

A Newton's cradle with five spheres. One sphere on the left is in motion, having just struck the others, as indicated by its blurred position and the motion lines. The other four spheres are stationary. The background is a solid orange color.

# Física:

Produção de conhecimento  
relevante e qualificado

Sabrina Passoni Maravieski  
(Organizadora)

A Newton's cradle with five silver spheres hanging from thin wires against a dark grey background. The spheres are arranged in a line, with one on the left and two on the right. The lighting creates highlights and shadows on the spheres, giving them a three-dimensional appearance.

# Física:

Produção de conhecimento  
relevante e qualificado

Sabrina Passoni Maravieski  
(Organizadora)

**Editora chefe**

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

**Editora executiva**

Natalia Oliveira

**Assistente editorial**

Flávia Roberta Barão

**Bibliotecária**

Janaina Ramos

**Projeto gráfico**

Camila Alves de Cremo

Daphynny Pamplona

Gabriel Motomu Teshima

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

**Imagens da capa**

iStock

**Edição de arte**

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-Não-Derivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

**Conselho Editorial**

**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná



Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás  
Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia  
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Profª Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro  
Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará  
Profª Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho  
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense  
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande  
Profª Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte  
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá  
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora  
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Profª Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba  
Profª Drª Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte  
Profª Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas  
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí  
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista



## Física: produção de conhecimento relevante e qualificado

**Diagramação:** Daphynny Pamplona  
**Correção:** Maiara Ferreira  
**Indexação:** Amanda Kelly da Costa Veiga  
**Revisão:** Os autores  
**Organizadora:** Sabrina Passoni Maravieski

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

F537 Física: produção de conhecimento relevante e qualificado / Organizadora Sabrina Passoni Maravieski. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.

Formato: PDF

Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader

Modo de acesso: World Wide Web

Inclui bibliografia

ISBN 978-65-5983-924-7

DOI: <https://doi.org/10.22533/at.ed.247222402>

1. Física. I. Maravieski, Sabrina Passoni (Organizadora).  
II. Título.

CDD 530

Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166

**Atena Editora**  
Ponta Grossa – Paraná – Brasil  
Telefone: +55 (42) 3323-5493  
[www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
contato@atenaeditora.com.br



**Atena**  
Editora  
Ano 2022

## DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.



## DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.



## APRESENTAÇÃO

O presente livro “Física: Produção de conhecimento relevante e qualificado?” é uma obra que tem como foco principal a discussão científica por intermédio de trabalhos diversos que compõe seus capítulos. O volume aborda de forma categorizada algumas pesquisas que aplicam conceitos, teorias e equações da física tecnologias atuais e situações do cotidiano a fim de mostrar a importância da física nas diversas áreas.

Ao final da leitura, mesmo que aqui estejam reunidos apenas alguns temas, o leitor poderá concluir que de fato, estudos que envolvam tecnologias, são extremamente importantes para o entendimento de como as “coisas” funcionam. E que, é impossível não nos envolvermos com estudos científicos, caso nosso objetivo seja a compreensão daquilo que nos cerca e usamos diariamente.

O objetivo desta obra é apresentar ao leitor que as aulas de física para a geração atual podem se tornar mais interessantes, ou atrativas para os estudantes, com a introdução de metodologias de aprendizagem baseada em projetos, games e também, a engenharia reversa, a qual consiste em saber como as tecnologias funcionam. Desta forma, além de relevante, é possível contribuir para um ensino-aprendizagem mais fascinante tanto para o estudante, como para o docente; independentemente da idade do aluno e área de conhecimento.

Por outro lado, a qualidade dos artigos aqui publicados depende da maturidade intelecto científica individual do leitor, ou seja, se está habituado a fazer leitura e correções de artigos científicos de forma crítica, mas imparcial. Neste sentido, em 2009, Ulysses Paulino de Albuquerque publicou na revista *botânica.org* um artigo de opinião intitulado: “A qualidade das publicações científicas – considerações de um Editor de Área ao final do mandato”, no qual, o autor, faz uma reflexão em torno dos principais problemas técnicos e éticos observados durante a sua carreira como Editor. Logo, para melhor avaliar-se a qualidade dos artigos publicados, sugiro ao leitor, a leitura deste artigo, pois sabe-se que a ideia em um artigo pode ser boa, porém a forma como esta é colocada no papel, seguindo as normas científicas, é bem diferente.

No primeiro capítulo são apresentados dois artigos que abordam conceitos da física aplicados em áreas técnicas distintas como a de Radiodiagnóstico via Tomografia Computadorizada (TC) Transferência de Calor em fluidos. O primeiro tem como objetivo encontrar uma metodologia unificada para o controle de qualidade semanal em TC utilizando fantoma independente. Já o segundo artigo, trata-se de implementação e aperfeiçoamento do padrão nacional de condutividade térmica para fluidos simples. Como pode-se observar são artigos que tem a física como base na resolução ou melhoria de problemas reais tecnológicos e de engenharia.

No segundo capítulo são apresentados três artigos voltados para a área de ensino, nos quais trazem abordagens diferentes para se trabalhar com diferentes conteúdos da








base curricular nacional. No primeiro artigo trata do conteúdo de astronomia para o ensino fundamental em um estudo de caso, cujo objetivo foi identificar juntos aos discentes as suas análises e dificuldade quanto a esse conhecimento. No segundo artigo, os autores apresentam conceitos básicos de física nuclear, trabalhando-os de forma integrada através de um jogo de tabuleiro no estilo Super Ludo, em que o jogo tem como objetivo simular um acidente nuclear em uma usina onde um dos reatores entrou em colapso.

E finalmente, no terceiro artigo, os autores propõem que os estudantes de engenharia devem conhecer e gerenciar a trajetória das informações do produto que são produzidos por diversas ferramentas e métodos. Para isso, colocam em prática a metodologia Baseada em Projetos (ABP), pois acreditam que essa, é uma metodologia ativa que pode ser utilizada para que o aprendizado de engenharia, principalmente para conhecer e aplicar o conhecimento de Engenharia Reversa dentro da área de Metrologia Dimensional promove o trabalho em equipamentos e resolução de problemas reais.

Deste modo, esta obra visa contribuir para o docente de Física e demais áreas tecnológicas e de engenharia para o enriquecimento da sua prática, pois sabemos o quão importante é a divulgação científica, por isso evidenciamos também a estrutura da Atena Editora capaz de oferecer uma plataforma consolidada e confiável para estes pesquisadores exporem e divulguem seus resultados.

Sabrina Passoni Maravieski

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1</b> .....   | <b>1</b>  |
| APLICABILIDADE DE UMA METODOLOGIA PARA TESTES SEMANAIS DE CONTROLE DE QUALIDADE EM TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA   |           |
| Laura Larré Godolfim  |           |
| Maurício Anés   |           |
| Janine Hastenteufel Dias  |           |
| Mirko Salomón Alva Sánchez  |           |
|  <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.2472224021">https://doi.org/10.22533/at.ed.2472224021</a>   |           |
| <b>CAPÍTULO 2</b> .....   | <b>14</b> |
| PATRÓN NACIONAL DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA PARA FLUIDOS SIMPLES CNM-PNE-20-2015   |           |
| Leonel Lira Cortés  |           |
| Saúl García Duarte  |           |
| Jesús Arce Landa  |           |
|  <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.2472224022">https://doi.org/10.22533/at.ed.2472224022</a>   |           |
| <b>CAPÍTULO 3</b> .....   | <b>29</b> |
| ASTRONOMIA NO ENSINO FUNDAMENTAL: UM ESTUDO DE CASO NO INTERIOR DO PARÁ   |           |
| Bruno Medeiros Quaresma   |           |
| Rafael Costa Araújo   |           |
| Fernanda Carla Lima Ferreira  |           |
|  <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.2472224023">https://doi.org/10.22533/at.ed.2472224023</a>   |           |
| <b>CAPÍTULO 4</b> .....   | <b>38</b> |
| GAME DE TABULEIRO PARA O ENSINO DE FÍSICA NUCLEAR   |           |
| Eduardo Toniolo Campos  |           |
| Marcelo Augusto Leigui de Oliveira  |           |
|  <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.2472224024">https://doi.org/10.22533/at.ed.2472224024</a> |           |
| <b>CAPÍTULO 5</b> .....   | <b>47</b> |
| LA INGENIERÍA INVERSA Y EL ABP COMO MEDIOS AUXILIARES PARA EL ESTUDIO Y EL APRENDIZAJE DE LA METROLOGÍA Y LA GENERACIÓN DE DUPLICADOS DE PARTES Y COMPONENTES                         |           |
| Eusebio Jiménez López   |           |
| Gabriel Luna-Sandoval   |           |
| Mario Acosta Flores   |           |
| Juan José Delfín Vázquez  |           |
| Lilia Zulema Gaytán Martínez  |           |
| Baldomero Lucero Velázquez  |           |
| Luis Andrés García Velásquez  |           |
|  <a href="https://doi.org/10.22533/at.ed.2472224025">https://doi.org/10.22533/at.ed.2472224025</a> |           |
| <b>SOBRE A ORGANIZADORA</b> .....   | <b>58</b> |
| <b>ÍNDICE REMISSIVO</b> .....   | <b>59</b> |

## PATRÓN NACIONAL DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA PARA FLUIDOS SIMPLES CNM-PNE-20-2015

*Data de aceite: 01/02/2022*

*Fecha de envío: 12/11/2021.*

**Leonel Lira Cortés**

Centro Nacional de Metrología  
Querétaro, México

**Saúl García Duarte**

Centro Nacional de Metrología  
Querétaro, México

**Jesús Arce Landa**

Tecnológico Nacional de México/CENIDET,  
Morelos, México

**RESUMEN:** Se presenta la implementación y mejora del patrón nacional de conductividad térmica para fluidos simples en el Centro Nacional de Metrología (CENAM). El patrón nacional utiliza la técnica transitoria del hilo caliente, ésta se basa en medir el incremento de temperatura de un alambre delgado de platino de alta pureza que disipa energía térmica de manera constante, y que se encuentra inmerso en el fluido al cual se requiere medir su conductividad térmica. El alcance de medición del patrón nacional fue inicialmente de  $0.1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  a  $0.6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  a temperatura ambiente, con incertidumbre relativa de 5 % del valor determinado con  $k=2$ ; posteriormente, se mejoró al emplear una celda de acero inoxidable diseñada para contener a dos alambres de platino con el objetivo de que los efectos de borde no influyan en la medición, finalmente se extendió el Intervalo en temperatura

de medición, de  $13 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $64 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Actualmente el patrón nacional realiza mediciones con incertidumbres menores a 1 % para valores de conductividad térmica que van de  $0.1 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  a  $0.6 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  en el intervalo de temperatura arriba mencionado.

**PALABRAS CLAVE:** Técnica del hilo caliente, conductividad térmica, fluidos simples, puente de Wheatstone.

### 1 | INTRODUCCIÓN

#### 1.1 Modelo físico ideal

El arreglo experimental ideal para la teoría del método transitorio del hilo caliente se observa en la Figura 1. Una línea fuente de calor, de longitud infinita, en posición vertical, con capacidad calorífica cero y conductividad térmica infinita se sumerge en un fluido denso, isotrópico, que tiene propiedades independientes de la temperatura y se encuentra en equilibrio termodinámico con el fluido en el tiempo  $t=0$ . Se considera que la transferencia de energía de la línea fuente a través de fluido es solo por el modo de conducción [1].

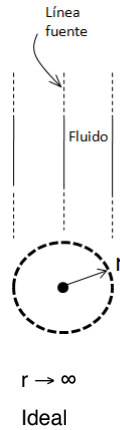


Fig. 1. Arreglo experimental ideal.

## 1.2 Modelo matemático

Para conocer el incremento de temperatura de la línea fuente para tiempos mayores que cero,  $t > 0$ , se utiliza la ecuación de difusión de calor en estado transitorio la cual surge de la ecuación de balance de energía:

$$\lambda \nabla^2 T(r,t) = \rho C_p \frac{\partial T(r,t)}{\partial t} \quad (1)$$

Donde  $\lambda$  es la conductividad térmica del fluido,  $\nabla^2(r,t)$  el Laplaciano de la temperatura,  $\rho$  la densidad del fluido,  $C_p$  la capacidad calorífica del fluido y  $t$  el tiempo.

Se define el incremento de temperatura en el fluido a una distancia  $r$  del alambre para un tiempo  $t$  como:  $\Delta T(r, t) = T(r, t) - T_0$ .

Donde  $T_0$  es la temperatura de equilibrio del fluido.

La Ecuación 1 se resuelve con las siguientes condiciones de frontera e inicial,

$$\begin{aligned} \Delta T(r,t) &= 0, & t=0 \\ \lim_{r \rightarrow \infty} \Delta T(r,t) &= 0, & t > 0 \\ \lim_{r \rightarrow 0} r \frac{\partial T}{\partial r} &= \frac{q}{2\pi\lambda}, & t > 0 \end{aligned}$$

Donde  $q$  es el calor por unidad de longitud de la línea fuente.

La solución particular de la Ecuación (1) es la siguiente, [2]:

$$\Delta T(r,t) = -\frac{q}{4\pi\lambda} E_1\left(-\frac{r^2}{4\alpha t}\right) \quad (2)$$

La integral exponencial puede expresarse como un desarrollo en serie para valores pequeños de  $r^2/4\alpha t$ :

$$\Delta T(r,t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \left( \ln \left( \frac{4at}{r^2} \right) + \frac{r^2}{4at} + \dots \right) \quad (3)$$

En la práctica, para proporcionar el flujo de calor se requiere reemplazar la línea fuente por un alambre de platino de radio pequeño, el cual es sometido al efecto Joule. Si dicho radio se selecciona de tal manera que el segundo término de la Ecuación (3) sea menor que 0.01% del  $\Delta T$ , entonces:

$$\Delta T(r_a,t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \ln \frac{4at}{r_a^2 C} \quad (4)$$

La ecuación anterior es una relación lineal entre  $y$  el  $\ln t$ :  $\Delta T = m \ln t + b$ .

Así, si experimentalmente se mide el incremento de la temperatura del alambre,  $\Delta T_a$ , y se grafica contra el logaritmo natural del tiempo,  $\ln t$ , se obtiene una línea recta cuya pendiente será:  $m = q/(4\pi\lambda)$ .

La conductividad térmica  $\lambda$  se determina entonces como, [3]:

$$\lambda = \frac{q}{4\pi m} = \frac{q}{4\pi} \frac{d(\ln t)}{d(\Delta T_a)} \quad (5)$$

Donde  $q$  es el calor por unidad de longitud del alambre en  $Wm^{-1}$  y  $d(\ln t)/d(\Delta T_a)$  está dado en  $K^{-1}$ .

## 2 I PATRÓN NACIONAL DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

El esquema de la Figura 2 muestra la instrumentación del hilo caliente. El alambre de platino y el líquido están contenidos en un recipiente o celda de vidrio, estos a su vez se encuentran en un baño termostático que tiene la función de establecer el equilibrio térmico entre el líquido muestra y el alambre de platino. El alambre de platino se conecta a un circuito tipo puente de Wheatstone, la fuente de potencia, Keithley 228A, energiza al alambre. Los multímetros, Agilent 3458A, miden la tensión  $V_{ab}$  y la tensión en una resistencia patrón del puente,  $R_{ref}$ , estos datos se envían por medio de una tarjeta GPIB a una computadora personal para su análisis.

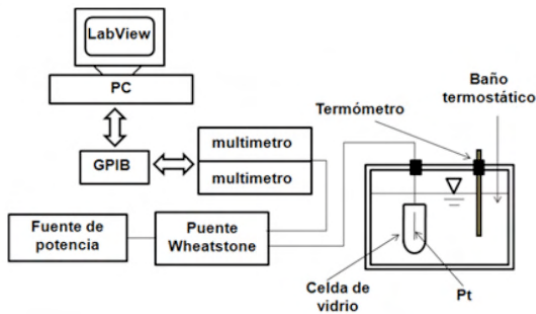


Fig. 2. Esquema de la instrumentación del hilo caliente.

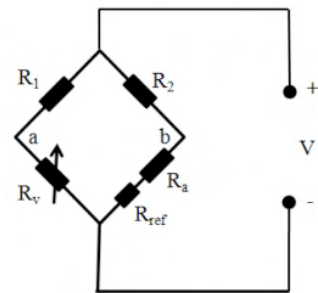


Fig. 3. Puente de Wheatstone.

## 2.1 Circuito de medición

El incremento de la temperatura del alambre está relacionado con los cambios de su resistencia eléctrica debido al *efecto Joule*. Los aumentos de resistencia eléctrica se determinan con ayuda de un circuito tipo puente de Wheatstone, Figura 3, que consta de dos resistencias fijas  $R_1$  y  $R_2$ , una resistencia variable  $R_v=0.001-1000 \Omega$  y el alambre de platino representado en el esquema de la Figura 3 como  $R_a$ .  $R_{ref}=0.1 \Omega$  se utiliza para determinar la corriente eléctrica  $i_a$  que pasa por el alambre con la cual se conocerá la energía disipada por unidad de longitud.

## 2.2 Recipiente del fluido

La Figura 4 muestra un recipiente de vidrio que contiene al fluido de trabajo, cuya longitud y diámetro interno son 300 mm y 18 mm, respectivamente. Este recipiente a su vez puede contener en su interior a un alambre de platino de 120 mm de largo como máximo, con un diámetro de  $15 \mu\text{m}$ . En la Figura 5 se muestra la imagen del patrón de conductividad térmica para fluidos simples.



Fig. 4. Celda de vidrio y alambre de platino.

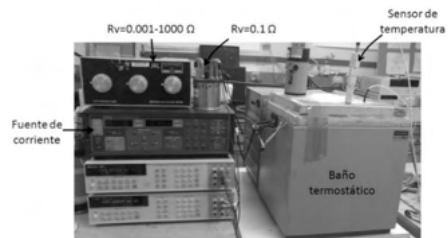


Fig. 5. Patrón de conductividad térmica.

## 2.3 Procedimiento de medición

Previo al proceso de medición y con el arreglo del esquema de la Figura 2 se mide la resistencia eléctrica del alambre de platino a diferentes temperaturas, se utiliza un termómetro de resistencia platino calibrado para conocer la temperatura del baño termostático.

Realizado lo anterior, el proceso de medición es de la siguiente manera:

1. Establecer el equilibrio térmico entre el alambre, el fluido muestra y el baño termostático.
2. Se aplica el efecto Joule al alambre.
3. Aumenta la temperatura del alambre y aumenta también su valor de resistencia eléctrica.
4. El aumento de resistencia eléctrica se mide por medio del circuito puente de Wheatstone.
5. El incremento de temperatura del alambre se determina por medio de una relación resistencia eléctrica contra temperatura.
6. La conductividad térmica del fluido se determina al conocer la potencia por unidad de longitud y la pendiente del  $\Delta T$  contra el  $\ln t$ .

## 2.4 Resultados iniciales

La Tabla 1 contiene los resultados de la determinación de conductividad térmica para el agua tipo I a 20.0 °C con diferentes valores de energía térmica disipada por el alambre.

## 2.5 Propagación de incertidumbre

El valor experimental de la conductividad térmica es evaluado por una función que incorpora cantidades de entrada no correlacionadas y que tienen asociada

| 20,0 °C  |   |
|--|---|
| Flujo de calor por unidad de longitud $q/W \text{ m}^{-1}$ | Conductividad térmica $\lambda/W \text{ m}^{-1}\text{K}^{-1}$ |
| 0,629  | 0,62  |
| 1,12   | 0,619   |
| 1,752  | 0,626   |
| 3,424  | 0,621   |
| 4,477  | 0,622   |
| 7,033  | 0,624   |
| 10,174   | 0,623   |

Tabla 1. Conductividad térmica del agua tipo I con diferente flujo de calor.

una incertidumbre, estas contribuirán a la incertidumbre de la medición. La conductividad térmica puede ser representada como:

$$\lambda = \lambda(q, m) \quad (6)$$

Donde  $q$  es el calor por unidad de longitud y  $m$  es la pendiente, estas cantidades de entrada también tienen otras cantidades de entrada y se representan de la siguiente forma:

$$q = q(i_a, R_{0a}, L_a) \quad (7)$$

$$m = m(t, \Delta T_a) \quad (8)$$

Aquí,  $i_a$  es la corriente eléctrica en el alambre,  $R_{0a}$  es la resistencia del alambre a la temperatura de equilibrio,  $L_a$  la longitud del alambre,  $t$  el tiempo y  $\Delta T_a$  el incremento de temperatura del alambre. Además, la incertidumbre de  $\Delta T_a$  tiene a  $R_a$  como cantidad de entrada:

$$\Delta T_a = \Delta T_a(R_a) \quad (9)$$

Es decir, depende de la relación  $\Delta T_a = (R_a - b)/m_c$  con  $m_c$  es la pendiente durante la transferencia de energía térmica por conducción. Por último,  $R_a$  tiene las siguientes cantidades de entrada:

$$R_a = (R_1, R_2, R_v, V, V_{ab}) \quad (10)$$

$R_1, R_2$  son resistencias fijas,  $R_v$  es una resistencia variable,  $V$  la tensión aplicada al puente de Wheatstone y  $V_{ab}$  la diferencia de tensión entre las dos ramas de éste.

La estimación de la incertidumbre será:

$$u^2(\lambda) = \sum_{i=1}^N (c_i u(x_i))^2 \quad (11)$$

Donde:

$$c_i = \left[ \frac{\partial \lambda}{\partial X_i} \right] \quad (12)$$

Como ejemplo ponemos a la medición realizada a 20 °C del agua tipo I, la corriente eléctrica en el alambre es de 0.0535 A, y la potencia de 1.75 W m<sup>-1</sup> dando un valor de conductividad térmica de 0.62 W m<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>.

Se considera que la incertidumbre del tiempo es despreciable, entonces, el valor para cada coeficiente de sensibilidad se muestra en la Tabla 2.



| Cantidad     | $ci$                                       | Valor de $ci$ | $(ci u(xi))^2$        | Cantidad  | $ci$                                  | Valor de $ci$ | $(ci u(xi))^2$        |
|--------------|--|---------------|-----------------------|-----------|---------------------------------------|---------------|-----------------------|
| $R_a$        | $\frac{\partial R_a}{\partial R_1}$        | -0.384        | $1.47 \times 10^{-7}$ | $q$       | $\frac{\partial q}{\partial I_a}$     | 65.5          | $2.1 \times 10^{-5}$  |
|              | $\frac{\partial R_a}{\partial R_2}$        | 0.385         | $1.48 \times 10^{-7}$ |           | $\frac{\partial q}{\partial R_{0a}}$  | 0.033         | $1.09 \times 10^{-9}$ |
|              | $\frac{\partial R_a}{\partial R_v}$        | 1             | $1 \times 10^{-6}$    |           | $\frac{\partial q}{\partial L_a}$     | -20.234       | $1.02 \times 10^{-4}$ |
|              | $\frac{\partial R_a}{\partial V}$          | -0.013        | $1.69 \times 10^{-8}$ |           | $\frac{\partial \lambda}{\partial q}$ | 0.357         | $1.57 \times 10^{-5}$ |
|              | $\frac{\partial R_a}{\partial R_{vab}}$    | 26.267        | $6.9 \times 10^{-10}$ | $\lambda$ | $\frac{\partial \lambda}{\partial m}$ | -2.81         | $2.09 \times 10^{-4}$ |
| $\Delta T_a$ | $\frac{\partial \Delta T_a}{\partial R_a}$ | 4.49          | $5.14 \times 10^{-3}$ |           |                                       |               |                       |

Tabla 2. Coeficientes de sensibilidad.

Aplicando la Ecuación (11) para  $R_a$ ,  $\Delta T_a$ ,  $q$  y  $\lambda$  se obtiene:  $u_\lambda = 0.015 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$

Su incertidumbre relativa es

$$\frac{u_\lambda}{\lambda} = 0.024$$

Con  $k=2$ : 4.8 %.

Y el resultado final lo muestra la Tabla 3.

| Muestra     | Temperatura de medición/ $^{\circ}\text{C}$ | Conductividad térmica/ $\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ | Incertidumbre relativa expandida ( $k=2$ ) |
|-------------|---|---|--|
| Agua tipo I | 20.0  | 0.62  | 5 %  |

Tabla 3. Resultado final de los valores experimentales.

## 3 I MEJORA DEL PATRÓN NACIONAL DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA, PRIMERA ETAPA

### 3.1 Efectos de borde y celda de acero inoxidable

La conductividad térmica del fluido se determina midiendo la energía por unidad de longitud que se genera en el alambre, la pendiente del incremento de temperatura y el logaritmo natural del tiempo.

El incremento de temperatura se logra estableciendo el efecto Joule en el alambre, esto ocasiona una transferencia de energía del alambre hacia el fluido. Evidentemente, el

alambre se encuentra unido en sus extremos a soportes de mayor masa, ello ocasiona que no toda la energía generada en el alambre se transmita a través del fluido, una pequeña parte se disipa por medio de los soportes, Figura 6.

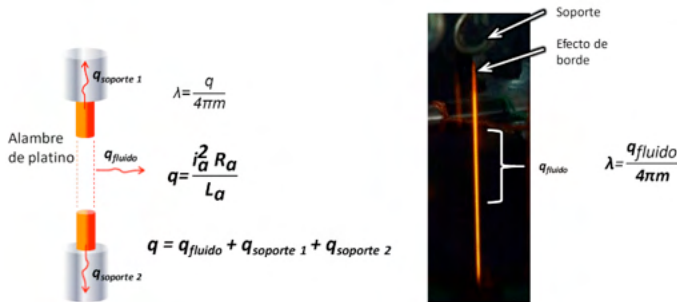


Fig. 6. Efectos de borde.

Como consecuencia de esto, al momento de determinar la conductividad térmica se sobre dimensiona la cantidad de energía por unidad de longitud. Para evitar que los efectos de borde no influyan en la determinación de la conductividad térmica, se utiliza un arreglo de dos alambres similares pero diferentes en longitud [4] originando que solo una porción central del alambre largo (diferencia de longitud entre los dos alambres) se utilice para determinar la conductividad térmica, Figura 7.

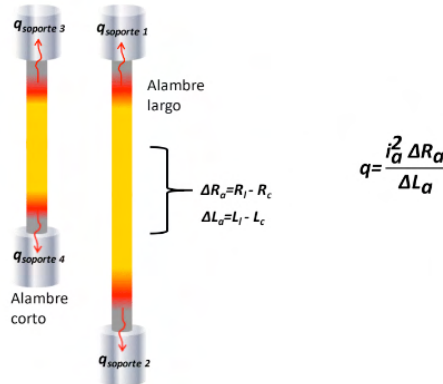


Fig. 7. Diagrama esquemático de dos alambres.

Para utilizar los dos alambres, se diseñó una celda de acero inoxidable la cual contiene en su interior soportes de latón para los alambres de platino Figura 8 [5].

### 3.2 Puentes de wheatstone con dos alambres

Para conocer el incremento de temperatura de esa porción del alambre, es necesario medir el incremento de su resistencia eléctrica por medio de un arreglo diferente del puente de Wheatstone y su respectiva ecuación. Este arreglo se usó para medir al tolueno.

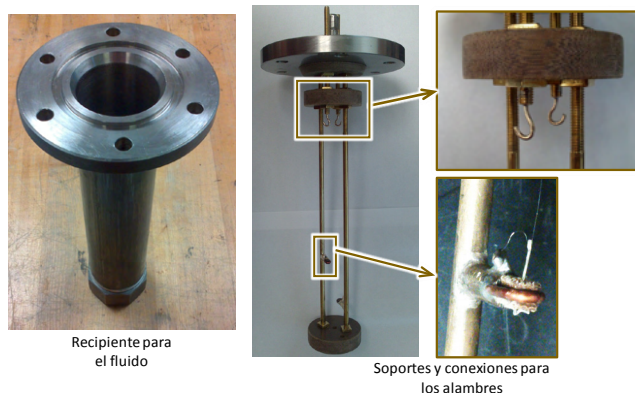


Fig. 8. Celda de acero inoxidable con soportes para los alambres de platino.

El puente de Wheatstone que se utiliza para medir el incremento de resistencia eléctrica de solo una porción del alambre largo se presenta en la Figura 9 [6].

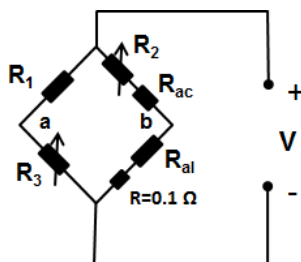


Fig. 9. Puente de Wheatstone.

La resistencia eléctrica se determina con la siguiente ecuación:

$$\Delta R_a = \frac{R_2 \left[ 1 + \frac{2V_{ab}}{V} + \frac{(R_3 - R_1)}{(R_1 + R_3)} \right]}{\left( \frac{R_{al}}{R_{ac}} + 1 \right) - \left( \frac{R_{al}}{R_{ac}} - 1 \right) \left[ \frac{2V_{ab}}{V} + \frac{(R_3 - R_1)}{(R_1 + R_3)} \right]} \quad \frac{R_{al}}{R_{ac}} = 1.7680$$

Y se instrumentó el patrón como el esquema de la figura 2, sustituyendo la celda de vidrio por la celda de acero inoxidable.

### 3.3 Resultados de la primera etapa

Se realizó una medición al tolueno con el arreglo de dos alambres. La Figura 10 muestra el comportamiento del incremento de temperatura del alambre contra el logaritmo natural del tiempo.

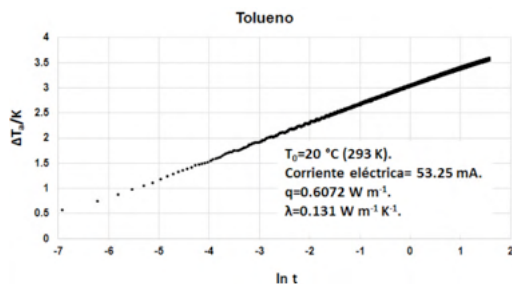


Fig. 10. Medición al tolueno.

## 4 | MEJORA DEL PATRÓN NACIONAL DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA, SEGUNDA ETAPA

### 4.1 AMPLIACIÓN DEL INTERVALO DE MEDICIÓN Y VALIDACIÓN DEL MÉTODO

Como parte final de las mejoras, se realizó la validación del método en el rango de temperatura de 13 °C a 64 °C para el tolueno por medio de la correlación propuesta por María L. V. Ramirez et al. [7].

### 4.2 Arreglo experimental

Se utilizó el arreglo del esquema de la Figura 11 para realizar las mediciones al tolueno en el intervalo de temperatura de 13 °C a 64 °C.

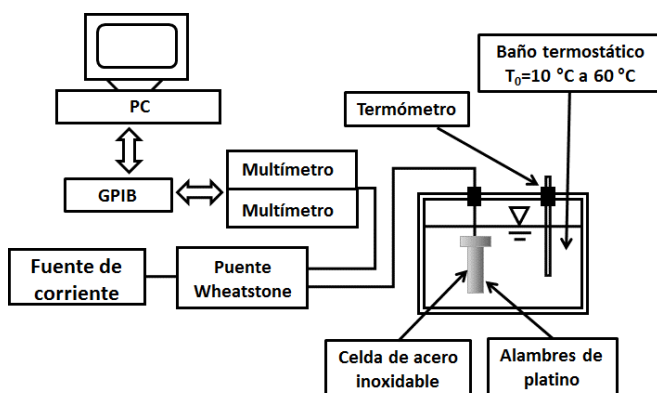


Fig. 11. Diagrama esquemático base para medir tolueno en el intervalo de 13 °C a 64 °C.

La temperatura de inicio  $T_0$  es la temperatura de equilibrio térmico entre el baño termostático, la celda, el fluido a medir y los alambres de platino. La temperatura de medición o de prueba,  $T_{prueba}$ , se determina de la siguiente forma:

$$T_{prueba} = T_0 + \left[ \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2}{2} \right]$$

Donde  $\Delta T_1$  y  $\Delta T_2$  se definen como:

$$\Delta T_1 = T_1 - T_0 \quad (13)$$

$$\Delta T_2 = T_2 - T_0 \quad (14)$$

$T_1$  y  $T_2$  es la temperatura de inicio y final, respectivamente, del modo de transferencia de energía por conducción.

### 4.3 Correlación

La correlación para el tolueno en el rango de temperatura de  $-84$  °C a  $280$  °C está expresada en términos de variables adimensionales  $\lambda^*$  y  $T^*$  [5]:

$$T^* = \frac{T}{298.15 \text{ K}}$$

Donde  $T$  es la temperatura de prueba de la medición,

$$\lambda^* = \frac{\lambda(T)}{\lambda(298.15 \text{ K}, 0.1 \text{ MPa})}$$

$\lambda(298.15 \text{ K}, 0.1 \text{ Mpa}) = 0.13088 \pm 0.000085 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  y es el valor de referencia para el tolueno a temperatura de  $298.15 \text{ K}$  y presión de  $0.1 \text{ Mpa}$ ,  $\lambda^*$  se obtiene con la ecuación 6 y  $\lambda(T)$  es la conductividad térmica a la  $T_{prueba}$ .

Los datos experimentales de conductividad térmica están correlacionados con un polinomio en términos de estas variables adimensionales:

$$\lambda^* = \sum_{i=1}^4 b_i T^{*i} \quad (15)$$

$$\lambda^* = 0.420919 + 3.629457T^* - 5.348298T^{*2} + 2.8189482T^{*3} - 0.519700T^{*4}$$

### 4.4 Resultados de la segunda etapa

La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos experimentalmente y los determinados por medio de la correlación mencionada, cada uno a la misma temperatura de prueba. En la Figura 12 se grafican estos resultados contra la temperatura de prueba  $T_{prueba}$ .

Las gráficas de las Figuras 13, 14 y 15 son ejemplos de tres mediciones representativas y muestran el incremento de temperatura de la porción del alambre de platino para diferente temperatura inicial  $T_0$  y diferente temperatura de prueba  $T_{prueba}$ .

| $T_0$<br>°C | $T_{\text{prueba}}$<br>°C | $\lambda_{\text{corr}}$<br>$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ | $\lambda_{\text{exp}}$<br>$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ | $T_0$<br>°C | $T_{\text{prueba}}$<br>°C | $\lambda_{\text{corr}}$<br>$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ | $\lambda_{\text{exp}}$<br>$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$ |
|-------------|---------------------------|---|--|-------------|---------------------------|---|--|
| 10.01       | 13.50                     | 0.1345  | 0.1346   | 40.02       | 43.56                     | 0.1255  | 0.1259   |
| 10.01       | 13.49                     | 0.1345  | 0.1338   | 40.02       | 44.17                     | 0.1253  | 0.1257   |
| 15.01       | 18.71                     | 0.1330  | 0.1322   | 50.02       | 53.58                     | 0.1225  | 0.1232   |
| 15.01       | 18.69                     | 0.1330  | 0.1323   | 50.02       | 54.10                     | 0.1223  | 0.1230   |
| 20.00       | 23.75                     | 0.1314  | 0.1316   | 50.02       | 54.01                     | 0.1224  | 0.1233   |
| 20.00       | 23.82                     | 0.1314  | 0.1311   | 59.98       | 62.52                     | 0.1199  | 0.1204   |
| 25.01       | 28.94                     | 0.1299  | 0.1296   | 59.98       | 63.07                     | 0.1197  | 0.1198   |
| 25.01       | 28.94                     | 0.1299  | 0.1297   | 59.98       | 63.66                     | 0.1195  | 0.1204   |
| 30.00       | 34.11                     | 0.1283  | 0.1280   | 59.98       | 63.73                     | 0.1195  | 0.1208   |
| 30.01       | 34.10                     | 0.1283  | 0.1287   |             |                           |   |  |

Tabla 4. Resultados, correlación-experimentales.

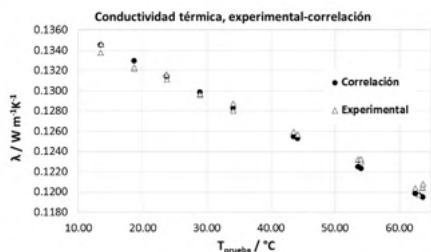


Fig. 12. Gráfica de resultados, correlación-experimentales.

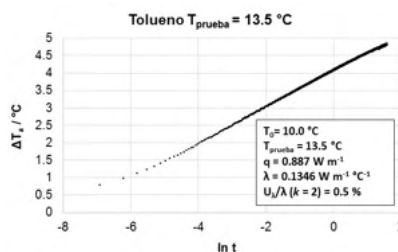


Fig. 13. Conductividad térmica del tolueno a  $T_{\text{prueba}} = 13.5$  °C.

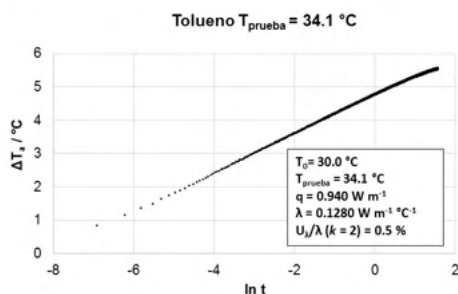


Fig. 14. Conductividad térmica del tolueno a  $T_{\text{prueba}} = 34.1$  °C.

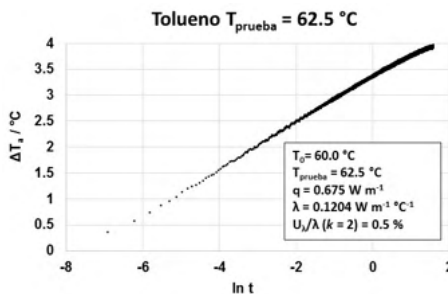


Fig. 15. Conductividad térmica del tolueno a  $T_{\text{prueba}} = 62.5$  °C.

La Tabla 5 indica la desviación de los resultados experimentales respecto a los obtenidos por medio de la correlación, además, estos mismos se muestran en forma de gráfica en la Figura 16.

| $T_{\text{prueba}} \text{ } ^\circ\text{C}$ | $\frac{((\lambda_{\text{corr}} - \lambda_{\text{exp}}) / \lambda_{\text{corr}}) \times 100}{100}$ | $T_{\text{prueba}} \text{ } ^\circ\text{C}$ | $\frac{((\lambda_{\text{corr}} - \lambda_{\text{exp}}) / \lambda_{\text{corr}}) \times 100}{100}$ |
|---|---|---|---|
| 13.50                                       | 0.06  | 43.56                                       | 0.38  |
| 13.49                                       | -0.57   | 44.17                                       | 0.35  |
| 18.71                                       | -0.56   | 53.58                                       | 0.61  |
| 18.69                                       | -0.48   | 54.10                                       | 0.58  |
| 23.75                                       | 0.16  | 54.01                                       | 0.76  |
| 23.82                                       | -0.24   | 62.52                                       | 0.44  |
| 28.94                                       | -0.16   | 63.07                                       | 0.05  |
| 28.94                                       | -0.13   | 63.66                                       | 0.76  |
| 34.11                                       | -0.20   | 63.73                                       | 1.07  |
| 34.10                                       | 0.33  |   |   |

Tabla 5. Desviación.

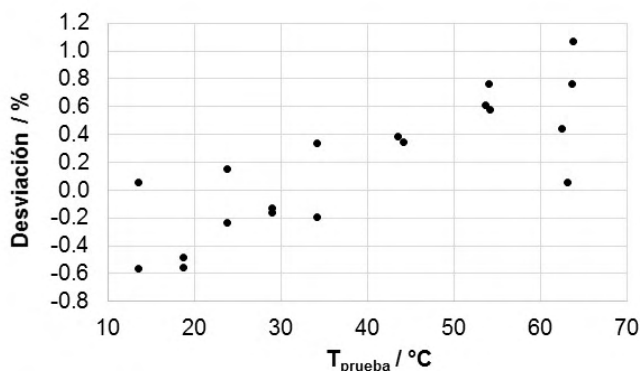


Fig. 16. Desviación de datos experimentales respecto a los obtenidos por medio de la correlación.

#### 4.5 ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE

Para las mediciones se estimó la incertidumbre relativa. La ecuación con la que se determina la conductividad térmica ( $\lambda$ ) es la siguiente:  $m = q / (4\pi \lambda)$ .

La energía por unidad de longitud tiene cantidades de entrada y se determina con la ecuación:

$$q = \left[ \frac{V}{R_2 + R_c + R_l} \right]^2 \left[ \frac{R_l - R_c}{L_l - L_c} \right], R_{\text{eq}} = R_2 + R_c + R_l$$

$$q = \left[ \frac{V}{R_2 + (0.0740T + 18.8285) + (0.1303T + 33.3054)} \right]^2 \left[ \frac{R_l - R_c}{L_l - L_c} \right]$$

y se representa de la siguiente forma:  $q = (V, \Delta R_a, R_{\text{eq}}, \Delta L_a)$ .

Donde  $V$  es la tensión eléctrica aplicada al puente de Wheatstone,  $\Delta R_a$  es la

resistencia eléctrica de la porción del alambre de platino,  $R_{eq}$  es la suma de la resistencia del alambre largo, corto y una resistencia de valor fijo y  $L_a$  es la longitud del alambre.

La pendiente y su incertidumbre se calculan por medio del método de mínimos cuadrados.

La estimación de la incertidumbre para la ecuación de la conductividad térmica es:

$$u_q = \sqrt{\sum_{i=1}^N (c_i u(x_i))^2}, \text{ donde } c_i = \left[ \frac{\partial \lambda}{\partial X_i} \right]$$

Es decir,

$$u_\lambda = \sqrt{\left[ \left( \frac{\partial \lambda}{\partial q} \right) u_q \right]^2 + \left[ \left( \frac{\partial \lambda}{\partial m} \right) u_m \right]^2}$$

Y la estimación para  $q$  y  $m$  es:

$$u_q = \sqrt{\left[ \left( \frac{\partial q}{\partial V} \right) u_V \right]^2 + \left[ \left( \frac{\partial q}{\partial \Delta R_a} \right) u_{\Delta R_a} \right]^2 + \left[ \left( \frac{\partial q}{\partial R_{eq}} \right) u_{R_{eq}} \right]^2 + \left[ \left( \frac{\partial q}{\partial \Delta L_a} \right) u_{\Delta L_a} \right]^2}$$

$$u_m = s_{\Delta T} \sqrt{\frac{N}{N \sum_{i=1}^N (\ln t_i)^2 - (\sum_{i=1}^N \ln t_i)^2}}$$

Por último, la estimación de la incertidumbre para la conductividad térmica se realiza de la siguiente forma:

$$u_\lambda = \sqrt{\left[ \left( \frac{\partial \lambda}{\partial q} \right) u_q \right]^2 + \left[ \left( \frac{\partial \lambda}{\partial m} \right) u_m \right]^2}$$

A manera de ejemplo, se presentan en la Tabla 6 los resultados del análisis de incertidumbre para una medición realizada al tolueno a temperatura de equilibrio,  $T_0$ , de 20 °C y temperatura de prueba,  $T_{prueba}$ , de 23.8 °C.

|                                    | $c_i$                                    | Valor $c_i$ | $(c_i \cdot u(x_i))^2$ |   | $c_i$                                 | Valor $c_i$ | $(c_i \cdot u(x_i))^2$ |
|------------------------------------|--|-------------|------------------------|---|---------------------------------------|-------------|------------------------|
| <b>q</b>                           | $\frac{\partial q}{\partial V}$          | 0.08385     | $2.53 \times 10^{-9}$  | <b><math>\lambda</math></b>   | $\frac{\partial \lambda}{\partial q}$ | 0.1435      | $6.05 \times 10^{-8}$  |
|                                    | $\frac{\partial q}{\partial \Delta R_a}$ | 0.0581      | $1.352 \times 10^{-6}$ |   | $\frac{\partial \lambda}{\partial m}$ | 0.237       | $9.596 \times 10^{-9}$ |
|                                    | $\frac{\partial q}{\partial R_{eq}}$     | -0.00548    | $1.20 \times 10^{-8}$  | <b><math>u_\lambda / W m^{-1} K^{-1}</math></b>   |                                       |             | 0.00026                |
|                                    | $\frac{\partial q}{\partial \Delta L_a}$ | -12.5325    | $1.57 \times 10^{-6}$  | <b><math>\left( \frac{u_\lambda}{\lambda} \right) \cdot 100 / \%</math></b>                 |                                       |             | 0.2014                 |
| <b><math>u_q / W m^{-1}</math></b> |  |             | 0.001714               | <b><math>\left( \frac{u_\lambda}{\lambda} \right) \cdot 100 / \%</math>,<br/><b>k=2</b></b> |                                       |             | 0.403                  |
| <b><math>u_m / K</math></b>        |  |             | 0.00041                |   |                                       |             |                        |

Tabla 6. Incertidumbre de la medición.



## 5 | CONCLUSIONES

Se estableció el patrón nacional de conductividad térmica para fluidos simples en el Centro Nacional de Metrología (CENAM).

Con la implementación de los dos alambres de platino se logró reducir la incertidumbre relativa expandida ( $k=2$ ) de 6 % a 1 %.

Se realizaron diecinueve mediciones al tolueno a temperaturas que van de 13 °C a 64 °C en las cuales se encontró una desviación máxima de 1 % con respecto a los obtenidos con dicha correlación.

Se incrementó el rango de medición del patrón nacional y éste trabaja dentro de las características metroológicas esperadas.

## REFERENCIAS

- [1]. C. A. Nieto de Castro, “**Absolute measurements of viscosity and thermal conductivity of fluids**”, JSME International Journal, Series II, Vol. 31, No. 3, 1988.
- [2]. H. S. Carslaw y J. C. Jaeger, “Conduction of heat in solids”, 2<sup>nd</sup>. Ed., Oxford University Press, 1959.
- [3] F. Morales Cuevas, “**Diseño de un aparato para medir la conductividad térmica de fluidos**”, Tesis, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), Cuernavaca, Morelos, Abril 1998.
- [4] J.W. Haarman, “**A contribution to the theory of the transient hot-wire method**”, Physica 52, 605-619 (1971).
- [5] Saúl García Duarte-Leonel Lira-Cortés, “**Mejora del patrón nacional de conductividad térmica para fluidos simples, resultados preliminares**”, Simposio de metrología 2016, 19 al 23 de septiembre.
- [6] R. G. Richard and I. R. Shankland, “**A Transient Hot-Wire Method for Measuring the Thermal Conductivity of Gases and Liquids**”, International Journal of Thermophysics, Vol. 10, No. 3, 1989.
- [7] María L. V. Ramirez, Carlos A. Nieto de Castro, et al; “**Reference data for the thermal conductivity of saturated liquid toluene over a wide range of temperatures**”; J. Phys. Chem. Ref. Data, Vol. 29, No. 2, 2000.

## ÍNDICE REMISSIVO

### A

Aprendizagem 2, 31, 35, 36, 38, 46, 56

Astronomia 3, 4, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37

### C

Ciências 1, 29, 30, 31, 37, 58

Conductividad térmica 4, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 24, 25, 26, 27, 28

Controle de qualidade 2, 4, 1, 13

### E

Ensino 2, 3, 29, 30, 31, 32, 35, 36, 37, 38, 39, 44, 46, 56, 58

ENSINO 4, 38

Ensino de física 4, 38, 46

### F

Física nuclear 3, 4, 38, 39, 45, 46

Fluidos simples 2, 4, 14, 17, 28

### J

Jogos 38

### P

Puente de Wheatstone 14, 16, 17, 18, 19, 22, 26

### R

Radiologia diagnóstica 1

### T

Técnica del hilo caliente 14

Tomografía computadorizada 2, 4, 1, 13

# Física:

Produção de conhecimento  
relevante e qualificado

-  [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)
-  [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)
-  [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
-  [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)

# Física:

Produção de conhecimento  
relevante e qualificado

 [www.atenaeditora.com.br](http://www.atenaeditora.com.br)  
 [contato@atenaeditora.com.br](mailto:contato@atenaeditora.com.br)  
 @atenaeditora  
 [www.facebook.com/atenaeditora.com.br](https://www.facebook.com/atenaeditora.com.br)