PROJETO CONCEITUAL DE BANCADA EXPERIMENTAL PARA QUANTIFICAÇÃO DA GERAÇÃO DE ENTROPIA EM TROCADORES DE CALOR

Rafael Keiji Takamatsu Pujolli (PIBIC/CNPq/FA/UEM), Júlio César Dainezi de Oliveira (Orientador), Nicholas Dicati Pereira da Silva (Coorientador). E-mail: jcdoliveira@uem.br, ndpsilva2@uem.br.

Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Maringá, PR.

Área e subárea do conhecimento: Engenharia Mecânica /Engenharia Térmica.

Palavras-chave: Geração de entropia; Trocadores de calor; Segunda Lei da Termodinâmica.

RESUMO

Este trabalho apresenta o projeto conceitual de uma bancada experimental para quantificar a taxa de geração de entropia em trocadores de calor sob diferentes condições operacionais. A metodologia fundamenta-se no dimensionamento de dois circuitos hidráulicos fechados (quente e frio) instrumentados com sensores de temperatura, pressão diferencial e vazão. A análise baseia-se na decomposição da entropia em parcelas térmicas ($\dot{S}_{ger,T}$) e hidráulica ($\dot{S}_{ger,\Delta p}$), permitindo mapear ineficiências exergéticas do sistema para o estudo prático da Segunda Lei da Termodinâmica.

INTRODUÇÃO

Em trocadores de calor, o uso de promotores de turbulência intensifica a transferência de calor, porém eleva a perda de carga e a dissipação hidráulica. A Minimização da Geração de Entropia (EGM), proposta por Bejan, avalia o compromisso ótimo entre o ganho térmico e a penalidade por atrito. Para a investigação experimental desses fenômenos, bancadas didáticas modulares oferecem um ambiente controlado para simular trocadores em configurações paralela e contracorrente. O objetivo deste trabalho é apresentar o projeto conceitual, a especificação dos componentes e a instrumentação necessária para quantificar essas irreversibilidades.

MATERIAIS E MÉTODOS

A bancada é composta por dois circuitos hidráulicos fechados: o quente (reservatório térmico, resistência e bomba) e o frio (*chiller* e bomba dedicada). Válvulas de três vias permitem alternar o escoamento no trocador sob teste entre as configurações paralela e contracorrente. Para a confiabilidade dos dados, prevê-se isolamento térmico nas linhas e adota-se a divergência entre as taxas de calor do fluido quente ($\dot{Q}_h$) e frio ($\dot{Q}_c$) como critério de aceitação.

A avaliação da taxa total de geração de entropia ($\dot{S}_{ger,total}$) assume fluidos incompressíveis, calores específicos (c_p) constantes e trocador operando em regime permanente com isolamento adiabático em relação ao meio externo. A Equação 1 fornece a parcela de geração de entropia por transferência de calor com diferença finita de temperatura:

$$\dot{S}_{ger,T} = \dot{m}_h c_{p,h} \ln\left(\frac{T_{h,out}}{T_{h,in}}\right) + \dot{m}_c c_{p,c} \ln\left(\frac{T_{c,out}}{T_{c,in}}\right) \quad (1)$$

A Equação 2 determina a parcela de geração de entropia associada ao atrito e perdas de carga nos circuitos:

$$\dot{S}_{ger,\Delta p} = \left(\frac{\dot{m}_h}{\rho_h T_h} \Delta p_h\right) + \left(\frac{\dot{m}_c}{\rho_c T_c} \Delta p_c\right) \quad (2)$$

Onde $\dot{m}$ é a vazão mássica (kg/s); c_p é o calor específico (J/(kg·K)); T_{in}, T_{out} são as temperaturas de entrada e saída (K); ρ é a massa específica (kg/m^3); T é a temperatura média absoluta (K); e Δp é a perda de carga (Pa) nos circuitos quente (h) e frio (c).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 detalha o diagrama esquemático com a segregação entre o circuito quente (linhas 7 e 8, em vermelho) e frio (linhas 9 e 10, em azul). Os três módulos independentes (1, 2 e 3) foram concebidos para comportar trocadores de geometrias distintas (ex.: bitubular e placas) ou com diferentes insertos. Essa variação permite avaliar como a área e a rugosidade afetam o balanço de irreversibilidades: geometrias mais eficientes reduzem a geração de entropia térmica ($\dot{S}_{ger,T}$), porém elevam a penalidade hidráulica ($\dot{S}_{ger,\Delta p}$), possibilitando mapear a vazão e a geometria ótimas do sistema.

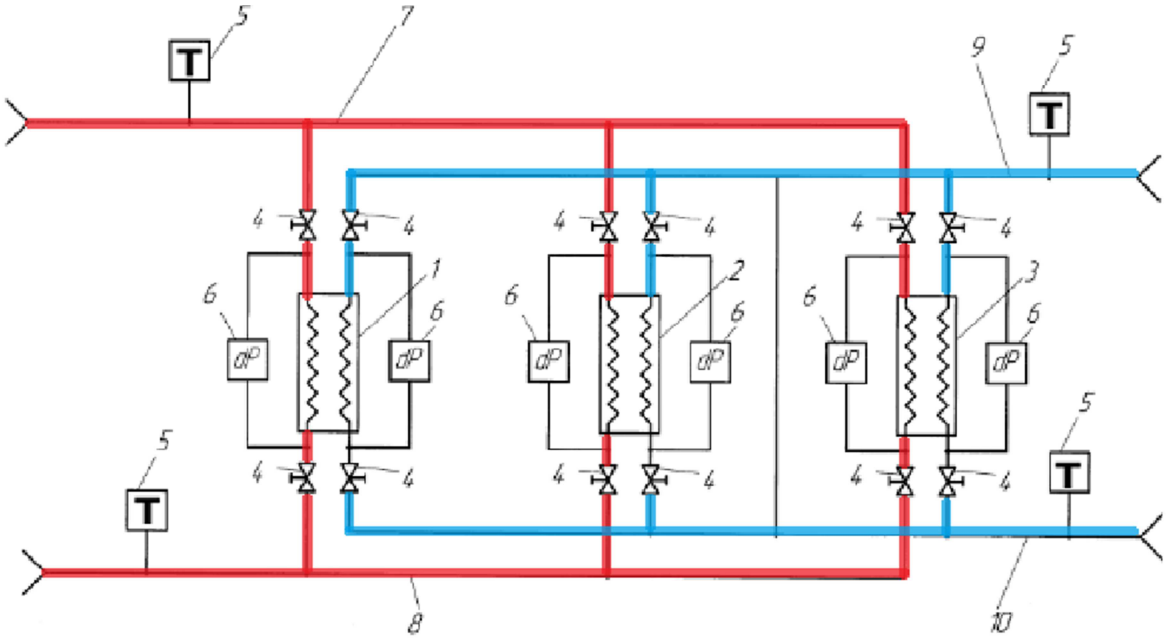


Figura 1 – Esquema conceitual da bancada experimental para estudo de trocadores de calor. Onde: (1, 2, 3) trocadores de calor modulares; (4) válvulas de manobra; (5) sensores de temperatura (T); (6) transdutores de pressão diferencial (Δ□); (7, 8) circuito quente em vermelho; (9, 10) circuito frio em azul. Fonte: Elaborado pelo autor, adaptado de ROSPATENT (2016).

A Tabela 1 detalha os sensores selecionados para quantificação da entropia. Espera-se que baixas vazões elevem a parcela térmica $\dot{\square}_{\square\square\square,\square\square}$ (Eq. 1), enquanto o aumento da velocidade eleva a parcela hidráulica $\dot{\square}_{\square\square\square,\square\square}$ com o quadrado da vazão (Eq. 2), indicando um ponto ótimo de operação.

Tabela 1: Especificação da instrumentação planejada para a bancada experimental.

Grandeza	Sensor/Instrumento	Faixa de medição	Exatidão
Temperatura (T)	Pt100 Classe A (4 fios)	-50 a 200ºC	±(0,15+0,002·|t|)ºC
Perda de carga (ΔP)	Transdutor de Pressão Diferencial Piezoresistivo	0 a 100 kPa	±0,1% F.S.
Vazão mássica ($\dot{\square}$)	Medidor de Vazão Magnético-Indutivo	0 a 30 L/min	±0,5% do valor medido

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

CONCLUSÕES

O projeto conceitual da bancada experimental mostrou-se adequado para a fundamentação de testes voltados à Segunda Lei da Termodinâmica. A especificação da instrumentação e o equacionamento analítico proposto fornecem a estrutura necessária para mapear as perdas térmicas ($\dot{\square}_{\square\square\square,\square\square}$) e hidráulicas ($\dot{\square}_{\square\square\square,\square\square}$). Conclui-se que o arranjo projetado apresenta viabilidade técnica e metrológica para a futura montagem física e validação de trocadores de calor em ambiente de ensino e pesquisa.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Estado do Paraná, por meio da concessão de bolsa de Iniciação Científica.

REFERÊNCIAS

ASSUNÇÃO, G. S. C.; SOUZA, É. **Desenvolvimento de uma bancada didática para estudo de um ciclo de refrigeração por expansão direta com R-134a**. Revista Técnico-Científica do CREA-PR, n. 32, p. 1-18, abr. 2023.

BASSALO, J. M. F.; FARIAS, R. F. **Clausius: pequena história da entropia**. Revista Brasileira de Ensino de Química, v. 10, n. 2, p. 95-100, jul./dez. 2015.

BEJAN, A. **Entropy Generation Minimization: The Method of Thermodynamic Optimization of Finite-Size Devices and Finite-Time Processes**. Boca Raton: CRC Press, 1996.

DHUMAL, G. S.; HAVALDAR, S. N. **Experimental investigation of entropy generation in a pipe heat exchanger with turbulence generator inside and on the outside**. Case Studies in Thermal Engineering, v. 51, p. 103464, nov. 2023.

FEDERAL SERVICE FOR INTELLECTUAL PROPERTY (ROSPATENT). **Experimental installation for studying heat exchange devices**: RU158772U1. Depositante: Federal Power Engineering Institute. Depósito: 21 maio 2015. Concessão: 20 jan. 2016.

OGULATA, R. T.; DOBA, F. **Experiments and entropy generation minimization analysis of a cross-flow heat exchanger**. International Journal of Heat and Mass Transfer, v. 41, n. 2, p. 373-381, Jan. 1998.