuídos aos parâmetros K_p , T_i e T_d deve ser calculado de acordo com a Tabela 4.5.

Tabela 4.5: Regra de sintonia de Ziegler-Nichols baseada no ganho crítico K_{cr} e no período crítico P_{cr} .

Tipo do controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.2 K_{cr}$	∞	0
PI	$0.18 K_{cr}$	$0,8 P_{cr}$	0
PID	$0.25 K_{cr}$	$0.5 P_{cr}$	$0.12 P_{cr}$

4.4 SOFTWARE

O LabVIEW é uma plataforma de desenvolvimento que utiliza uma linguagem de programação visual desenvolvido pela National Instruments. A linguagem gráfica, chamada de linguagem G, é uma linguagem de fluxo de dados que permite a execução do código em paralelo. Isso faz do LabVIEW uma poderosa ferramenta no desenvolvimento de software para aquisição de dados, automação e controle industrial.

Os programas em LabVIEW são chamados de Virtual Instruments, ou VI's, porque sua aparência e operação imitam instrumentos físicos, tal como osciloscópios e multímetros. O LabVIEW contém um conjunto abrangente de ferramentas para aquisição, análise e armazenamento de dados. Na Figura 4.6 é exibido o painel frontal de uma aplicação desenvolvida em Labview.

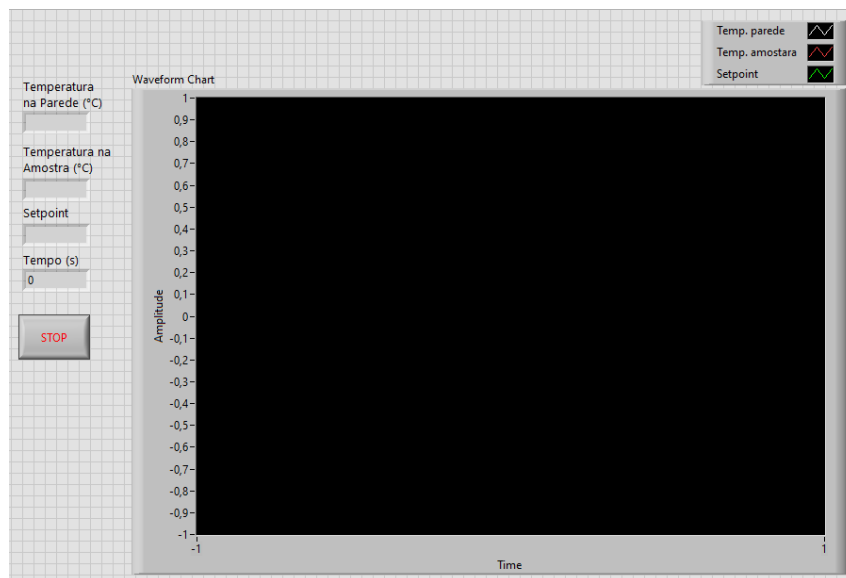


Figura 4.6: Painel frontal em LabVIEW.

O software desenvolvido é responsável pelo gerenciamento do sistema de controle térmico e pelas medidas de temperatura no centro do tubo. O comportamento do sistema térmico pode ser visualizado no gráfico plotado em tempo real, em valor numérico e no arquivo criado pelo programa onde todos os dados são salvos. Os valores que indicam a temperatura da parede e da amostra também podem ser visualizados na forma numérica. Os dados são amostrados e exibidos na interface num intervalo de 1 segundo. Os sinais de temperaturas foram analisados através da função *Peak Detector* que aplica o método dos mínimos quadrados recursivos para determinar os valores dos picos, vales e suas respectivas localizações. Para calcular a defasagem ($\Delta\theta$) entre os sinais de temperatura, calcula-se o período da senoide, da parede, a partir da localização dos picos. Da diferença dos picos entre a senoide da amostra e da parede obtém-se a defasagem no tempo. A defasagem em radianos pode ser obtida a partir de uma regra de três fazendo a equivalência entre a defasagem no tempo e radianos.

CAPÍTULO V

5. RESULTADOS

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados teóricos obtidos através de código computacional escrito em linguagem de programação FORTRAN, utilizando o software Fortran PowerStation 4.0. Os resultados apresentados permitiram avaliar a influência dos parâmetros sobre a temperatura no centro do tubo, viabilizando um melhor dimensionamento no estudo experimental desenvolvido.

5.2 RESULTADOS TÉORICOS

Os resultados obtidos mostram que as perturbações harmônicas na parede do tubo tendem a se propagar pelo fluido até chegar ao centro do tubo com diferentes amplitudes e fases, de acordo com a concentração analisada. Os parâmetros mais relevantes envolvidos nesta análise são: a difusividade térmica da mistura, o raio do tubo, período e amplitude da oscilação térmica.

5.2.1 Difusividade térmica

Com auxílio do software solucionador de equações de engenharia (EES), que possui uma biblioteca própria de funções termofísicas pré-definidas, obtivemos as difusividades das misturas analisadas. Os valores de difusividade térmica, para diferentes concentrações das misturas água-álcool em função das concentrações e temperaturas, são apresentados no gráfico a seguir.

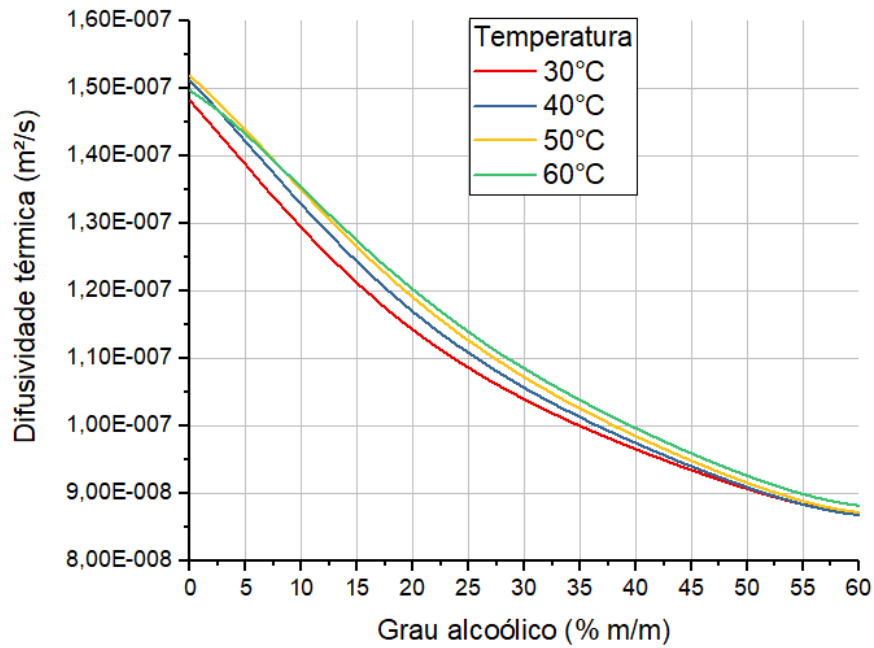


Figura 5.1: Curvas de difusividade térmica pela concentração para diferentes temperaturas.

Observando as curvas de difusividade térmica, apresentadas na Figura 5.1, é possível perceber que seu comportamento é semelhante a uma função assintótica, ou seja, à medida que a concentração alcoólica aumenta os valores de difusividade térmica tendem a ficar cada vez mais próximos, a partir de 20% de álcool. Com o objetivo de obter maior sensibilidade de medição da concentração da mistura água-álcool, escolhemos a região da curva, entre 0% e 20%, onde seu comportamento é aproximadamente linear.

5.2.2 Análise paramétrica

Os valores das simulações obtidos com o algoritmo computacional implementado em Fortran foram validados a partir da comparação com os resultados obtidos do problema resolvido numericamente pela rotina NDSolve do software *Mathematica*. Os resultados foram comparados nas seguintes condições: amplitude térmica na parede do tubo de $5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, raio de 4 mm, frequência de 0,012 Hz e difusividade térmica de $1,45 \cdot 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$. No gráfico abaixo, temos as curvas de temperatura em função do tempo.

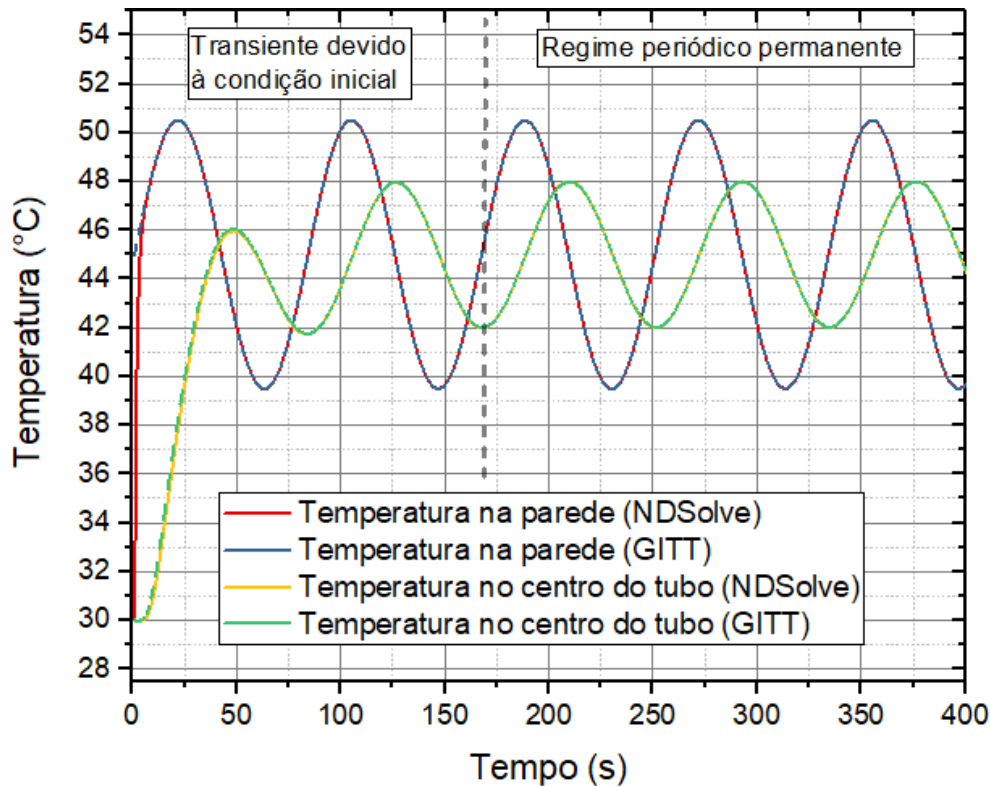


Figura 5.2: Curvas de temperatura em função do tempo para amplitude $5,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, raio de 4 mm, frequência de $0,012\text{ Hz}$ e difusividade térmica de $1,45 \cdot 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$.

Analisando as curvas de temperatura da Figura 5.2, percebe-se que até aproximadamente 170 segundos o campo de temperatura tem comportamento transiente devido à condição inicial, após este tempo, o campo térmico entra no regime periódico permanente, ou seja, o sinal se repete ao longo do tempo. As variações da temperatura de pico e ângulo de fase dos sinais de temperatura, aqui avaliadas, foram obtidas do campo de temperatura em regime periódico permanente.

Na Figura 5.2, temos também, a comparação das curvas de temperatura, onde pode-se perceber a excelente concordância entre os resultados obtidos através da GITT e da rotina NDSolve.

Para resolver o problema matemático independente de dimensionamento, foi realizado o procedimento de adimensionalização. Na análise paramétrica, realizamos o processo de dimensionalização que consiste em utilizar as Equações 3.5a, 3.5b e 3.5c do capítulo 3 para retomar as grandezas dimensionais. Os valores de temperatura, raio e tempo, dimensionais e adimensionais, podem ser observados nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3, respectivamente.

Tabela 5.1: Processo de dimensionalização da temperatura.

$\theta(R, \tau) = \frac{T(r, t) - T_w}{T_0 - T_w}$			
T_0	T_w	$\theta(R, \tau)$	$T(r, t)$
30,0	45,0	0,0	45,0
30,0	45,0	0,2	42,0
30,0	45,0	0,4	39,0
30,0	45,0	0,6	36,0
30,0	45,0	0,8	33,0
30,0	45,0	1,0	30,0

Tabela 5.2: Processo de dimensionalização do raio.

$R = \frac{r}{r_0}$		
r_0	R	r
0,004	0,0	0,000
0,004	0,2	0,001
0,004	0,4	0,002
0,004	0,6	0,002
0,004	0,8	0,003
0,004	1,0	0,004

Tabela 5.3: Processo de dimensionalização do tempo.

$\tau = \frac{\alpha t}{r_0^2}$			
r_0	α	τ	t
0,004	$1,44 \cdot 10^{-7}$	0,0	0,000
0,004	$1,44 \cdot 10^{-7}$	0,2	22,222
0,004	$1,44 \cdot 10^{-7}$	0,4	44,444
0,004	$1,44 \cdot 10^{-7}$	0,6	66,667
0,004	$1,44 \cdot 10^{-7}$	0,8	88,889
0,004	$1,44 \cdot 10^{-7}$	1,0	111,111

Na análise, avaliou-se a influência da amplitude da oscilação térmica na parede do tubo sobre a dinâmica de temperatura no centro do tubo. Com a finalidade de obter respostas que viabilizassem as aferições experimentais, foram realizadas simulações com

três valores distintos - 3,0, 6,0 e 8,0°C - de amplitude, raio de 4mm e frequência de 0,006Hz. Os resultados são apresentados nos gráficos abaixo.

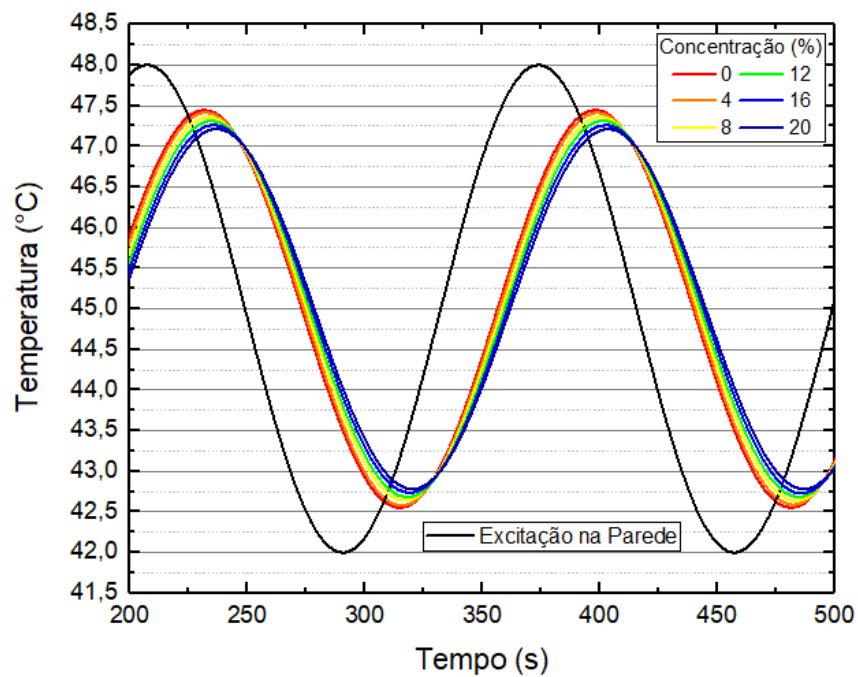


Figura 5.3: Curvas de temperatura em função do grau alcoólico para amplitude de 3,0°C.

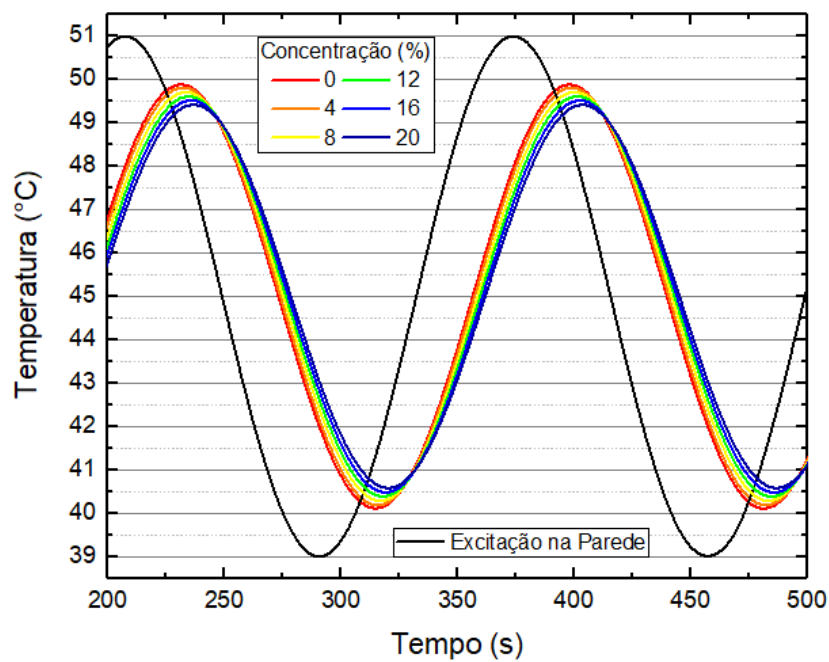


Figura 5.4: Curvas de temperatura em função do grau alcoólico para amplitude de 6,0°C.

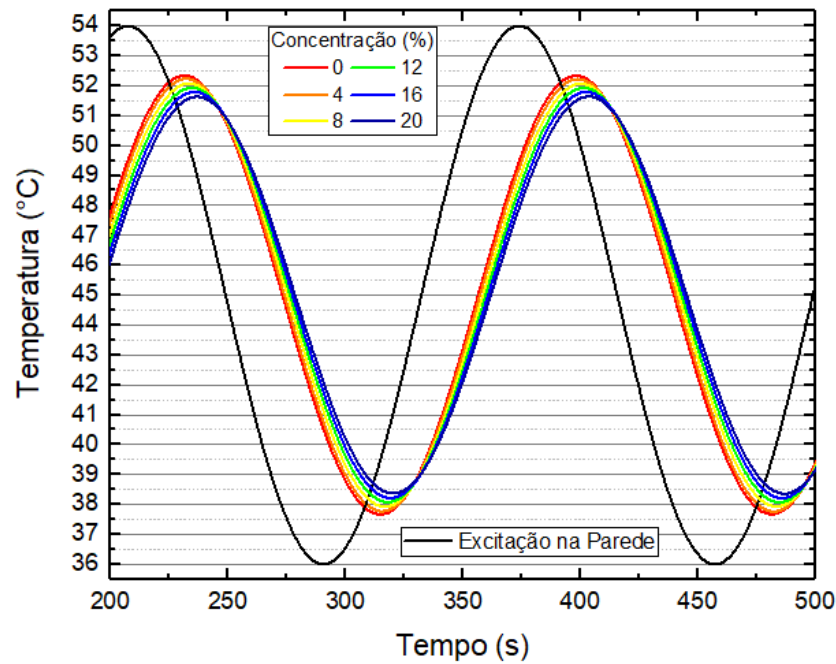


Figura 5.5: Curvas de temperatura em função do grau alcoólico para amplitude de 9,0°C.

As Figuras 5.3, 5.4 e 5.5 apresentam a relação entre as curvas de temperaturas no centro do tubo e a curva do fluxo de calor periódico na parede. Através das figuras acima, pode-se observar um crescimento gradual nos valores de ΔT_{p-a} (variação da temperatura de pico entre amostra e parede) à medida que aumentamos a amplitude da excitação periódica, ou seja, os sinais adquiridos no centro tendem a aumentar a diferença de temperatura de pico para cada concentração, ao passo que, os valores de $\Delta \theta_{p-a}$ (variação do ângulo de fase entre amostra e parede) se mantêm constante. A Tabela 5.4 apresenta os resultados de $\Delta T_{m\acute{a}x}$ (variação máxima das temperaturas de pico entre as amostras) e $\Delta \theta_{m\acute{a}x}$ (variação máxima dos ângulos de fase entre as amostras) em função da variação da amplitude.

Tabela 5.4: Valores de $\Delta T_{m\acute{a}x}$ e $\Delta \theta_{m\acute{a}x}$ no centro do tubo em função da variação da amplitude.

Amplitude (°C)	Frequência (Hz)	Raio (mm)	$\Delta T_{m\acute{a}x}$ (°C)	$\Delta \theta_{m\acute{a}x}$ (rad)
3,0	0,006	4,00	0,233	0,206
6,0	0,006	4,00	0,466	0,205
9,0	0,006	4,00	0,699	0,205

Observando a tabela acima, pode-se afirmar que maiores amplitudes do fluxo de calor periódico provocam maiores valores de $\Delta T_{\text{máx}}$. No entanto, valores de amplitude muito elevados provocam grandes variações térmicas que, na prática, tornam-se mais difíceis de se reproduzir experimentalmente devido a limitações na dinâmica do sistema de controle de temperatura.

No intuito de perceber a influência que a frequência da oscilação térmica provocaria nos sinais térmicos medidos pelo termopar imerso na amostra, foram realizadas simulações considerando as seguintes frequências de excitação: 0,012 e 0,024Hz. Nas figuras abaixo, podemos visualizar os resultados das curvas de temperatura, provocadas pela oscilação térmica na parede, para as simulações das frequências analisadas.

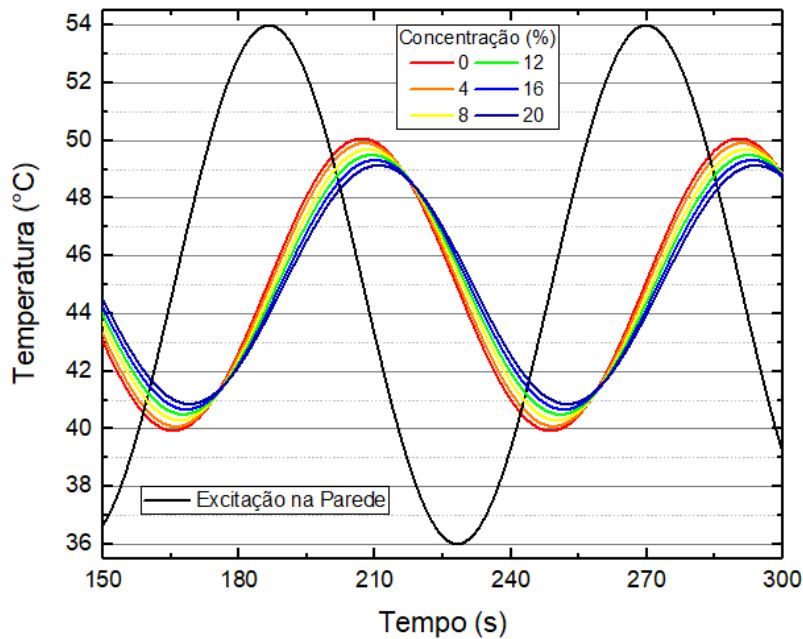


Figura 5.6: Variação da temperatura de pico em função do grau alcoólico para um tubo com raio de 4 mm, frequência de 0,012Hz e amplitude de 9,0°C.

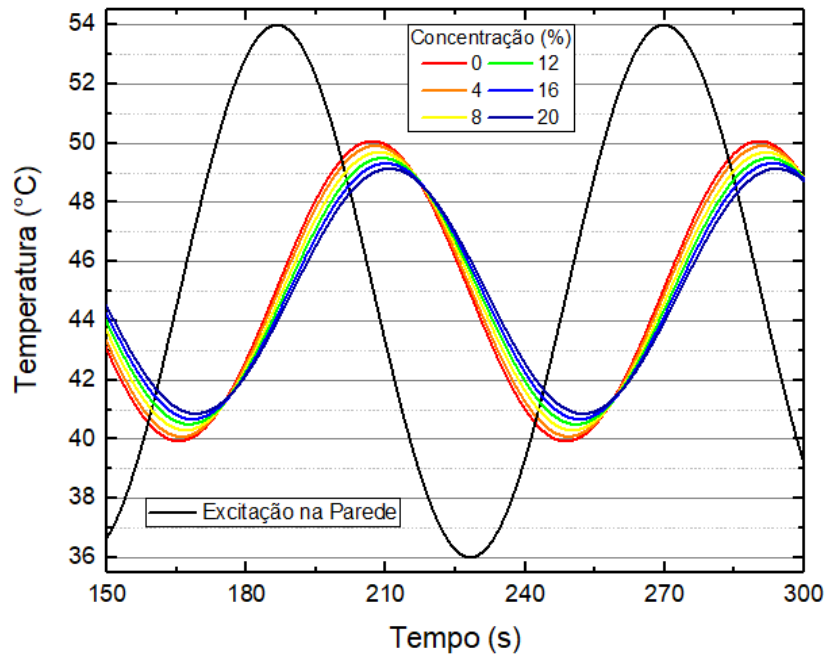


Figura 5.7: Variação da temperatura de pico em função do grau alcoólico para um tubo com raio de 4 mm, frequência de 0,024Hz e amplitude de 9,0°C.

De acordo com as Figuras 5.6 e 5.7, pode-se verificar a dinâmica de temperatura no centro do tubo para diferentes frequências da oscilação térmica na parede. As curvas de temperatura das amostras mostram que determinados valores de frequência provocam diferentes valores de ΔT_{p-a} e $\Delta \theta_{p-a}$. Uma variação de $\Delta T_{m\acute{a}x}$ mais acentuada pode ser observada na Figura 5.6. A Tabela 5.5 apresenta os resultados de $\Delta T_{m\acute{a}x}$ e $\Delta \theta_{m\acute{a}x}$ em função da variação da frequência.

Tabela 5.5: Valores de $\Delta T_{m\acute{a}x}$ e $\Delta \theta_{m\acute{a}x}$ no centro do tubo em função da frequência.

Amplitude (°C)	Frequência (Hz)	Raio (mm)	$\Delta T_{m\acute{a}x}$ (°C)	$\Delta \theta_{m\acute{a}x}$ (rad)
9,0	0,006	4,00	0,699	0,205
9,0	0,012	4,00	0,918	0,276
9,0	0,024	4,00	0,697	0,374

A partir dos valores apresentados na tabela acima, pode-se constatar que na frequência de 0,006 Hz o $\Delta T_{m\acute{a}x}$ é de 0,69°C e o $\Delta \theta_{m\acute{a}x}$ é de 0,20 radianos. Na frequência de 0,012 Hz, o $\Delta T_{m\acute{a}x}$ é de 0,91°C e o $\Delta \theta_{m\acute{a}x}$ é de 0,27 radianos. Na frequência de 0,024 Hz, o $\Delta T_{m\acute{a}x}$ é de 0,69 °C e o $\Delta \theta_{m\acute{a}x}$ é de 0,37 radianos. Os valores mostram que à medida que diminuimos a frequência de excitação na parede, as curvas de temperatura da amostra

tentem a se alongar aproximando-se do sinal de excitação, por outro lado, aumentando a frequência da perturbação na parede, as curvas de temperatura da amostra se deslocam para baixo perdendo amplitude aproximando-se da temperatura média do sinal de excitação. Os resultados exibidos na Tabela 5.5 permitem concluir que a frequência mais adequada para realização dos experimentos é de 0,012 Hz por apresentar maior $\Delta T_{\text{máx}}$ que, em termos práticos, significa maior amplitude de leitura da temperatura medida na amostra.

Com o objetivo de avaliar o diâmetro do tubo que fosse capaz de fornecer a melhor resposta para o sistema em estudo e apontasse o melhor dimensionamento mecânico, foram realizadas simulações com os raios de 6 e 8 mm de comprimento. Os resultados são apresentados nos gráficos abaixo.

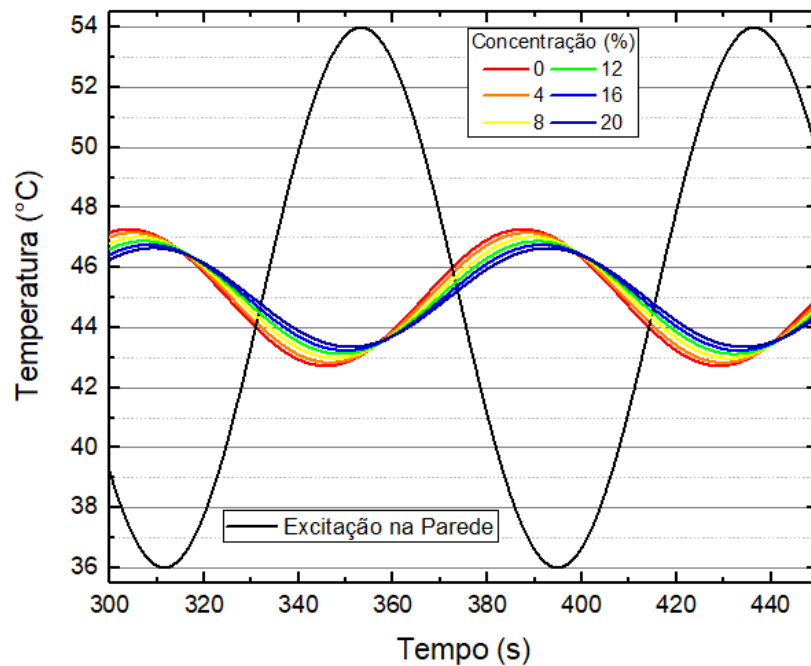


Figura 5.8: Variação da temperatura em função do grau alcoólico para um tubo com raio de 6 mm, frequência de 0,012Hz e amplitude de 9,0°C.

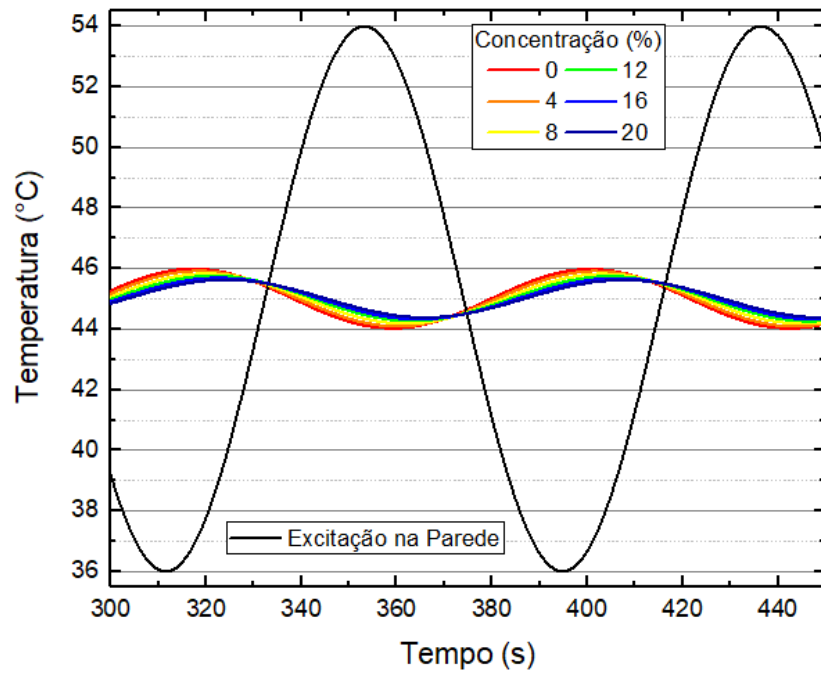


Figura 5.9: Variação da temperatura de pico em função do grau alcoólico para um tubo com raio de 8 mm, frequência de 0,012Hz e amplitude de 9,0°C.

A partir das curvas exibidas nas Figuras 5.8 e 5.9, percebe-se que as temperaturas medidas no centro do tubo apresentam uma diferença considerável tanto na temperatura de pico quanto no ângulo de fase, para as diferentes concentrações, quando comparados com o sinal de excitação térmica na parede do tubo. Também pode-se verificar que o raio do tubo reflete diretamente na dinâmica de temperatura no centro do tubo, essas diferenças ocorrem devido ao atraso da propagação térmica provocado pela distância entre a fonte de excitação e o sensor de medição da amostra.

Os resultados indicam que os sinais de temperatura no centro são atenuados à medida que o raio do tubo aumenta em decorrência do aumento da distância entre atuador e sinal medido. No entanto, existe uma limitação de construção mecânica para tubos com raios muito pequenos, uma vez que, um sensor de temperatura será posicionado no centro do tubo. A Tabela 5.6 apresenta os resultados de $\Delta T_{\text{máx}}$ e $\Delta \theta_{\text{máx}}$ em função da variação do raio.

Tabela 5.6: Valores de $\Delta T_{\text{máx}}$ e $\Delta \theta_{\text{máx}}$ no centro do tubo em função da variação do raio.

Amplitude (°C)	Frequência (Hz)	Raio (mm)	$\Delta T_{\text{máx}}$ (°C)	$\Delta \theta_{\text{máx}}$ (rad)
9,0	0,012	4,00	0,918	0,276
9,0	0,012	6,00	0,641	0,394
9,0	0,012	8,00	0,358	0,529

Para um melhor dimensionamento do dispositivo experimental, a análise dos valores de $\Delta T_{\text{máx}}$ e $\Delta \theta_{\text{máx}}$ assumem grande relevância no presente trabalho, uma vez que eles auxiliam na aferição experimental proporcionando maior facilidade nas medidas de temperatura. As maiores taxas dessas variáveis tornam a situação experimental mais perceptível, logo, mais viável de ser trabalhada. A partir da tabela acima, pode-se verificar de forma detalhada que, para um raio de 8 mm, o $\Delta T_{\text{máx}}$ é de 0,35°C e o $\Delta \theta_{\text{máx}}$ é de 0,52 radianos. Para o caso em que o tubo possui raio de 6 mm, o $\Delta T_{\text{máx}}$ é de 0,64°C e o $\Delta \theta_{\text{máx}}$ é de 0,39 radianos. Para o raio de 4 mm, o $\Delta T_{\text{máx}}$ é de 0,91°C e o $\Delta \theta_{\text{máx}}$ é de 0,27 radianos. As diferenças expostas na Tabela 5.6 corroboram com os comportamentos das curvas de temperatura apresentadas nos gráficos concluindo-se que o tubo com raio interno de 4 mm apresentou a configuração experimental mais favorável devido à maior amplitude de leitura da temperatura da amostra.

Os resultados teóricos apresentados mostram que pequenas mudanças em cada um dos parâmetros analisados correspondem a diferenças notáveis observadas na temperatura de pico e ângulo de fase dos sinais de temperatura.

5.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS DAS MISTURAS

As medidas experimentais foram obtidas a partir do desenvolvimento de um protótipo. Os valores de temperatura de pico e ângulo de fase que são exibidos no gráfico correspondem à média de dez ciclos de medidas obtidos a partir do sistema de aquisição de dados.

5.3.1 Caracterização das amostras

As medidas de grau alcoólico das misturas foram caracterizadas, conforme método apresentado nas seções 4.1.2 e 4.1.3 do Capítulo IV. A participação de cada componente da mistura é apresentada na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Caracterização das amostras preparada com AEA grau PA e água destilada.

Composição da amostra	Massa específica – 20°C (kg/m³)	Grau alcoólico de referência (%m/m)	Grau alcoólico de referência (%v/v)	Temperatura (°C)
Água destilada sem adições (1)	997,60	0,30	0,40	30,20
Água destilada + 52 ml de AEA (2)	990,70	4,20	5,20	30,20
Água destilada + 102 ml de AEA (3)	984,50	8,20	10,20	30,20
Água destilada + 149 ml de AEA (4)	979,00	12,10	15,00	30,20
Água destilada + 200 ml de AEA (5)	973,60	16,20	20,00	30,20
Água destilada + 242 ml de AEA (6)	969,00	19,70	24,20	20,10

A caracterização das amostras teve como objetivo determinar a fração de cada componente da mistura e confrontar os dados obtidos pelo método tradicional, obtenção do grau alcoólico através da densidade, com os dados obtidos a partir do método estudado no presente trabalho.

5.3.2 Análise experimental

Diferente das medidas obtidas por simulações que considera condições ideais, na realização dos ensaios experimentais foi observado que frequências maiores demandam intensa troca de calor, isto é, retirar e colocar grande quantidade de calor num intervalo de tempo muito curto, além da capacidade de troca de calor do sistema térmico. Desta forma, foi necessário reduzir a amplitude de oscilação na parede à proporção que se aumenta a frequência de excitação. Considerando as previsões produzidas pelas simulações teóricas e as limitações do sistema físico, foram realizados três casos experimentais com as seguintes amplitudes e frequências: 7,7°C - 0,0059Hz; 5,5°C - 0,0119Hz e 3,8°C - 0,0238Hz. Os resultados são apresentados nos gráficos e tabela abaixo.

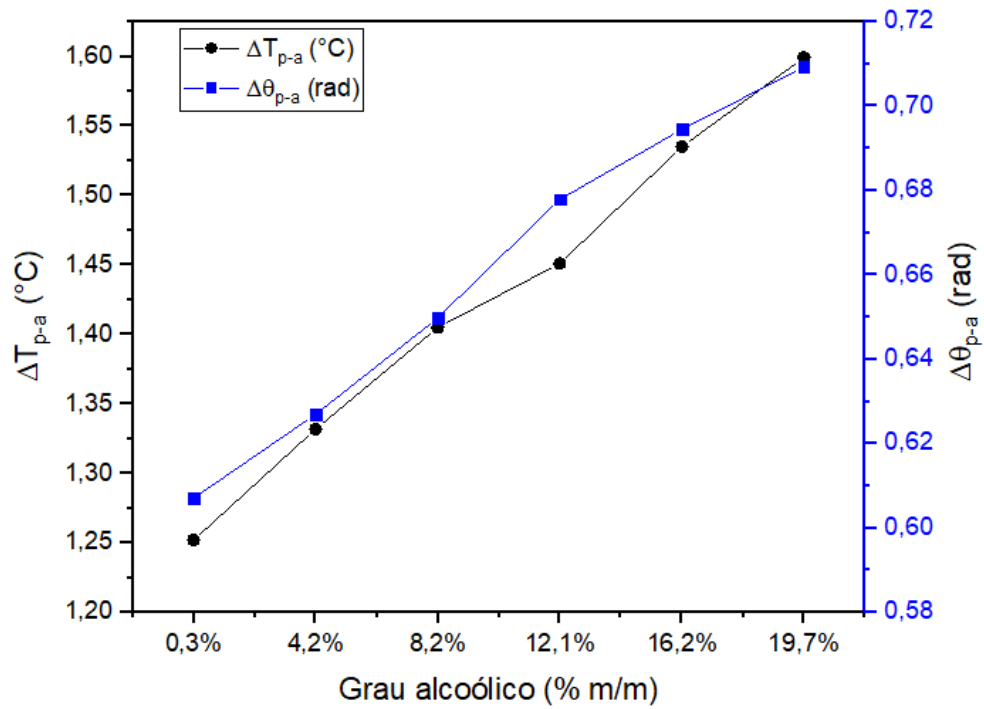


Figura 5.10: Curvas de ΔT_{p-a} e $\Delta \theta_{p-a}$ em função da densidade com frequência de 0,0059Hz e amplitude de 7,7°C.

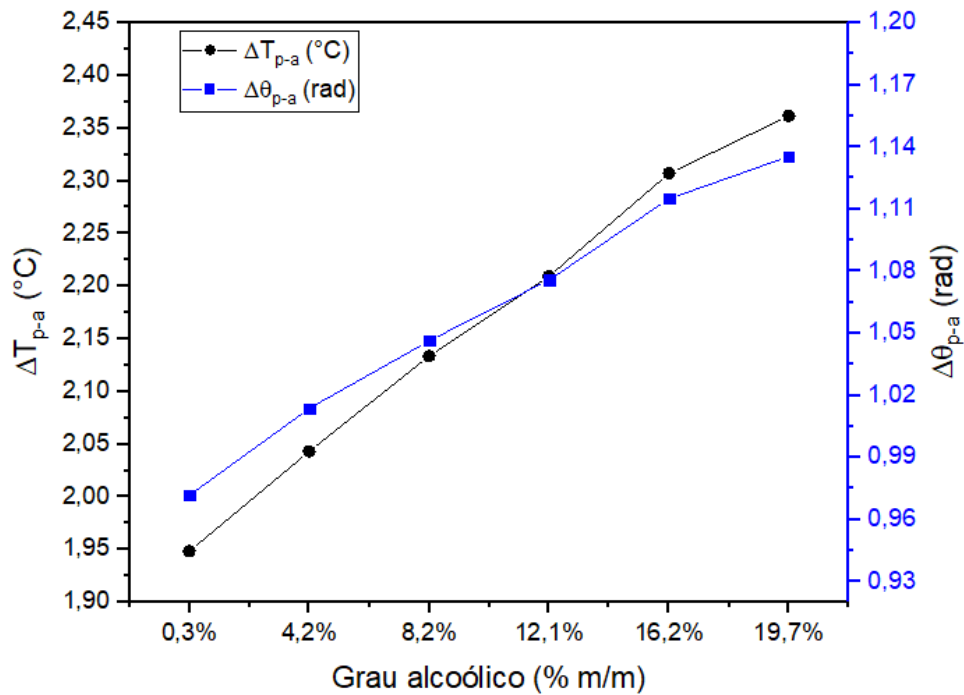


Figura 5.11: Curvas de ΔT_{p-a} e $\Delta \theta_{p-a}$ em função da concentração de álcool com frequência de 0,0119Hz e amplitude de 5,5°C.

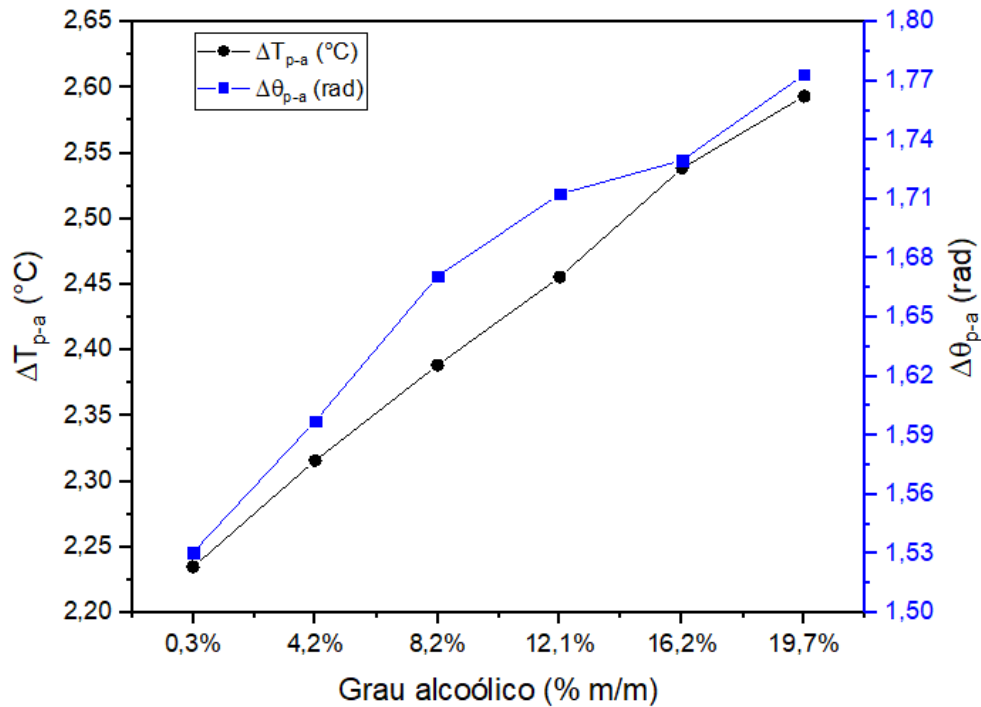


Figura 5.12: Curvas de ΔT_{p-a} e $\Delta \theta_{p-a}$ em função da concentração de álcool com frequência de 0,0238Hz e amplitude de 3,8°C.

Percebeu-se nas simulações que os valores de ΔT_{p-a} e $\Delta \theta_{p-a}$ podem crescer ou decrescer de acordo com o valor de difusividade térmica das amostras, ao passo que, a fração de álcool presente em cada mistura aumenta ou diminui. Maiores variações em ΔT_{p-a} e $\Delta \theta_{p-a}$ podem ser observados nas misturas que apresentam menor difusividade térmica.

Observa-se nas Figuras 5.10, 5.11 e 5.12, que os valores experimentais de ΔT_{p-a} e $\Delta \theta_{p-a}$ aumentaram para misturas com maior concentração de álcool devido ao decréscimo da difusividade térmica em consequência do aumento da fração alcoólica presente em cada amostra. Pode-se afirmar que o comportamento para os valores experimentais de ΔT_{p-a} e $\Delta \theta_{p-a}$ estão de acordo com o observado nas simulações. Os valores experimentais expostos nos gráficos das Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 são apresentados nas Tabelas 5.8, 5.9 e 5.10.

Tabela 5.8: Valores experimentais de ΔT_{p-a} e $\Delta \theta_{p-a}$ na amostra em função da variação da frequência e amplitude.

Amplitude = 7,7°C e frequência = 0,0059Hz		
Teor alcoólico (%m/m)	ΔT_{p-a} (°C)	$\Delta \theta_{p-a}$ (rad)
0,30	1,252	0,607
4,20	1,331	0,627
8,20	1,405	0,650
12,10	1,451	0,678
16,20	1,535	0,694
19,70	1,599	0,709

Tabela 5.9: Valores experimentais de ΔT_{p-a} e $\Delta \theta_{p-a}$ na amostra em função da variação da frequência e amplitude.

Amplitude = 5,5°C e frequência = 0,0119Hz		
Teor alcoólico (%m/m)	ΔT_{p-a} (°C)	$\Delta \theta_{p-a}$ (rad)
0,30	1,949	0,972
4,20	2,043	1,014
8,20	2,134	1,046
12,10	2,209	1,076
16,20	2,307	1,115
19,70	2,362	1,135

Tabela 5.10: Valores experimentais de ΔT_{p-a} e $\Delta \theta_{p-a}$ na amostra em função da variação da frequência e amplitude.

Amplitude = 3,8°C e frequência = 0,0238Hz		
Teor alcoólico (%m/m)	ΔT_{p-a} (°C)	$\Delta \theta_{p-a}$ (rad)
0,30	2,235	1,531
4,20	2,316	1,597
8,20	2,389	1,671
12,10	2,456	1,713
16,20	2,539	1,730
19,70	2,593	1,773

Tabela 5.11: Valores de $\Delta\theta_{\text{máx}}$ e $\Delta T_{\text{máx}}$ na amostra em função da variação da frequência e amplitude.

Amplitude (°C)	Frequência (Hz)	$\Delta T_{\text{máx}}$ (°C)	$\Delta\theta_{\text{máx}}$ (rad)
7,7	0,0059	0,347	0,102
5,5	0,0119	0,413	0,164
3,8	0,0238	0,358	0,243

Das simulações, observou-se que ocorre um crescimento em $\Delta T_{\text{máx}}$ e $\Delta\theta_{\text{máx}}$ ao aumentar-se a amplitude de excitação, por outro lado, esses valores tendem a diminuir em baixa frequência. Como também, observou-se que na maior frequência os valores de $\Delta T_{\text{máx}}$ tendem a diminuir, uma vez que, as curvas de temperatura tendem a atenuar-se e se aproximar do valor médio de temperatura da excitação térmica da parede.

Nota-se nos experimentos realizados, com valores expostos nas Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 e Tabela 5.11, o mesmo comportamento das simulações. No primeiro e terceiro caso, independente da amplitude, são os que apresentam os menores valores de $\Delta T_{\text{máx}}$, assim como, no segundo caso, tem-se o maior valor de $\Delta T_{\text{máx}}$ em função do efeito exercido pela frequência de excitação na parede. As curvas referentes ao segundo caso (5,5°C - 0,0119Hz) na Figura 5.11, foram escolhidas para discussão por apresentarem melhor amplitude de leitura.

5.3.3 Comparação entre as variações de temperatura de pico e ângulo de fase experimental e teórico

Os resultados teóricos foram comparados com as medidas obtidas experimentalmente com o objetivo de avaliar se modelo matemático proposto representa bem a fenômeno físico. Nas Figuras 5.13 e 5.14, são apresentadas as curvas dos valores de (ΔT_{p-a} e $\Delta\theta_{p-a}$) estimadas e experimental em função do grau alcoólico.

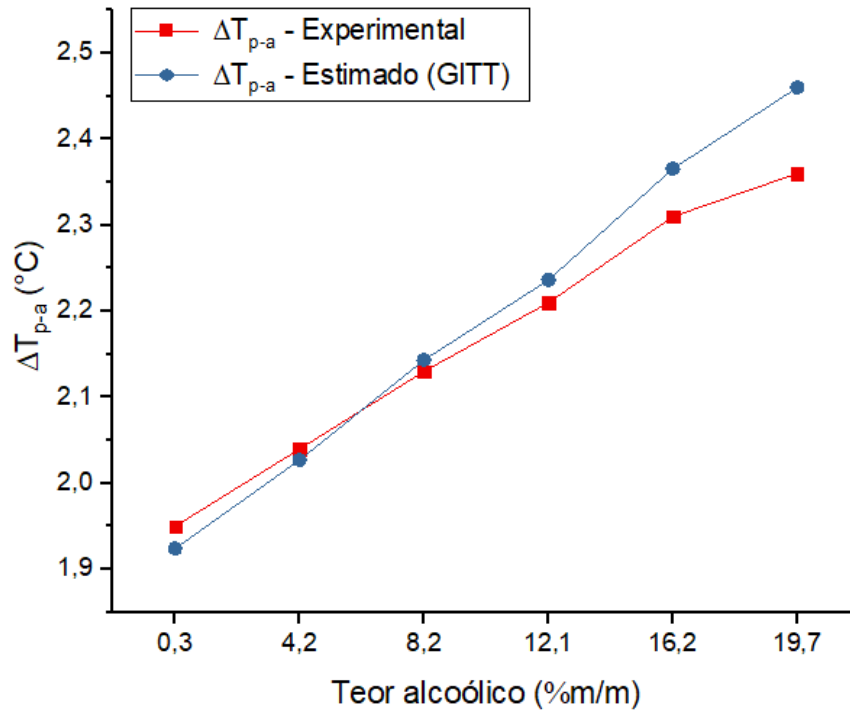


Figura 5.13: Curvas dos valores de ΔT_{p-a} estimadas e experimental em função do grau alcoólico.

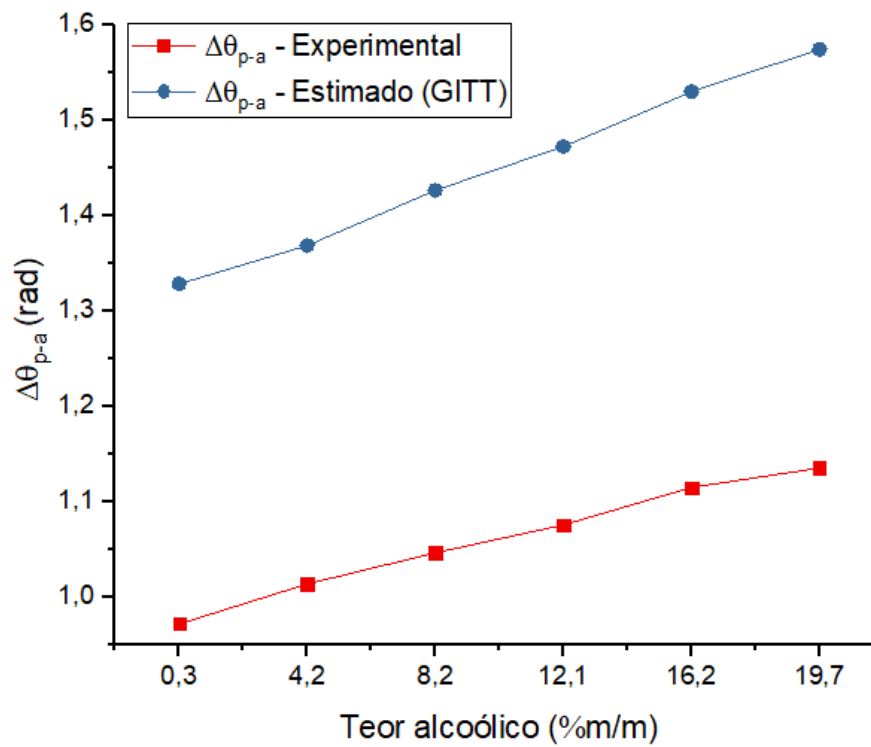


Figura 5.14: Curvas dos valores de $\Delta \theta_{p-a}$ estimadas e experimental em função do grau alcoólico.

Analisando o gráfico da Figura 5.13, observa-se uma diferença de 4,15 % nos valores de ΔT_{p-a} para a mistura de 19,7 %m/m. Isso provavelmente está associado a maior amplitude de leitura das temperaturas de pico que os resultados teóricos apresentaram. As curvas apresentam o mesmo comportamento, nas quais, existe o aumento de ΔT_{p-a} associado ao aumento da concentração.

Observa-se na Figura 5.14, que os valores de $\Delta \theta_{p-a}$ experimentais apresentam diferenças de 36,73 %, para a mistura com menor concentração, e 38,70 % para a mistura com maior concentração. Contudo, as curvas mantêm o mesmo padrão de comportamento dos valores estimados. Essas diferenças podem ser associadas às assimetrias mecânicas inerentes a implementação do sistema físico. Os valores experimentais e estimados (GITT) expostos nos gráficos das Figura 5.13 e 5.14 são apresentados nas Tabelas 5.12 e 5.13.

Tabela 5.12: Valores de ΔT_{p-a} experimental e estimado em função do teor alcoólico.

Teor alcoólico (%m/m)	Experimental ΔT_{p-a} (°C)	Estimado (GITT) ΔT_{p-a} (°C)	Erro absoluto (°C)	Erro relativo (%)
0,30	1,949	1,924	0,024	1,24
4,20	2,043	2,027	0,041	2,01
8,20	2,134	2,143	0,010	0,45
12,10	2,209	2,236	0,027	1,22
16,20	2,307	2,366	0,058	2,53
19,70	2,362	2,460	0,098	4,15

Tabela 5.13: Valores de $\Delta \theta_{p-a}$ experimental e estimado em função do teor alcoólico.

Teor alcoólico (%m/m)	Experimental $\Delta \theta_{p-a}$ (rad)	Estimado (GITT) $\Delta \theta_{p-a}$ (rad)	Erro absoluto (rad)	Erro relativo (%)
0,30	0,972	1,329	0,36	36,73
4,20	1,014	1,369	0,36	35,05
8,20	1,046	1,427	0,38	36,36
12,10	1,076	1,473	0,40	36,92
16,20	1,115	1,530	0,42	37,24
19,70	1,135	1,575	0,44	38,70

Nota-se a partir das Tabelas 5.12 e 5.13 que o aumento do teor alcoólico das misturas provocou o crescimento nos valores de ΔT_{p-a} e $\Delta \theta_{p-a}$. Ao avaliar os resultados apresentados, podemos afirmar que o modelo teórico proposto foi capaz de prever de maneira bem sucedida o efeito provocado pela diferença de teor alcoólico em cada amostra analisada.

5.3.4 Comparação entre as variações de temperatura de pico e ângulo de fase com grau alcoólico

Os resultados obtidos pelo método proposto foram confrontados com as medidas de grau alcoólico, de referência, adquiridas pelo método tradicional através da densidade. Nas Figuras 5.15 e 5.16, são traçadas as curvas de (ΔT_{p-a} e $\Delta \theta_{p-a}$) respectivamente, e grau alcoólico de acordo com a amostra em estudo. Sabe-se que o álcool etílico possui valores de difusividade térmica e densidade mais baixos que o da água. O aumento da fração de álcool faz com que os valores de difusividade térmica das amostras fiquem cada vez menores provocando a atenuação e atraso do fluxo de calor na região da amostra.

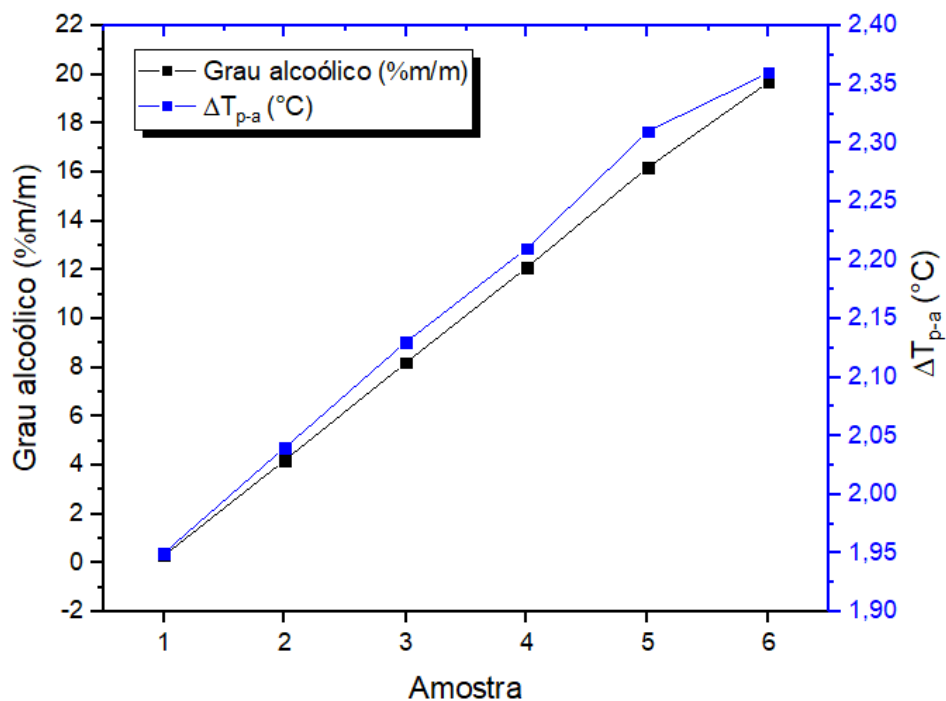


Figura 5.15: Curvas dos valores de ΔT_{p-a} e grau alcoólico de referência para cada amostra.

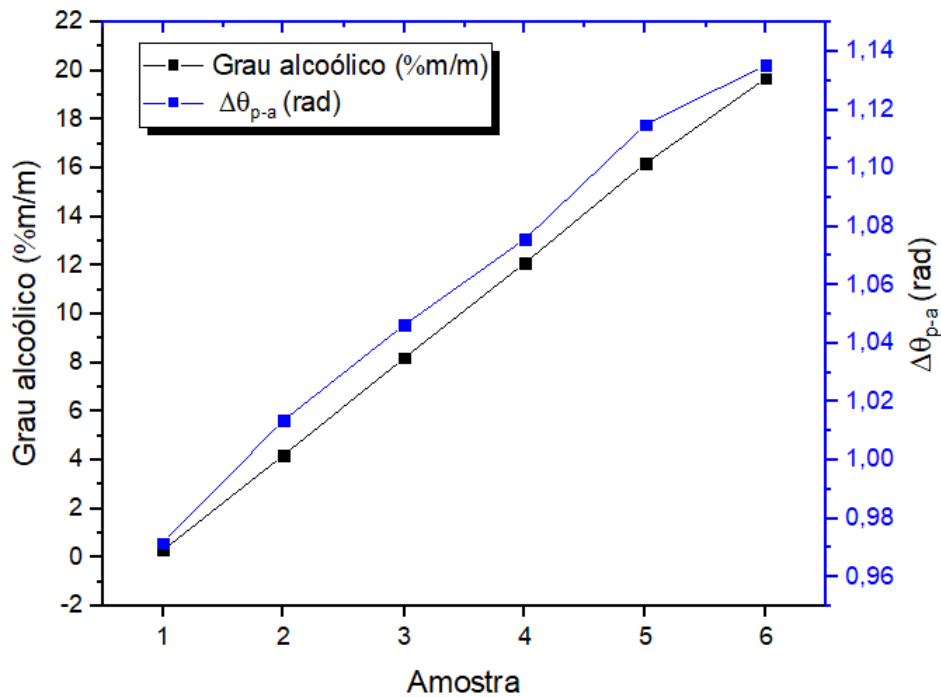


Figura 5.16: Curvas dos valores de $\Delta\theta_{p-a}$ e grau alcoólico de referência para cada amostra.

Nota-se que os valores de ΔT_{p-a} e $\Delta\theta_{p-a}$ crescem, devido a atenuação da temperatura de pico na amostra, à medida que a densidade da mistura diminui. Pelos resultados apresentados nas Figuras 5.15 e 5.16, as curvas de ΔT_{p-a} e $\Delta\theta_{p-a}$ tiveram comportamento similar a curva de grau alcoólico, ou seja, crescem com o aumento da participação de álcool na amostra.

5.3.5 Avaliação das medidas experimentais

Prosseguindo os estudos dos resultados experimentais, com o objetivo de estabelecer uma relação entre as variáveis de entrada (ΔT_{p-a} e $\Delta\theta_{p-a}$) e a variável de saída (grau alcoólico), utilizou-se o modelo de regressão quadrático. As Figuras 5.17 e 5.18 exibem a distribuição dos valores do grau alcoólico em função de ΔT_{p-a} e $\Delta\theta_{p-a}$ experimentais para aproximação quadrática.

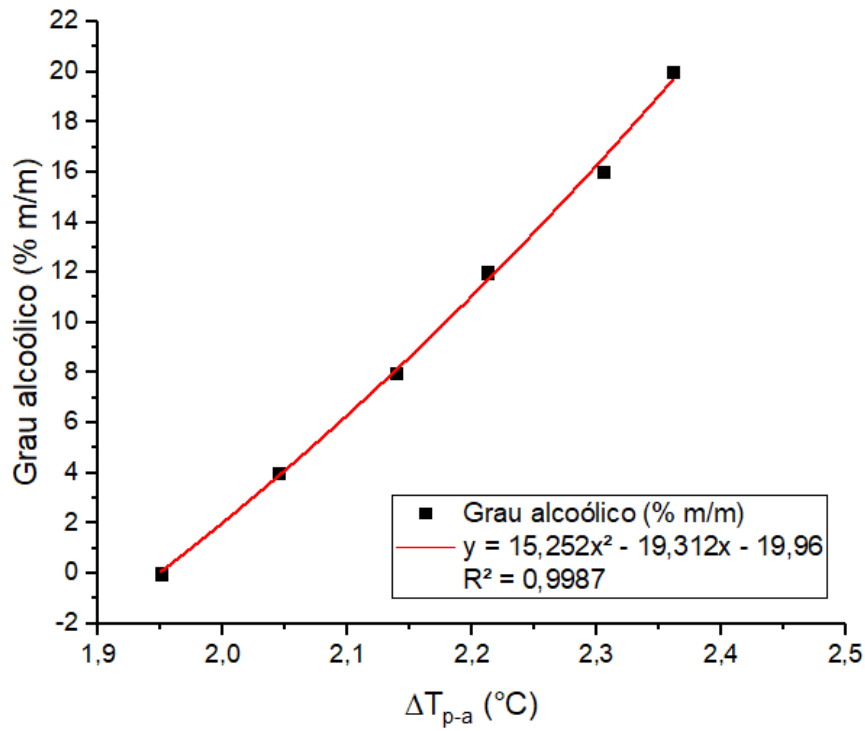


Figura 5.17: Correlação entre grau alcoólico e ΔT_{p-a} .

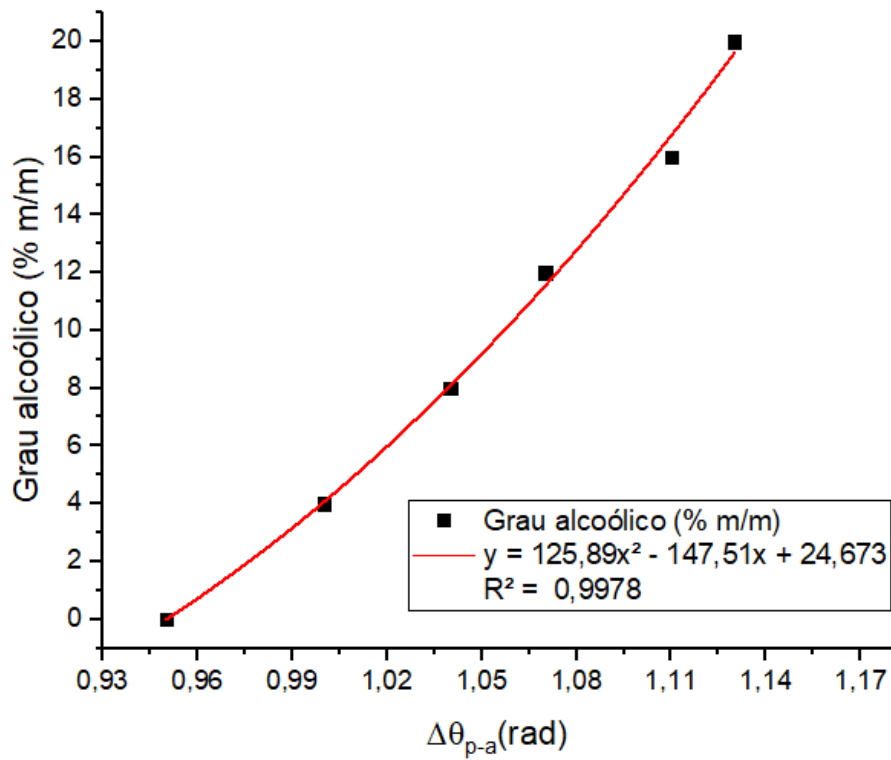


Figura 5.18: Correlação entre grau alcoólico e $\Delta \theta_{p-a}$.

A partir do coeficiente de correlação é possível observar a forte correlação (acima de 99%) entre ΔT_{p-a} e $\Delta \theta_{p-a}$ com o grau alcoólico, como também, o modelo de aproximação quadrático descreveu adequadamente essa correlação.

Os valores de ΔT_{p-a} e $\Delta \theta_{p-a}$ obtidos com o ensaio das amostras foram aplicados nas equações das curvas de calibração das regressões quadráticas com o objetivo de determinar o grau alcoólico das misturas. Os resultados são mostrados nas Tabelas 5.14 e 5.15.

Tabela 5.14: Resultado das análises do grau alcoólico das misturas a partir do modelo quadrático com ΔT_{p-a} .

$y = 15,252x^2 - 19,312x - 19,96$		
Amostra (%m/m)	ΔT_{p-a}	y = Teor de álcool (%m/m)
0,30	1,949	0,40
4,20	2,043	4,28
8,20	2,134	8,30
12,10	2,209	11,82
16,20	2,307	16,66
19,70	2,362	19,50

Tabela 5.15: Resultado das análises do grau alcoólico das misturas a partir do modelo quadrático com $\Delta \theta_{p-a}$.

$y = 125,89x^2 - 147,51x + 24,673$		
Amostra (%m/m)	$\Delta \theta_{p-a}$	y = Teor de álcool (%m/m)
0,30	1,329	0,20
4,20	1,369	4,65
8,20	1,427	8,19
12,10	1,473	11,67
16,20	1,530	16,32
19,70	1,575	19,47

Os experimentos realizados no presente trabalho, mostram que é possível determinar o grau alcoólico de misturas com diferentes concentrações de água e álcool – de 0 a 20% de álcool – a partir da correlação dos valores de ΔT_{p-a} e $\Delta \theta_{p-a}$ com as respectivas medidas reais de concentração alcoólica.

5.3.6 Incerteza das medidas experimentais

Com o objetivo de determinar a qualidade das medidas do grau alcoólico, foi estimado o desvio padrão da distribuição dos erros de medição que corresponde à incerteza padrão de medição com intervalo de confiança de 68,67%. Para obter maior probabilidade de acerto, a incerteza expandida, com intervalo de confiança de 95,45%, foi estimada pela multiplicação da incerteza padrão de medição pelo coeficiente de *Student* correspondente ao número de graus de liberdade. As Tabelas 5.16 e 5.17 apresentam os valores de incerteza de padrão e expandida das medidas de grau alcoólico obtidos com os valores experimentais de ΔT_{p-a} e $\Delta \theta_{p-a}$.

Tabela 5.16: Incerteza padrão e expandida das medidas de mistura a partir de ΔT_{p-a} .

Amostras (%m/m)	0,30	4,20	8,20	12,10	16,20	19,70
Teor alcoólico (%m/m)	0,40	4,28	8,30	11,82	16,66	19,50
Incerteza padrão (%m/m)	$\pm 0,61$	$\pm 0,53$	$\pm 0,76$	$\pm 0,52$	$\pm 0,55$	$\pm 0,56$
Incerteza expandida (%m/m)	$\pm 1,42$	$\pm 1,23$	$\pm 1,77$	$\pm 1,22$	$\pm 1,29$	$\pm 1,31$

Tabela 5.17: Incerteza padrão e expandida das medidas de mistura a partir de $\Delta \theta_{p-a}$.

Amostras (%m/m)	0,30	4,20	8,20	12,10	16,20	19,70
Teor alcoólico (%m/m)	0,20	4,65	8,19	11,67	16,32	19,47
Incerteza padrão (%m/m)	$\pm 0,40$	$\pm 1,26$	$\pm 0,87$	$\pm 0,92$	$\pm 1,28$	$\pm 0,50$
Incerteza expandida (%m/m)	$\pm 0,95$	$\pm 2,99$	$\pm 2,06$	$\pm 2,18$	$\pm 3,03$	$\pm 1,19$

A partir dos experimentos práticos podemos perceber que a técnica desenvolvida é capaz de determinar a concentração de uma mistura água álcool no intervalo de 0 a 20 %m/m de álcool com excelente grau de confiança.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSÕES

O presente trabalho utilizou modelagem teórica e simulação computacional que contribuíram para a compreensão de diversos comportamentos observados experimentalmente. Além disso, foi um método importante de projeto, possibilitando a previsão de diversas características antes da realização dos experimentos. A partir dos resultados obtidos chegou-se às seguintes conclusões:

- Pode-se comprovar, a partir dos valores de ΔT_{p-a} e $\Delta \theta_{p-a}$ experimentais e simulados, que as excitações harmônicas na parede do tubo tendem a se propagar pelo fluido até chegar ao centro do tubo com diferentes amplitudes e fases, de acordo com a concentração analisada.
- Os modelos de regressão quadrática expressaram adequadamente a variação dos dados com valores de coeficiente de determinação R^2 superiores a 0,99 na correlação com ΔT_{p-a} e $\Delta \theta_{p-a}$ representando de maneira significativa a relação entre as variáveis analisadas.
- Neste trabalho, conclui-se da análise dos resultados obtidos que a aplicação do GITT é eficaz na resolução do problema proposto apresentando diferença percentual máxima de 4,15 % nos valores de ΔT_{p-a} . Dessa forma, os objetivos foram alcançados satisfatoriamente, mostrando a influência de variáveis – como: raio do tubo; frequência e amplitude do sinal de excitação; e concentração de álcool – na dinâmica da temperatura da mistura.

- Os resultados mostraram que é possível detectar mudanças no desenvolvimento do campo térmico quando ocorrem variações nos valores de concentração da mistura água-álcool. Os dados mostram a potencialidade do método utilizado na caracterização de misturas líquidas binárias cuja difusividade térmica apresente variação de acordo com a fração de seus componentes.
- Esse trabalho demonstrou que foi possível determinar o grau alcoólico de misturas com diferentes concentrações de água e álcool – no intervalo em estudo de 0 a 20 % –, com bom nível de precisão, utilizando o método proposto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKPA, B. S.; D'AGOSTINO, C.; GLADDEN, L. F.; HINDLE, K.; MANYAR, H.; MCGREGOR, J.; LI, R.; NEUROCK, M.; SINHA, N.; STITT, E. H.; *et al.* "Solvent Effects in the Hydrogenation of 2-Butanone". *J. Catal.* 2012, 289, 30–41.
- ASTROM, K. J., HAGGLUND, T., 1995. *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*. 2 ed. Instrument Society of America.
- BALL, P. "Water: Water - an Enduring Mystery". *Nature* 2008, 452, 291 –292.
- BHATTACHARYA, P., NARA, S., VIJAYAN, P., TANG, T., LAI, W., PHELAN, P.E., WANG, J., 2006, "Characterization of the temperature oscillation technique to measure the thermal conductivity of fluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(17-18), 2950–2956.
- BELO, F. A. "Protótipo Medidor de Concentração Eletrônica", Apresentação no II FEBRAN (Feira Brasileira de Negócios), São Paulo, Brasil, 1982.
- BELO, F. A., 1982, "Medidor de Concentração Eletrônico", Patente Requerida, Brasil.
- BELO, F. A., "Etilômetro Eletrônico", Seminário de Instrumentação e Feira de Exposição de Protótipos, SINST/PADCT/CNPQ, USP, São Paulo, Brasil, 1988.
- BELO, F. A. ; LEITE, J. T. F. "Electronic Analyzer of quality". *SAE Data Book*, São Paulo, Brasil, 1993.
- BELO, F. A., 1995. *Aplicação da Análise Eletrônica ao Estudo do Escoamento Multifásico*, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

- BELO, F. A. “Protótipo do Analisador de Mistura pela Polarização Dipolar”, Apresentação na Feira Mundial Rio Oil & Gas, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.
- BELO, F. A., SILVA, T. A. B., SILVA, D. M. G. B., Analisador de Mistura De Material Dipolar e Medidor Simultâneo de Propriedades Térmicas Pela Harmônica Pura, Rio Oil & Gas 2012 Expo and Conference, Estande da FINEP, Centro de Convenções do Riocentro, 2012.
- BELO, F. A.; LIMA FILHO, A. C.; SILVA, F. A.; SILVA, T. A. B., “Analisador Eletrônico De Componentes De Mistura Pela Polarização Dipolar Para Laboratório E Controle De Processos” Patente Requerida, 2015.
- CAMPBELL, R. C., SMITH, S. E., AND DIETZ, R. L., 1999, “Measurements of Adhesive Bondline Effective Thermal Conductivity and Thermal Resistance Using the Laser Flash Method”, Fifteenth Annual IEEE Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, Mar. 9–11, pp. 83–97.
- COTTA, R. Integral Transform in Computational Heat and Fluid Flows. 1ª Edição ed. Flórida: CRC Press, Inc., 1993.
- FRANCO, A., 2007, “An Apparatus for the Routine Measurement of Thermal Conductivity of Materials for Building Application Based on a Transient HotWire Method”, Appl. Therm. Eng., 27(14–15), pp. 2495–2504.
- GONÇALVES, P. G. Estudo Teórico e Experimental de um Analisador de Misturas pela Polarização Dipolar, 2015.
- KRAUSEA, D., SCHÖCK, T., HUSSEIN, M.A., BECKER, T., 2011, “Ultrasonic characterization of aqueous solutions with varying sugar and ethanol content using multivariate regression methods”, Journal of chemometrics, v. 25, p. 216-223.
- LEVINE, W. S., 1999. The Control Handbook. 1. ed., CRC Press. India.
- LIBERT, N., 2013. Sistema de medição capacitivo para determinação de fração de vazio em escoamentos bifásicos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil.

- LIPTÁK, B. G., 2003. "Instrument engineer's handbook. Process, measurement, and analysis handbook". 4 ed. CRC Press.
- MENDONÇA, L. G. D., 2008. Microsensor capacitivo para avaliação da qualidade de combustíveis automotivos. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil.
- MIKHAILOV, M. D., VULCHANOV, N. L. 1983; "Computational procedure for Sturm-Liouville problems", *Journal of computational Physics*, v. 5, 323-336.
- MIN, S., BLUMM, J. & LINDEMANN, A. A new laser flash system for measurement of the thermophysical properties. *Thermochim. Acta* 455, 46–49 (2007).
- OLIVEIRA, J.R.F, 2017, "Identificação da difusividade térmica de ligas metálicas utilizando um campo de temperatura periódico", Dissertação de Mestrado, PPGEM/UFCG, Campina Grande – Paraíba, Brasil.
- OGATA, K., 2010. Engenharia de Controle Moderno. 4. ed, 3ª reimpressão. São Paulo: Pearson Prentice Hall. 798p.
- PALO, D. R., DAGLE, R. A., HOLLADAY, J. D., "Methanol Steam Reforming for Hydrogen Production". *Chem. Rev.* 2007, 107, 3992–4021.
- PARKER, W. J., JENKINS, R. J., BUTLER, C. P. & ABBOTT, G. L. Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity. *J. Appl. Phys.* 32, 1679–1684 (1961).
- PRASAD, A., AMBIRAJAN, A., 2018, "Criteria for accurate measurement of thermal diffusivity of solids using the Angstrom method", *International Journal of Thermal Sciences*, No. 134, pp 216 – 223.
- PUTTMER, A., HAUPTMANN, P., HENNING, B., 2000. "Ultrasonic density sensor for liquids. *IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics and Frequency control*". vol. 47, pp. 85-92.

- QUEIROZ, D. P., 2009. Sensores de filmes finos para avaliação de etanol combustível. Tese de Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Brasil.
- RUOHO, M., VALSET, K., FINSTAD, T. & TITTONEN, I. Measurement of thin film thermal conductivity using the laser flash method. *Nanotechnology* 26, 195706 (2015).
- SANTOS, W. N.; SANTOS, J. N.; MUMMERY, P.; WALLWORK, A. “Thermal diffusivity of polymers by modified Angstrom method”. *Polymer Testing*, v. 29, 2010.
- SANTUCCI, A., VERDINI, L., VERDINI, P.G., 1986, “Data-acquisition system for measurement of thermal diffusivity and propagation properties of thermal waves by a non-steady-state method”, *Rev. Sci. Instrum.* 57 1627-1632.
- SILVA, T.A.B, 2014, “O gerador térmico como analisador de propriedades térmicas a partir da harmônica pura”, Dissertação de Mestrado, PPGEM/UFPB, João Pessoa – Paraíba, Brasil.
- STALHANE, B., and PYK, S., 1931, “New method for determining the coefficients of thermal conductivity”, *Teknisk Tidskift*, Vol. 61, No. 28, pp 389 – 393.
- SOUZA, D. C., 2013. Sensor capacitivo para monitoramento do teor de álcool etílico anidro combustível (AEAC) em amostras de gasolina comercial. Dissertação de Mestrado em Química. Universidade Federal do Maranhão, Brasil.
- TONG, X. C. in *Advanced Materials for Thermal Management of Electronic Packaging*, 59–129 (Springer New York, 2011).
- ZHANG, W., LIN W., TSAI, C., WU, S., 2019. “A Thermo-electric Apparatus for Thermal Diffusivity and Thermal Conductivity Measurements”, *Energies*. 12. 4238.

ZHU, Y, 2016, “Heat-loss modified Angstrom method for simultaneous measurements of thermal diffusivity and conductivity of graphite sheets: The origins of heat loss in Angstrom method”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, No. 92, pp 784 – 71.

ANEXO A

Equação para cálculo das tabelas alcoolométricas

A.1 Massa específica

A equação a seguir é utilizada no programa para calcular a massa específica do álcool e está de acordo com o modelo de Bettin e Spieweck (Bettin, H. & Spieweck, F. A Revised Formula for the Calculation of Alcoholometric Tables, PTB Mitteilungen 6/90, p. 457, 1990). Esta equação é válida de -20°C a 40°C.

$$ME = A_1 + \sum_{k=2}^{12} A_k \times \left(\frac{GM}{100} - 0,5 \right)^{k-1} + \sum_{k=1}^6 B_k \times (t - 20)^k + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{m_i} C_{i,k} \times \left(\frac{GM}{100} - 0,5 \right)^k \times (t - 20)^i$$

Onde:

ME é o valor da massa específica do álcool, expresso em quilogramas por metro cúbico (kg/m³);

GM é o valor numérico do grau alcoólico, expresso em porcentagem mássica (kg de etanol /100 kg álcool);

t é o valor numérico da temperatura de leitura da amostra de álcool etílico, expresso em graus Celsius (°C);

A, B e C são os coeficientes de Bettin e Spieweck, conforme Tabela A.1;

n = 5; m₁ = 11; m₂ = 10; m₃ = 9; m₄ = 4; m₅ = 2.

Tabela A.1 – Coeficiente de Bettin e Spieweck.

	A	B	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
1	913,76673	- 0,7943755	- 0,39158709	- 0,000120832	- 3,86832E-05	- 5,60249E-07	- 1,44417E-08
2	- 221,75948	- 0,001216841	1,1518337	- 0,005746625	- 0,000209114	- 1,26492E-06	1,34705E-08
3	- 59,61786	3,50178E-06	- 5,0416999	0,12030894	0,002671389	3,4864E-06	
4	146,82019	1,77094E-07	13,381608	- 0,23519694	0,004104205	- 1,51687E-06	
5	- 566,5175	- 3,41388E-09	4,5899913	- 1,0362738	- 0,049364385		
6	621,18006	- 9,98802E-11	- 118,21	2,1804505	- 0,017952946		
7	3782,4439		190,5402	4,2763108	0,29012506		
8	- 9745,3133		339,81954	- 6,8624848	0,023001712		
9	- 9573,4653		- 900,32344	- 6,9384031	- 0,54150139		
10	32677,808		- 349,32012	7,4460428			
11	8763,7383		1285,9318				
12	- 39026,437						