

Planta Térmica Didática para Estimação da Condutividade Térmica de Materiais

Marques da Luz. Luigi F. * Lussón C. Ania ** Beltrán A. Reinel **

* Centro de Informática (CIn)-UFPE, PE (e-mail: lfml@cin.ufpe.br)

** Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho (UACSA)-UFRPE, PE (e-mail: ania.lusson@ufrpe.br, reinel.beltran@ufrpe.br)

Abstract: The law of thermal conduction or Fourier's law describes that the heat flow through a material depends on the temperature difference between two points on the material and also on its thermal conductivity, which provides an indication of the rate at which energy is transferred by the diffusion process. The estimation of this, in turn, is applied in several fields, such as in civil construction, among others. This article presents a prototype of a low cost didactic thermal plant to estimate the thermal conductivity of materials. The proposal is based on Fourier's law and the protected hot plate principle. As a case study, the pine chip was used, due to its use in the generation of electric energy, whose accuracy in the estimation of thermal conductivity was 97,1 %, showing the effectiveness of both the method used and the proposed prototype.

Resumo: A lei da condução térmica ou lei de Fourier descreve que o fluxo de calor através de um material depende da diferença de temperatura entre dois pontos do mesmo e também de sua condutividade térmica, a qual fornece uma indicação da taxa na qual a energia é transferida pelo processo de difusão. A estimativa desta, por sua vez é aplicada em vários campos, como na construção civil, no desenvolvimento de componentes eletrônicos, entre outros. Neste artigo se apresenta um protótipo de planta térmica didática de baixo custo para realizar a estimativa da condutividade térmica de materiais. A proposta é baseada na lei de Fourier e no princípio da placa quente protegida. Como caso de estudo foi usado o cavaco de pinus, devido a seu uso na geração de energia elétrica, cuja precisão na estimativa da condutividade térmica foi de 97,1 %, mostrando a efetividade tanto do método usado quanto do protótipo proposto.

Keywords: Thermal conductivity; thermal plant; heat transfer; thermal gradient.

Palavras-chaves: Condutividade térmica; planta térmica; transferência de calor; gradiente térmico.

1. INTRODUÇÃO

A estimativa da condutividade térmica é aplicada em diversos campos, como na construção civil, no desenvolvimento de componentes eletrônicos, entre outros. Existem diversos métodos e normas que regulamentam a forma como a condutividade térmica deve ser estimada, um exemplo é a medição da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida, que é um método de medição em regime permanente, da resistência térmica e da condutividade térmica de materiais sólidos ou granulares no âmbito da construção civil (NBR15520, 2005).

Em Lucas et al. (2021) se apresentam estudos experimentais de concretos leves estruturais com argila expandida. No mesmo, se apresenta a construção de um protótipo de baixo custo em conformidade com a NBR 15220-4:2005, para a medição da condutividade térmica usando o método da placa quente protegida. Resultados da condutividade apresentaram-se satisfatórios para dar resposta à questão do desempenho térmico. Por outra parte, em Alvarenga et al. (2020) é analisado o desempenho térmico de argamassas para fins estruturais (concreto sem brita ou microconcreto) produzidas com e sem substituição parcial do cimento Portland por micropartículas de vidro soda-cal-

sílica. O desempenho térmico das argamassas foi avaliado por meio de uma adaptação do método da placa quente protegida descrito na NBR 15220 e por termografia infravermelha ativa (aquecimento artificial). Já em Vilela (2017), foi desenvolvido um sistema de baixo custo para medição da condutividade térmica de corpos cerâmicos, neste caso, a argamassa de revestimento. Nesta aplicação, foi utilizado um corpo de prova tubular, onde a fonte de calor foi uma resistência elétrica e as medições de temperatura foram realizadas com termopares. Também em Cargnelutti et al. (2010) se apresenta um estudo do método prático da placa quente protegida para a determinação da condutividade térmica de uma liga de alumínio, usando medições experimentais da diferença de temperatura entre dois pontos com distância da barra de alumínio.

Embora existam diversas referências que tratam do assunto, tanto para aplicações profissionais como para fins de pesquisa, o tema em questão ainda é abordado de forma majoritariamente teórica em disciplinas dos cursos de graduação de engenharia. No contexto da educação na engenharia, novas metodologias de ensino são desenvolvidas para vincular a teoria e a prática. O uso de plantas didáticas serve como uma ferramenta educacional, enfatizando o papel da universidade no processo de ensino-aprendizagem

(Silva et al., 2021), (Prata and Campo, 2020), (Rubio et al., 2018), (Pérez et al., 2018). Com isso em vista, este artigo almeja unir a teoria e a prática, e projetar uma planta térmica didática de baixo custo para realizar a estimativa da condutividade térmica de diferentes tipos de materiais. Desta forma, os alunos poderão realizar experimentos práticos das mais diversas disciplinas, tais como: fenômenos de transportes, para realizar a estimativa da condutividade térmica de um material; instrumentação industrial, para analisar a curva de calibração dos sensores e determinar os erros associados a eles; sistemas de controle, para obter a função de transferência do sistema térmico, entre outras diversas aplicações.

O trabalho encontra-se organizado da seguinte forma: primeiramente é apresentada toda a fundamentação teórica relacionada à transferência de calor necessária para realizar a estimativa da condutividade térmica. Ato seguido se apresenta a metodologia com a escolha dos componentes propostos para o protótipo da planta térmica em conjunto com a justificativa da amostra a ser utilizada e a especificação do experimento a ser realizado. Depois disso, são apresentados os resultados obtidos a partir dos experimentos e, por fim, as conclusões.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Transferência de calor

Calor é a energia trocada entre um sistema e o ambiente devido a uma diferença de temperatura (Resnick, 2012). Existem diversos processos de transferência de calor, que normalmente são classificados pelo meio em que se encontram. Quando existe um gradiente de temperatura em um meio estacionário, que pode ser um sólido ou um fluido, usa-se o termo condução para se referir à transferência de calor que ocorre através do meio. Em contraste, o termo convecção se refere à transferência de calor que ocorrerá entre uma superfície e um fluido em movimento quando eles estiverem a diferentes temperaturas. O terceiro modo de transferência de calor é chamado de radiação térmica. Todas as superfícies com temperatura não nula emitem energia na forma de ondas eletromagnéticas. Desta forma, na ausência de um meio interposto participante, há transferência de calor líquida, por radiação, entre duas superfícies a diferentes temperaturas (Incropera, 2008).

2.2 Condução de calor

Condução é a transferência de energia das partículas mais energéticas de uma substância para as vizinhas menos energéticas como resultado da interação entre elas. A condução pode ocorrer em sólidos, líquidos ou gases. Em líquidos e gases, a condução deve-se às colisões e difusão das moléculas em seus movimentos aleatórios. Nos sólidos é devido à combinação das vibrações das moléculas em uma rede e a energia é transportada por elétrons livres (Çengel, 2009).

A lei da condução térmica, também conhecida como lei de Fourier, estabelecida em 1822 pelo cientista francês Jean-Baptiste Joseph Fourier, descreve que o fluxo de calor através de um material é proporcional ao gradiente negativo de temperatura. Supondo que existe apenas gradiente de

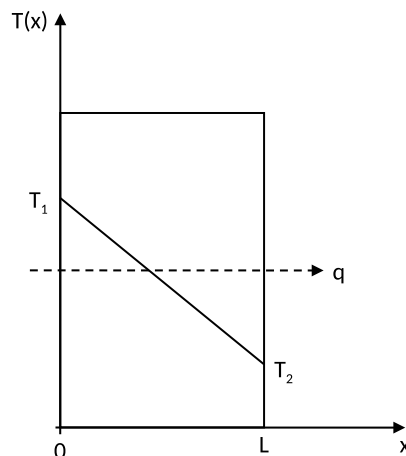


Figura 1. Distribuição de temperatura numa parede plana.

temperatura na direção x (caso unidimensional), a lei de Fourier pode ser representada por (1):

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

em que:

- q é a taxa de transferência de calor $[W]$;
- k é a condutividade térmica $[\frac{W}{mK}]$;
- A é a área perpendicular ao fluxo $[m^2]$;
- $\frac{dT}{dx}$ é o gradiente térmico $[\frac{K}{m}]$.

A lei de Fourier pode ser aplicada para os mais diversos casos. O mais simples é a aplicação da equação de transferência de calor no cenário de uma parede plana, o qual consiste em analisar a parede em condições de regime permanente e sem geração interna de energia, conforme pode ser visto na Figura 1.

2.3 Condutividade térmica

A condutividade térmica é uma propriedade de transporte que fornece uma indicação da taxa na qual a energia é transferida pelo processo de difusão. Ela depende da estrutura física da matéria, atômica e molecular, que está relacionada à fase da matéria. Em geral, a condutividade térmica de um sólido é maior do que a de um líquido, que, por sua vez, é maior do que a de um gás (Incropera, 2008). Esta propriedade é muito importante no processo de condução, uma vez que materiais mais condutores têm maior facilidade de propagar calor para outro sistema. Um exemplo disto é que a condutividade térmica do alumínio é de aproximadamente $300 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, enquanto a do Hélio é de $0,1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ na mesma temperatura de 200 K , conforme pode ser visto na Figura 2.

Determinar o campo de temperaturas em um meio devido às condições de contorno impostas se trata de uma das principais aplicações da análise da condução de calor. Em outras palavras, deseja-se encontrar a distribuição de temperatura no meio, e com isso, tornar possível a determinação do fluxo de calor por condução por meio da lei de Fourier. O conhecimento da distribuição de temperatura também pode ser utilizado para obter outras grandezas de interesse, tais como: a integridade estrutural

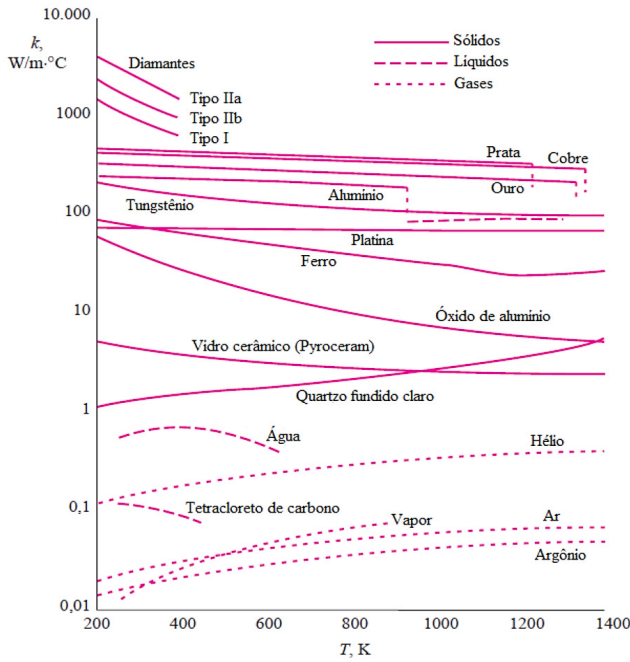


Figura 2. Variação de condutividade térmica dos materiais com a temperatura.

de um sólido ou a otimização da espessura de um material isolante.

Para obter a equação geral da condução de calor, se parte da exigência de conservação de energia em um volume de controle elementar: o fluxo da calor que entra mais a taxa de calor gerada é igual à taxa temporal de variação da energia interna mais o fluxo de calor que deixa o volume, o que resulta na equação geral da condução de calor apresentada em (2) em coordenadas cartesianas (Incropera, 2008).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k(x) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k(y) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k(z) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_G = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

em que:

- T é a temperatura [K];
- q_G é a taxa de energia gerada por unidade de volume do meio [$W/(m^3)$];
- $\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}$ é a taxa de variação com o tempo da energia térmica do meio.

A solução analítica de (2) depende das condições iniciais e de contorno, pelo que não existe uma solução para todos os casos de geometrias. Por tal motivo, tal solução é encontrada dependendo da geometria do problema, assim como do tipo de regime que determina as direções de contorno e inicial.

Mais ainda, (2) pode ser escrita em notação mais sintética utilizando o operador Laplaciano, como mostrado em (3), considerando o cenário em que a condutividade térmica é uniforme (material isotrópico) e constante (independente de T). Vale destacar que a formulação simbólica do Laplaciano independe do sistema de coordenadas adotado. Assim, caso seja usado um sistema diferente do cartesiano,

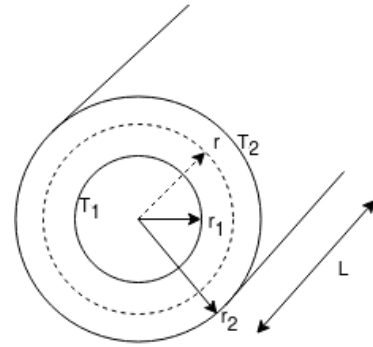


Figura 3. Pontos de temperatura e dimensões de um corpo cilíndrico.

como o cilíndrico, só há que substituir o Laplaciano do sistema de interesse. As expressões a seguir são deduzidas no sistema de coordenadas cilíndricas por conta da aplicação em questão.

$$\nabla^2 T + \frac{q_G}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

em que:

- $\alpha = \frac{k}{\rho c_p}$ é a difusividade térmica [$\frac{m^2}{s}$];
- $\nabla^2 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ é o operador Laplaciano no sistema de coordenadas cilíndricas;

Desenvolvendo (3), obtêm-se:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_G}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

Com as seguintes considerações:

- Não há geração interna de calor: $q_G = 0$;
- Regime permanente: $\frac{\partial T}{\partial t} = 0$;
- Condução unidimensional: $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0$;
- Simetria radial, isto é, T não depende de ϕ , ou seja: $\frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} = 0$.

Uma vez que essas considerações são feitas, (4) pode ser simplificada como:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0 \quad (5)$$

Integrando (5) duas vezes, sua solução é mostrada em (6).

$$T(r) = C_1 \ln(r) + C_2 \quad (6)$$

As constantes C_1 e C_2 podem ser encontradas com base nas condições de contorno, que de acordo com a Figura 3, são $T(r_1) = T_1$ e $T(r_2) = T_2$. Desta forma, e usando (6):

$$C_1 = \frac{T_2 - T_1}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (7)$$

$$C_2 = T_2 - \frac{(T_2 - T_1)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \ln(r_2)$$

Substituindo (7) em (6), obtêm-se que:

$$T(r) = \frac{(T_2 - T_1)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \ln\left(\frac{r}{r_2}\right) + T_2 \quad (8)$$

Ao aplicar o resultado de (6) em (1), é possível obter o calor em função das dimensões físicas do cilindro. Considerando a área da casca cilíndrica, $A = 2\pi L$, tem-se que:

$$q = -k(2\pi L)C_1 \quad (9)$$

Ao isolar k em (9) e substituindo C_1 , é obtida a condutividade térmica.

$$k = -\frac{qln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L(T_2 - T_1)} \quad (10)$$

Por meio de (10), conclui-se que é possível obter a condutividade térmica de um material que esteja disposto em um recipiente cilíndrico, como o cavaco de madeira, por exemplo. Essa estimativa pode ser feita apenas conhecendo o calor ao qual o material é submetido, o comprimento do cilindro, os raios internos e externos, e também a diferença de temperatura entre os dois raios.

2.4 Métodos de medição de condutividade térmica

Os métodos de medição de condutividade térmica, k , requerem do conhecimento do perfil de temperatura bem como a quantificação simultânea do fluxo de calor. Os mesmos são usualmente separados em dois grandes grupos: de regime permanente e de regime transiente. Os métodos de regime permanente tendem a se basear na medição do fluxo de calor e na diferença de temperatura entre faces opostas da amostra, o que possibilita a utilização da lei de Fourier. Já nos de regime transiente, a medição de temperatura é realizada em um ponto específico da amostra ao longo do tempo, requerendo de instrumentais menos elaborados e a medição é mais rápida, porém os resultados são menos confiáveis se comparados aos obtidos com os métodos de regime permanente onde, normalmente, a medição requer um longo tempo, porém os resultados são mais exatos (Schneider, 1998).

Assim para o desenvolvimento deste trabalho será usado um método de regime permanente com base no resultado apresentado em (10).

3. METODOLOGIA

De acordo com (10), para a estimação da condutividade térmica é necessário conhecer o calor ao qual o material é submetido (q), o comprimento do cilindro (L), a localização de pelo menos dois pontos de medição de temperatura (r_1 e r_2), assim como as temperaturas (T_1 e T_2). Dessa forma, foram identificados os seguintes requisitos:

- Uma fonte de calor externa, para que seja possível estimar a quantidade de calor fornecida para a amostra;
- Medição de temperatura nos raios internos e externos do cilindro;
- Conhecimento dos raios dos pontos de medição de temperatura, para se ter noção da extensão da amostra no cilindro;
- Conhecimento do comprimento do cilindro a ser utilizado.

Por meio dos requisitos, foi possível especificar os componentes e suas funções.

3.1 Especificação dos componentes

A especificação dos componentes deve garantir que o funcionamento do protótipo ocorra como o esperado. Além disso, deve ser avaliado o custo-benefício em relação às funcionalidades e custo total do protótipo, uma vez que um dos objetivos é que o protótipo apresente um baixo custo.

Fonte de calor: Devido à facilidade de aquisição, baixo custo e diversos tipos de acionamentos, foi escolhida uma resistência elétrica. As resistências CA (Corrente Alternada) se destacam em relação às CC (Corrente Contínua) devido às altas potências que podem entregar. Entretanto, as de CA necessitam de dispositivos de controle mais robustos que as de CC. Por conta da facilidade de aquisição das resistências CA e também pela disponibilidade de um equipamento de baixo custo e que apresentasse um formato cilíndrico, optou-se por utilizar um ferro de solda de 30 W como a fonte de calor. Embora as resistências CA apresentem uma maior dificuldade para realizar controle de sua potência, um sistema térmico apresenta uma constante de tempo elevada, o que faz com que um controle analógico de potência não seja estritamente necessário. Dessa forma, um controle do tipo liga-desliga satisfaz a necessidade de projeto.

Os dispositivos mais usuais para controle liga-desliga são os relés, podendo ser eletromecânicos ou de estado sólido. Enquanto o relé eletromecânico utiliza o princípio da indução eletromagnética, os de estado sólido utilizam as tecnologias de semicondutores. Devido à facilidade de aquisição, foi escolhido o eletromecânico, que é amplamente utilizado em projetos de eletrônica.

Sensores de temperatura: A medição de temperatura é um dos pontos cruciais para a correta estimativa da condutividade térmica. Foi escolhido o sensor do tipo DS18B20, que se comunica pelo barramento *One-Wire*, o que elimina a necessidade da utilização de várias entradas analógicas, pode medir temperaturas no intervalo de -55 °C até $+125$ °C, além de possuir um encapsulamento à prova d'água.

Microcontrolador: O microcontrolador tem como objetivo de reunir as informações das leituras dos sensores e enviá-las ao sistema supervisório por meio do protocolo de comunicação Modbus. Devido à facilidade de uso, a quantidade de informação disponível, bibliotecas prontas e baixo custo, optou-se por utilizar uma placa Arduino UNO.

Sistema Supervisório: Para o desenvolvimento do sistema supervisório foi escolhido o ScadaBR, por se um *software* livre, gratuito e de código-fonte aberto, indicado para desenvolver aplicações de Automação, Aquisição de Dados e Controle Supervisório. Para que o supervisório seja capaz de se comunicar com o Arduino UNO foi utilizado o protocolo Modbus por meio da biblioteca *SimpleModbusSlave* (ScadaBR, 2006).

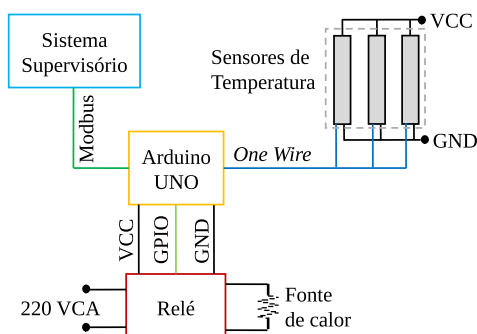


Figura 4. Diagrama de blocos proposto para a planta térmica.

Recipiente para acomodar a amostra: A maior restrição deste item é reproduzir a situação do corpo cilíndrico. Para isso, foi escolhido um cano de PVC, por ser um material de fácil aquisição, baixo custo e apresenta um bom isolamento térmico (ponto favorável para manter o calor apenas na amostra de material a ser analisado).

Escolha da amostra: A amostra escolhida para os experimentos foi o cavaco de madeira, comumente encontrado em serrarias. O cavaco escolhido teve sua origem de uma serraria onde serram-se madeiras de diversos tipos, entre eles: pinos, jaqueira e angelim. Este material foi escolhido devido a sua aplicação para geração de biomassa, e assim, energia elétrica, o que contribui para os estudos de energias renováveis (Areias et al., 2020), (Santos et al., 2020), (Sordi et al., 2002).

3.2 Protótipo da Planta Térmica Didática

O diagrama de blocos apresentado na Figura 4 apresenta uma visão geral da planta térmica didática e seus componentes. A fonte de calor será alimentada por meio da rede elétrica e terá seu acionamento dado por um relé controlado pelo Arduino UNO. Também conectados ao Arduino por meio do barramento *One Wire*, estão os sensores de temperatura DS18B20. Uma vez adquiridas as medições de temperatura, serão enviadas para o sistema supervisor por meio do protocolo Modbus, onde se apresentarão os valores de temperatura, bem como a estimativa da condutividade térmica do material em análise.

Na Figura 5 é apresentada a proposta de protótipo para a planta térmica, onde é possível perceber o formato cilíndrico, bem como a fonte de calor e os sensores, posicionados dentro dele.

O funcionamento do protótipo se baseia na equação (10), dessa forma, se faz necessário obter os parâmetros envolvidos na mesma. As metodologias propostas para obter tais parâmetros são apresentadas a seguir.

Parâmetros do protótipo: Os parâmetros físicos utilizados para o protótipo são de extrema importância para a estimativa da condutividade térmica. Dessa forma, na Tabela 1 são apresentadas as dimensões físicas e os parâmetros elétricos utilizados no protótipo.

É importante notar que 30 W é a potência nominal da fonte de calor, o qual pode ser controlado com base no

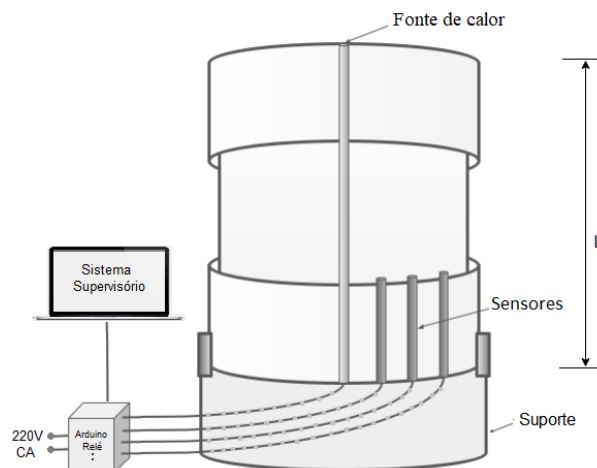


Figura 5. Proposta de formato do protótipo.

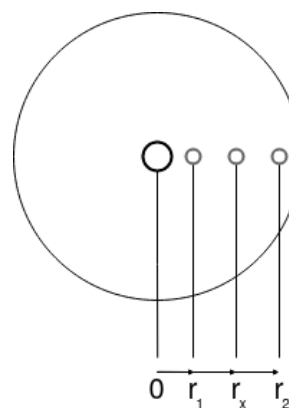


Figura 6. Pontos de medição dos raios do cilindro.

tempo de acionamento do relé. Na Figura 6, a origem do sistema é considerada na posição da fonte de calor. Dessa forma, o raio interno r_1 é dado na posição em que se encontra o primeiro sensor de temperatura, já o raio externo r_2 é dado na posição do último sensor de temperatura.

Conforme pode ser visto nas Figuras 5 e 6, a fonte de calor deve ser posicionada na parte central do cilindro ao longo de todo seu comprimento, dessa forma, se terá a situação mais próxima de uma distribuição de calor radial. Como foi sugerida a utilização de um ferro de solda como fonte de calor, é recomendado que utilize um cilindro com comprimento $L = 115$ mm, que é o comprimento do ferro de solda utilizado.

Obtendo as temperaturas nos pontos: Três sensores de temperatura DS18B20 são propostos para verificar experimentalmente a característica logarítmica da distribuição de temperatura em um corpo cilíndrico. As leituras de temperatura serão disponibilizadas no Sistema Supervisor.

Tabela 1. Dimensões físicas e parâmetros elétricos do protótipo.

Parâmetro	Valor
r_1	25 mm
r_2	65 mm
L	115 mm
q	30 W

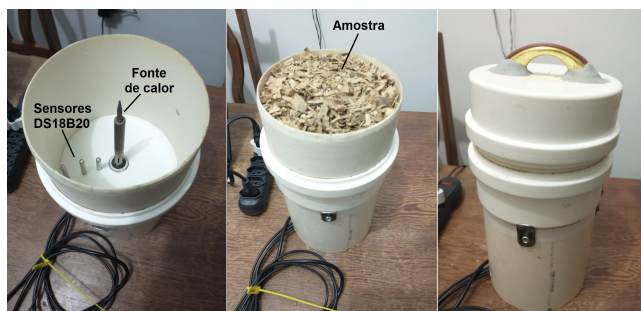


Figura 7. Proposta de experimento.

Obtendo a potência da fonte de calor: A potência na fonte de calor é obtida a partir da média dos valores que indicam o estado do acionamento do relé multiplicada pela potência nominal da fonte de calor.

Amostras para estimar a condutividade: Amostras granulares são sugeridas, pois quando colocadas dentro do cilindro assumem a forma cilíndrica, como por exemplo, o cavaco de pinus sp, o grão de arroz com casca e o trigo. Por outro lado, é importante que a condutividade térmica seja conhecida para mensurar a precisão da protótipo proposto, o que permitirá, posteriormente, utilizá-la para materiais que não possuem a condutividade térmica conhecida.

3.3 Proposta de experimento

O experimento consiste em dispor a amostra selecionada dentro do protótipo (ver Figura 7). Na mesma é apresentado o protótipo vazio, onde pode ser visualizada a fonte de calor e os três sensores de temperatura DS18B20. Ato seguido se mostra o protótipo com a amostra do cavaco de madeira, e finalmente se apresenta o protótipo fechado e pronto para iniciar o experimento.

Uma vez que a amostra foi disposta no protótipo e o mesmo foi fechado, pode-se ligar à tomada do relé na energia elétrica, alimentar o Arduino UNO por meio da porta USB do computador. O Sistema Supervisório está programado para atualizar os valores de temperatura e de condutividade térmica a cada 1 minuto. O relé será chaveado em intervalos de 5 minutos, para emular um sinal PWM, de modo que a potência entregue à resistência seja igual a 50% de sua potência nominal.

No Sistema Supervisório são observadas as distribuições de temperatura até que se atinja o regime permanente, assim como a condutividade térmica ao longo do tempo, bem como o seu valor mais atual. Além disso, também é possível gerar relatório com as medições das temperaturas e estimativas da condutividade térmica.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção são detalhados os resultados obtidos ao longo do desenvolvimento do protótipo, desde a lista de materiais até os experimentos de estimativa da condutividade térmica. Primeiramente, na Tabela 2 se mostra uma estimativa do custo do protótipo, enfatizando o baixo custo.

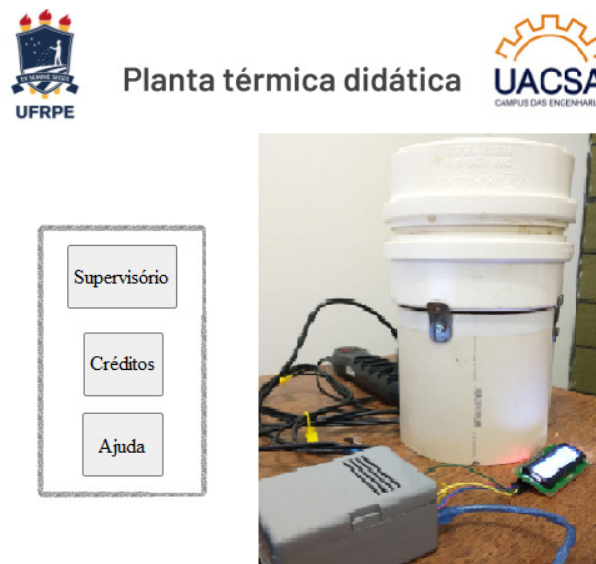


Figura 8. Tela inicial do sistema supervisório.

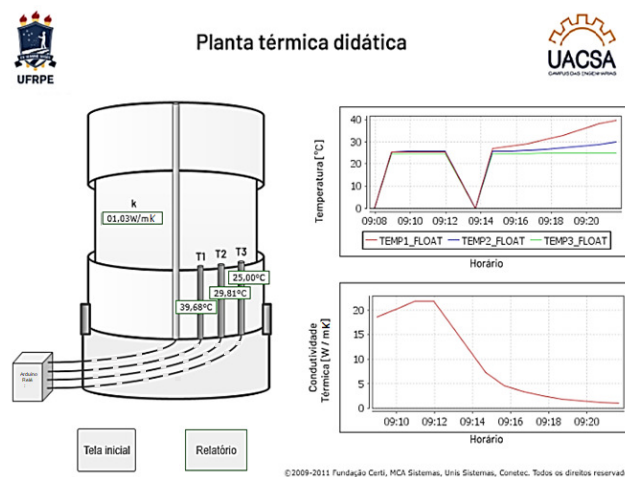


Figura 9. Tela de visualização de variáveis do sistema supervisório.

4.1 Sistema supervisório

Ao abrir o Sistema Supervisório, se apresenta a tela inicial conforme a Figura 8. Ao clicar no botão Supervisório se apresenta um diagrama da planta térmica, onde se mostram as medições de temperatura e de condutividade térmica, atualizadas em intervalos de 1 minuto (ver Figura 9). Também se podem visualizar gráficos de temperaturas nos três sensores e da condutividade térmica ao longo do tempo. Além disso, com o botão Relatório é possível exportar os dados de temperatura e condutividade térmica obtidos nas últimas 24 horas.

Tabela 2. Lista de componentes e custo total.

Componente	Preço Unitário (R\$)	Quantidade	Custo (R\$)
Arduino UNO	49,31	1	49,31
Ferro de solda	41,71	1	41,71
Módulo Relé	9,98	1	9,98
Sensor DS18B20	14,16	3	42,48
Cano PVC 150 mm (metro)	30,00	1/10	3,00
Tampa Cano PVC 150 mm	35,00	2	70,00
Total			216,48

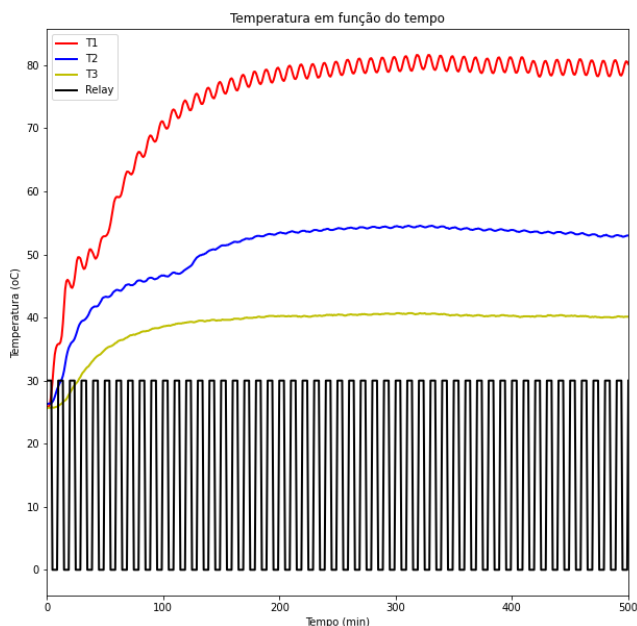


Figura 10. Distribuição de temperatura em função do tempo.

4.2 Distribuição de temperatura

As distribuições de temperatura podem ser analisadas de duas formas: em função do tempo com o objetivo de analisar se o sistema atingiu o regime permanente, e em função do raio do cilindro com o intuito de analisar se a distribuição se aproxima do resultado teórico esperado.

Em função do tempo: Na Figura 10 é possível verificar a distribuição de temperatura nos três pontos de medição ao longo do tempo, bem como os momentos em que o relé se encontrava ligado ou desligado. Se pode observar que a curva de temperatura apresenta pequenas oscilações que ocorrem por conta do modo de controle do relé. Mesmo com essas oscilações, é possível perceber que perto da marca dos 300 minutos, as variações nos valores de temperatura são mínimas, o que indica que o sistema atingiu o regime estacionário.

Em função do raio: Na Figura 11 é possível visualizar a distribuição de temperatura ao longo do raio do cilindro no momento em que o máximo valor de temperatura foi atingido.

O valor encontrado no ponto central foi de $54,35\text{ }^{\circ}\text{C}$, enquanto o valor teórico calculado por meio (8) foi de $56,36\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tal resultado apresenta um erro de $2,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ em relação ao valor teórico. Com base no valor de erro encontrado e na Figura 11 é possível validar que a curva experimental da distribuição de temperatura ao longo do raio apresenta uma característica próxima da curva logarítmica prevista teoricamente.

4.3 Estimativa da condutividade térmica

Por meio de (10), pode-se realizar a estimativa da condutividade térmica com base nos parâmetros da Tabela 1 e dos valores de temperatura encontrados. Na Figura 12 é apresentada a curva da condutividade térmica em função

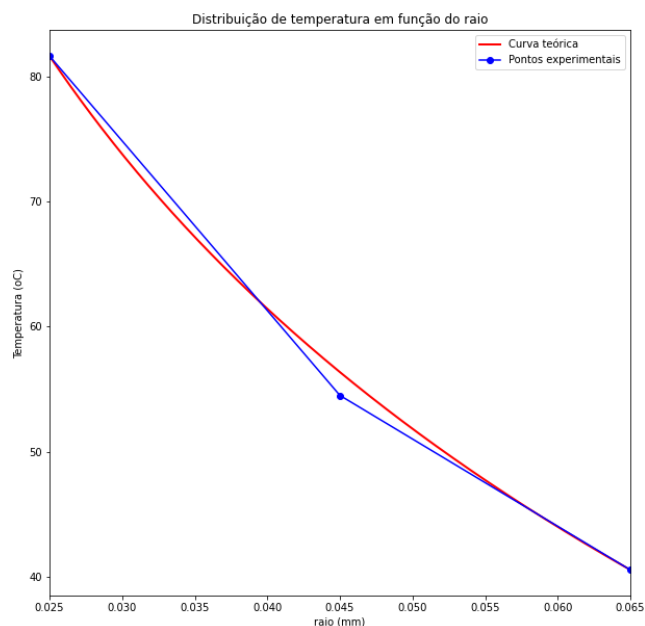


Figura 11. Distribuição de temperatura em função do raio.

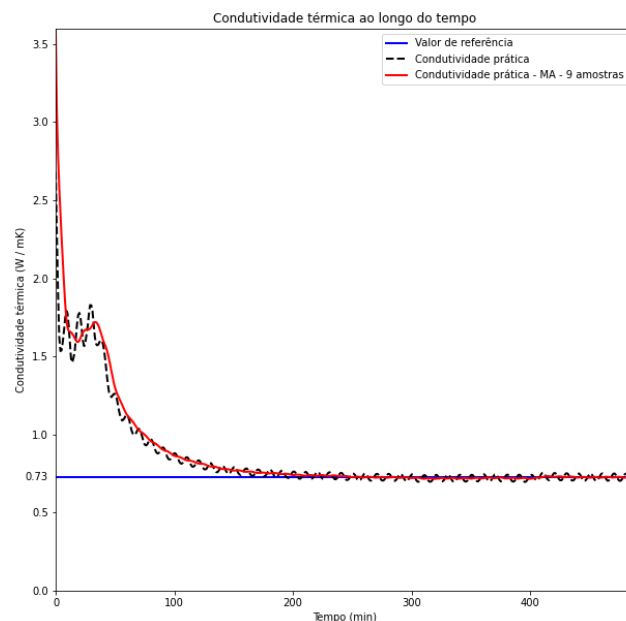


Figura 12. Condutividade térmica em função do tempo.

do tempo em conjunto com sua média móvel aritmética, assim como seu valor de referência. O resultado encontrado para a condutividade térmica foi de $k = 0,709\frac{\text{W}}{\text{mK}}$, sendo que o valor utilizado como referência teórica foi de $0,73\frac{\text{W}}{\text{mK}}$ do pinus sp (MacLean, 1941). Em relação a este valor, a condutividade térmica obtida apresenta um erro de $0,021\frac{\text{W}}{\text{mK}}$ e um erro relativo de 2,9 %, o que caracteriza uma estimativa adequada para uma planta didática de baixo custo.

5. CONCLUSÃO

Neste artigo foi construída uma planta térmica didática de baixo custo para realizar a estimativa da condutividade térmica de diferentes materiais. Por meio dos resultados experimentais obtidos, foi possível concluir que

a condutividade térmica encontrada é condizente com o valor teórico esperado para um dos principais tipos de madeira utilizados para produzir o cavaco. Dessa forma, o protótipo se mostrou eficaz para realizar experimentos de estimativa da condutividade térmica de materiais em regime estacionário. Além disso, foi desenvolvido um Sistema Supervisório usando como plataforma o ScadaBR para o monitoramento do sistema. Vale destacar que o protótipo também poderá ser utilizado para atividades experimentais futuras e com um baixo custo de produção, o que cumpre com a proposta do projeto de desenvolver uma planta térmica didática de baixo custo. Finalmente, com este trabalho é possível apreciar a importância do uso das plantas didáticas como ferramenta educacional, enfatizando o papel da universidade na contribuição com a geração e difusão do conhecimento tecnológico e científico.

REFERÊNCIAS

- Alvarenga, C.d.B.C.S., Maximo, O.H., Cassimiro, I.L.V.A., Sales, R.d.B.C., and Aguiar, M.T.P. (2020). Influência do uso de lama de vidro na difusividade térmica de argamassas estruturais utilizando termografia. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 25.
- Areias, A.A., Júnior, J.C.C., and Yamaji, F.M. (2020). Estudo de mercado sobre o uso de biomassa para queima no estado de são paulo, brasil. *Research, Society and Development*, 9(11), e1429119566–e1429119566.
- Cargnelutti, A.L., Oestreich, D.H., and Vechia, V.D. (2010). Determinação da condutividade térmica pelo método da placa quente protegida. Trabalho final da disciplina de medições térmicas da UFRGS.
- Incropera, F.P. (2008). *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*, volume 6^a Edição. LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda.
- Lucas, C.N.M., dos Anjos Azambuja, M., and Scalón, V.L. (2021). Measurement of thermal conductivity in lightweight concrete produced with ground stone residue. *Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades*, 9(74).
- MacLean, J. (1941). Thermal conductivity of wood. *Heating, piping & air conditioning. Madison, USA*.
- NBR15520 (2005). ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15520-4: Desempenho térmico de edificações - Parte 4: Medição da resistência térmica e da condutividade térmica pelo princípio da placa quente protegida*. Rio de Janeiro.
- Prata, T. and Campo, A. (2020). Desenvolvimento e aplicação de controle preditivo baseado em modelo (mpc) em planta didática de temperatura. In *Congresso Brasileiro de Automática-CBA*, volume 2. doi:10.48011/asba.v2i1.1187.
- Pérez, K., Vargas, H., Castro, C., Chacón, J., and de la Torre, L. (2018). Coupled tanks laboratory for teaching multivariable control concepts. In *2018 IEEE International Conference on Automation/XXIII Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA)*, 1–6. doi:10.1109/ICA-ACCA.2018.8609851.
- Resnick, H. (2012). *Fundamentos de Física*, volume 2, 9^a Edição. LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda.
- Rubio, E., Santana, I., Rohten, J., Esparza, V., and Martinez-Jimenez, B.L. (2018). Remote laboratories for control education: Experience to classic pid control course. In *2018 IEEE International Conference on Automation/XXIII Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA)*, 1–6. doi:10.1109/ICA-ACCA.2018.8609754.
- Santos, M.C.B., da Silva, Y.B.R., Martins, M.T., Soares, E.C.V., de Oliveira, F.D.B., de Moura, J.J., and dos Santos, M.d.S.F. (2020). Aproveitamento de biomassa em uma indústria moveleira para geração de energia. In *VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS 2020*. Fortaleza-CE. URL <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/961>.
- ScadaBR (2006). *Download ScadaBR*. FUNDAÇÃO CERTI, Rio de Janeiro. URL <http://www.scadabr.com.br/?q=downloads>.
- Schneider, A. (1998). *Handbook of temperature measurement: Temperature and humidity measurement*, volume Vol.1. Springer.
- Silva, N., Cervantes, A., Gomes, F., and Aguedo, R. (2021). Supervision and control system of a didactic plant in the teaching of industrial automation and control. In *2021 IEEE International Conference on Automation/XXIV Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA)*, 1–7. doi:10.1109/ICAACCA51523.2021.9465319.
- Sordi, A., Souza, S.N., Galdino, A.P., and Oliva, C.A. (2002). Planta de cogeração num frigorífico de francos com cavaco de pinus como fonte primária. In *4^o Encontro de Energia no Meio Rural*. URL http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022002000200040&script=sci_arttext.
- Vilela, K.C. (2017). Desenvolvimento de sistema de baixo custo para medição de condutividade térmica em corpos de prova cerâmicos. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais.
- Çengel, Y.A. (2009). *Transferência de calor e massa: Uma abordagem prática*, volume 3^a Edição. McGraw-Hill Interamericana do Brasil Ltda.