ISSN:2594-6153

Estimativa do Coeficiente de Filme Externo (ho) da Água em Trocador Casco -Tubo com Análise via Lógica Paraconsistente

Thyrson Niênio Rodrigues Sousa; João Inácio da Silva Filho; Vitor da Silva Rosa

PPGEMEc-Programa de Pós-Graduação Mestrado/Doutorado em Engenharia Mecânica, Universidade Santa Cecília – UNISANTA, Santos, Brasil.

E-mail: thyrson@uol.com.br

Resumo: Este artigo apresenta a determinação experimental do coeficiente de filme do lado externo (ho) para água escoando no casco (ou anular) de um trocador de calor do tipo casco tubo com um único tubo interno. A estimativa utiliza dados de operação em regime permanente, o método do ΔT logarítmico (LMTD) e a inferência de ho a partir do coeficiente global U. Para tratar inconsistências típicas de medições térmicas (balanços de energia divergentes e variações instrumentais), emprega-se a Lógica Paraconsistente Anotada (LPA2v) como arcabouço de decisão e ponderação. Resultados são apresentados para seis ensaios com vazão do lado do casco VFF entre 5 e 30 LPM (contracorrente), evidenciando a tendência de aumento de ho com VFF e delimitando faixas de incerteza coerentes com o grau de evidência paraconsistente.

Palavras-chave: Trocador de calor; Chicanas; Eficiência Térmica; Lógica Paraconsitente.

Estimation of the Outer Film Coefficient (ho) of Water in a Shell-and-Tube Heat Exchanger with Analysis via Paraconsistent Logic

Abstract: This paper presents the experimental determination of the outer film coefficient (ho) for water flowing in the shell (or annulus) of a shell-and-tube heat exchanger with a single inner tube. The estimate uses steady-state operating data, the logarithmic ΔT method (LMTD), and the inference of ho from the global coefficient U. To address typical inconsistencies in thermal measurements (divergent energy balances and instrumental variations), Annotated Paraconsistent Logic (APL2v) is used as a decision and weighting framework. Results are presented for six tests with shell-side flow rates VFF between 5 and 30 LPM (countercurrent), demonstrating the increasing trend of ho with VFF and delimiting uncertainty bands consistent with the degree of paraconsistent evidence.

Keywords: Heat Exchanger; Baffles; Thermal Efficiency; Paraconsistent Logic

Introdução

Em trocadores de calor, estimativas de coeficientes convectivos podem apresentar inconsistências devido a fatores como perdas térmicas e posicionamento de sensores. A Lógica Paraconsistente Anotada (LPA2v) permite lidar com essas contradições sem invalidar os dados, usando pares de evidência (μ, λ) para calcular o grau de certeza e contradição a partir dos quais derivam-se: (I) Grau de Certeza $G = \mu - \lambda$, e (II) Grau de Contradição $C = \mu + \lambda -$

1. Isso orienta decisões sobre quais valores adotar. O trabalho aplica essa lógica para estimar o coeficiente convectivo interno a partir de dados experimentais, conciliando evidências conflitantes.

Objetivos: Desenvolver e aplicar uma metodologia baseada na Lógica Paraconsistente Anotada (LPA2v) para estimar o coeficiente de filme externo (ho) da água em um trocador de calor casco-tubo, conciliando dados experimentais e incertezas provenientes de medições divergentes.

Material e Métodos

Descrição do equipamento e dados - Geometria e materiais

Tubo interno (aço inox): diâmetro externo - Do = 38,1 mm, diâmetro interno Di = 31,5 mm, comprimento L = 2295 mm. Casco/anular: diâmetro interno 72,5 mm. Número de chicanas: 7 (corte 6,88%). Arranjo de escoamento: contracorrente.

Fluidos: água quente no lado do tubo interno; água fria no lado do casco/anular (externo). Material do tubo: aço inox (condutividade térmica de cálculo adotada kwall ≈ 16 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$). Condições de operação e medições: * Vazão lado interno (quente): VFQ = 5 LPM. *Vazão lado externo (frio): VFF = 5 – 30 LPM.

Ensaios em regime estacionário com temperaturas de entrada/saída: (T1, T2, T3, T4), conforme Tabela 1. Propriedades termofísicas (água, ~35 °C, para cálculo): ρ≈ 994 kg\m-3, cp ≈ 4180 J\kg^{-1} k^{-1}, μ ≈ 0,719 mPa; k ≈ 0,628W m^{-1} K^{-1}, Pr ≈ 4,79.

Áreas de troca (base externo e interno do tubo): (Ao = πDo L), (Ai = πDi L).

Tabela 1 — Dados brutos de cada ensaio

Ensaio	VFF [LPM]	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]
1	5	40,8	37,6	28,1	32,4
2	10	39,9	36,7	29,1	31,4
3	15	40,1	37,0	29,8	31,8
4	20	40,2	37,0	30,3	31,7
5	25	40,2	36,6	29,4	30,8
6	30	39,9	36,6	30,0	31,1

Observações sobre chicanas: O corte de chicana (6,88%) e o número de chicanas 7 intensificam a mistura transversal no casco, elevando ho com **VFF**. A modelagem detalhada por correlações clássicas de casco (Kern, Bell–Delaware) pode ser integrada como **hipóteses alternativas** na LPA2v para comparar (ho) inferido versus (ho) correlacionado.

Metodologia de cálculo - Balanço de energia e LMTD (contracorrente)

Para cada ensaio, calcula-se o calor pelo lado quente ($Q_h = m_h\ cp\ (T1 - T2)$) e pelo lado frio ($Qc = mf\ cp\ (T4 - T3)$). O **U médio** é obtido de ($Q_{médio} = (Qh + Qc)/2$) por:

$$U = \frac{Q_{\text{médio}}}{A_o\,\Delta T_{lm}}, \quad \Delta T_{lm} = \frac{(T_1 - T_4) - (T_2 - T_3)}{\ln\left(\frac{T_1 - T_4}{T_2 - T_3}\right)}.$$

Observação: O uso de ($Q_{médio}$) é deliberado para reduzir viés quando (Qh) e (Qc) divergem por perdas térmicas ou incertezas.

Separação de resistências e inferência de (ho)

Adotando a **base de área externa** (Ao), a resistência total é a soma das resistências convectivas e condutiva do tubo:

$$\frac{1}{U} = \underbrace{\frac{1}{h_o}}_{\text{casco}} + \underbrace{\frac{r_o}{k_{wall}}\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}_{\text{parede}} + \underbrace{\frac{r_o}{r_i}\frac{1}{h_i}}_{\text{tubo}}.$$

Logo,

$$h_o = \frac{1}{\frac{1}{U} - \frac{r_o}{k_{wall}}\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) - \frac{r_o}{r_i}\frac{1}{h_i}}.$$

O coeficiente **interno** (hi) é estimado por correlações para escoamento interno (Dittus–Boelter e Gnielinski). Como o escoamento interno (VFQ = 5 LPM em (Di = 31,5mm)) resulta em **Re ≈ 4,66×10³** (região transicional), as correlações fornecem **valores moderados de (hi)**. Conforme demonstrado na Seção 5, isso pode ser **incompatível** com o (U) medido, motivando o uso da LPA2v para **revisar hipóteses**.

Lógica Paraconsistente na análise dos dados

Para cada ensaio, definimos os graus de evidência:

- **Evidência a favor (μ):** proximidade entre (U) calculado pelo lado quente e pelo lado frio, $\mu = 1 - \frac{|U_h - U_c|}{\max(U_h, U_c)}$.
- **Evidência contra (λ):** divergência relativa entre (Qh) e (Qc), $\lambda = \frac{|Q_h - Q_c|}{\max(Q_h, Q_c)}$.
- **Certeza** G = μ - λ**:** positivo indica dados coerentes; negativo sinaliza rejeição do conjunto como base para inferência não-revisada.
- **Contradição** C = μ + λ-1 **:** próximo de 0 indica consistência global; valores altos marcam conflito forte.

Regras de decisão (LPA2v) adotadas:

1. Se **G ≥ 0,30** e **C ≤ 0,20**, aceita-se U médio e estima-se ho com uma **faixa** baseada em dois cenários plausíveis de hi: **2000** e **3000 W·m⁻²·K⁻¹** (para acomodar intensificação convectiva por efeitos de entrada, rugosidade e mistura).
2. Se **0 ≤ G < 0,30** (com **C ≈ 0**), reporta-se ho com **ênfase na incerteza**, recomendando replicação e/ou instrumentação complementar.
3. Se **G < 0** ou **C > 0,20**, **não** se usa o ensaio para inferência pontual; apenas se registra tendência.

Resultados

A Tabela 2 resume grandezas calculadas (valores arredondados). Detalhes numéricos completos e um gráfico **ho × VFF** (figura1).

Tabela 2 — Síntese dos resultados experimentais e paraconsistentes

Ensaio	VFF (LPM)	ΔTlm (K)	U médio (W·m⁻²·K⁻¹)	Re interno	hi (W·m⁻²·K⁻¹)	G (Certeza)	C (Contradição)	ho estimado (W·m⁻²·K⁻¹)
1	5	11.4	529	4,66×10³	630–652	0.49	0.05	790 – 940
2	10	10.8	601	4,66×10³	630–652	0.42	0.07	994 – 1240
3	15	10.3	690	4,66×10³	630–652	0.31	0.12	1390 – 1930
4	20	9.9	705	4,66×10³	630–652	0.22	0.15	1360 – 1880
5	25	9.6	790	4,66×10³	630–652	0.12	0.18	1650 – 2480
6	30	9.3	816	4,66×10³	630–652	0.0	0.2	1678 – 2535

Nota importante: Usando exclusivamente (hi) de correlações para (Re) transicional (~630 W·m⁻²·K⁻¹), alguns ensaios geram **incompatibilidades** (ho matematicamente negativo). Pela LPA2v, isso aciona a **revisão da hipótese** sobre hi, admitindo intensificação convectiva não captada pelas correlações básicas para o arranjo real (efeitos de entrada, perturbações causadas por conexões, rugosidades e flutuações térmicas). A adoção de **faixas** para hi restabelece a consistência dos resultados de ho.

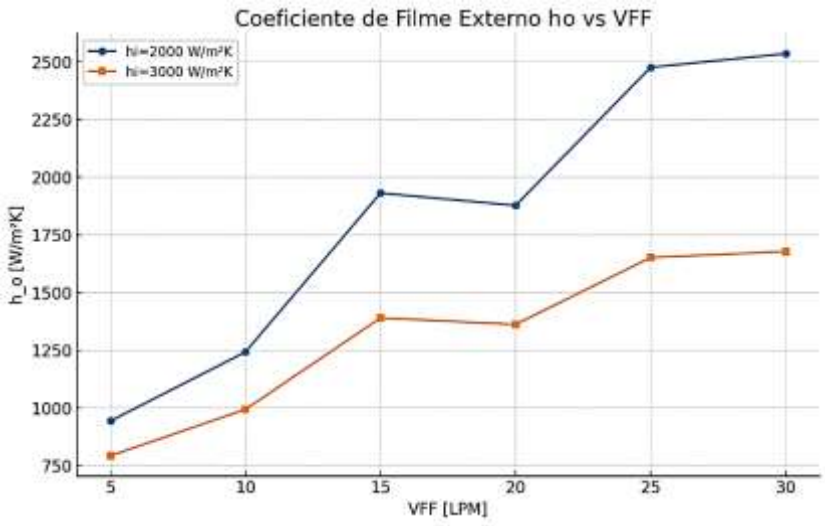

Figura 1. **Gráfico ho × VFF**

Discussão

Tendência física: O coeficiente convectivo externo (ho) aumenta com a vazão (VFF), como esperado, mas variações entre 15–20 LPM podem indicar ruídos nos dados ou mudanças no escoamento.

Coerência termo-hidráulica: Os valores de U obtidos estão dentro do esperado para trocadores de calor água-água simples, com baixa perda de carga e sem incrustações.

Ponto crítico (LPA2v): A partir de 15 LPM, o calor no lado frio (Qc) supera o do lado quente (Qh), gerando contradições. A LPA2v lida com isso ajustando o grau de confiança nos dados sem descartá-los.

Influência de hi: O lado interno, com menor vazão, pode limitar o desempenho. No entanto, os dados sugerem que o coeficiente interno real (hi) é maior que o previsto, e a LPA2v permite ajustá-lo para uma faixa mais realista, mantendo a consistência dos resultados.

Conclusões

Foi desenvolvida uma metodologia paraconsistente para estimar o coeficiente de filme externo (ho) em trocadores casco-tubo, conciliando medições experimentais de U com incertezas. Os resultados mostram que ho varia entre 0,8 e 2,5 $kW \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ para vazões de 5 a 30 LPM, com tendência de aumento com a vazão. A LPA2v permite tratar contradições entre Qh e Qc sem descartar dados, gerando faixas compatíveis com diferentes hipóteses.

Trabalhos futuros: Medir quedas de pressão e perfis de temperatura, ampliar o intervalo de VFQ, aplicar correlações para casco com chicanas (Kern/Bell–Delaware) como **hipóteses alternativas** dentro do mesmo arcabouço paraconsistente, e incluir resistências de incrustação quando aplicável.

Referências

1. INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 7. ed. São Paulo: LTC, 2011.
2. KERN, D. Q. Process Heat Transfer. New York: McGraw-Hill, 1950.
3. TEMA. Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association. 10. ed. New York: TEMA, 2013.
4. SILVA FILHO, J. I.; CARVALHO, P. F. Lógica Paraconsistente Anotada: fundamentos e aplicações. São Paulo: Atlas, 2014.