



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



# O GERADOR TÉRMICO COMO ANALISADOR DE PROPRIEDADES TÉRMICAS A PARTIR DA HARMÔNICA PURA

Por

Tássio Alessandro Borges da Silva

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba  
para obtenção do grau de Mestre.*

**TÁSSIO ALESSANDRO BORGES DA SILVA**

**O GERADOR TÉRMICO COMO ANALISADOR DE  
PROPRIEDADES TÉRMICAS A PARTIR DA  
HARMÔNICA PURA**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre.

**Orientador: Prof. Dr. Francisco Antônio Belo**

**O GERADOR TÉRMICO COMO ANALISADOR DE  
PROPRIEDADES TÉRMICAS A PARTIR DA  
HARMÔNICA PURA**

**Por**

**Tássio Alessandro Borges da Silva**

*Dissertação aprovada em 21 de fevereiro de 2014*

*Período letivo 2013.2*

**Prof. Dr. FRANCISCO ANTÔNIO BELO**

*Orientador - UFPB*

**Prof. Dr. ABEL CAVALCANTE LIMA FILHO**

*Examinador Interno - UFPB*

**Profa. Dra. ANDRÉA SAMARA SANTOS DE OLIVEIRA GOMES**

*Examinador Externo - IFCE*

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho à minha família e amigos, e especialmente à minha noiva, Bianka, pelo apoio dado durante o trabalho, e aos meus cães pelos seus ensinamentos.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador e amigo Professor Francisco Antônio Belo pela sua dedicação, suporte e atenção. Ao Professor Abel Cavalvante Lima Filho pela sua amizade e ensinamentos.

Ao Professor Paulo Henrique de Miranda Montenegro pela atenção dada a mim e aos demais alunos, como coordenador do curso de pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Aos meus companheiros de pesquisa, Marcéu Adissi, Lamartine Daniel e Ruan Gomes. A todos os alunos companheiros de curso e de laboratório pela disposição em ajudar sempre que preciso.

Ao Técnico em Eletrônica Diógenes Silva, Técnico em Mecânica Sérgio e ao “Soldador” Ernandes Alves pelo apoio técnico e amizade.

A todos os amigos que contribuíram na realização desse trabalho.

Agradeço à Bianka Xavier, por todo apoio, amizade, companheirismo e ensinamentos, não apenas na realização do trabalho, mas durante todos os dias da minha vida.

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

## **O GERADOR TÉRMICO COMO ANALIZADOR DE PROPRIEDADES TÉRMICAS A PARTIR DA HARMÔNICA PURA**

### **RESUMO**

Neste trabalho é apresentado um novo método para determinação das propriedades térmicas dos materiais. Como faz uso de dois materiais distintos no momento da medição, trata-se de um instrumento diferencial. No método proposto é gerada uma onda térmica em uma extremidade do material e medida a temperatura de saída na outra extremidade. A partir da relação entre as ondas de entrada e saída é possível obter a condutividade térmica do material. A equação da condução de calor nos materiais foi deduzida e simulada, permitindo determinar a temperatura em qualquer ponto dos materiais.

Na montagem experimental foram utilizados dois módulos termoeletrônicos com controle PID para gerar uma onda térmica e um módulo para manter a temperatura constante. A plataforma LabVIEW em conjunto com o cFP-2000 foram utilizados para aquisição de dados e controle. Foram empregados termopares do tipo T como sensores de temperatura. Os materiais utilizados nos experimentos (Aço ASTM A36, Nylon e Quartz) têm suas propriedades térmicas previstas pelos fabricantes. Esses valores foram utilizados como referência para a validação. O instrumento desenvolvido gera ondas térmicas com amplitudes entre 1 e 3 °C e períodos de 100 a 10000 segundos. Para solução do problema de determinação da temperatura nos materiais aplicou-se o Método de Simulação de Rede, que aplica uma analogia entre sistemas elétricos e térmicos. Os resultados foram divididos em três partes: a primeira apresenta a senóide térmica gerada pelo Gerador Térmico; a segunda compara os valores teóricos com os valores medidos da temperatura entre os dois materiais; e a terceira apresenta o valor da condutividade térmica medida pelo instrumento. Os resultados foram positivos e indicam a viabilidade do método e do instrumento.

**Palavras chave:** Propriedades Térmicas, Módulo Termoeletrônico, Circuito Térmico, PID.

## **THE THERMAL GENERATOR AS THERMAL PROPERTIES ANALYZER THROUGH THE PURE HARMONIC**

### **ABSTRACT**

This work presents a new method for determination of thermal properties of materials. As it makes use of two different materials at the time of measurement, it is a differential instrument. In the proposed method a thermal wave is generated at one end of the material and measured the temperature at the other end. Based on the relationship between the input and output waves is possible to obtain the thermal properties of the material. The equation of heat conduction in materials was deduced and simulated, to determine the temperature at any point of the materials.

In the experimental setup two thermoelectric modules were used along with a PID control to generate a thermal wave and a module to maintain a constant temperature. The LabVIEW platform together with the cFP-2000 was used for data acquisition and control. Type T thermocouples were used as temperature sensors. The materials used in the experiments (ASTM A36 Steel, Nylon and Quartz) have their thermal properties provided by the manufacturers, these values were used as reference for validation. The developed instrument generates waves with amplitudes between 1 and 3 ° C and periods from 100 to 10000 seconds. To solve the problem of determining the temperature in the material, the analogy between thermal and electrical systems was applied, a technique called the Method of Simulation Network. The results were divided into three parts: The first introduces thermal sinusoid generated by the thermal generator and the second compares the theoretical values to the measured values of temperature between the two materials and the third displays the value of thermal conductivity measured by the instrument. The results were positive and indicate the feasibility of the method and instrument.

**Palavras chave:** Thermal Properties, Thermoelectric Module, Thermal Circuit, PID.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1 MOTIVAÇÃO .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 PROPRIEDADES TÉRMICAS .....</b>	<b>3</b>
<b>1.3 OBJETIVOS .....</b>	<b>4</b>
<b>1.4 OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>4</b>
<b>1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>4</b>
<b>1.6 APRESENTAÇÃO .....</b>	<b>5</b>
<b>2. ESTADO DA ARTE.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1 MÉTODOS DE MEDIÇÃO EXISTENTES .....</b>	<b>7</b>
<b>2.2 MÉTODO DE ÅNGSTRÖM.....</b>	<b>9</b>
<b>3. MODELAGEM MATEMÁTICA .....</b>	<b>10</b>
<b>3.1 REPRESENTAÇÃO FASORIAL.....</b>	<b>10</b>
<b>3.2 MODELAGEM DO SISTEMA.....</b>	<b>11</b>
<b>4. MÉTODO DA SIMULAÇÃO DE REDES .....</b>	<b>18</b>
<b>4.1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
<b>4.1.1 NSM PARA CONDUÇÃO DE CALOR UNIDIMENSIONAL .....</b>	<b>20</b>
<b>5. MONTAGEM EXPERIMENTAL.....</b>	<b>22</b>
<b>5.1 GERADOR TÉRMICO .....</b>	<b>22</b>
<b>5.2 ANALISADOR DE PROPRIEDADES TÉRMICAS PELA HARMÔNICA PURA (APTHP).....</b>	<b>23</b>
<b>5.3 SISTEMA DE CONTROLE.....</b>	<b>25</b>
<b>5.3.1 CONTROLADOR PID .....</b>	<b>26</b>

<b>5.4</b>	<b>SOFTWARES DESENVOLVIDOS .....</b>	<b>27</b>
<b>5.4.1</b>	<b>INSTRUMENTAÇÃO E CONTROLE.....</b>	<b>27</b>
<b>5.4.2</b>	<b>RESOLUÇÃO DO PROBLEMA INVERSO .....</b>	<b>28</b>
<b>5.5</b>	<b>MATERIAIS .....</b>	<b>30</b>
<b>5.5.1</b>	<b>MÓDULO TERMOELÉTRICO .....</b>	<b>30</b>
<b>5.5.2</b>	<b>TERMOPAR.....</b>	<b>34</b>
<b>5.5.3</b>	<b>COMPACT FIELD-POINT (CFP-2000).....</b>	<b>36</b>
<b>5.5.4</b>	<b>PASTA TÉRMICA.....</b>	<b>37</b>
<b>6.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>39</b>
<b>6.1</b>	<b>RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DIRETO PELO NSM .....</b>	<b>39</b>
<b>6.2</b>	<b>GERADOR TÉRMICO .....</b>	<b>41</b>
<b>6.3</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>44</b>
<b>6.4</b>	<b>VALORES DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA .....</b>	<b>50</b>
<b>7.</b>	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>52</b>
<b>7.1</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>52</b>
<b>7.2</b>	<b>SUGESTÕES .....</b>	<b>53</b>
	<b>TRABALHOS RELACIONADOS À DISSERTAÇÃO.....</b>	<b>54</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>55</b>
	<b>APÊNDICE A - CÁLCULO DOS PARÂMETROS PARA O NSM.....</b>	<b>60</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Ondas senoidais com e sem defasagem .....	11
Figura 3.2 Configuração para modelagem matemática .....	12
Figura 3.3 Esboço do Instrumento Diferencial no plano.....	15
Figura 4.1 Circuito elétrico análogo ao circuito térmico.....	20
Figura 4.2 Divisão do material em células. ....	21
Figura 5.1 Gerador Térmico .....	23
Figura 5.2 Instrumento do APTHP.....	24
Figura 5.3 Vista Simplificada do Instrumento.....	25
Figura 5.4 Aparato instrumental.....	25
Figura 5.5 Sistema de Controle Térmico.....	26
Figura 5.6 Painel Frontal - Instrumentação e Controle .....	27
Figura 5.7 Painel Frontal - Determinação da Condutividade Térmica.....	29
Figura 5.8 Representação simplificada de um módulo termoeletrico .....	30
Figura 5.9 Ilustração do Módulo Termoeletrico.....	31
Figura 5.10 Representação do sensor de Peltier .....	31
Figura 5.11 Diagrama do fluxo de potência em um TEC.....	33
Figura 5.12 Curvas das temperaturas e diferenças em função de $I_p$ .....	33
Figura 5.13 Módulo Termoeletrico incorporado os elementos isoladores elétricos .....	34
Figura 5.14 Termopar .....	34
Figura 5.15 Compact Field-Point 2000 .....	37
Figura 5.16 Interface entre dois materiais .....	38
Figura 5.17 Pasta Térmica e Adesivo Térmico .....	38
Figura 6.1 Circuito no PSPICE para 2 células de cada material. Amostra: Quartzo (5mm); Referência: Nylon6 (2mm).....	40

Figura 6.2 Resposta Analítica e NSM, Aço 4mm (Amostra) e Nylon 2mm (Referência). Frequência de 0,01Hz .....	40
Figura 6.3 Resposta Analítica e NSM, Quartzo 5mm (Amostra) e Nylon 2mm (Referência). Frequência de 0,001Hz .....	41
Figura 6.4 Resposta do Gerador Térmico ; Frequência 0,01Hz. ....	42
Figura 6.5 Erro Absoluto para frequência 0,01Hz. ....	42
Figura 6.6 Resposta do Gerador Térmico; Frequência 0,001Hz. ....	43
Figura 6.7 Erro Absoluto para frequência 0,01Hz. ....	43
Figura 6.8 Onda térmica: Amostra ASTM A36 (4,85 mm), referência: Nylon (2 mm). Frequência de 0,01Hz .....	45
Figura 6.9 Onda térmica: Amostra Nylon (2 mm), referência: Quartzo (5 mm). Frequência de 0,01Hz.....	45
Figura 6.10 Onda térmica: Amostra Nylon (2mm), referência: ASTM A36 (8mm). Frequência de 0,01Hz .....	46
Figura 6.11 Onda térmica: Amostra Quartzo (5 mm), referência: ASTM A36 (4,85mm). Frequência de 0,01Hz .....	46
Figura 6.12 Onda térmica: Amostra Nylon (2 mm), referência: Quartzo (5 mm). Frequência de 0,001Hz .....	47
Figura 6.13 Onda térmica: Amostra: Quartzo (5 mm), referência: Nylon (2 mm). Frequência de 0,001Hz .....	48
Figura 6.14 Onda térmica: Amostra: Quartzo (5 mm), referência: ASTM A36 (4,85 mm). Frequência de 0,001Hz .....	48
Figura 6.15 Onda térmica: Amostra: ASTM A36 (4,85 mm) , referência: Nylon (2 mm). Frequência de 0,001Hz .....	49
Figura 6.16 Onda térmica: Amostra: ASTM A36 (4,85 mm), referência: Quartzo (5 mm). Frequência de 0,001Hz .....	49
Figura 6.17 Onda térmica: Amostra: Quartzo (5 mm), referência: Nylon (2 mm). Frequência de 0,0002Hz .....	50
Figura 6.18 Onda térmica: Amostra: Nylon (2 mm), referência: Quartzo (5 mm). Frequência de 0,0001Hz .....	50

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 Parâmetros de entrada do VI para Instrumentação e Controle .....	28
Tabela 2 Condutividade Térmica .....	51
Tabela A.1 Parâmetros dos materiais para o NSM.....	74

## LISTA DE SÍMBOLOS

$C$  → Capacitância elétrica (F)

$C_p$  → Calor específico (J/(kg·K))

$e(t)$  → Sinal de erro atuante no controlador

$F$  → Frequência (Hz)

$j$  → Número complexo ( $j = \sqrt{-1}$ )

$T$  → Temperatura

$T_L$  → Temperatura na superfície L (°C)

$\bar{T}$  → Temperatura diferencial

$h$  → Coeficiente de transferência de calor por convecção ( $W m^2 K^{-1}$ )

$H$  → Espessura da Amostra (mm)

$I_p$  → Corrente nos materiais semicondutores do TEC (A)

$J_0$  → Função Bessel do primeiro tipo e ordem zero

$J_1$  → Função Bessel do primeiro tipo e ordem um

$K_p$  – Constante de proporcionalidade

$L$  → Espessura Total (mm)

$Q_C$  → Taxa de remoção de calor da junção fria;

$r$  – Posição radial (m)

$R$  – Posição radial adimensional

$R$  – Resistência elétrica ( $\Omega$ )

$R$  → Raio da amostra (mm)

$R_p$  → Resistência elétrica dos materiais semicondutores do TEC

$S$  → Coeficiente de Seebeck

$t$  → tempo (s);

$T_d$  – Constante de tempo derivativo (s)

$T_i$  – Constante de tempo integral (s)

$u(t)$  – Sinal de saída do controlador (V)

$V$  → é o valor da onda no instante de tempo;

$V_m$  → é o valor máximo, ou amplitude da onda;

$V_s$  → Tensão nos terminais do TEC devido ao efeito Seebeck

$Z$  → Desempenho do TEC

$\alpha$  → Difusividade Térmica ( $m^2/s$ )

$\beta$  → Parâmetros da Amostra ( $\sqrt{\frac{j\omega}{\alpha}}$ )

$\kappa$  → Condutividade Térmica (W/(mK))

$\rho$  → Densidade ( $kg/m^3$ )

$\sigma$  → Condutividade elétrica do material.

$\Phi$  → Fase da onda ( $^\circ$ )

$\omega$  → Frequência Angular (rad/s)

$\Pi$  → Coeficiente de Peltier

# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

### 1.1 MOTIVAÇÃO

Um grande número de processos físicos e químicos, espontâneos ou não, estão intimamente relacionados à temperatura, tendo as suas realizações em conformidade com as condições térmicas às quais estão sendo submetidos. Tais processos incluem fenômenos de transporte de calor e/ou de massa, o que torna necessário o conhecimento das propriedades térmicas dos materiais envolvidos visando o seu gerenciamento e otimização (OLIVEIRA, 2010).

Os materiais utilizados para qualquer aplicação são definidos de acordo com a sua funcionalidade, ou seja, o material é escolhido em conformidade com as suas características de modo a desempenhar o seu papel da forma mais eficiente e rentável possível. As propriedades térmicas são características de suma importância na escolha de materiais, seja em indústrias ou laboratórios, é mandatório o seu conhecimento tanto do ponto de vista econômico quanto de desempenho.

As propriedades térmicas são especialmente importantes em diversos setores, em BOGLIETTI *et al.* (2009) é apresentado a sua importância na fabricação de máquinas elétricas e uma das razões para tal é a constante miniaturização dos sistemas que envolvem motores. Em sistemas microeletromecânicos há uma constante preocupação com a dissipação de calor, como apresentado por OUYANG e ZHU (2012) LAU *et al.* (2010), e WANG *et al.* (2012). Na eletrônica e microeletrônica, um dos principais problemas enfrentados no desenvolvimento de novos circuitos integrados é a dissipação de calor pelo

encapsulamento empregado, como em ZHANG *et al.* (2009) e ARIK *et al.* (2004). Parte significativa dos problemas converge para a dissipação do calor em produtos cada vez menores, com o conhecimento das características dos materiais empregados é possível adequar a escolha do material à aplicação do mesmo.

O conhecimento dessas propriedades também contribui no aumento da eficiência energética. Em ALAWADHI e AMON (2003) é apresentado um estudo térmico com o objetivo de aumentar a eficiência energética de aparelhos eletrônicos portáteis.

E não só há importância econômica, mas também na segurança em projetos de engenharia, tendo em vista que inúmeras máquinas operam em altas temperaturas, especialmente em usinas termoelétricas e nucleares.

Em KUNTNER *et al.* (2010) é proposta a medida das propriedades térmicas para monitorar a contaminação de óleos por partículas de água. E em VERMEULEN e CHUTE (1983) essas propriedades térmicas e elétricas de óleos pesado são medidas para auxiliar no processo de recuperação.

Com o surgimento de novos materiais em um ritmo acelerado, se faz necessário a determinação de suas propriedades mecânicas, dentre elas as térmicas, para que seja possível maximizar o campo de utilização desses materiais, e usá-los de maneira adequada. Em SANTOS *et al.* (2007b) é apresentada a importância do conhecimento das propriedades térmicas em materiais reciclados, tendo em vista que a reciclagem não permite um controle detalhado do processo, levando a criações de materiais levemente diferentes dos pretendidos. Além disso, os materiais precisam ter todas suas propriedades mecânicas bem conhecidas, pois a partir delas é que são definidas em quais aplicações esses materiais poderão ser utilizados de forma segura.

O método proposto tem como objetivo determinar as propriedades térmicas de um material, fazendo uso de um instrumento desenvolvido para esse fim e com elementos simples, dessa forma auxiliar no emprego do material adequado para cada uso específico.

## **1.2 PROPRIEDADES TÉRMICAS**

Dentre as propriedades mecânicas dos materiais, as térmicas são de grande importância, e delas podemos destacar a condutividade térmica ( $\kappa$ ) e a difusividade térmica ( $\alpha$ ).

A difusividade térmica mede a capacidade do material de conduzir a energia térmica em relação à sua capacidade de armazená-la, em outras palavras, a difusividade térmica define a velocidade com que a energia térmica se propaga através do material, por esse motivo é criticamente importante em resoluções de condução de calor em estado não estacionário.

Já a condutividade térmica quantifica a capacidade de uma substância de conduzir calor. Essa é uma propriedade intrínseca do material, para a qual os valores dependem da composição química, porosidade, densidade e da estrutura do material (JUMIKIS, 1996). Especialmente a condutividade térmica é discutida em inúmeros projetos, pois quando se necessita minimizar as perdas de calor é necessário um material de baixa condutividade térmica, é o caso de isolantes térmicos, e quando se deseja transferir calor de um ponto a outro é empregado um material de alta condutividade térmica, é o caso dos condutores térmicos. Dessa forma, é indispensável possuir os valores exatos das condutividades térmicas dos materiais envolvidos em qualquer processo, para assim, fazer melhor proveito de seu uso. Essa é a propriedade que determina o nível de temperatura de trabalho de um material, sendo um importante parâmetro em problemas envolvendo transferência de calor transiente.

As propriedades térmicas discutidas nessa seção são relacionadas através da Eq. (1).

$$\alpha = \frac{\kappa}{\rho \times c_p} \quad (1)$$

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.4 Objetivo Geral**

Desenvolver um instrumento capaz de determinar a condutividade térmica de materiais sólidos seja isolante ou condutor, translúcido ou opaco.

#### **1.5 Objetivos Específicos**

- Apresentar as técnicas de medição das propriedades térmicas existentes;

- Desenvolver o modelo matemático que resolva o problema direto para temperatura nos materiais;
- Elaborar um gerador térmico para aplicação do modelo matemático de forma experimental;
- Resolução do problema de condução de calor empregando o Método de Simulação de Redes;
- Resolver o problema inverso do modelo matemático, possibilitando a determinação das propriedades térmicas;
- Implementar a resolução do problema inverso em software para determinação da condutividade térmica a partir dos dados experimentais.

## **1.6 APRESENTAÇÃO**

O trabalho apresentado foi desenvolvido em sua integridade pelo Grupo de Pesquisa em Instrumentação e Controle em Estudo de Energia e Meio Ambiente (GPICEEMA) da Universidade Federal da Paraíba, iniciado no ano de 2012 com o autor exercendo o papel de bolsista de Iniciação Científica juntamente com o aluno de doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica Leonaldo José Lyra do Nascimento, com o projeto orientado pelo Professor Francisco Antônio Belo.

Por se tratar de um trabalho interdisciplinar, característica marcante do GPICEEMA, envolvendo as áreas de Engenharia Mecânica e Engenharia Elétrica, outros alunos de Iniciação Científica da UFPB dessas áreas participam atualmente do trabalho.

A presente dissertação é dividida em seis capítulos nomeados: Introdução, Fundamentação Teórica, Modelagem Matemática, Método da Simulação de Redes, Montagem Experimental, Resultados, e Conclusões.

No primeiro capítulo é abordado o tema de maneira geral, em que contexto ele se encontra inserido e a sua importância no meio industrial, além dos objetivos e a apresentação.

O segundo capítulo trata da revisão bibliográfica do trabalho, ou seja, os métodos de medição das propriedades térmicas que são atualmente empregados, e suas respectivas vantagens e desvantagens.

O terceiro capítulo apresenta o Método de Simulação de Redes (NSM), uma abordagem para resolução de problemas de condução de calor utilizando a analogia entre circuitos térmicos e elétricos, esse método torna mais simples a resolução de um número significativo de problemas.

O quarto capítulo exhibe a montagem experimental em detalhes, todo o *hardware* e o *software* envolvido. Apresenta também os procedimentos para a montagem experimental.

O quinto capítulo contém os resultados obtidos em laboratório, com a montagem experimental, que são comparados com os dados obtidos de forma analítica e pelo NSM. Além de exibir como é realizada a resolução do problema inverso de forma numérica. Os valores da condutividade térmica dos materiais, obtidos através do problema inverso, são comparados com os fornecidos pelos fabricantes.

O sexto capítulo apresenta as conclusões desse trabalho e também as sugestões para trabalhos futuros, visando à melhoria do instrumento apresentado.

## CAPÍTULO II

### ESTADO DA ARTE

Esse capítulo apresenta a revisão bibliográfica necessária para o do desenvolvimento trabalho, a qual envolve os métodos de determinação das propriedades térmicas empregados atualmente, assim como suas vantagens e desvantagens. Também é apresentado o método de Ångström, o qual utiliza uma onda térmica para análise do material.

#### 2.1 MÉTODOS DE MEDIÇÃO EXISTENTES

Os métodos para medição das propriedades térmicas descritos na literatura são classificados em dois tipos: fluxo transiente de calor e de fluxo periódico de calor. As técnicas mais utilizadas são a de fio quente (JANNOT *et al*, 2009) e a *flash* (SANTOS ,2007a) Os métodos transientes não são capazes de medir precisamente a condutividade térmica de materiais isolantes de baixa densidade (JANNOT *et al*, 2009)

Os dois métodos podem ser usados para determinação simultânea dessas propriedades, mas usualmente o método do Fio Quente é mais indicado para a obtenção d condutividade térmica ( $\kappa$ ) enquanto o Flash para a determinação da difusividade térmica ( $\alpha$ ) (TILLMAN, 2005)

BLACKWELL (1954) toma como base a solução da equação de difusão de calor para apresentar o método do Fio Quente, que consiste em uma fonte de calor ideal, na forma de uma linha infinita circundada até o infinito pelo material cuja condutividade térmica pretende-se determinar. A fonte de calor é um fio, pelo qual passa uma corrente elétrica, dessa forma, a função dele é dissipar calor pelo efeito Joule na amostra. A alta resistência térmica de contato entre o fio e a amostra desencoraja seu uso com metais. Nesse método a

condutividade térmica é obtida com certa precisão. Em SANTOS *et al.* (2004) são apresentados trabalhos com o uso do método do Fio Quente modificado para determinação da condutividade térmica em materiais cerâmicos e em polímeros. Em HEALY (1976) é proposto o uso do método do Fio quente para medição da condutividade térmica de líquidos.

O método Flash, descrito por PARKER *et al.* (1961), consiste em aplicar um pulso de calor radiante de curta duração e alta intensidade em uma das superfícies da amostra. Através do tempo decorrido para a temperatura na face oposta ao calor aplicado atingir um valor máximo, é determinado a difusividade térmica.

Em BOUTINGUIZA *et al* (2012) é apresentado a medição da condutividade térmica da ardósia, uma rocha metamórfica. SHEIKH *et al* (2000) apresenta o método flash para medição da condutividade térmica em materiais isotrópicos. SALAZAR *et al* (2006) apresenta a medição da condutividade de hastes, cilindros e esferas através do método Flash.

Porém o método Flash apresenta dificuldades de uso, pelos seguintes motivos:

- Os materiais isolantes são muitas vezes semi-transparentes para as frequências de radiações da lâmpada de flash;
- É muito difícil medir com precisão a temperatura de uma superfície em um material de baixa densidade;
- A transferência de calor sobre a face aquecida é frequentemente muito diferente da transferência de calor sobre as outras faces (diferenças de temperatura muito importantes) (JANNOT *et al*, 2009).

BABA e ONO (2001) propõe modificações no método Flash para aprimorar os seus resultados, porém seu custo aumenta drasticamente com o uso dos recursos apresentados.

A maior dificuldade do método Flash reside na implementação do aparato experimental, o gerador laser responsável pelo pulso radiante de calor de alta intensidade e curta duração torna elevado o custo dos equipamentos. As restrições dos métodos apresentados, como as características destrutivas do método do Fio Quente e o alto custo do método Flash, indicam a necessidade do desenvolvimento de métodos alternativos que possam contornar esses problemas (TILLMAN, 2005).

## 2.2 MÉTODO DE ÅNGSTRÖM

O método de Ångström, apresentado por ÅNGSTRÖM (1863), foi o primeiro a empregar um fluxo de calor periódico. Uma onda térmica é aplicada ao final de uma barra do material, cuja condutividade térmica se deseja mensurar, e se propaga por todo o material. Da temperatura adquirida em dois pontos distintos do material, apenas após atingir o estado estacionário, é observada uma mudança de fase e uma atenuação da amplitude da onda. A propriedade térmica em questão é obtida através desses resultados. O principal problema em relação ao método de Ångström, como explorado em LOPEZ-BAEZ *et al* (1987), é devido à suposição feita no modelo matemático, no qual considera uma amostra semi-infinita para realizar a análise da condutividade térmica. Essa suposição precisa ser levada em conta na montagem experimental. Em LOPEZ -BAEZ *et al.* (1987) é exibido uma análise do método de Ångström para amostras curtas com o fim do material isolado termicamente, isso é feito, pois há situações em que não há materiais de tamanho suficiente para uma aproximação semi-infinita, é o caso de *wafers* de semicondutores.

Atualmente o método é empregado em determinação das propriedades térmicas de metais, polímeros e cerâmicas. Em SANTUCCI *et al.* (1986) é apresentada uma modificação na técnica para que pudesse ser aplicada na determinação da difusividade térmica em líquidos, outras modificações para mensurar as propriedades térmicas líquidos são apresentadas em ROETZEL *et al.* (1990) e em BHATTACHARYA *et al.* (2006). As diferenças presentes nessas modificações do método de Ångström estão na modelagem matemática utilizada.

As descrições sobre a montagem experimental do método de Ångström na literatura são satisfatórias, tanto para líquidos quanto para sólidos. Entretanto, a análise dos dados obtidos experimentalmente não possui explicações detalhadas, sendo a principal razão da preferência de outros métodos sobre esse.

## CAPÍTULO III

### MODELAGEM MATEMÁTICA

#### 3.1 REPRESENTAÇÃO FASORIAL

No método proposto é empregada uma onda senoidal térmica, porém para representá-la como uma função independente do tempo, utiliza-se a representação fasorial. Essa representação é bastante comum na área da engenharia elétrica, pois os valores que são importantes da onda senoidal são apenas a amplitude e fase.

A equação que representa a onda senoidal em função do tempo é exibida na Equação (2).

$$V(t) = V_m \text{sen}(\omega t + \phi) \quad (2)$$

Onde:  $V$  é o valor da onda no instante de tempo;

$t$  é o tempo em segundos;

$V_m$  é o valor máximo, ou amplitude da onda;

$\omega$  é a frequência angular ( $\omega = 2\pi F$ , onde  $F$  é a frequência da onda);

$\Phi$  é a fase da onda em graus;

A Figura 3.1 exibe duas formas de onda senoidais, uma onde o valor de  $\Phi$  é zero, ou seja, não há defasagem da onda, e a outra onde  $\Phi$  é um valor diferente de zero.

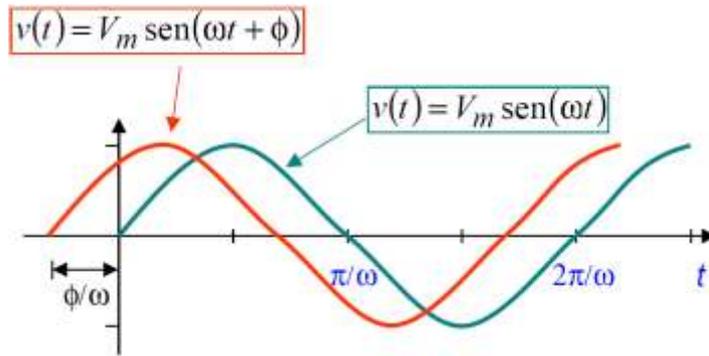


Figura 3.1 Ondas senoidais com e sem defasagem (BALDINI FILHO, 2013)

Como mencionado anteriormente, as informações mais importantes da onda senoidal são a amplitude ( $V_m$ ) e fase ( $\Phi$ ), pois essas não alteram seus valores em estado estacionário. Dessa forma, uma onda senoidal pode ser representada contendo apenas essas duas informações fundamentais, chamada de representação fasorial, dada na Eq. (3).

$$V = V_m \angle \Phi \quad (3)$$

Outra forma prática de representar a onda senoidal como um valor independente do tempo é a representação polar de um número complexo, essa representação é exibida na Eq. (4).

$$V = |V_m| e^{j\Phi} = V_m \angle \Phi \quad (4)$$

Onde  $j = \sqrt{-1}$ .

Utilizando essas representações torna mais simples o uso de ondas senoidais na modelagem matemática, pois não há necessidade de representar a função seno em função do tempo, como normalmente empregado.

### 3.2 MODELAGEM DO SISTEMA

Um modelo matemático ideal auxilia na obtenção das temperaturas nas amostras de qualquer geometria. Essa seção procura mostrar que o instrumento proposto determina as propriedades térmicas e que a precisão é determinada principalmente pela medida da

espessura e o posicionamento do sensor na superfície. Os erros no modelo são devidos à quantidade de calor dissipado que não é considerado na relação teórico experimental. Como primeira etapa, uma amostra cilíndrica é considerada para o modelo. Em seguida será apresentada uma validação geral para amostras de qualquer sólido.

Com a técnica proposta é possível o desenvolvimento de instrumentos absolutos e diferenciais. A Figura 3.2 exibe um meio de condução de calor entre a amostra e o gerador de sinais térmicos, o qual foi utilizado no modelo matemático. O sinal térmico senoidal é aplicado em uma superfície do material ( $z=0$ ) e na outra é mantida uma temperatura constante ( $z=L$ ), onde  $r$  é o eixo radial e  $R$  é o raio do material.

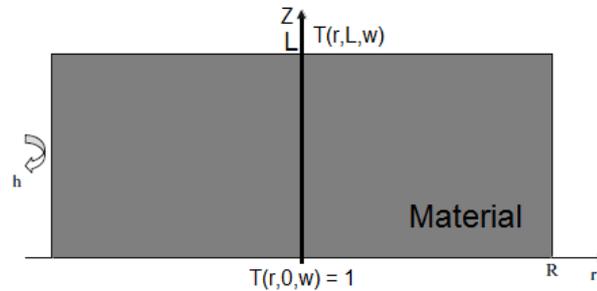


Figura 3.2 Configuração para modelagem matemática

Fixando a Eq. (5), a equação de condução de calor em coordenadas cilíndricas se torna a Eq. (6) (JANNOT *et al.*, 2009).

$$\bar{T}(r, z, t) = T(r, z, t) - T_L \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} \quad (6)$$

A condição de primeira condição de contorno é dada pela Eq. (7), que pode ser reescrita como a Eq. (8), onde modela a condução de calor nas bordas do material, tendo  $h$  como o coeficiente de transferência de calor por convecção.

$$r = R \rightarrow -\kappa \frac{\partial T(R,z,t)}{\partial r} = h T(R,z,t) \quad (7)$$

ou

$$r = R \rightarrow \kappa \frac{\partial T(R,z,t)}{\partial r} + h T(R,z,t) = 0 \quad (8)$$

Nas Eqs. (9), (10), (11) são apresentadas outras condições de contorno, igualmente importantes, e na Eq. (12) é apresentada a condição inicial do problema.

$$z = 0 \rightarrow \bar{T}(r, 0, t) = \sin(\omega t) \quad (9)$$

$$z = L \rightarrow \bar{T}(r, L, t) = \text{constante} \quad (10)$$

$$r = 0 \rightarrow \partial \frac{\bar{T}(0,z,t)}{\partial r} = 0 \quad (11)$$

$$t = 0 \rightarrow \text{Fase}(\bar{T}(r, 0, 0)) = 0 \text{ (fase} = 0^\circ \text{ em } z = 0) \quad (12)$$

Na Eq. (9) é modelada a aplicação de uma onda senoidal em uma superfície do material, onde  $\omega$  é a frequência angular, e a Eq. (10) é referente à temperatura constante na outra superfície. Já a Eq. (11) modela uma condição da condução de calor unidimensional devido a simetria da geometria cilíndrica, ou seja, apenas no centro ( $r = 0$ ) e em Eq. (12) é afirmado que a fase do sinal senoidal, aplicada no material ( $z = 0$ ), no tempo inicial ( $t = 0$ ) é zero.

A temperatura em qualquer ponto é dada pela Eq. (13). A solução é dada pela Eq. (14).

$$\bar{T}(r, z, t) = \bar{T}(r, z) \cdot \Delta T e^{j\omega t} = \bar{T}(r, z) e^{j\omega t} \quad (13)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{T}(r, z)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \bar{T}(r, z)}{\partial r} + \frac{\partial^2 \bar{T}(r, z)}{\partial z^2} = \frac{j\omega}{\alpha} \bar{T}(r, z) \quad (14)$$

Usando o método de separação de variáveis ( $T(r,z) = R(r) \cdot Z(z,\omega)$ ) são obtidas as Eq. (15), (16) e (17).

$$\frac{1}{R(r)} \left( \frac{\partial^2 R(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R(r)}{\partial r} \right) + \frac{1}{Z} \frac{\partial^2 Z(z)}{\partial z^2} = \frac{j\omega}{\alpha} \quad (15)$$

$$\frac{1}{R(r)} \left( \frac{\partial^2 R(r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial R(r)}{\partial r} \right) = -\kappa^2 \quad (16)$$

$$\frac{1}{Z} \frac{\partial^2 Z(z)}{\partial z^2} = \frac{j\omega}{\alpha} + \kappa^2 \quad (17)$$

A solução é dada pela Eq. (18), como em ÖZİŞİK (1993).

$$T(r, z, \omega) = \frac{2}{b} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{h^2}{\kappa_m (h^2 + \kappa_m^2)} \frac{J_0(\kappa_m r)}{J_1 \kappa_m b} \cdot \frac{\sinh(\beta_m (L-z))}{\sinh(\beta_m L)} \quad (18)$$

Onde  $\kappa_m$  e  $\beta_m$  são soluções da Eq. transcendental (19) e é dada pela Equação (20).

$$J'_v(\kappa r) + h J_v(\kappa r) = 0 \quad (19)$$

$$\beta_m = \sqrt{\frac{j\omega}{\alpha} + \kappa^2} \quad (20)$$

Nas superfícies ( $z = 0$  e  $z = L$ ) os valores das temperaturas, amplitude e fase, são constantes e independentes de  $r$ . Entre elas, a função  $T(r, z, \omega)$  é alterada dependendo de  $r$  e  $z$ . No centro ( $r=0$ ) não há transferência de calor na direção de  $r$ , de acordo com a Eq. (11). Então, no centro ( $r=0$ ) a Eq. (6) se torna a Eq. (21), que modela a equação da condução de calor unidimensional em  $z$ .

$$\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} \quad (21)$$

A solução da Eq. (21) é a Eq. (22), obtida a partir da Eq. (19) quando considerada a condução de calor unidimensional.

$$T(0, z, \omega) = \frac{\sinh(\beta(L-z))}{\sinh(\beta L)} \quad (22)$$

Onde,  $\beta$  é dado pela Eq. (23).

$$\beta = \sqrt{\frac{j\omega}{\alpha}} \quad (23)$$

Em qualquer ponto diferente do centro ( $r=0$ ), ou seja, ( $0 < z < L$ ), a transferência de calor se dá nas direções de  $r$  e  $z$ , aumentando os erros na determinação da temperatura. Além disso, também há erros devido às soluções transcendentais aplicadas na Eq. (19).

Para validar esse estudo é proposto um instrumento diferencial, sem perda de generalidade, usando dois materiais. A Figura 3.2 exibe o instrumento diferencial, onde na superfície inferior ( $z=0$ ) é aplicado o sinal térmico e na superfície superior ( $z = L$ ) é aplicada uma temperatura constante. O material de referência tem espessura  $H$ . O ponto de interesse nesse arranjo é o ponto  $H$ , pois é o contato dos dois materiais utilizados, amostra e referência.

A principal vantagem desse arranjo é que ao usar um material de referência, do qual se conhece todas as propriedades térmicas, pode-se prever como a onda se comportará no interior desse material, tornando a análise dos dados de temperatura na junção dos dois materiais mais simples e mais precisa.

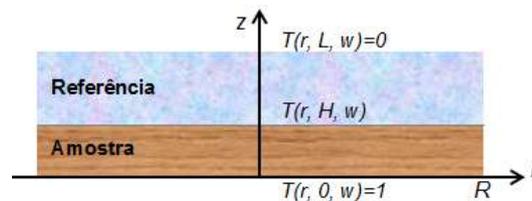


Figura 3.2 Esboço do Instrumento Diferencial no plano

Os parâmetros que envolvem esse sistema são dados abaixo:

$H$  é a espessura da amostra;

$L$  é a espessura total;

$\beta_1$  representa as propriedades da primeira amostra;

$\beta_2$  representa as propriedades da segunda amostra;

Onde:  $\beta = \sqrt{j\frac{\omega}{\alpha}} = (j+1)\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}$

$\kappa_1$  é a condutividade térmica da primeira amostra;

$\kappa_2$  é a condutividade térmica da segunda amostra;

Com a condição da Equação 11, medindo no centro da amostra ( $r=0$ ) e assumindo o modelo unidimensional, obtemos a Eq. (24).

$$\frac{\partial^2 T(z)}{\partial z^2} - \frac{j\omega}{\alpha} T(z) = 0 \quad (24)$$

Para cada valor de  $z$ , a temperatura dada por  $T(z)$  é um valor complexo que contém informações da amplitude e da fase do sinal térmico naquele local. A solução da Eq. diferencial (24) é dada pelas Eqs. (25) e (26). A Eq. (25) fornece a temperatura no material de amostra, enquanto que a Eq. (26) fornece a temperatura no material de referência.

$$T(z) = A_1 e^{\beta_1 z} + B_1 e^{-\beta_1 z} \quad 0 < z < H \quad (25)$$

$$T(z) = A_2 e^{\beta_2 z} + B_2 e^{-\beta_2 z} \quad H < z < L \quad (26)$$

A fim de determinar as constantes  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ , as condições de contorno foram aplicadas nas Eqs. (25) e (26).

Condição de contorno  $z=0$ :

$$\begin{aligned} T(0) &= 1 \\ A_1 + B_1 &= 1 \end{aligned} \quad (27)$$

Condição de contorno  $z=H$ :

$$\begin{aligned} T_1(H) &= T_2(H): \\ \kappa_1 \frac{\partial T}{\partial z} &= \kappa_2 \frac{\partial T}{\partial z} \end{aligned} \quad (28)$$

$$A_1 e^{\beta_1 H} + B_1 e^{-\beta_1 H} = A_2 e^{\beta_2 H} + B_2 e^{-\beta_2 H} \quad (29)$$

Condição de contorno  $z = L$ :

$$\begin{aligned} T(L) &= 0: \\ A_2 e^{\beta_2 L} + B_2 e^{-\beta_2 L} &= 0 \end{aligned} \quad (30)$$

Das equações Eqs. (27), (28), (29) e (30) é possível encontrar as constantes  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$  e  $B_2$ , obtidas a partir das Eqs. (31), (32), (33) e (34).

$$A_1 = A_2 e^{\beta_2 H} - \frac{e^{-\beta_2 H + 2\beta_2 L}}{e^{\beta_1 H} - e^{-\beta H}} - \frac{e^{-\beta_1 H}}{e^{\beta_1} - e^{-\beta_1 H}} \quad (31)$$

$$A_2 = \frac{2K_1}{(K_1\beta_1 - K_2\beta_2)(e^{\beta_1 + \beta_2 H} - e^{-(\beta_1 + \beta_2 H) + 2\beta_2 H}) + (K_1\beta_1 + K_2)(e^{(\beta_1 + \beta_2)H} - e^{-(\beta_1 - \beta_2)H + 2\beta_2 L})} \quad (32)$$

$$B_1 = 1 - A_1 \quad (33)$$

$$B_2 = -A_2 e^{2\beta_2 L} \quad (34)$$

Dessa forma, a partir dos valores das propriedades dos dois materiais ( $K_1$ ,  $K_2$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $H$ ,  $L$ ) é possível conhecer a temperatura  $T(z)$  em cada ponto  $z$ . O local mais importante para se conhecer a temperatura é entre a amostra e a referência, pois é nesse ponto onde é medida a temperatura na montagem experimental, permitindo a comparação entre as curvas.

## CAPÍTULO IV

### MÉTODO DA SIMULAÇÃO DE REDES

#### 4.1 INTRODUÇÃO

Nesse trabalho é proposta a aplicação da analogia entre sistemas elétricos e térmicos, com o uso do *software* PSPICE, para solucionar o problema direto, apresentado no Capítulo III, da determinação da temperatura nos pontos desejados dos materiais. A técnica é denominada Método de Simulação de Rede, do inglês, Network Simulation Method (NSM), que tem como base a analogia física entre a condução de calor unidimensional transiente e o fluxo de corrente elétrica. A analogia entre sistemas térmicos e elétricos também é conhecida por analogia Resistência-Capacitância, ou analogia RC.

O SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) é um *software* desenvolvido para realizar simulações de circuitos eletrônicos, a fim de prever seu comportamento. A partir da entrada gráfica do usuário, o *software* cria uma lista que descreve todos os elementos do circuito (resistores, capacitores, indutores, fontes de tensão, fontes de corrente, transistores e circuitos integrados), juntamente com suas conexões, dessa lista são criadas as equações para serem resolvidas e preverem o comportamento do sistema. O SPICE foi desenvolvido pelo Electronics Research Laboratory da Universidade da Califórnia (EUA) (NAGEL e PEDERSON, 1973). Atualmente, o SPICE tornou-se o programa padrão para simulação de circuitos elétricos de propósito geral, tanto para análise em corrente contínua quanto corrente alternada, sendo adequado tanto para circuitos elétricos lineares quanto não lineares (VLADIMIRESCU, 1994). O SPICE utilizado no presente trabalho é o PSPICE, fabricado pela Orcad.

Devido à complexidade dos modelos matemáticos que envolvem os processos de difusão de calor, a analogia entre circuitos térmicos e elétricos tem sido aplicada como uma ferramenta rápida, precisa e simples, dado que os problemas podem ser resolvidos através de um programa de simulação para circuitos elétricos (PSPICE, 1994).

O uso dessa ferramenta no âmbito da resolução de problemas complexos da área de engenharia térmica permite que se alcance os resultados desejados de maneira mais direta e simples.

Este método não requer o estabelecimento de um critério de convergência para solucionar as equações diferenciais infinitas que têm origem na discretização das equações diferenciais parciais do modelo matemático (ZUECO e ALHAMA, 2006). Ele apresenta uma rápida convergência para análise de transientes, quando comparado com outros métodos de análise de transporte de energia por séries infinitas (ALHAMA e CAMPO, 2003).

O NSM tem sido empregado na resolução de problemas de transferência de calor. Em ACHARD *et al* (2002) a técnica é utilizada para modelar o comportamento térmico em construções. Em TANG *et al* (2004) e WEIGEN *et al* (2009) a resolução do modelo térmico do transformador é feita através da analogia térmico-elétrica. ZUECO *et al* (2004) usa o método para estudar o comportamento transiente de transferência de calor bidirecional relativo a escoamento laminar em tubos submetidos a um degrau de temperatura. Em ALHAMA *et al* (2005) é apresentada o NSM e estudado a condução de calor para uma grande placa com a temperatura simétrica nas superfícies. Já em ZUECO e ALHAMA (2006) são resolvidos, através desse método, os problemas direto e inverso da emissividade da superfície em função da temperatura de sólidos de propriedades térmicas variáveis. Em ZUECO (2009) o fluxo de convecção natural não estacionário de um fluido dissipativo viscoso ao longo de uma placa vertical semi-infinita submetido a uma oscilação periódica da temperatura na superfície é investigado através do NSM. ZUECO e ALHAMA (2007) faz uso da técnica para a estimativa simultânea inversa das propriedades térmicas dependentes da temperatura (condutividade térmica e capacidade volumétrica de calor) de fluidos completamente desenvolvidos fluindo através de um duto circular.

Nos trabalhos mais recentes SÁNCHEZ *et al* (2012) resolve equações diferenciais acopladas não-lineares para a corrosão por CO<sub>2</sub> com proteção filmes de carbonato de ferro. E ALHAMA *et al* (2012) apresenta o NSM como ferramenta para solução de equações diferenciais ordinárias lineares ou não, de qualquer grau e ordem.

#### 4.1.1 NSM para Condução de Calor Unidimensional

O modelo de condução de calor em Método de Simulação de Rede (NSM) é definido por um circuito Resistor – Capacitor (RC), onde há dois resistores e um capacitor. Essa é a forma geral para representar as propriedades térmicas de forma análoga aos circuitos elétricos, porém com apenas um circuito RC a representação não é fiel às propriedades térmicas, dessa forma, é necessário dividir o material em  $n$  células, onde cada célula é um circuito RC, até que a resposta se torne satisfatória para o problema proposto. A Figura 4.1 exibe a representação para o material com  $n$  células.

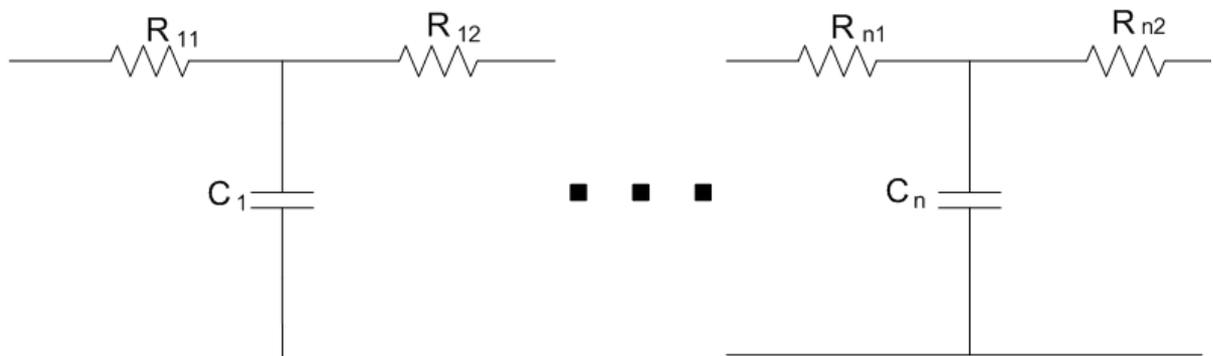


Figura 4.14.1.1 Circuito elétrico análogo ao circuito térmico

Para o cálculo dos valores das resistências é necessário, além de definir a quantidade de células, o conhecimento dos valores da altura do material ( $L$ ), sua massa específica ( $\rho$ ), calor específico ( $C_p$ ), condutividade térmica ( $\kappa$ ) e a área da qual será a representação. A Figura 4.2 exibe uma amostra circular e as divisões das células no centro do material, onde as células possuem um raio  $r'$ .

Para calcular o valor da resistência elétrica a ser utilizada, utiliza-se a quantidade de células ( $n$ ) para definir a altura das células ( $\Delta L$ ), Eq. (35).

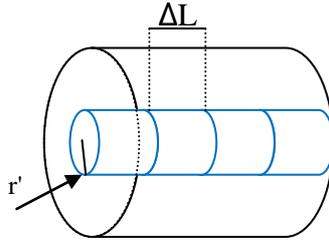


Figura 4.2 Divisão do material em células.

$$\Delta L = \frac{L}{n} \quad (35)$$

Com o tamanho da célula e a área que se deseja representar, calcula-se a resistência elétrica da porção do material desejado, Eq. (36).

$$R = \frac{1}{\kappa} \frac{\Delta L}{\pi r'^2} \quad (36)$$

Esse valor calculado é o valor da resistência total da célula, e para aplicá-lo no circuito exibido na Figura 4.1 observa-se que há dois resistores em cada célula, mas é calculado apenas um. Usa-se dois resistores, cada um com metade do valor da resistência, pois caso contrário, o capacitor da última célula seria conectado em paralelo com o terra do circuito elétrico, eliminando o efeito desse capacitor no circuito elétrico.

O valor da capacitância da célula é obtido pela Eq. (37).

$$C = \Delta L \cdot \pi r'^2 \cdot \rho \cdot C_p \quad (37)$$

A fim de analisar a temperatura no material é necessário um estímulo que seja análogo a uma fonte de calor, nesse caso se faz o uso de uma fonte de tensão. Como a tensão simula a fonte de calor, então a tensão medida nas células representa a temperatura no ponto.

## CAPÍTULO V

### MONTAGEM EXPERIMENTAL

#### 5.1 GERADOR TÉRMICO

O aparato principal do instrumento proposto, o Analisador de Propriedades Térmicas pela Harmônica Pura (APTHP) é o Gerador Térmico. O Gerador Térmico é capaz de gerar uma onda térmica senoidal na sua superfície, isso é realizado com o uso de Módulos Termoelétricos (TEC) como elementos atuadores, sensores de temperatura termopar tipo T, controlados por um controlador PID em uma aplicação desenvolvida no *LabVIEW*.

A plataforma *LabVIEW* (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*), *National Instruments*, é um ambiente de programação gráfica, linguagem G, que permite o desenvolvimento de *softwares* para controle, aquisição e tratamento de dados. As aplicações desenvolvidas nessa plataforma são chamadas *Virtual Instruments* (VI).

A principal diferença entre essa plataforma e as tradicionais, é a execução paralela das instruções no programa, tornando possível o uso de controladores em paralelo, como desejado nessa aplicação. Com a facilidade de integração da plataforma com todos os equipamentos do mesmo fabricante fizeram com que o seu uso crescesse rapidamente em ambientes industriais e em laboratórios.

O Gerador Térmico é formado por dois TECs, dois termopares, um dissipador de calor e um *cooler*. Os dois TECs são colocados em cascata para um melhor desempenho, pois o TEC I tem o papel de manter uma temperatura constante na superfície inferior do TEC II, assim torna possível o funcionamento adequado do TEC II, além de fazê-lo independente da temperatura ambiente, para gerar o sinal térmico desejado. A temperatura é medida com um termopar entre os TECs e outro na superfície do TEC II, onde é gerada a onda térmica. Os dados de temperatura são adquiridos e o controle PID é realizado no *LabVIEW*. É

importante ressaltar que o controle PID é realizado com uma entrada senoidal, ou seja, não é uma aplicação de um *setpoint* constante, mas variável no tempo. A Figura 5.1 ilustra os componentes do Gerador Térmico.

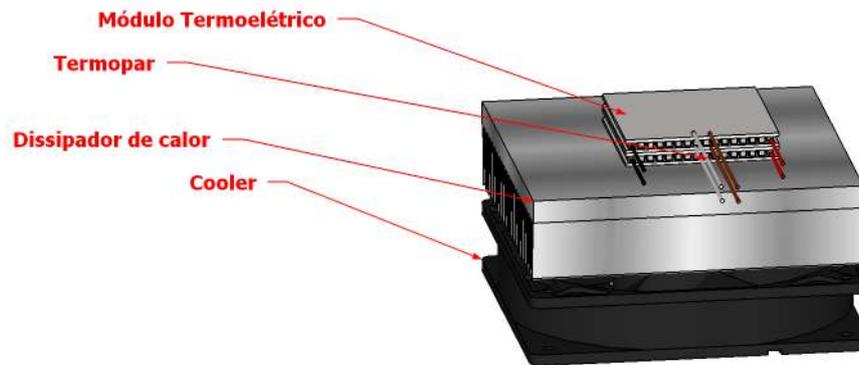


Figura 5.1 Gerador Térmico

## 5.2 ANALISADOR DE PROPRIEDADES TÉRMICAS PELA HARMÔNICA PURA (APTHP)

O elemento principal do APTHP é o Gerador Térmico, descrito anteriormente, mas o instrumento proposto também necessita de mais elementos para satisfazer o modelo matemático apresentado. Uma parte muito importante no modelo matemático é o uso de um material de referência, do qual se conhece as propriedades térmicas, então é necessário incluir esse material no instrumento. Para garantir todas as condições de contorno também é preciso controlar a temperatura na parte superior do instrumento, ou seja, na superfície do material de referência, e para isso é empregado mais um TEC. Uma condição importante de contorno apresentada no modelo matemático é que a amplitude e fase da temperatura na parte superior da referência seja zero, entretanto a onda senoidal térmica gerada na amostra possui um *offset*, dessa forma, a temperatura constante na parte superior da referência deve ser o mesmo valor do *offset* da onda senoidal aplicada na amostra.

Assim o instrumento do APTHP é composto por três TECs, o material da amostra, o material de referência, quatro termopares tipo T para medição de temperatura, dois dissipadores de calor com *coolers*. Os dissipadores e *coolers* são utilizados para retirar calor das superfícies que rejeitam calor dos TECs. Os quatro termopares são posicionados entre os TECs do Gerador Térmico, entre o Gerador Térmico e o material de amostra, entre

o material da amostra e o de referência, e o quarto termopar é colocado entre o material de referência e o último TEC.

Para melhorar a medição de temperatura e a condução de calor são utilizadas folhas de cobre de 0,1mm de espessura entre os elementos, e também é aplicada uma pasta térmica de prata. Para assegurar que a resistência de contato térmica seja a mínima possível, é utilizado um grampo mecânico para aplicar uma força mecânica nas extremidades do instrumento, e assim aumentar o contato entre os elementos. Como resultado é obtido uma medição de temperatura mais precisa e um melhor posicionamento do sensor.

A Figura 5.2 exibe a visão explodida do instrumento e a Figura 5.3 exibe a visão simplificada do mesmo.

Uma aplicação foi desenvolvida na plataforma *LabVIEW* para realizar as aquisições dos dados e o controle de temperatura utilizando o controlador PID (Proporcional, Integrador e Derivativo), a interface entre o instrumento e o computador é feito através do *Compact Field Point 2000* (cFP-2000). Os TECs precisam de uma quantidade de corrente relativamente alta, cerca de três Amperes para cada TEC, por essa razão é necessário circuitos de estágio de potência, já que o cFP-2000 não fornece potência, apenas o sinal de controle proveniente do PID. A ilustração do aparato instrumental completo é exibida na Figura 5.4.

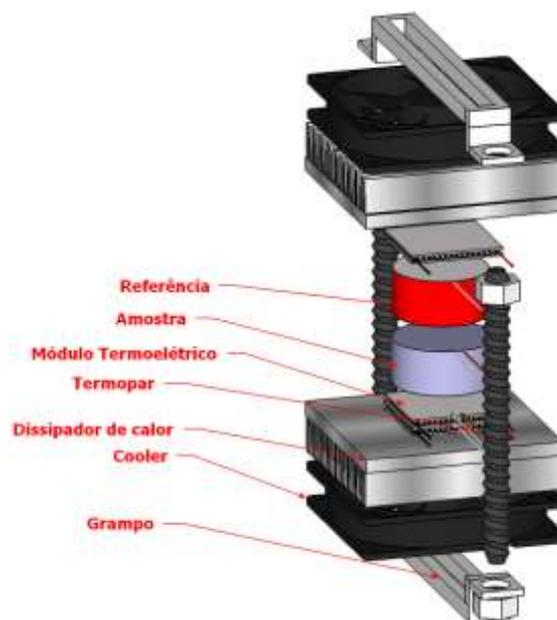


Figura 5.2 Instrumento do APTHP

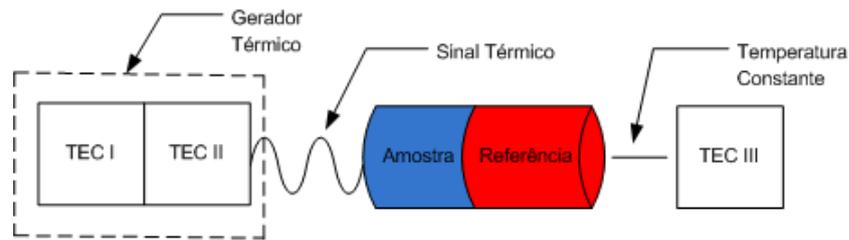


Figura 5.3 Vista Simplificada do Instrumento

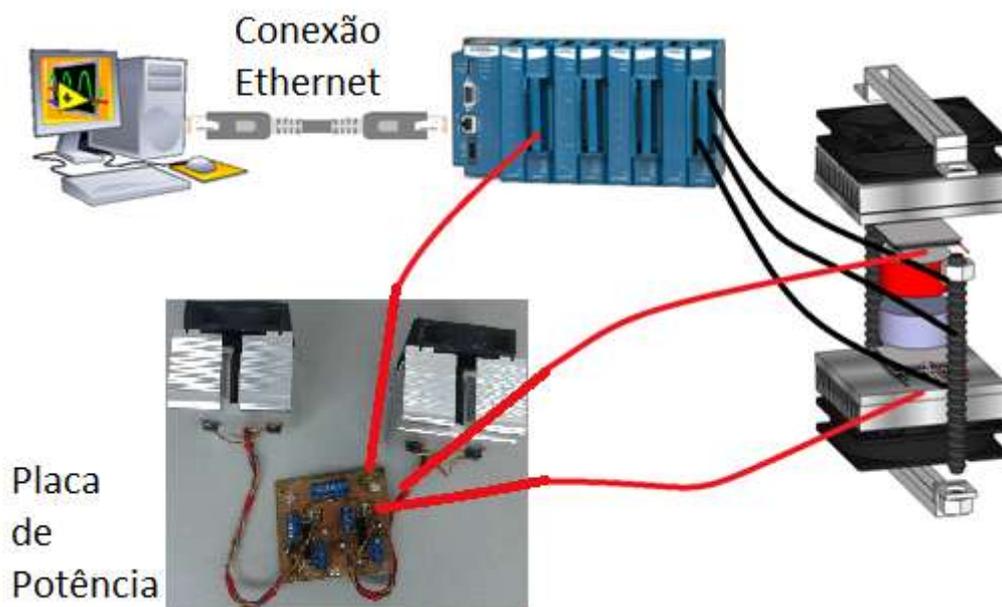


Figura 5.4 Aparato instrumental

### 5.3 SISTEMA DE CONTROLE

Como visto anteriormente, os valores de temperatura requeridos para o instrumento são específicos e necessitam ser precisos. No caso do Gerador Térmico é gerada uma onda térmica senoidal, e no TEC III é mantida uma temperatura constante. Para que isso ocorra é imprescindível o controle térmico nos pontos desejados.

Esse sistema de controle deve permitir o funcionamento do instrumento independente de possíveis perturbações externas. As temperaturas desejadas se encontram abaixo da ambiente, de 10 a 20 °C, uma das razões é o fato da pasta térmica de prata utilizada nos contatos entre os materiais se torna mais viscosa com baixas temperaturas, assim o

posicionamento do sensor de temperatura é mais preciso, pois não ocorrerão deslocamentos na pasta de prata.

O sistema de controle térmico empregado é composto pelos elementos: controlador, interface, circuito de potência, atuador, sensor e a planta na qual se deseja controlar a temperatura. No instrumento proposto temos três sistemas de controle distintos, um para cada TEC, onde a interface é o cFP-2000, o sensor é um termopar tipo T, o atuador é o TEC e as plantas são a superfície inferior do TEC II, a superfície do material de amostra e a superfície do material de referência, respectivamente para os TEC I, II e III. O esquema geral do controle térmico é exibido na Figura 5.5.

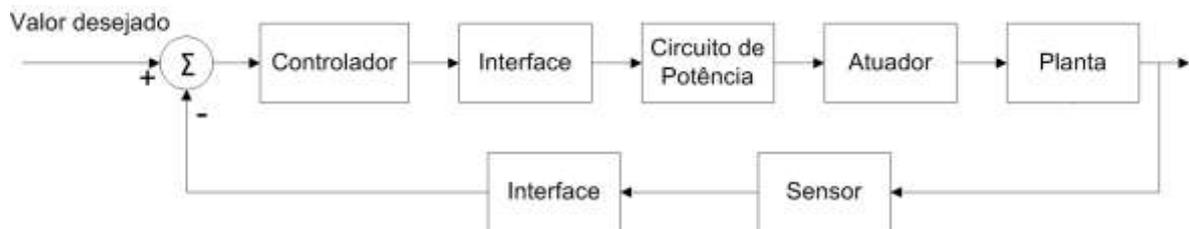


Figura 5.5 Sistema de Controle Térmico

### 5.3.1 Controlador PID

Os controladores mais comuns são dos tipos proporcional (P), integral (I), proporcional-integral (PI), proporcional-derivativo (PD) e proporcional-integral-derivativo (PID).

No controlador proporcional, a saída do controlador é proporcional ao sinal de erro atuante. Ele pode ser descrito como um amplificador com ganho ajustável.

No controlador proporcional-integral a saída do controlador é modificada a uma taxa de variação proporcional ao sinal de erro atuante.

A ação derivativa no controlador proporcional-derivativo corresponde a aplicação de um sinal de controle proporcional a derivada do sinal de erro

A combinação das ações de controle proporcional, integral e derivativo gera o controlador proporcional-integral-derivativo. Esse controlador possui as vantagens de cada uma das ações empregadas. A equação do controlador PID é dada na Eq. (38).

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{d e(t)}{dt} \quad (38)$$

A equação do controlador possui três termos, o primeiro termo representa a parte proporcional ao sinal do erro, já o segundo termo faz referência à ação integral, e o último termo é referente à ação derivativa. O projeto do controlador PID consiste em determinar as três constantes:  $K_p$  (ganho proporcional),  $T_i$  (tempo integrativo) e  $T_d$  (tempo derivativo).

## 5.4 SOFTWARES DESENVOLVIDOS

### 5.4.1 Instrumentação e Controle

A instrumentação e controle do instrumento são realizados na plataforma *LabVIEW*, devido as características mencionadas anteriormente sobre a mesma. Na Figura 5.6 é exibido o painel frontal da aplicação desenvolvida e na Tabela 1 são exibidos os parâmetros de entrada necessários para execução do VI desenvolvido.

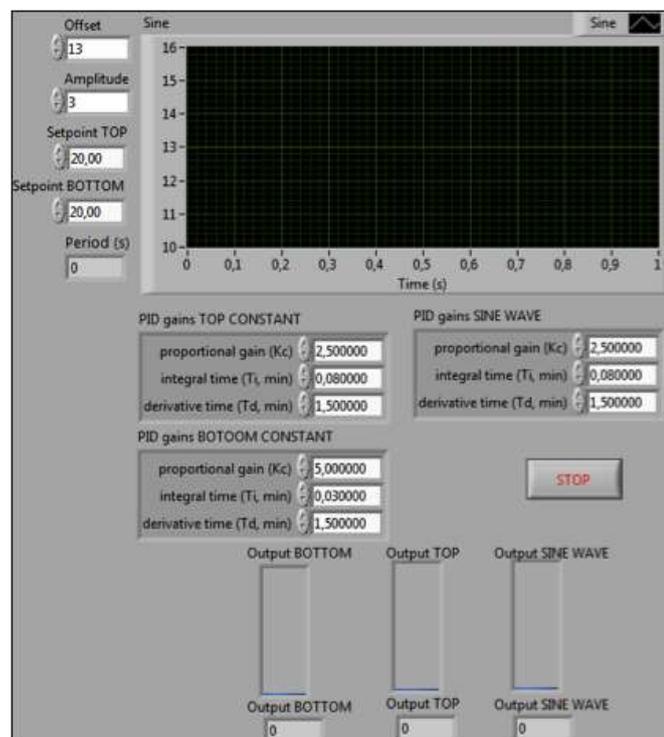


Figura 5.6 Painel Frontal - Instrumentação e Controle

Tabela 1 – Parâmetros de entrada do VI para Instrumentação e Controle

Parâmetros de entrada do VI	
TEC II (Senóide Térmica)	<i>Offset</i>
	Amplitude
	Parâmetros do controle PID
TEC I	Temperatura desejada
	Parâmetros do controle PID
TEC III (Temperatura na Referência)	Temperatura desejada (igual ao <i>Offset</i> da senóide)
	Parâmetros do controle PID

Os valores de temperatura adquiridos pelo cFP-2000 são utilizados no controle e salvos em arquivo para posterior análise, porém não são exibidos no painel frontal, pois a atualização de valores numéricos ou gráficos no painel frontal fazem uso do processamento da aplicação e interferem na eficiência dos controladores. O único indicador gráfico é a onda senoidal que será produzida pelo Gerador Térmico, a qual não sofre atualização durante toda a execução do programa.

O controlador PID utilizado é uma aplicação do próprio *LabVIEW*, no qual se insere os parâmetros desejados e ele fornece a resposta do controlador. As constantes foram definidas por tentativa e erro, especialmente as constantes para a geração da onda térmica, pois o valor de temperatura desejado não é constante, e não há técnicas tradicionais de estimação de parâmetros que possam ser aplicadas.

#### 5.4.2 Resolução do Problema Inverso

No Capítulo III foi apresentado o modelo matemático, o qual resultou em equações que fornecem a temperatura em função da posição nos materiais, tendo como dados de entrada as propriedades térmicas dos materiais em questão, esse problema é caracterizado como o problema direto.

O problema inverso tem como objetivo fornecer as propriedades térmicas a partir dos dados de temperatura entre os dois materiais, amostra e referência. Pelas características exponenciais das Equações (25) e (26), o método numérico de aproximações sucessivas é o mais adequado, e para isso foi utilizado um *software* de matemática simbólica, *MATLAB* da MathWorks, para desenvolver o algoritmo a ser executado em uma aplicação no *LabVIEW*.

Para utilizar os dados provenientes da aquisição de dados na determinação das propriedades térmicas é fundamental conhecer a onda térmica exata entre os materiais, mas como os dados provenientes da aquisição de dados são ruidosos é preciso a aplicação de uma técnica que possa extrair, sem perda de informações, apenas a onda térmica, pois as informações desejadas são a amplitude e a fase da onda.

O algoritmo de Levenberg–Marquardt presente no *LabVIEW* é utilizado para obter uma regressão senoidal, então a sua resposta é uma onda senoidal sem ruído, porém com a mesma amplitude e fase da onda ruidosa de entrada. Com os dados da onda térmica é executado o algoritmo de aproximações sucessivas para obter a condutividade térmica do material de amostra. A Figura 5.7 exibe o painel frontal do VI desenvolvido para determinação da condutividade térmica.

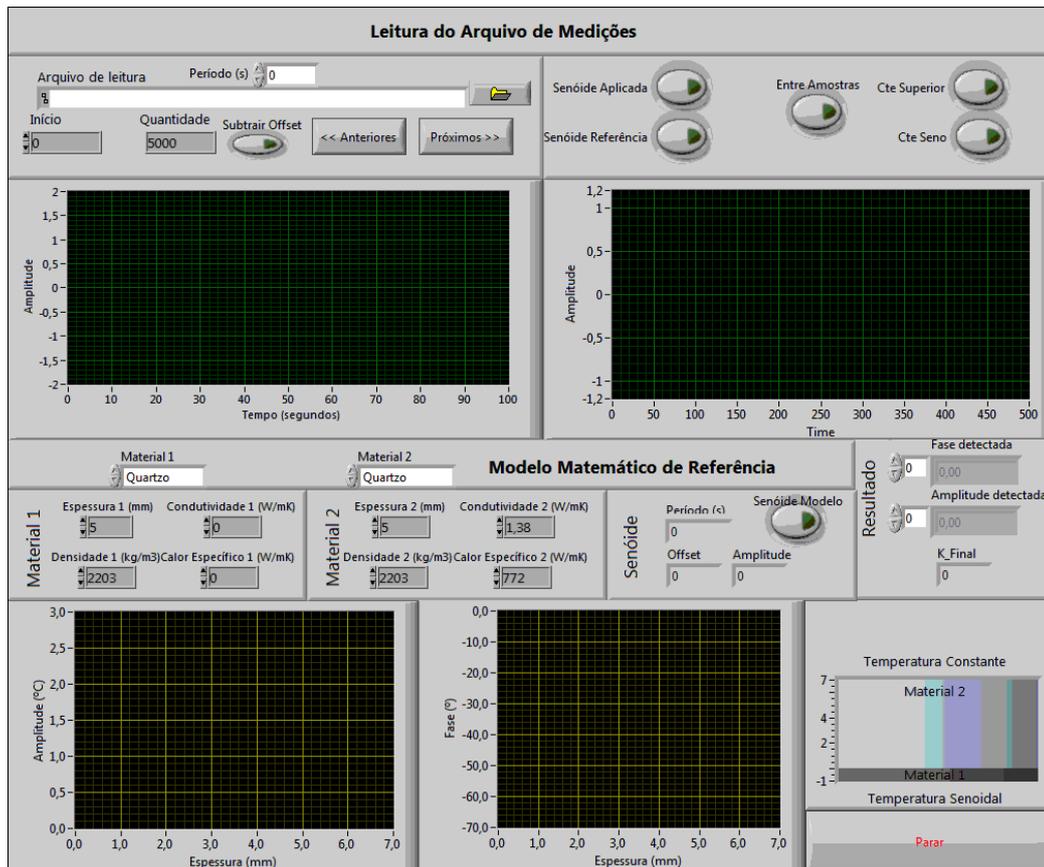


Figura 5.7 Painel Frontal - Determinação da Condutividade Térmica

## 5.5 MATERIAIS

### 5.5.1 Módulo Termoelétrico

O Módulo Termoelétrico (*Thermoelectric Cooler* - TEC) ou Pastilha Peltier tem aplicações para melhoria dos desempenhos dos componentes eletrônicos, da refrigeração comercial, do controle de temperatura de elementos para eletrônica e ótica de precisão, e como elemento para ensaios de componentes e sistema eletrônicos. Uma aplicação proposta neste texto é de um gerador de sinal harmônico térmico (fluxo de calor e temperatura). Este novo elemento pode ser aplicado em um novo método de determinação das propriedades termofísicas e de ensaios de sistemas de engenharia térmica.

Sistemas termoelétricos são dispositivos de estado sólido que convertem energia térmica de um gradiente de temperatura em energia elétrica (efeito Seebeck) ou converte energia térmica de um gradiente de energia elétrica (efeito Peltier). A Figura 5.8 mostra uma idealização de um TEC ou pastilha Peltier e a Figura 5.9 exibe uma ilustração do módulo termoelétrico. Os materiais semicondutores tipo *n* e *p* são soldados em um metal **A** e os terminais de *n* e *p* são soldados em dois metais **B** e **C**. O efeito Seebeck afirma que se a junção **A** for posta em uma temperatura  $T_S$  e as junções **B** e **C** em uma temperatura  $T_R$  uma força eletromotriz irá surgir entre **B** e **C**. A célula Peltier é baseada na reversibilidade deste fenômeno: Uma fonte de corrente ou de tensão elétrica entre **B** e **C** irá gerar uma diferença de temperatura entre os terminais **A** e (**B,C**), que é dada por  $\Delta T = T_S - T_R$ . A curva que descreve este diferencial de temperatura e a força eletromotriz é aproximadamente linear, por faixa.

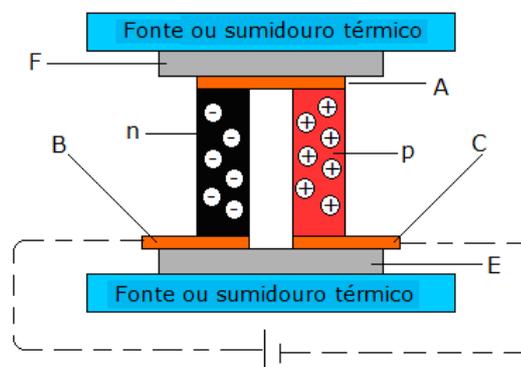


Figura 5.8 Representação simplificada de um módulo termoelétrico



Figura 5.9 Ilustração do Módulo Termoelétrico

Se os dois contatos de um semicondutor são mantidos em uma diferença de temperatura ( $\Delta T = T_S - T_R$ ), uma diferença de potencial ( $V_S$ ) pode ser observada entre eles. Essa diferença de potencial ( $V_S$ ) é chamada de tensão de Seebeck e surge a partir da rápida difusão dos portadores na junção quente. O coeficiente de Seebeck ( $S$ ) é definido pela Eq. (39).

$$S = \frac{V_S}{\Delta T} \quad (39)$$

Uma corrente ( $I_p$ ) fluindo em um circuito com um contato de metal entre os semicondutores ( $n$  e  $p$ ) tende a bombear calor de um eletrodo para o outro devido ao efeito Peltier. Uma unidade de resfriamento composto de um elemento semicondutor do tipo  $p$  e um tipo  $n$  unidos por contato ôhmico é esboçado na Figura 5.10.

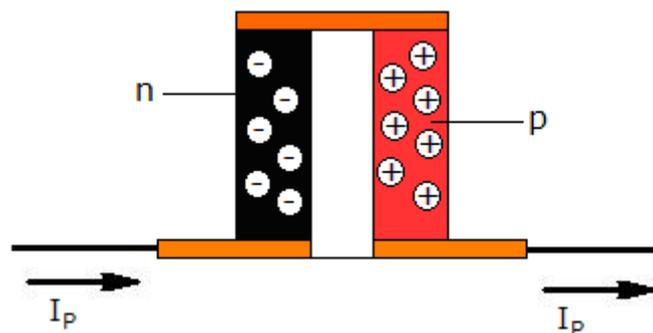


Figura 5.10 Representação do sensor de Peltier

A corrente  $I_p$  bombeia o calor da junção comum, arrefecendo-a em uma quantidade  $\Delta T$  abaixo da junção quente de referência ( $\Delta T = T_S - T_R$ ). O efeito Peltier é reduzido pelo calor conduzido para baixo devido à condutividade térmica e pelo efeito Joule devido à corrente elétrica. A taxa de remoção de calor na junção fria é expressa pela Eq. (40)

$$Q_c = S I_p T_c - \frac{1}{2} R_p I_p^2 - \kappa \Delta T \quad (40)$$

Ou

$$Q_c = \Pi I_p - \frac{1}{2} R_p I_p^2 - \kappa \Delta T \quad (40')$$

Onde:

$Q_c$  é a taxa de remoção de calor da junção fria;

$\kappa$  é a condutividade térmica do material;

$R_p$  é resistência elétrica dos materiais semicondutores;

$S$  é o coeficiente de Seebeck;

$\Pi$  é o coeficiente de Peltier.

A Figura 5.11 ilustra o fluxo de potência expresso pela Eq. (40). Há uma corrente ótima para um máximo  $\Delta T$  para uma célula de Peltier, Figura 5.12. Em corrente baixa, o efeito Peltier é pequeno. Em grandes correntes, o efeito de refrigeração é grande, mas o aquecimento por efeito Joule pode ser maior, pois aumenta com o quadrado da corrente. O desempenho de um TEC é definido pela Eq. (41). Os materiais escolhidos para efeito Peltier deverão ter grande coeficiente Seebeck, grande condutividade elétrica e pequena condutividade térmica.

$$Z = S^2 \frac{\sigma}{\kappa} \quad (41)$$

Onde  $\sigma$  é a condutividade elétrica do material.

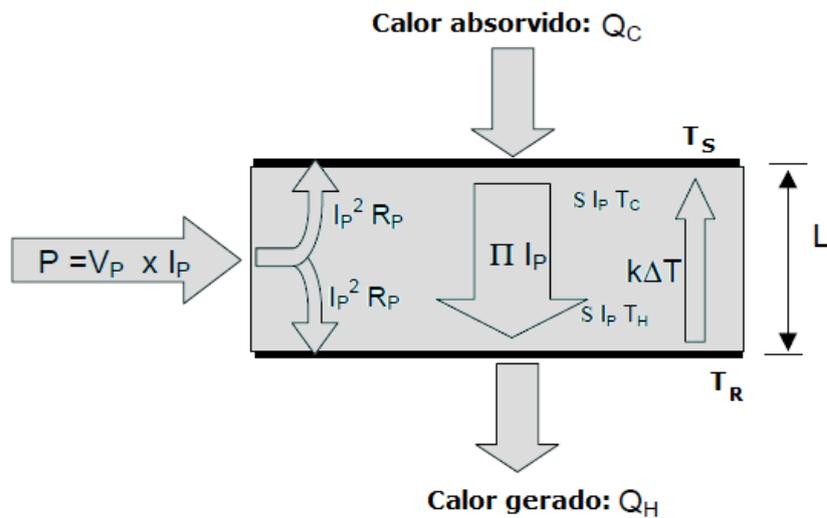


Figura 5.11 Diagrama do fluxo de potência em um TEC

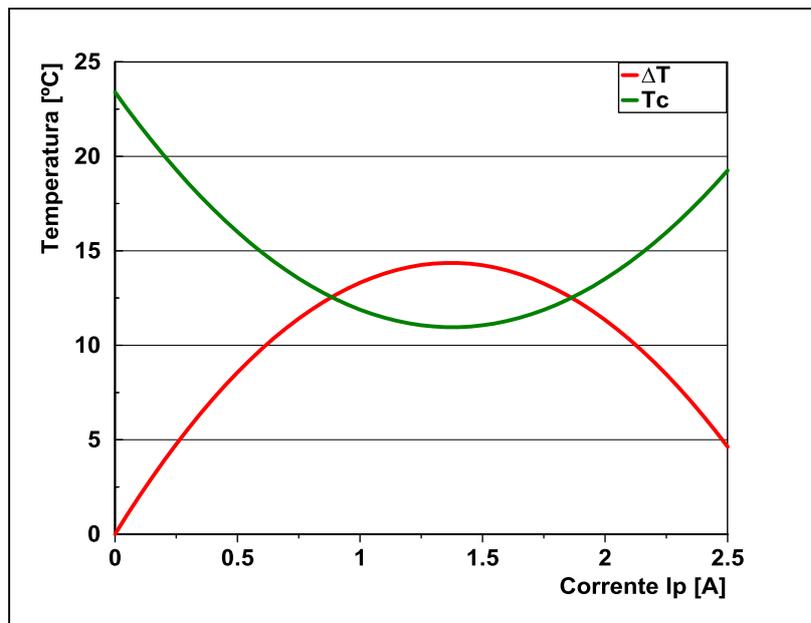


Figura 5.12 Curvas das temperaturas e diferenças em função de  $I_P$

Em uma pastilha Peltier comercial, os elementos **E** e **F** incorporados à mesma, Figura 5.13, são isolantes elétricos e bons condutores térmicos. A resistência térmica da célula é semelhante à resistência térmica da soma da resistência térmica da junção mais a resistência térmica da cerâmica nos dispositivos semicondutores. As resistências térmicas dos isolantes devem ser incorporadas ao modelo. Na equivalência da analogia térmica elétrica, a resistência total poderá ser representada por uma única resistência térmica. Em uma célula comercial, não é possível medir as temperaturas nas junções, pois estas estão situadas internamente e sem contato acessível. Também deverá ser acrescentada a perda de

calor por convecção devido a diversas junções (um TEC é formado por inúmeros destes elementos em série).

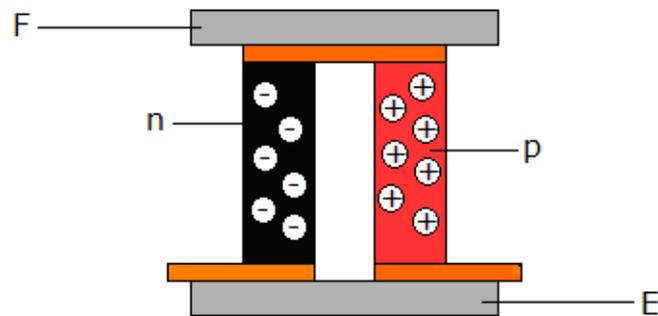


Figura 5.13 Módulo Termoelétrico incorporado os elementos isoladores elétricos

### 5.5.2 Termopar

O termopar é um dos sensores de temperatura mais utilizados, principalmente pela sua confiabilidade e facilidade de uso. Definimos termopares como sensores de medição de temperatura que são constituídos por dois condutores metálicos e distintos, puros ou heterogêneos.

Thomas Johann Seebeck descobriu em 1821 que uma junção de metais diferentes produz uma tensão elétrica e essa tensão é dependente da temperatura. Esse efeito é denominado efeito Seebeck, como detalhado na subsecção anterior.

Para realizar a medição é necessária uma diferença de temperatura, portanto é indispensável o uso de uma junção fria, ou junção de referência, enquanto a junção quente, ou junção de medição, deve ser colocada onde se deseja mensurar a temperatura, conforme ilustrado na Figura 5.14.

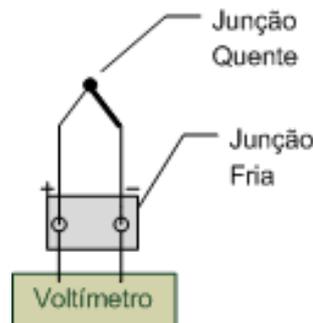


Figura 5.14 Termopar

O instrumento de medida tem de ter a capacidade de lidar com a compensação da junção fria, bem como com o fato de a saída do termopar não ser linear. A relação entre a temperatura e a tensão de saída é uma equação polinomial de 5ª a 9ª ordem dependendo do tipo do termopar. Alguns instrumentos de alta precisão guardam em memória os valores das tabelas dos termopares para eliminar esta fonte de erro (OLIVEIRA, 2010).

Dentre os diversos tipos de termopares disponíveis no mercado é necessária a escolha adequada dos mesmos, de acordo com sua temperatura suportada, sensibilidade, entre outras. Os tipos mais comuns de termopares são:

- Tipo K (Cromel / Alumel) - O termopar tipo K é um termopar de uso genérico. Tem um baixo custo e cobre temperaturas entre os -200 e os 1200 °C, tendo uma sensibilidade de aproximadamente  $41\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ .
- Tipo E (Cromel / Constantan) - Este termopar possui elevada sensibilidade ( $68\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ) que o torna adequado para baixas temperaturas.
- Tipo J (Ferro / Constantan) - A sua gama limitada (-40 a 750 °C) é a responsável pela sua menor popularidade em relação ao tipo K.
- Tipo N (Nicrosil / Nisil) - A sua elevada estabilidade e resistência à oxidação a altas temperaturas tornam o tipo N adequado para medições a temperaturas elevadas, sem recorrer aos termopares que incorporam platina na sua constituição (tipos B, R e S). Foi desenhado para ser uma “evolução” do tipo K.
- Tipo B (Platina / Ródio-Platina) - Adequado para medição de temperaturas até aos 1800 °C.
- Tipo R (Platina / Ródio-Platina) - Adequado para medição de temperaturas até aos 1600 °C. Reduzida sensibilidade ( $10\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ) e custo elevado.
- Tipo S (Platina / Ródio-Platina) - Adequado para medição de temperaturas até aos 1600 °C. Reduzida sensibilidade ( $10\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ), elevada estabilidade e custo elevado.

- Tipo T (Cobre / Constantan) - É dos termopares mais indicados para medições na faixa dos  $-270^{\circ}\text{C}$  até  $400^{\circ}\text{C}$ , é muito preciso em função da grande homogeneidade com que o cobre pode ser processado. (OLIVEIRA, 2010)

O uso do termopar Tipo T é o mais indicado para essa aplicação, pela sua alta sensibilidade ( $43\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ ) na faixa desejada, de 10 a  $60^{\circ}\text{C}$ , além de possuir um tempo de resposta rápido. Porém, a principal característica que resultou na escolha desse termopar específico foi o tamanho de sua seção, de 0,5mm, pois os termopares são inseridos entre materiais na montagem experimental, dessa forma quanto menor o sensor, maior será o contato entre os materiais e menor a resistência térmica de contato.

### 5.5.3 Compact Field-Point (cFP-2000)

O *compact Field Point* é um Controlador Lógico Programável (CLP), desenvolvido pela *National Instruments* especialmente para aplicações industriais, como monitoramento e controle embarcado. Ele possui arquitetura modular, isolamento elétrica entre os módulos e condicionamento de sinais embarcado. Seus módulos possibilitam a conexão direta com sensores e atuadores de uso industrial, pois possui módulos de aquisição e saída de tensão e corrente analógica, PWM (*Pulse Width Modulation*) e sensores de temperatura. A unidade central do cFP-2000 possui as interfaces de comunicação RS-232 e Ethernet, com a última é possível ligar o cFP à rede existente no local. Um ponto importante do equipamento, que difere dos tradicionais CLPs, é a possibilidade do uso em conjunto com o *LabVIEW* em tempo real, ou seja, o *LabVIEW* recebe os dados do cFP e executa o processamento dos dados para controle em tempo real.

O *LabVIEW* em conjunto com o cFP-2000 permite o desenvolvimento de aplicações para controle, analógico ou digital, de maneira embarcada, pois o algoritmo desenvolvido no *LabVIEW* utiliza o cFP-2000 como interface (aquisição e envio de dados) para os sensores e atuadores. E com o uso das ferramentas de controle PID (Proporcional, Integrador e Derivativo) e Fuzzy do *LabVIEW*, o desenvolvimento do controle se torna mais prático, permitindo o desenvolvimento de controladores avançados em menor tempo.

O cFP-2000 é um equipamento recomendado para o uso industrial por sua robustez e versatilidade, e pela sua facilidade de integração com os sensores e atuadores, ele se torna

bastante adequado para as especificidades do uso em laboratório. A resolução de problemas de engenharia se torna mais simplificada com o uso do mesmo.

No presente trabalho, fez-se uso do cFP-2000, constituído por:

- Unidade central de processamento (CPU);
- Conexão Ethernet para rede local;
- Módulo de aquisição de sinais, específico para termopares (cFP-TC-120);
- Módulo de saída, tensão analógica (cFP-AO-210).

Os Termopares tipo T são ligados diretamente no módulo correspondente, onde há uma junção fria, necessária para realizar as medições com exatidão. A resolução do conversor analógico-digital do módulo TC-120 é de 16 bits.

O cFP-2000 utilizado é exibido na Figura 5.15.



Figura 5.15 Compact Field-Point 2000

#### 5.5.4 Pasta Térmica

A pasta térmica é aplicada nas superfícies dos materiais para aumentar o contato entre os mesmos, pois as superfícies apresentam vales e depressões muito pequenas que ficariam preenchidas com lacunas de ar caso não haja a aplicação da pasta térmica. Dessa forma, a resistência térmica de contato é minimizada quando inserido um material de interface, nesse caso a pasta térmica. Outra maneira é utilizar um adesivo térmico permanente que possui a mesma função, mas não é possível separar os componentes após a aplicação, já que ele funciona como uma cola.

A Figura 5.16 ilustra a aplicação da pasta térmica como material de interface entre dois materiais distintos para maximizar a área de contato entre eles.

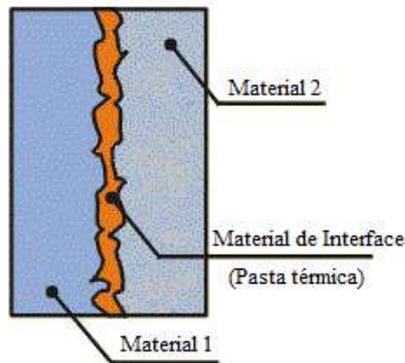


Figura 5.16 Interface entre dois materiais

A pasta térmica utilizada, *Artic Silver*® 5, é constituída de prata micronizada e aprimorada com partículas cerâmicas termicamente condutoras. Ela possui uma condutividade térmica muito maior do que a pasta térmica tradicional, o que elimina quaisquer lacunas de ar ao mesmo tempo em que garante uma boa condução de calor. Da mesma forma que a pasta, o adesivo térmico, *Arctic Silver*™ *Thermal Adhesive*, foi utilizado para auxiliar na transferência de calor. Na Figura 5.17 são exibidos o adesivo e a pasta térmica.



Figura 5.17 Pasta Térmica e Adesivo Térmico

A pasta foi aplicada apenas nos componentes que devem ser substituídos, ou seja, a amostra e a referência. E o adesivo térmico foi aplicado na formação do Gerador Térmico e no TEC III, responsável pela temperatura constante, para colá-lo no dissipador de calor, com isso foi eliminado a necessidade de remontar todo o instrumento a cada utilização.

## CAPÍTULO VI

### RESULTADOS

Nesse Capítulo são apresentados os resultados obtidos através dos métodos discutidos nos capítulos anteriores, também são apresentados os valores das condutividades térmicas obtidas através da solução do problema inverso. Os materiais, e suas respectivas espessuras, utilizados no presente trabalho são: Nylon 6 (2mm e 4mm), aço ASTM A36 (4,85mm e 8 mm) e Quartzo (5mm). As frequências das ondas térmicas foram de 0,01 Hz a 0,0001 Hz.

#### 6.1 RESOLUÇÃO DO PROBLEMA DIRETO PELO NSM

Um método alternativo de resolução do problema de condução de calor, que é mais simples e rápido na obtenção do perfil de temperatura. Este se baseia na analogia existente entre grandezas térmicas e grandezas elétricas. O diagrama esquemático do circuito elétrico é feito dividindo-se o meio em um determinado número de células (discretização espacial). Para o dimensionamento dos componentes do circuito é necessário considerar a geometria cilíndrica do sistema, as propriedades térmicas ( $\rho$ ,  $C_p$  e  $\kappa$ ) dos materiais, o comprimento e raio do cilindro. Ambos os materiais utilizados no problema foram divididos em 12 células cada, total de 24 células. Na Figura 6.1 é exibido, ilustrativamente, o circuito simulado no PSPICE utilizando a discretização em 2 células para cada material, totalizando 4 células, onde o material de amostra é o Quartzo (5mm) e o de referência é o Nylon 6 (2mm). No Anexo I está descrito como são realizados os cálculos das resistências e capacitâncias para as simulações no PSPICE.

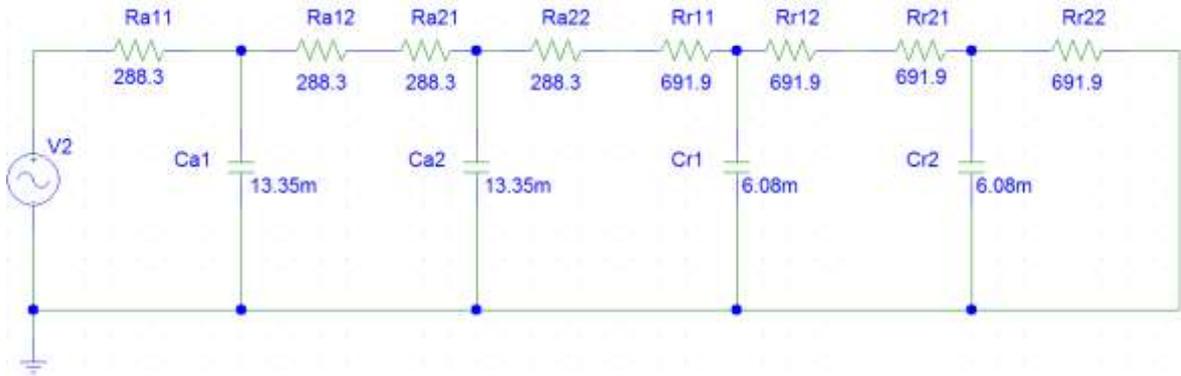


Figura 6.1 Circuito no PSPICE para 2 células de cada material. Amostra: Quartzo (5mm); Referência: Nylon6 (2mm)

A resolução do problema direto pelo NSM é comparada com a resolução analítica para validar o método proposto. As Figuras 6.2 e 6.3 exibem as respostas analíticas e NSM.

A partir da comparação dos valores obtidos pelos dois métodos distintos é validada a utilização do NSM na resolução do problema direto apresentado nesse trabalho.

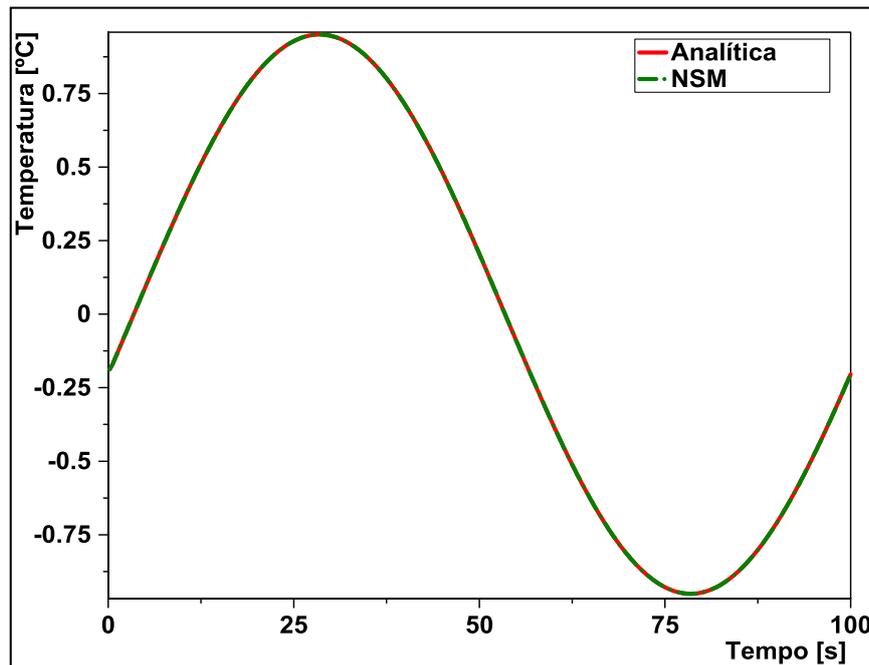


Figura 6.2 Resposta Analítica e NSM, Aço 4mm (Amostra) e Nylon 2mm (Referência). Frequência de 0,01Hz

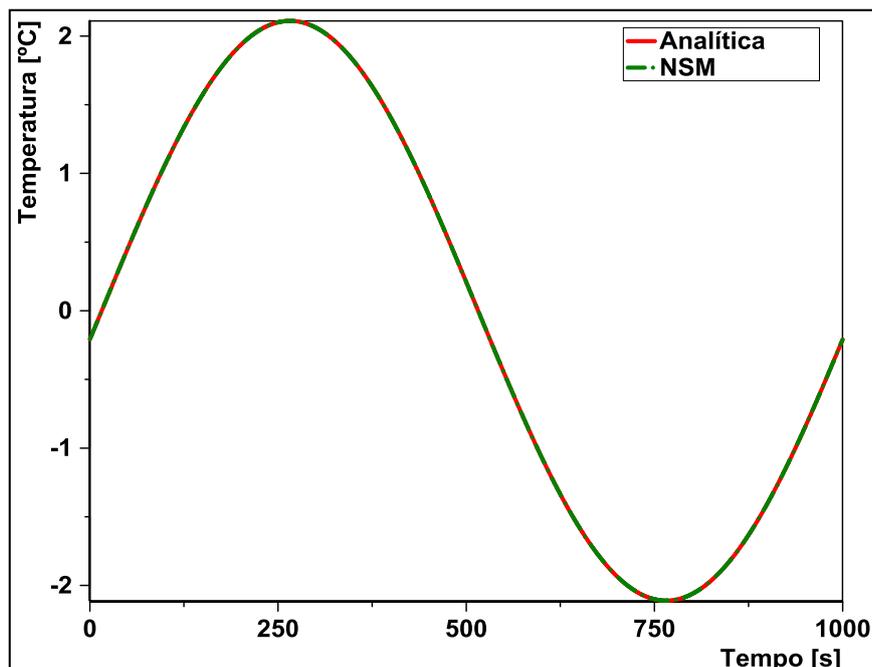


Figura 6.3 Resposta Analítica e NSM, Quartzo 5mm (Amostra) e Nylon 2mm (Referência). Frequência de 0,001Hz

## 6.2 GERADOR TÉRMICO

Apresentado no Capítulo V, esse componente do instrumento possui o papel fundamental de gerar a onda térmica na superfície do material que será analisado, e por essa razão se faz necessário que essa onda seja a mais exata e precisa possível, outro ponto que acentua a importância do resultado do Gerador Térmico é o fato do controlador possuir como entrada uma onda senoidal, diferente das aplicações tradicionais, onde a entrada é um valor constante.

O gráfico de resposta do Gerador Térmico para a frequência de 0,01Hz é exibido na Figura 6.4, e o erro absoluto (Senóide Gerada subtraída da Senóide Referência) é exibido na Figura 6.5. Da mesma forma ocorre para a frequência de 0,001Hz, a resposta e o erro absoluto são exibidos, respectivamente, nas Figuras 6.6 e 6.7.

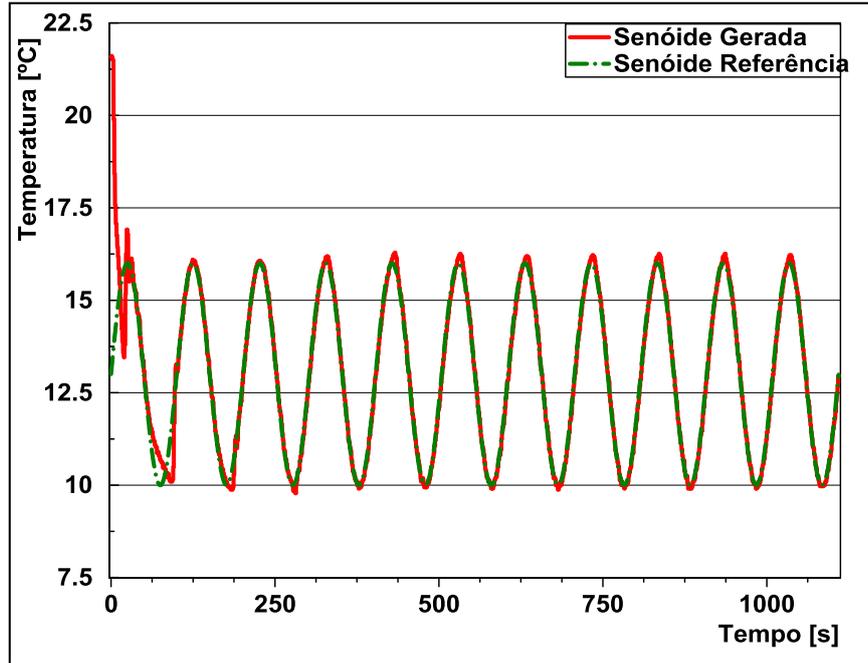


Figura 6.4 Resposta do Gerador Térmico ; Frequência 0,01Hz.

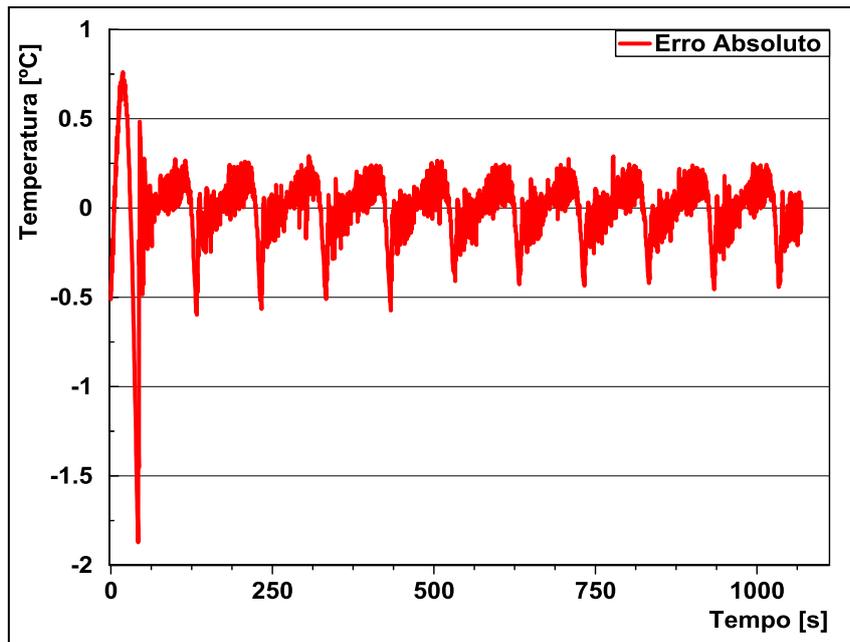


Figura 6.5 Erro Absoluto para fequência 0,01Hz.

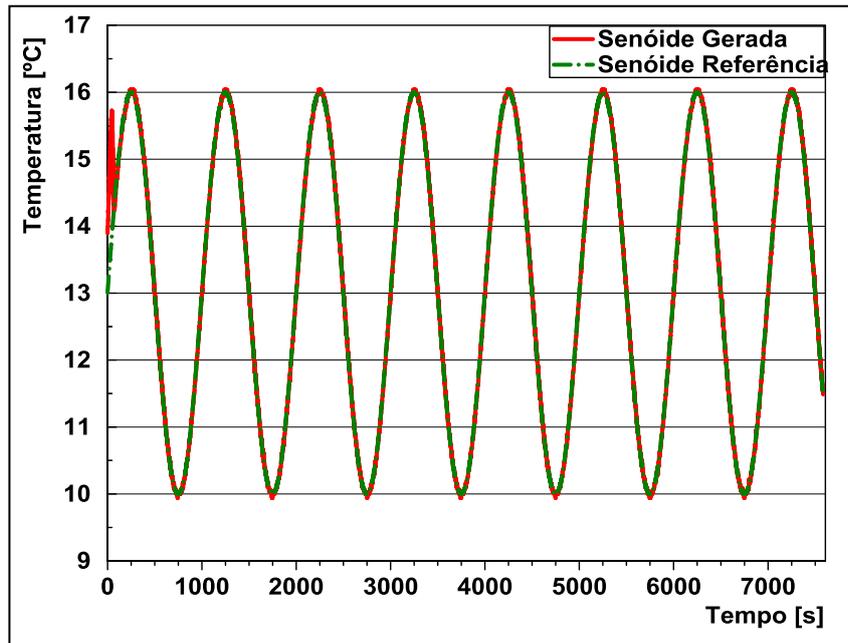


Figura 6.6 Resposta do Gerador Térmico ; Frequência 0,001Hz.

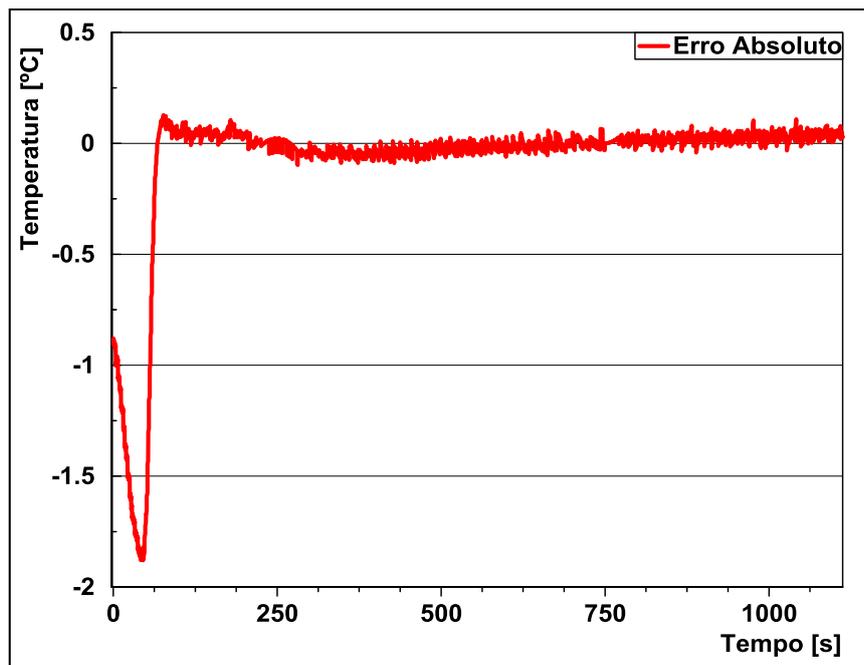


Figura 6.7 Erro Absoluto para frequência 0,001Hz.

Tanto na resposta quanto no erro é possível observar que o comportamento é melhor com a frequência de 0,001Hz, entretanto a resposta em 0,01Hz é satisfatória. Com esses resultados é possível afirmar que o Gerador Térmico satisfaz o requisito básico, que é gerar uma onda senoidal, para utilização no APTHP.

### 6.3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O objetivo principal da montagem experimento do APTHP é a obtenção da temperatura entre o material da amostra e o material de referência, como descrito no Capítulo V, TECs são utilizados no controle de temperatura que satisfaçam o modelo matemático apresentado no Capítulo III. O sensor de temperatura termopar tipo T é colocado entre o material de amostra e o material de referência, pois esse é o ponto onde se deseja obter a onda térmica. Na analogia entre o sistema térmico e o elétrico é possível afirmar que a onda térmica aplicada no material de amostra possui uma amplitude e fase diferente da onda adquirida entre os materiais e com esses dados é possível determinar a condutividade térmica do material em questão.

Os resultados experimentais são comparados com os resultados analíticos e com os do NSM. Os experimentos foram conduzidos com as frequências de 0,01Hz, 0,001Hz, 0,0002Hz e 0,0001Hz. A duração se deu até o tempo em que houvesse cerca de 8 períodos da onda térmica em estado estacionário, então a análise dos resultados foi realizada. A amplitude das senóides térmicas geradas no material de amostra varia de 1 a 3 °C, essa variação é de acordo com o a dinâmica do sistema de controle, pois em alguns experimentos o sistema não foi capaz de se estabilizar e a solução encontrada para esse problema foi alterar a senóide térmica gerada.

Na análise dos dados os valores são normalizados, ou seja, cada ponto da onda é subtraído da média do sinal completo, isso é feito com a intenção de se aproximar do modelo matemático, pois nele o sinal térmico é normalizado.

Nas Figuras 6.8, 6.9, 6.10 e 6.11 são exibidos os resultados experimentais, juntamente com os resultados teóricos, para as frequências de 0,01Hz.

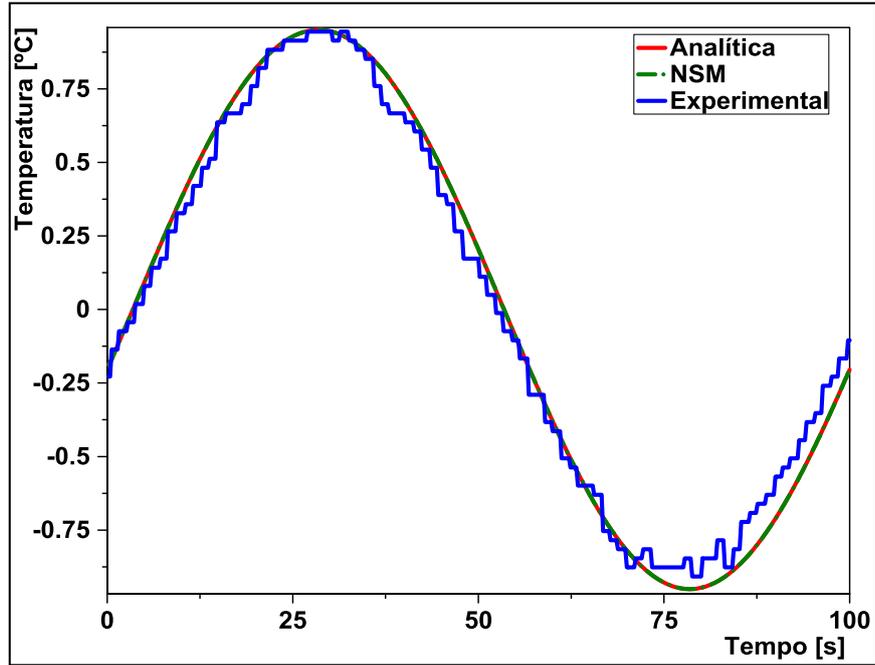


Figura 6.8 Onda térmica: Amostra ASTM A36 (4,85 mm), referência: Nylon (2 mm). Frequência de 0,01Hz

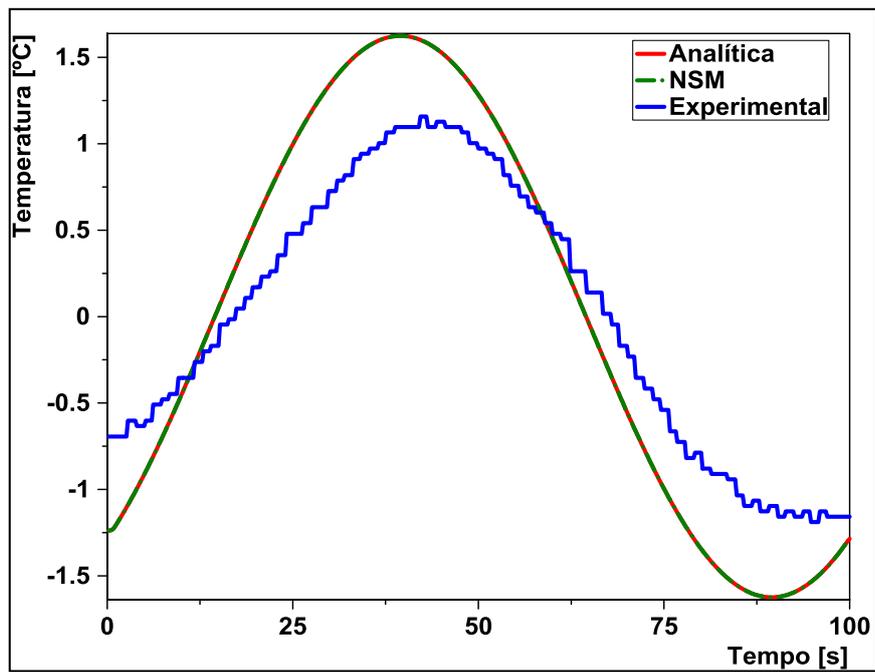


Figura 6.9 Onda térmica: Amostra Nylon (2 mm), referência: Quartz (5 mm). Frequência de 0,01Hz

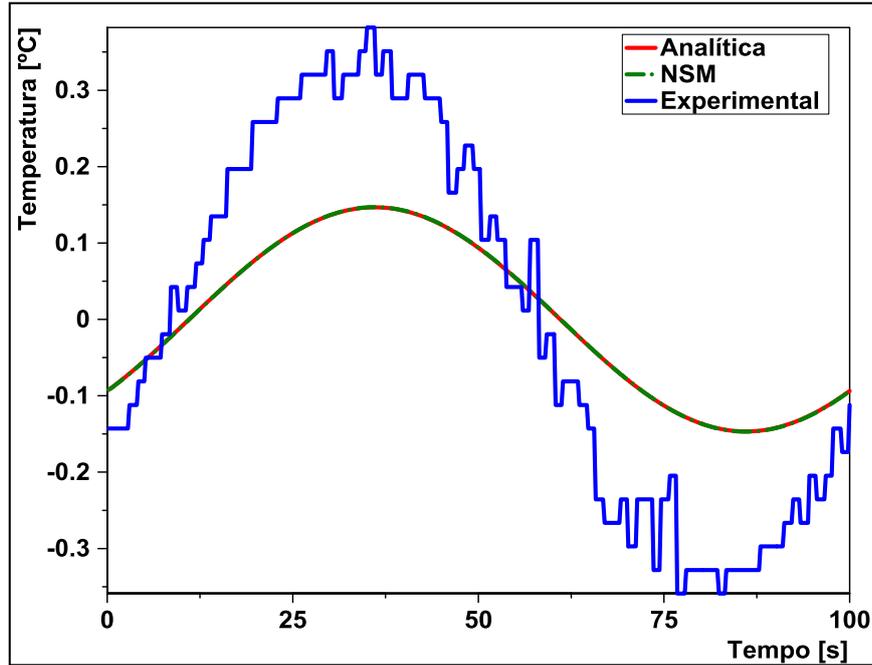


Figura 6.10 Onda térmica: Amostra Nylon (2mm), referência: ASTM A36 (8mm). Frequência de 0,01Hz

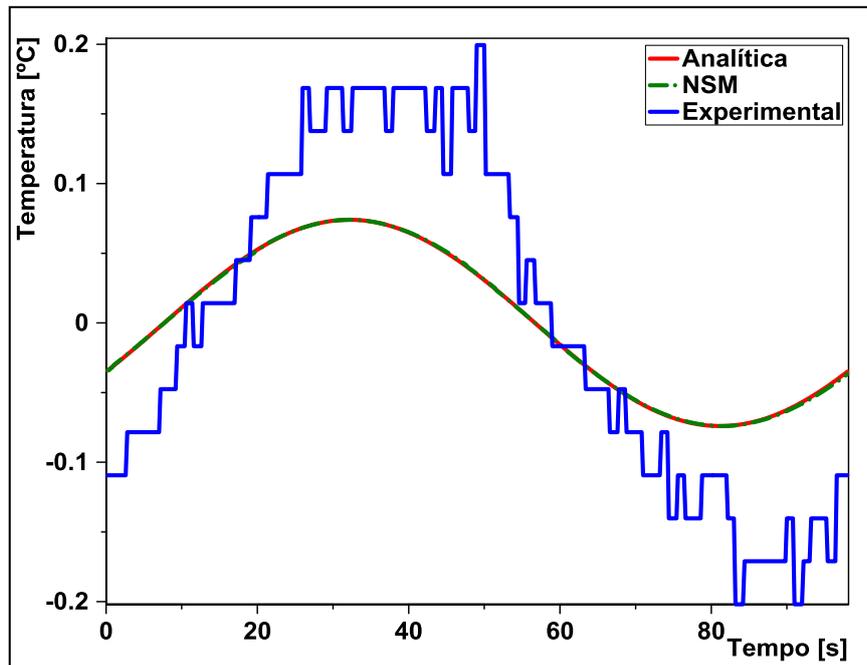


Figura 6.11 Onda térmica: Amostra Quartzo (5 mm), referência: ASTM A36 (4,85mm). Frequência de 0,01Hz

Os resultados obtidos com a frequência de 0,01Hz não são satisfatórios, pois as senóides térmicas adquiridas entre os materiais não são, em sua maioria, semelhantes aos valores obtidos de maneira analítica, ou ainda pelo NSM. Por essa razão, a frequência do sinal térmico gerado foi diminuída, visando a melhora da resposta do sistema.

Nas Figuras 6.12, 6.13, 6.14, 6.15 e 6.16 são exibidos os resultados experimentais com a frequência de 0,001Hz, juntamente com os resultados teóricos.

Observa-se que a onda térmica adquirida no ponto de interesse ficou mais próxima daquelas obtidas pelos outros métodos. Ainda com base nessa informação, a frequência foi mais uma vez reduzida.

A onda térmica apresentada na Figura 6.17 possui uma frequência de 0,002Hz. Seu resultado, no valor da amplitude, não difere muito dos outros com frequência de 0,001Hz, porém há uma diferença na fase do sinal, uma característica importante do sistema proposto é o valor da fase do sinal térmico, então mais uma vez a frequência foi reduzida, seu resultado é exibido na Figura 6.18.

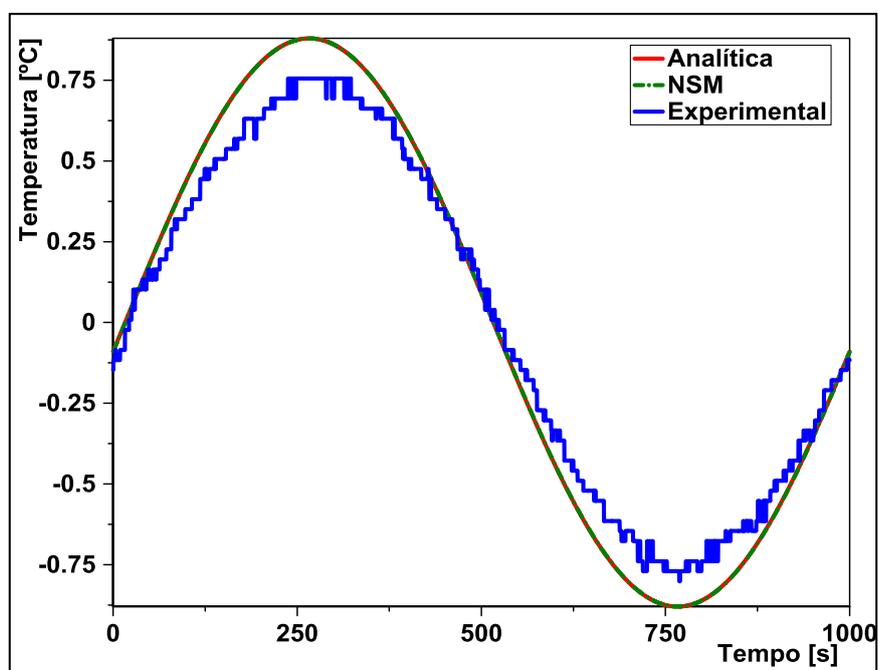


Figura 6.12 Onda térmica: Amostra Nylon (2 mm), referência: Quartzo (5 mm). Frequência de 0,001Hz

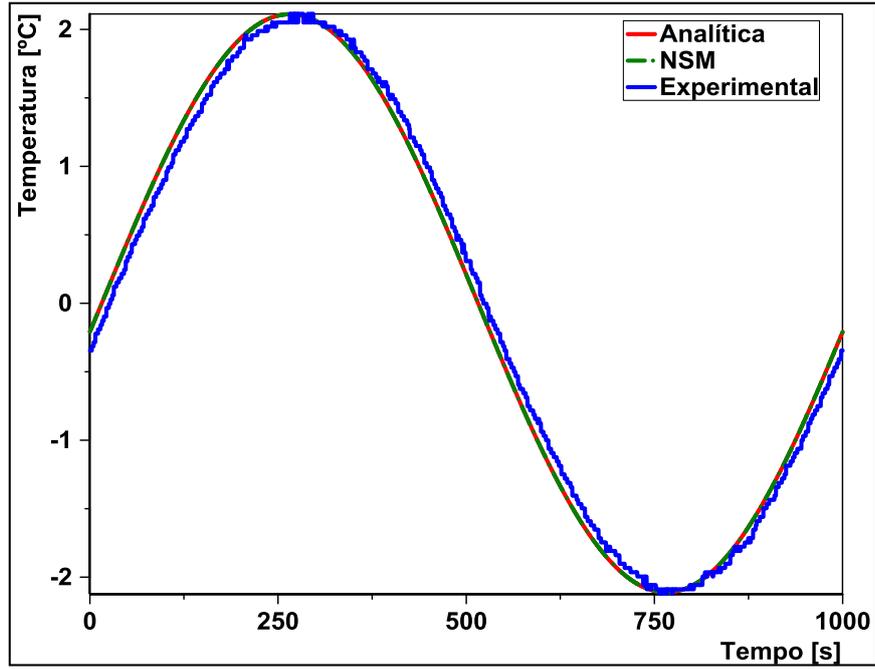


Figura 6.13 Onda térmica: Amostra: Quartzo (5 mm), referência: Nylon (2 mm). Frequência de 0,001Hz

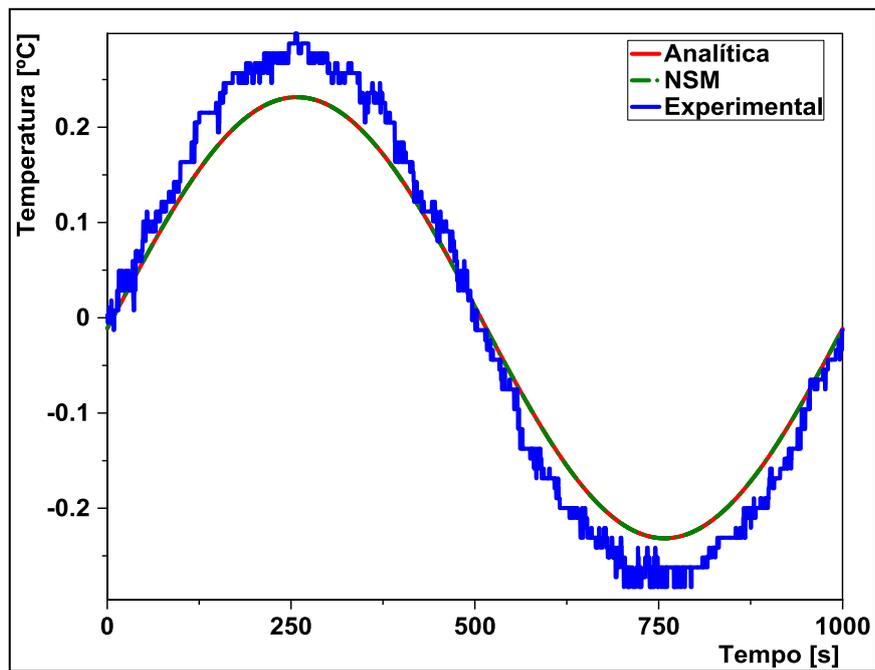


Figura 6.14 Onda térmica: Amostra: Quartzo (5 mm), referência: ASTM A36 (4,85 mm). Frequência de 0,001Hz

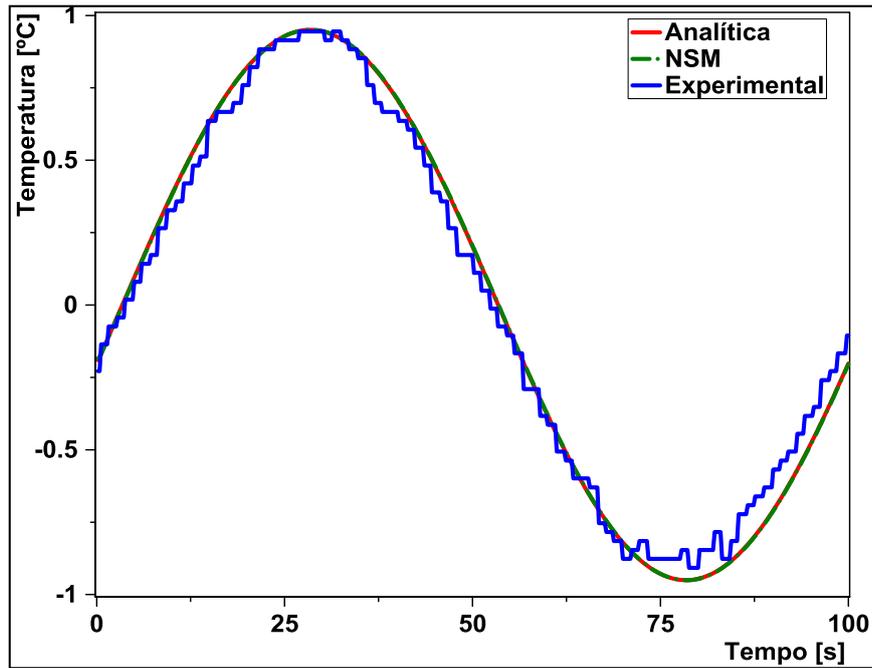


Figura 6.15 Onda térmica: Amostra: ASTM A36 (4,85 mm) , referência: Nylon (2 mm). Frequência de 0,001Hz

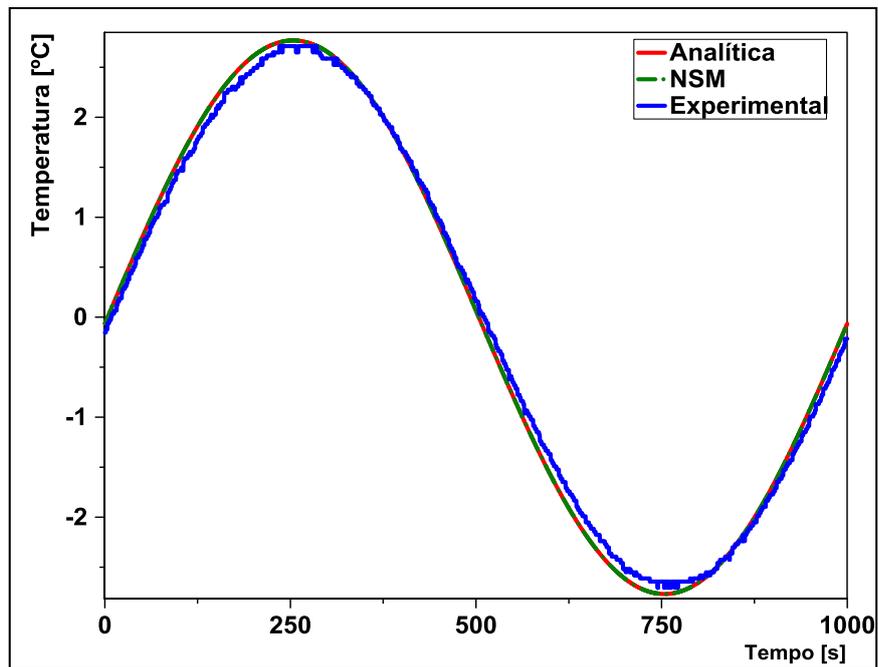


Figura 6.16 Onda térmica: Amostra: ASTM A36 (4,85 mm), referência: Quartzo (5 mm). Frequência de 0,001Hz

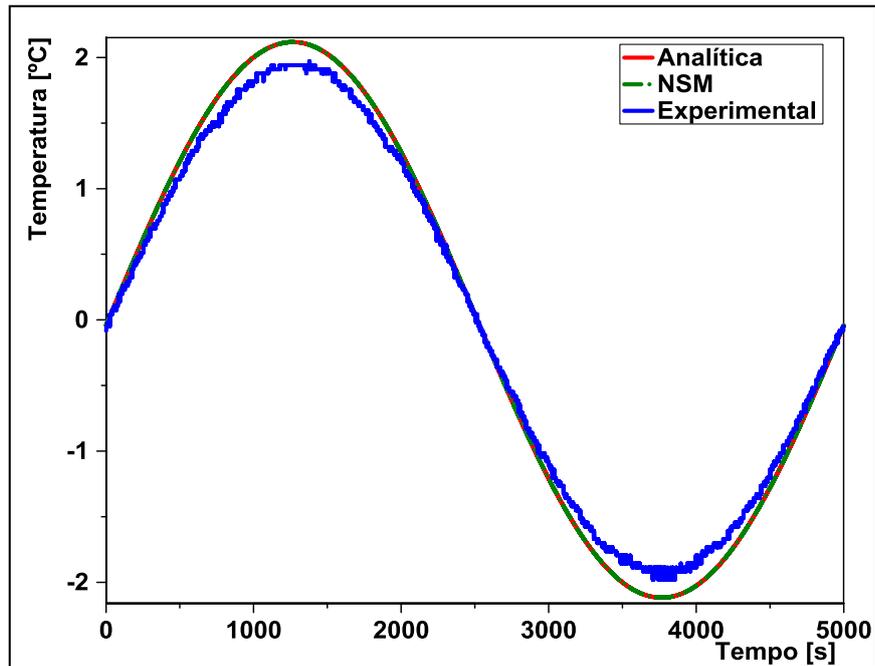


Figura 6.17 Onda térmica: Amostra: Quartzo (5 mm), referência: Nylon (2 mm). Frequência de 0,0002Hz

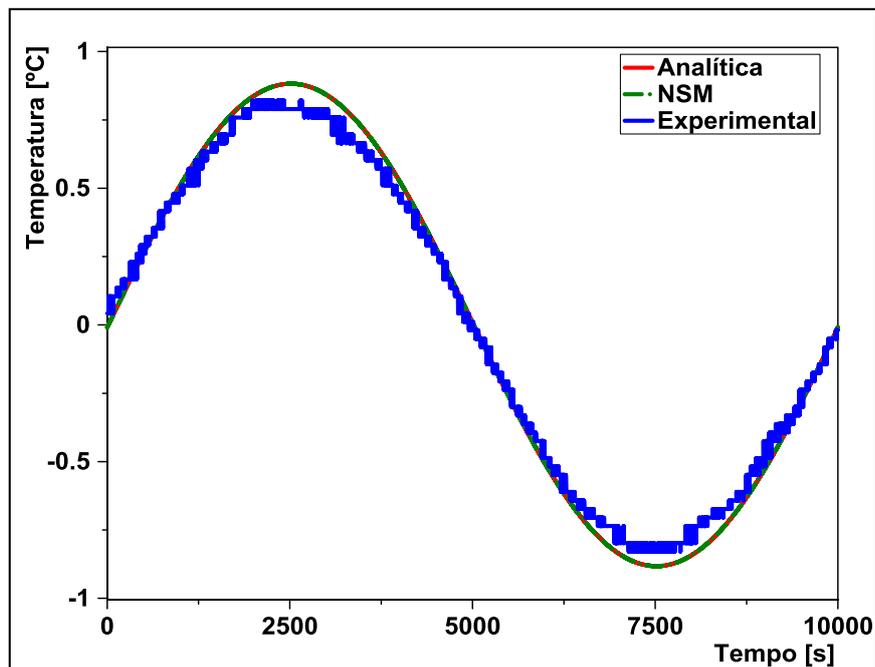


Figura 6.18 Onda térmica: Amostra: Nylon (2 mm), referência: Quartzo (5 mm). Frequência de 0,0001Hz

#### 6.4 VALORES DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A resolução do problema inverso, apresentado no Capítulo IV, através de uma regressão senoidal, utilizando o algoritmo de Levenberg–Marquardt, permite a obtenção

dos valores de condutividade térmica. Na aplicação desenvolvida é necessário entrar com os dados experimentais, além dos dados do material de referência. O valor da condutividade térmica é salvo em um arquivo juntamente com os dados das amplitudes e fases, dos dados analíticos e experimentais.

Na Tabela 2 são exibidos os valores de condutividade térmica calculada para cada conjunto de materiais nas diferentes frequências dos experimentos realizados.

Tabela 2 Condutividade Térmica

Materiais				Condutividade Térmica (W/m·K) @ 20°C				
Amostra		Referência		Fornecida	Estimada			
					Frequência			
					0,01 Hz	0,001 Hz	0,0002 Hz	0,0001 Hz
<b>ASTM A36</b>	4,85mm	<b>Nylon 6</b>	2mm	16	12,642	12,49	-	-
<b>Nylon 6</b>	2mm	<b>ASTM A36</b>	4,85mm	0,23	0,804	0,306	-	-
<b>ASTM A36</b>	8mm	<b>Nylon 6</b>	2mm	16	5,929	-	-	-
<b>Nylon 6</b>	2mm	<b>ASTM A36</b>	8mm	0,23	0,693	-	-	-
<b>ASTM A36</b>	4,85mm	<b>Quartzo</b>	5mm	16	3,767	9,063	-	-
<b>Quartzo</b>	5mm	<b>ASTM A36</b>	4,85mm	1,38	2,556	1,68	-	-
<b>Nylon 6</b>	4mm	<b>Quartzo</b>	5mm	0,23	0,205	0,212	-	0,211
<b>Quartzo</b>	5mm	<b>Nylon 6</b>	4mm	1,38	1,061	-	-	-
<b>Quartzo</b>	5mm	<b>Nylon 6</b>	2mm	1,38	1,05	1,11	1,146	-

## CAPÍTULO VII

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES

#### 7.1 CONCLUSÕES

O presente trabalho tratou da determinação da condutividade térmica de um material a partir de um modelo matemático com uma abordagem diferente dos métodos clássicos. A principal diferença desse método é o uso de um material de referência, pois ao conhecer todas as propriedades do material, então é possível prever o comportamento da temperatura nesse material.

A solução do problema direto é feita de modo analítico, através da modelagem matemática do sistema, e também via Método de Simulação de Rede (NSM). Esse último demonstrou uma das principais características do NSM, a velocidade, pois só foi necessário determinar os parâmetros do circuito elétrico.

O instrumento desenvolvido para o APTHP, juntamente com os *softwares* de controle e instrumentação, foi fundamental nesse trabalho, pois permitiu a validação do método proposto, assim como o desenvolvimento de um novo aparato, o Gerador Térmico. O controle da temperatura se mostrou exato e preciso.

A condutividade térmica foi obtida a partir da resolução do problema inverso. Para resolver esse problema foi utilizado um *software* de matemática simbólica para elaborar um algoritmo de aproximações sucessivas. Os dados ruidosos provenientes da aquisição no instrumento foram submetidos a uma regressão senoidal através do algoritmo de *Levenberg-Marquardt*, então é obtida apenas a senóide com suas características principais, amplitude e fase, e esses valores são as entradas do *software* responsável por calcular a condutividade térmica da amostra.

A partir da redução da frequência do sinal térmico, houve uma melhora no resultado da condutividade térmica, porém os resultados obtidos com as frequências mais baixas não forneceram valores com diferenças significativas.

Os valores das condutividades calculadas indicam a viabilidade do método e instrumento propostos, e parece não ter as limitações inerentes dos métodos tradicionais.

## 7.2 SUGESTÕES

Os estudos posteriores devem ser desenvolvidos visando os pontos fracos do presente trabalho:

- A força aplicada pelo grampo no instrumento é desconhecida, então não há como estabelecer uma relação entre a força aplicada e o resultado obtido. A solução é aplicar um mecanismo que mensure a força aplicada pelo grampo, e assim realizar um estudo da influência da força no resultado da condutividade térmica.
- A pasta térmica e a folha de cobre utilizadas no aparato instrumental podem influenciar o resultado final, pois as suas propriedades térmicas não são levadas em consideração no modelo matemático. É proposta a inclusão dos efeitos desses materiais na análise do comportamento da temperatura.
- O posicionamento do sensor deve ser feito no centro dos materiais, porém não há confirmação que o posicionamento esteja correto no instrumento, para tentar minimizar isso é proposto criar um aparato mecânico que permita posicionar o sensor no centro do material.

## **TRABALHOS RELACIONADOS À DISSERTAÇÃO**

### **Patentes depositadas**

BELO, F. A., LIMA FILHO, A. C., NASCIMENTO, L. J. L., GOMES, R. D., SILVA, D. M. G. B, SILVA, T. A. B., 2011, “ANALISADOR DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS PELA HARMÔNICA PURA, COM A INCLUSÃO DA CONTÍNUA ”, Patente INPI, RePB 000243, UFPB, 2011.

BELO, F. A., LIMA FILHO, A. C., NASCIMENTO, L. J. L., GOMES, R. D., SILVA, D. M. G. B, SILVA, T. A. B, “GERADOR DE FUNÇÕES TÉRMICAS”, Patente INPI RePB 000242 , UFPB, 2011.

### **Artigos Publicados em anais de congressos**

SILVA, T., BELO, A., ADISSI, M., DANIEL, L., GOMES, R., LIMA FILHO, A., “THE THERMAL FUNCTION GENERATOR AND ITS APPLICATION ON THE MEASUREMENT OF THERMAL PROPERTY”. In: Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition , 15 a 21 de Novembro, 2013.

SILVA, T., BELO, A., ADISSI, M., DANIEL, L., G. R. M., GOMES, R., LIMA FILHO, A., “DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES TÉRMICAS A PARTIR DE UM GERADOR TÉRMICO”, XI *Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica*, 11 a 15 de Novembro, 2013.

## REFERÊNCIAS

- ALAWADHI, E. M., and AMON, C. H., 2003, “PCM thermal control unit for portable electronic devices: experimental and numerical studies”. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 26(1), 116–125.
- ALHAMA, F. e CAMPO, A., 2003, “Network Simulation of the Rapid Temperature Changes in the Composite Nozzle Wall of an Experimental Rocket Engine During a Ground Firing Test”, *Applied Thermal Engineering*, 23, 37–47.
- ALHAMA, F., CAMPO, A., & ZUECO, J., 2005, “Numerical solution of the heat conduction equation with the electro-thermal analogy and the code PSPICE”. *Applied Mathematics and Computation*, 162(1), 103–113.
- ALHAMA, I., ALHAMA, F., & SOTO MECA, A., 2012, “The network method for a fast and reliable solution of ordinary differential equations: Applications to non-linear oscillators”. *Computers & Electrical Engineering*, 38(6), 1524–1533.
- ANGSTROM, A. J., 1863. “A new method of determining the thermal conductivity of bodies”. *Phil. Mag.*, 25, pp. 130 – 142.
- BALDIN FILHO, R., 2013, *Notas de Aula em Circuitos Elétricos Capítulo 10*, UNICAMP, Brasil. Disponível em: <<http://www.decom.fee.unicamp.br/~baldini>>.
- BABA, T., & ONO, A., 2001, “Improvement of the laser flash method to reduce uncertainty in thermal diffusivity measurements”, *Measurement Science and Technology*, 12(12), 2046–2057.
- 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.

BLACKWELL, J. H., 1954, “A Transient-Flow Method for Determination of Thermal Constants of Insulating Materials in Bulk Part I—Theory”, *Journal of Applied Physics*, 25(2), 137.

BOGLIETTI, A., CAVAGNINO, A., STATON, D., SHANEL, M., MUELLER, M., and MEJUTO, C., 2009. “Evolution and modern approaches for thermal analysis of electrical machines”. *IEEE Trans. Ind. Electron*, 56(3), pp. 871–882.

BOUTINGUIZA, M., LUSQUIÑOS, F., POU, J., SOTO, R., QUINTERO, F., & COMESAÑA, R., 2012, “Thermal properties measurement of slate using laser flash method”, *Optics and Lasers in Engineering*, 50(5), 727–730.

FRAISSE, G., VIARDOT, C., LAFABRIE, O., & ACHARD, G., 2002, “Development of a simplified and accurate building model based on electrical analogy”. *Energy and Buildings*, 34(10), 1017–1031.

HEALY, J.J., DE GROOT J.J., KESTIN, J., 1976, “The theory of the transient hot-wire method for measuring thermal conductivity”, *Physica B+C*, Volume 82, Issue 2, Pages 392-408.

JANNOT, Y., DEGIOVANNI, A., and PAYET, G., 2009, “Thermal conductivity measurement of insulating materials with a three layers device”. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(56), pp. 1105 – 1111.

JUMIKIS, A. R., 1996, *THERMAL SOIL MECHANICS*, Rutgers University Press (New Jersey).

KEATING, J. F., WEST, J. B. AND JENNINGS, J. W., 1991. “Lifting Cost Reduction form Dynamic Balancing.” *38th Annual Southwestern Petroleum Short Course. Proceedings*, pp 324-37.

- KUNTNER, J., CHABICOVSKY, R., & JAKOBY, B., 2010, “Oil Condition Monitoring Using a Thermal Conductivity Sensor”, In: GMe Forum Proceedings, 203-209, Viena.
- LAU, G.-K., GOOSEN, J. F. L., and VAN KEULEN, F., 2010. “Optimum design of polymeric thermal microactuator with embedded silicon skeleton”. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 19(4), pp. 992–1001.
- LOPEZ-BAEZA, E., DE LA RUBIA, J., and GOLDSMID, H. J., 1987. “Angstrom’s thermal diffusivity method for short samples”. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 20(9), p. 1156.
- NAGEL, L. W. e PEDERSON, D. O., 1973, SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), Technical Report No. UCB/ERL M382, University of California, Berkeley.
- OLIVEIRA, A. S. S., 2010, *Estudo Teórico Experimental da Dinâmica de Temperatura no Interior de Uma Cavidade Cilíndrica*, Tese de Doutorado, PPGEM/UFPB, João Pessoa – Paraíba, Brasil.
- OUYANG, J., and ZHU, Y., 2012. “Z-shaped mems thermal actuators: Piezoresistive self-sensing and preliminary results for feedback control”. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 21(3), pp. 596–604.
- ÖZISIK, M. N., 1989, *Boundary Value Problems of Heat Conduction*, 1<sup>a</sup> Ed. Dover phoenix editions, EUA.
- PARKER, W. J., JENKINS, R. J., BUTLER, C. P., & ABBOTT, G. L., 1961, “Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity”, *Journal of Applied Physics*, 1679
- PSPICE, v. 6.0, 1994, *Microsin Corporation*, 20 Fairbanks, Irvine, California 92718.
- ROETZEL, W., PRINZEN, S., ZUAN, Y., 1990. “Measurement of thermal diffusivity using temperature oscillations”, *Therm. Conduct.* 21, 201–207.

- SALAZAR, A., GARRIDO, F., & CELORRIO, R., 2006, “Thermal diffusivity of rods, tubes, and spheres by the flash method”, *Journal of Applied Physics*, 99(6), 066116.
- SÁNCHEZ, J. F., ALHAMA, F., & MORENO, J. A., 2012. “An efficient and reliable model based on network method to simulate CO<sub>2</sub> corrosion with protective iron carbonate films”. *Computers & Chemical Engineering*, 39, 57–64.
- SANTOS, W. N., 2007, “Thermal properties of polymers by non-steady-state techniques”. *Polymer Testing*, 26(4), pp. 556 – 566
- SANTOS, W. N., AGNELLI, J. A. M., MUMMERY, P. and WALLWORK, A., 2007b, “Effect of recycling on the thermal properties of polymers”. *Polymer Testing*, 26(2), 216-221.
- SANTOS, Wilson N. *et al.*, 2004, “Método de fio quente na determinação das propriedades térmicas de polímeros. Polímeros”, *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, São Carlos , v. 14, n. 5, dez.
- 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.
- SHEIKH, M. a, TAYLOR, S. C., HAYHURST, D. R., & TAYLOR, R., 2000, “Measurement of thermal diffusivity of isotropic materials using a laser flash method and its validation by finite element analysis”, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 33(12), 1536–1550.
- TANG, W. H., WU, Q. H., & RICHARDSON, Z. J., 2004, “A simplified transformer thermal model based on thermal-electric analogy”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(3), 1112–1119.
- TILLMANN, A. R., 2005, *DETERMINAÇÃO SIMULTÂNEA DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA E DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA VARIANDO COM A TEMPERATURA*. Dissertação de Mestrado. UFU, Uberlândia, Brasil.

- VERMEULEN, F. E. and CHUTE F. S., 1983, “Electromagnetic Techniques in the In-Situ Recovery of Heavy Oils”, *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*, 18(1), 15-30, 1983.
- VLADIMIRESCU, A., 1994, *The spice book*. J. Wiley, EUA.
- WANG, D.-B., LIAO, X.-P., and LIU, T., 2012. “A thermoelectric power sensor and its package based on mems technology”. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 21(1), pp. 121–131.
- WEIGEN, C., CHONG, P., & YUXIN, Y., 2009, « Power transformer top-oil temperature model based on thermal – electric analogy theory”, *EUROPEAN TRANSACTIONS ON ELECTRICAL POWER*, 19, 341–354.
- ZHANG, Y., HU, X., ZHAO, J., SHENG, K., CANNON, W., WANG, X., and FURSIN, L., 2009. “Rheology and thermal conductivity of diamond powder-filled liquid epoxy encapsulants for electronic packaging”. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, 32(4), pp. 716–723.
- ZUECO, J., & ALHAMA, F., 2006, “Inverse estimation of temperature dependent emissivity of solid metals”, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 101(1), 73–86.
- ZUECO, J., & ALHAMA, F., 2007, “Simultaneous inverse determination of temperature-dependent thermophysical properties in fluids using the network simulation method”, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(15-16), 3234–3243.
- ZUECO, J., 2009, “Network modelling of unsteady natural convection flow over a vertical plate submitted to surface temperature oscillation”, *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, 19(3/4), 285–302.
- ZUECO, J., ALHAMA, F. e GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ, C.F., 2004, “Analysis of Laminar Forced Convection With Network Simulation In Thermal Entrance Region of Ducts”, *International Journal of Thermal Science* 43, 443–451.

## APÊNDICE A – CÁLCULO DOS PARÂMETROS PARA O NSM

Como descrito no Capítulo IV, o cálculo dos parâmetros para o Método de Simulação de Redes necessita dos dados do material utilizado.

Para o cálculo dos valores da resistência e capacitância para o Quartzo (5mm), com a discretização de 12 células, da mesma forma que utilizada no presente trabalho, deve-se seguir os passos a seguir.

1. Conhecer as propriedades do material utilizado:
  - a. Altura do material: 5 mm
  - b. Massa específica ( $\rho$ ): 2203 Kg/cm<sup>3</sup>
  - c. Calor específico (Cp): 772 J / Kg · K
  - d. Condutividade Térmica ( $\kappa$ ): 1,38 W / m · K
2. Definir a quantidade de células para discretização:  $n = 12$  células
3. Definir o raio da célula de discretização:  $r' = 1$  mm

A partir desses dados é possível calcular os valores da resistência e capacitância. Utilizando a Eq. (35), definimos a altura da célula de discretização:

$$\Delta L = \frac{L}{n} \quad (\text{A.1})$$

$$\Delta L = \frac{5mm}{12} = 0,4166 \text{ mm} \quad (\text{A.2})$$

Para o cálculo da resistência utiliza-se a Eq. (36):

$$R_{\text{Quartzo}} = \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{\Delta L}{\pi r'^2} \quad (\text{A.3})$$

$$R_{\text{Quartzo}} = \frac{1}{1,38} \cdot \frac{0,005}{\pi 0,001^2} = 96,108 \Omega \quad (\text{A.4})$$

É válido lembrar que o valor da resistência utilizado no circuito deve ser a metade do valor calculado, devido à necessidade de evitar que a última célula tenha seu capacitor anulado ao ligar em paralelo com o terra do circuito elétrico.

Para o cálculo da capacitância utiliza-se a Eq. (37):

$$C_{Quartzo} = \Delta L \cdot \pi r'^2 \cdot \rho \cdot C_p \quad (\text{A.5})$$

$$C_{Quartzo} = 0,00417 \cdot \pi \cdot 0,001^2 \cdot 2203 \cdot 1,38 = 2,226 \text{ mF} \quad (\text{A.6})$$

Da mesma forma se faz os cálculos para os outros materiais. A Tabela A.1 exibe os dados dos materiais e suas respectivas resistências e capacitâncias para o NSM utilizando a discretização apresentada no trabalho, 12 células. Também é utilizado o raio de discretização de 1mm, da mesma forma apresentada no cálculo dos parâmetros do Quartzo.

Tabela A.1 – Parâmetros dos materiais para o NSM

Material	Altura (mm)	Massa específica ( $\rho$ ) (Kg/cm <sup>3</sup> )	Calor específico (Cp) (J / Kg • K)	Condutividade Térmica ( $\kappa$ ) (W / m • K)	Resistência NSM ( $\Omega$ )	Capacitância NSM (mF)
Quartzo	5	2203	772	1,38	96,108	2,226
Nylon 6	2	1140	1700	0,23	230,659	1,015
Aço ASTM A36	4,85	800	500	16	13,263	8,218