

Modelagem Bifocal Aplicada à Engenharia Mecânica: Desenvolvimento de um modelo computacional de condução térmica para uso educacional no ensino superior

Julio P. Witwytzkj¹, Adhemar M. do Valle Filho², Andre L. M. Santana^{3,4}

¹Escola do Mar, Ciência e Tecnologia. Universidade do Vale do Itajaí – Itajaí, SC

²Centro de Comunicação e Expressão - EGR. Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, SC – Brasil

³Escola de Engenharia e Tecnologia. Universidade Anhembi Morumbi – São Paulo, SP

⁴Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – São Paulo, SP – Brasil

juliopw@edu.univali.br, adhemar.valle@ufsc.br, lms91@usp.br

Abstract. *Bifocal modeling integrates physical experimentation and creation of virtual models, including comparison of the results as a way of validating or reformulating the models. In this paper, a thermal conduction computational model was created on NetLogo, along with an analogous physical experiment. At the end, the temperature values compared between the model and the experiment were statistically convergent in four of five points of analysis when evaluated in a paired way, but needing small corrections. It was observed that Bifocal Modeling stimulates critical thinking, helping in the formulation of hypotheses for possible divergences.*

Resumo. *Modelagem Bifocal integra experimentação física e criação de modelos virtuais, incluindo comparação dos resultados como forma de validar ou de reformular os modelos. Neste trabalho, um modelo computacional de condução térmica foi criado no NetLogo em conjunto com um experimento físico análogo. Ao fim, os valores de temperatura comparados entre o modelo e o experimento obtiveram convergência estatística em quatro dos cinco pontos de análise quando avaliados de maneira pareada, sendo necessário que sejam revisados em busca de pequenas correções. Observou-se que a Modelagem Bifocal estimula o pensamento crítico, auxiliando na formulação de hipóteses para possíveis divergências.*

1. Introdução

Modelagem Bifocal é um método de modelagem que integra a criação de modelos físicos e computacionais com o objetivo de aprimorar o aprendizado sobre o fenômeno físico estudado [Blikstein e Wilensky 2007]. O método faz com que o pesquisador, seja aluno ou profissional, se torne protagonista na investigação sobre o comportamento do fenômeno físico, e por sua característica iterativa promove o pensamento crítico sobre o motivo de falhas ou divergências entre o experimento físico e o modelo criado computacionalmente.

De maneira simplificada, a Figura 1 apresenta as etapas desse método de modelagem, iniciando com o projeto, construção e interação com o experimento físico, sendo a base para a criação de um modelo computacional que represente suas características essenciais.

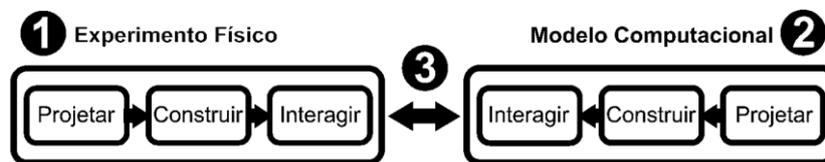


Figura 1. Etapas da Modelagem Bifocal [Blikstein et al. 2012]

Existe, nesse método, um grande enfoque na interação entre os modelos, seja manipulando variáveis do modelo computacional ou alterando parâmetros do experimento físico. É da comparação entre ambos que surge a característica bifocal, e é a partir da liberdade do pesquisador para formular e testar suas hipóteses em ambiente físico e computacional que surgem os benefícios de aprendizagem, mencionados por Blikstein et al. (2012), em relação aos chamados métodos tradicionais, nos quais o aluno não é tratado como pesquisador, mas sim como absorvedor passivo do conhecimento [Casale 2013].

Ainda no escopo de aprendizagem, Rosa e Araújo (2016) afirmam que disciplinas básicas dos cursos de Engenharia, como a de Física, devem ser desenvolvidas de maneira satisfatória para que o estudante esteja preparado para as disciplinas específicas de cada área e para que sejam superadas “as dificuldades trazidas do Ensino Médio.” No caso da Engenharia Mecânica, a compreensão do fenômeno físico de condução térmica, essencial para esse curso, apresenta dificuldades substanciais aos estudantes.

A ementa das disciplinas de Transmissão de Calor frequentemente inclui a solução desse tipo de problema de maneira analítica, ou mesmo da criação de modelos simplificados e com características rígidas de manipulação. Ainda, existem os softwares de simulação computacional que produzem excelentes resultados para uso profissional, mas criam um distanciamento entre o funcionamento dos métodos computacionais e o usuário.

São concretas as tentativas de modificar o paradigma educacional por meio de aprendizagem baseada em problemas [Casale 2013], pelo tratamento do estudante como um profissional atuante [Queiroz, Lima e Cerqueira 2017], ou mesmo por meio da inclusão de tecnologias atuais de prototipagem rápida e de kits eletrônicos [Berman 2012, Yamanoor e Yamanoor 2017]. É nesse contexto que se localiza a proposta de Blikstein et al. (2012), proporcionando maior interação entre o pesquisador e seu objeto de estudo.

O material disponível sobre Modelagem Bifocal concentra-se principalmente na aplicação do método em conjunto com alunos da educação básica dos Estados Unidos [Blikstein et al. 2012; Blikstein 2012] e com alunos de graduação e pós-graduação [Blikstein e Wilensky 2007]. No Brasil, Sgorlon e Cruz (2016) discutiram sobre o método de Modelagem Bifocal, porém sem resultados conclusivos.

Portanto, com o objetivo de ampliar o estudo sobre Modelagem Bifocal e verificar a adaptação do método ao contexto acadêmico, especificamente ao curso de Engenharia Mecânica, um experimento físico de condução bidimensional de calor foi desenvolvido,

assim como um modelo computacional análogo, que representa as principais características do experimento, como recomenda Blikstein et al. (2012).

De acordo com o método de Modelagem Bifocal, o software de modelagem e de simulação computacional deve ser selecionado de acordo com as características do experimento. Entre os softwares mais utilizados em Engenharia Mecânica estão o Autodesk Inventor, o SolidWorks, o MATLAB e o Scilab. Porém, pela natureza do fenômeno de condução térmica, o foco deste estudo está na criação de um modelo baseado em agentes. Um dos expoentes nesta área é o *NetLogo*, um software de modelagem e simulação computacional multiplataforma, livre e de código aberto que utiliza o paradigma de Modelagem Baseada em Agentes (MBA).

Os agentes, dos quais trata a MBA, são elementos independentes que podem obter informações sobre seu ambiente por meio de sensores e que podem provocar ações nesse ambiente por meio de atuadores com base em regras estipuladas em sua programação [Russell e Norvig 2013]. Wilensky e Rand (2015) afirmam que um agente pode conter diversas propriedades, como cor e tamanho, que podem ser representadas graficamente, assim como variáveis criadas pelo usuário, como peso e temperatura.

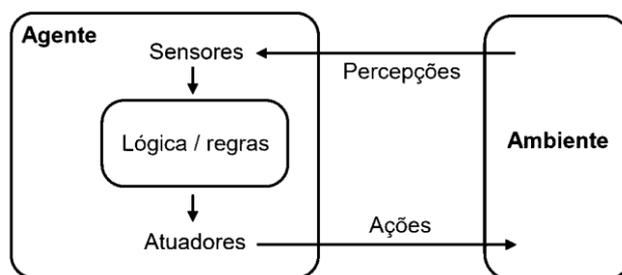


Figura 2. Interação de um agente por meio de sensores e atuadores [Russell e Norvig 2013]

Os agentes em um mundo de simulação do *NetLogo* podem ser dos tipos *turtle*, *link*, *patch* e *observer*, sendo *observer* o agente que observa todos os outros agentes e pode dar instruções a qualquer agente. O ambiente é formado por agentes do tipo *patch*, organizados como uma matriz e sem capacidade de movimentação. É possível atribuir cores aos *patches*, efetivamente modificando o ambiente de simulação [Wilensky 2018].

Os agentes do tipo *turtle* possuem uma grande flexibilidade quanto a apresentação gráfica, movimentação e interação. Cada um dos agentes que pertence a esse grupo possui variáveis manipuláveis que definem sua cor e sua forma, assim como posição e orientação em relação a um sistema de coordenadas de referência. Esses agentes também têm capacidade de percepção, podendo identificar ou perceber outros elementos presentes no ambiente, assim como a capacidade de interagir com esses elementos e com o próprio ambiente. [Wilensky 2018].

A interface do *NetLogo* possui um campo onde é inserido o código do modelo, que define seu comportamento. Nesse campo são declaradas as variáveis de simulação, as espécies de agentes, as variáveis de cada agente, e também são criados os procedimentos (semelhantes a funções em outras linguagens de programação) de configuração e de execução da simulação.

2. Condução Térmica

Transmissão de calor pode ser conceituada como “[...] a energia em trânsito devido a uma diferença de temperatura”, e pode ocorrer na forma de condução, em sólidos e em líquidos estáticos, na forma de convecção, em fluidos que se movem, e na forma de radiação, quando a energia é transferida por meio de ondas eletromagnéticas [Incropera e DeWitt 1998].

De acordo com Incropera e DeWitt (1998), em um nível elementar, a transmissão de calor por condução ocorre pela migração de elétrons livres e pelas ondas vibracionais na estrutura dos átomos, ou seja, a “[...] transferência de energia de partículas mais energéticas para partículas de menor energia, em um meio, devido a interações que existem entre elas.”

Matematicamente, a condução de calor é descrita pela Lei de Fourier, apresentada na Equação 1 de maneira tridimensional, na qual o termo k [W/m.K] representa a condutividade térmica do material, determinada experimentalmente, que varia com a temperatura e indica a capacidade do material de conduzir energia térmica. Materiais com valores altos, como ferro e cobre, são considerados bons condutores de energia térmica. Já materiais com baixo coeficiente de condutividade térmica são considerados isolantes. [Çengel e Ghajar 2012].

O sinal negativo na equação deriva da propriedade de que o calor é transmitido no sentido da diminuição da temperatura. Já os termos $\partial T/\partial x$, $\partial T/\partial y$ e $\partial T/\partial z$ representam a variação infinitesimal de temperatura ao longo do material. [Fourier 1822 apud Incropera e DeWitt 1998].

$$q'' = -k\nabla T = -k \left(i \frac{\partial T}{\partial x} + j \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (\text{Equação 1})$$

Embora as soluções analíticas sejam úteis, a aplicação computacional dessas equações exige que seja feita discretização. Um dos métodos mais utilizados nesse contexto é o Método das Diferenças Finitas, que consiste em discretizar ou dividir o objeto de estudo em uma malha composta de nós ou pontos (m, n) com o objetivo de conhecer ou calcular as variáveis em cada um desses pontos [Maliska 2004].

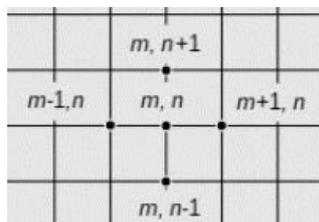


Figura 3. Nós do Método das Diferenças Finitas [Çengel e Ghajar 2012]

Çengel e Ghajar (2012) definem, por meio do método do balanço de energia, que a formulação da equação de transferência de calor por diferenças finitas para um nó interno m, n pode ser representada na equação 2, onde $l = \Delta x = \Delta y$.

$$T_{m-1,n} + T_{m+1,n} + T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 4T_{m,n} + \frac{\dot{e}_{m,n}l^2}{k} = 0 \quad (\text{Equação 2})$$

Porém, caso não exista geração de calor no elemento analisado ($\dot{e} = 0$), a equação para um elemento interno se torna $T_{m,n} = (T_{m-1,n} + T_{m+1,n} + T_{m,n+1} + T_{m,n-1})/4$, ou

seja, a média aritmética da temperatura dos elementos imediatamente acima, abaixo, à esquerda e à direita.

O método das diferenças finitas foi usado neste trabalho para a criação do modelo computacional, sendo que os agentes no modelo do *NetLogo* foram organizados de maneira a representar os nós da malha e utilizaram a capacidade de percepção para solicitar aos agentes vizinhos a temperatura de cada um deles para assim realizar o cálculo de sua própria temperatura. Da mesma forma, no experimento físico, a amostra teve os mesmos pontos delimitados e a temperatura nesses pontos foi aferida por meio de sensores térmicos conhecidos como termopares.

3. Metodologia

O modelo foi avaliado segundo a metodologia da Modelagem Bifocal, conforme descrita por Blikstein e Wilensky (2007), através de experimentos realizados em laboratório e computacionalmente. A comparação dos resultados foi feita primeiramente por testes *t* pareados. O nível de significância escolhido para os testes de hipótese foi de 1%, com 0,01 como valor de α e análise bilateral.

Para todos os experimentos físicos foram coletadas 31 amostras, e os testes *t* pareados usaram apenas o valor da média dessas amostras na análise. Nestes testes a hipótese nula H_0 considera convergência dos resultados, enquanto que a hipótese alternativa H_1 considera divergência dos resultados. Ou seja, para os testes foi considerado que $H_0: \mu_1 = \mu_2$ e que $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$.

4. Desenvolvimento

O objetivo do experimento de condução térmica é avaliar o perfil de temperatura em uma placa metálica que seja aplicada a fontes térmicas e esteja isolada dos fenômenos de convecção e de radiação, sendo considerado apenas o fenômeno de condução de calor.

Com base nessas informações, foi determinado que as variáveis de entrada ou características manipuladas neste experimento são a temperatura ambiente, temperatura da fonte fria e temperatura da fonte quente. Já a variável de saída é a temperatura mensurada em 5 pontos do material.

4.1 Experimento Físico de Condução Térmica

Um aparato experimental foi construído para isolar termicamente e suportar a chapa de aço inoxidável de 100 mm x 100 mm x 0,8 mm. Como disponível em MatWeb (2019), a condutividade térmica média desse material é de 16,2 W/m.K entre 0°C e 100°C e sua massa específica é de 8 g/cm³, porém não foi possível obter um certificado do material da amostra para atestar suas propriedades.

Essa amostra foi isolada do ambiente por camadas de espuma de polietileno colocadas entre a placa metálica e as chapas de MDF da estrutura. A Figura 4 apresenta a estrutura do experimento, com os sete sensores de temperatura posicionados nos locais de leitura.

Diversas modificações foram feitas durante o desenvolvimento do experimento. A mais notável foi a troca das fontes de calor, que inicialmente seriam resistores e cubos de gelo, por pastilhas de Peltier TEC1-12715 ligadas a fontes de alimentação.

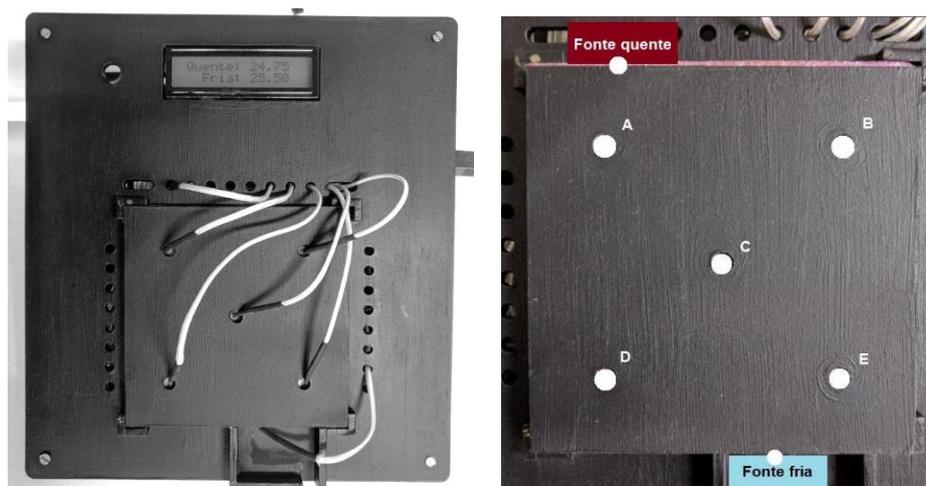


Figura 4. Experimento de condução

Dessa forma, a amostra foi aquecida de um lado e resfriada de outro, formando um perfil de temperatura ao longo da amostra. Foi necessário resfriar a pastilha de Peltier com gelo para que atingisse temperaturas baixas o suficiente para a realização do experimento.

Para obter a temperatura em cada ponto indicado na Figura 4 foram utilizados sete termopares do tipo K com extremidade de 1 mm e cabo isolante com comprimento de 1 m, ligados a sete placas MAX 6675 para que os valores analógicos de tensão dos termopares sejam convertidos em sinais digitais, recebidos e processados por um microcontrolador Arduino Uno que envia os dados de temperatura a um computador por meio da interface serial.

No momento da coleta de dados percebeu-se a necessidade de aplicar uma pequena quantidade de pasta térmica aos pontos A, B, C, D e E como forma de facilitar a transferência de energia térmica e diminuir a diferença de temperatura entre a amostra e a ponta dos termopares.

4.2 Modelo Computacional de Condução Térmica

De maneira semelhante, a amostra de aço inox foi representada computacionalmente por meio de um modelo do *NetLogo*. O modelo foi criado de acordo com alguns requisitos funcionais, como realizar corretamente a simulação do fenômeno físico, permitir que o usuário altere os parâmetros de simulação dinamicamente e possa visualizar as mudanças de estado da simulação em tempo real. Além disso, as ações do usuário são interpretadas por meio de botões ou outros elementos de interação na interface gráfica.

Os agentes do tipo *turtle* do *NetLogo* representam os nós m e n da malha da amostra e os agentes do tipo *patch* representam as dimensões e o posicionamento da amostra, das fontes de calor e das fontes frias. Dessa forma, as condições de contorno da amostra no modelo são consideradas como isoladas, o que é razoável devido às camadas de isolamento incorporadas ao experimento físico.

Os códigos completos desenvolvidos durante o projeto estão disponíveis em Witwytzkyj (2019), sendo que a parte central do código do modelo é o cálculo de temperatura em cada elemento *turtle* da amostra. Neste caso, cada agente solicita a temperatura de seus quatro vizinhos, acima, abaixo, à direita e à esquerda, e define sua

própria temperatura como a média da temperatura de seus vizinhos, ou seja, “*set temperatura mean [temperatura] of turtles-on neighbors4*”, e atribui uma cor ao agente de acordo com sua temperatura. Um fator de correção foi adicionado ao cálculo para levar em conta possíveis vazamentos de calor durante a realização do experimento.

Essas cores são exibidas na interface do modelo, que foi dividida entre entrada de parâmetros, mundo de simulação e saída de dados, à esquerda, ao centro e à direita, respectivamente. A linha formada entre duas cores na amostra é a linha isotérmica, indicando locais de mesma temperatura. É o que ilustra a Figura 5, uma captura de tela da interface no momento em que a variação de temperatura nos pontos de análise se aproximou o suficiente de zero para que o sistema possa ser considerado em equilíbrio.

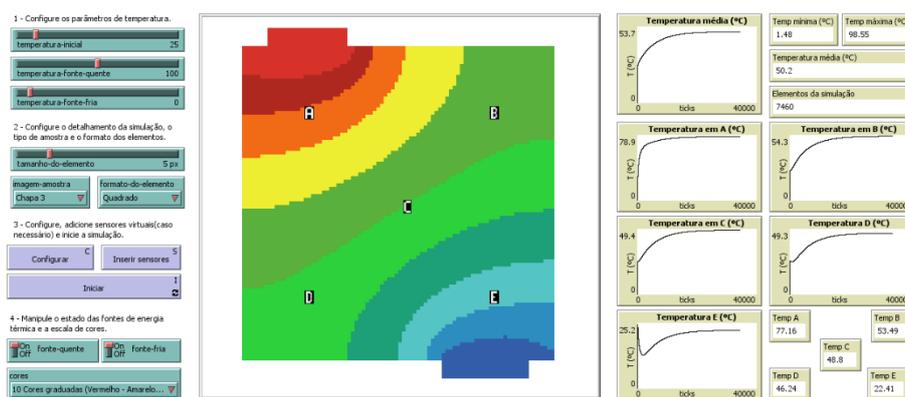


Figura 5. Interface do modelo de condução de calor

Os parâmetros que podem ser alterados a partir da interface são temperatura da fonte quente, temperatura da fonte fria, temperatura inicial da amostra e o tamanho dos elementos de simulação, o que se assemelha ao refinamento da malha em muitos pacotes de simulação.

Assim como no experimento físico, o modelo computacional recebeu sensores virtuais nos pontos A, B, C, D e E, que indicam a temperatura do elemento de amostra abaixo de cada sensor. Com auxílio dos valores de temperatura da fonte fria e da fonte quente, os dados dos sensores virtuais foram usados para as etapas de comparação e validação do modelo computacional.

5. Resultados e discussão

Foram realizadas quatro medidas com diferentes valores de temperatura aplicados à fonte fria (F) e à fonte quente (Q). Os dados obtidos tanto no experimento físico quanto na simulação do modelo computacional estão disponíveis na Tabela 1. A partir desses dados foram realizados testes estatísticos em comparação aos dados obtidos no experimento físico levando em conta o nível de significância de 1%.

O resultado do teste t pareado para o ponto A, indica que a hipótese aceita é H_0 , de igualdade. Portanto, para este ponto pode-se considerar que há validade estatística entre o modelo e o experimento, com forte correlação entre os dados (0,9990) e valor t de -1,0743 dentro da faixa crítica bicaudal 5,8409. Assim como no caso do ponto A, os resultados do teste t pareado para os dados do ponto B indicam que há validade estatística entre o experimento e o modelo, com a hipótese H_0 aceita e com forte correlação entre os dados (0,9975) e valor t de -5,4472 dentro da faixa crítica bicaudal 5,8409.

Tabela 1. Dados dos experimentos realizados

Experimento	Medida 1 (°C)	Medida 2 (°C)	Medida 3 (°C)	Medida 4 (°C)
Fria	5,27	3,98	2,07	5,08
Quente	40,36	50,49	60,89	70,23
A (Computacional)	30,77	37,80	44,98	52,49
A (Físico)	30,64	38,53	44,85	52,95
B (Computacional)	23,63	28,24	32,89	39,11
B (Físico)	24,42	30,32	34,26	40,76
C (Computacional)	21,55	25,31	28,99	34,97
C (Físico)	22,77	27,15	30,83	36,32
D (Computacional)	19,87	22,90	25,79	31,58
D (Físico)	18,90	21,76	24,16	28,89
E (Computacional)	12,81	13,69	14,18	18,67
E (Físico)	12,76	13,75	15,29	20,43

Ainda assim, o teste t pareado mostra que a hipótese aceita para o ponto C é a de diferença, H1, com valor t de -9,6215, menor do que o valor crítico bicaudal 5,8409. O resultado indica igualdade no ponto de coleta D, com a hipótese H0 aceita, valor t de 4,1537, menor do que o valor crítico bicaudal 5,8409, e com forte correlação (0,9995).

A hipótese aceita no teste t pareado para o ponto E feito com esses dados é a de igualdade, H0, com forte correlação (0,9931) e valor t de -1,6583 dentro da faixa crítica bicaudal 5,8409, corroborando com a validade do modelo computacional em relação ao experimento físico.

É relevante ressaltar que a MBA se mostrou adequada ao estudo de transmissão de calor, da mesma forma que as ferramentas do *NetLogo* permitiram a criação de um modelo coerente com a teoria e com as observações experimentais. Além disso, o método de Modelagem Bifocal foi eficaz em auxiliar na identificação de falhas no experimento.

5.1 Contribuições pedagógicas do experimento

A abordagem de Modelagem Bifocal foi utilizada por Blikstein et al. (2012) com estudantes do ensino básico, porém possui o potencial de ser implementada também em ambientes acadêmicos, certamente necessitando de futuros estudos que avaliem a efetividade do método nesse contexto, especialmente no Brasil. Professores e alunos poderiam explorar o modelo computacional em cursos ou disciplinas de transmissão de calor a partir da apresentação dos conceitos teóricos principais, da construção de um modelo físico de condução de calor, da exploração do código do modelo e da interação com a interface gráfica.

É importante que essa interação seja acompanhada de um incentivo para a formulação de hipóteses sobre as mudanças observadas, de forma que seja feita uma investigação sobre o funcionamento do modelo em relação aos dados do mundo real. Os estudantes devem ser capazes de responder a perguntas com base em um material introdutório e pela interação com o modelo, variando parâmetros e observando como isso afeta o comportamento da simulação em tempo real. Nesse sentido, materiais introdutórios sobre condução de calor e cartões de atividades sobre esse tema, que podem ser utilizados em conjunto com a exploração do modelo computacional de condução térmica, foram disponibilizados em Witwytzkyj (2019).

6. Conclusão

É possível afirmar que o modelo computacional criado apresentou validade estatística em relação ao experimento físico em quatro dos cinco pontos coleta de dados quando avaliado por testes t pareados. Ainda assim, necessita ser revisado para que se tenha confiança nos dados obtidos em relação ao ponto C, onde houve divergência.

Alguns fatores que podem ter influenciado negativamente nos resultados são o método de fixação dos termopares, o material de isolamento e o material da própria amostra, que tem baixo coeficiente de condução térmica em relação a materiais como cobre. Portanto, a substituição do material da amostra por um melhor condutor térmico pode levar a resultados mais consistentes.

Apesar disso, é notável pela teoria e pelo desenvolvimento do trabalho que o método de Modelagem Bifocal, assim como outros métodos, capacita o pesquisador a pensar criticamente sobre seu experimento por sua característica iterativa e de busca por defeitos do experimento ou modelo, exigindo, como no caso deste estudo, reformulações tanto no método experimental quanto no modelo em si em caso de divergência entre os resultados.

Ainda assim é possível argumentar que essa característica iterativa é inerente ao método científico, porém a Modelagem Bifocal se orienta em um campo muito mais educacional e de incentivo ao uso do método científico do que apenas a sua utilização cotidiana. É importante que, principalmente no momento presente, iniciativas que divulguem e democratizem a utilização do método científico sejam fortemente incentivadas e compartilhadas.

Nesse sentido, o *NetLogo* se apresenta como uma ferramenta acessível e com uma abordagem diferenciada em relação a outros ambientes de modelagem pela utilização de agentes como elementos do modelo, sendo especialmente interessante no contexto da introdução de estudantes à modelagem de sistemas.

Referências

- BERMAN, Barry. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, v. 55, n. 2, p. 155–62.
- BLIKSTEIN, P., Fuhrmann, T., Greene, D. and Salehi, S. (2012). Bifocal modeling: mixing real and virtual labs for advanced science learning. In: *International Conference on Interaction Design and Children*, 11. New York: ACM, pp.296 - 299. Disponível em: <https://tltlab.org/wp-content/uploads/2019/02/2012.IDC-BFGS.Bifocal.pdf> [Acesso em 2 jul. 2019].
- BLIKSTEIN, Paulo, WILENSKY, Uri. (2007). Bifocal modeling: a framework for combining computer modeling, robotics and real-world sensing. *American Educational Research Association*. Chicago: AERA; 2007 [Acesso em: 20 jul. 2019]. p. 1 - 16. Disponível em: https://ccl.northwestern.edu/2007/09-bifocal_modeling.pdf.
- BLIKSTEIN, Paulo. (2010). Connecting the science classroom and tangible interfaces: the bifocal modeling framework. *International Conference of the Learning Sciences* [Internet]. Chicago; 2019 [Acesso em: 20 July 2019]. p. 128 - 130. Disponível em: <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=1854567>.

- BLIKSTEIN, Paulo. (2012). Bifocal modeling: a study on the learning outcomes of comparing physical and computational models linked in real time. ACM international conference on Multimodal interaction [Internet]. Santa Monica: ACM; 2012 [Acesso em: 20 jul. 2019]. p. 257-264. Disponível em: <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=2388729>.
- CASALE, Adriana. (2013). Aprendizagem Baseada em Problemas: desenvolvimento de competências para o ensino da engenharia [Doutorado]. Universidade de São Paulo; 2013. [Acesso em: 20 jul. 2019]. Disponível em: <http://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18157/tde-12092013-085201>.
- ÇENGEL, Yunus A, GHAJAR, Afshin J. (2012). Transferência de Calor e Massa: Uma abordagem prática. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2012.
- INCROPERA, Frank P., DEWITT, David P. (1998). Fundamentos de transferência de calor e de massa. 4. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1998.
- MATWEB. (2019). 304 Stainless Steel. [Acesso em: 08 jul. 2019]. Disponível em: <http://www.matweb.com/search/datasheetText.aspx?bassnum=MQ304A>.
- QUEIROZ, Geraldo Nunes de; LIMA, Daniele dos Santos; CERQUEIRA, Daniel Lucas. (2017). A “pedagogia espaço-tempo” no ensino da engenharia: Experienciar o Objetivo (Output) e assimilar as Ferramentas Básicas (Input). In: Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, 45., 2017, Joinville. Anais... Joinville: ABENGE, 2017 [Acesso em: 17 mar. 2018]. p. 1 - 10. Disponível em: http://www.abenge.org.br/sis_submetidos.php?acao=abrir&codigo=COBENGE17_00001_00000314.pdf.
- ROSA, Juliana Aozane da, ARAÚJO, Maria Cristina Pansera de. (2016). As discussões sobre o ensino de física no congresso brasileiro de educação em engenharia. In: XXI Jornada de Pesquisa, 2016, Ijuí. Anais... Ijuí: Unijui, 2016 [Acesso em: 20 jul. 2019]. p. 1 -5. Disponível em: <https://www.publicacoeseventos.unijui.edu.br/index.php/salaconhecimento/article/viewFile/7005/5771>.
- RUSSELL, Stuart, NORVIG, Peter. (2013). Inteligência Artificial. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier.
- WILENSKY, Uri, RAND, William. (2015). An Introduction to Agent-Based Modeling: Modeling Natural, Social, and Engineered Complex Systems with NetLogo. Cambridge: MIT Press, 2015.
- WILENSKY, Uri. (2018). NetLogoUser Manual. [s. L.]: Northwestern University [Acesso em: 08 jul. 2019]. Disponível em: <https://ccl.northwestern.edu/NetLogo/docs/NetLogo%20User%20Manual.pdf>.
- WITWYTZYK, Julio Patron. (2019). TICT-Modelagem-Bifocal-NetLogo. [Acesso em: 08 jul. 2019]. Disponível em: <https://github.com/juliopw/TICT-Modelagem-Bifocal-NetLogo>.
- YAMANOOR, Narasimha Saii, YAMANOOR, Srihari. (2017). High Quality, Low Cost Education with the Raspberry Pi. In: Global Humanitarian Technology Conference, 2017, San Jose. Proceedings... San Jose: IEEE, 2017 [Acesso em: 08 jul. 2019]. p. 1-5. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8239274/>.