

Estimativa do Coeficiente de Filme Externo (h_o) 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 (h_o) 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 h_o 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 h_o com VFF e delimitando faixas de incerteza coerentes com o grau de evidência paraconsistente.

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

Estimation of the Outer Film Coefficient (h_o) 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 (h_o) 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 h_o 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 h_o 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 (h_o) 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 - $D_o = 38,1$ mm, diâmetro interno $D_i = 31,5$ 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 $k_{wall} \approx 16 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Condições de operação e medições: * Vazão lado interno (quente): $VFQ = 5$ LPM. *Vazão lado externo (frio): $VFF = 5 - 30$ LPM.

Ensaio em regime estacionário com temperaturas de entrada/saída: (T_1, T_2, T_3, T_4), conforme Tabela 1. Propriedades termofísicas (água, $\sim 35^\circ\text{C}$, para cálculo): $\rho \approx 994 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $c_p \approx 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $\mu \approx 0,719 \text{ mPa}$; $k \approx 0,628 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $Pr \approx 4,79$.

Áreas de troca (base externo e interno do tubo): ($A_o = \pi D_o L$), ($A_i = \pi D_i L$).

Tabela 1 — Dados brutos de cada ensaio

Ensaio	VFF [LPM]	T1 [$^\circ\text{C}$]	T2 [$^\circ\text{C}$]	T3 [$^\circ\text{C}$]	T4 [$^\circ\text{C}$]
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 h_o com VFF. A modelagem detalhada por correlações clássicas de casco (Kern, Bell–Delaware) pode ser integrada como **hipóteses alternativas** na LPA2v para comparar (h_o) inferido versus (h_o) correlacionado.

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

Para cada ensaio, calcula-se o calor pelo lado quente ($Q_h = m_h c_p (T_1 - T_2)$) e pelo lado frio ($Q_c = m_f c_p (T_4 - T_3)$). O U **médio** é obtido de ($Q_{\text{médio}} = (Q_h + Q_c)/2$) 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 ($Q_{\text{médio}}$) é deliberado para reduzir viés quando (Q_h) e (Q_c) divergem por perdas térmicas ou incertezas.

Separação de resistências e inferência de (h_o)

Adotando a **base de área externa** (A_o), 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** (h_i) é estimado por correlações para escoamento interno (Dittus–Boelter e Gnielinski). Como o escoamento interno (VFQ = 5 LPM em ($D_i = 31,5\text{mm}$)) resulta em **Re** $\approx 4,66 \times 10^3$ (região transicional), as correlações fornecem **valores moderados de (h_i)**. 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

$$\mu = 1 - \frac{|U_h - U_c|}{\max(U_h, U_c)}.$$

frio,

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

Regras de decisão (LPA2v) adotadas:

1. Se $G \geq 0,30$ e $C \leq 0,20$, aceita-se U médio e estima-se h_o com uma **faixa** baseada em dois cenários plausíveis de h_i : **2000** e **3000 $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$** (para acomodar intensificação convectiva por efeitos de entrada, rugosidade e mistura).
2. Se $0 \leq G < 0,30$ (com $C \approx 0$), reporta-se h_o 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.

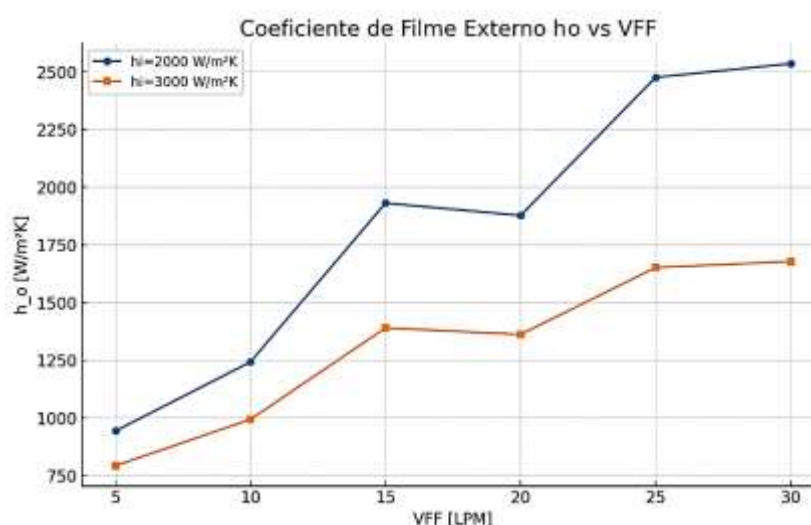
Resultados

A Tabela 2 resume grandezas calculadas (valores arredondados). Detalhes numéricos completos e um gráfico $h_o \times VFF$ (figura 1).

Tabela 2 — Síntese dos resultados experimentais e paraconsistentes

Ensaio	VFF (LPM)	ΔT_{lm} (K)	U médio ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	Re interno	h_i ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)	G (Certeza)	C (Contradição)	h_o estimado ($W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$)
1	5	11.4	529	$4,66 \times 10^3$	630–652	0.49	0.05	790 – 940
2	10	10.8	601	$4,66 \times 10^3$	630–652	0.42	0.07	994 – 1240
3	15	10.3	690	$4,66 \times 10^3$	630–652	0.31	0.12	1390 – 1930
4	20	9.9	705	$4,66 \times 10^3$	630–652	0.22	0.15	1360 – 1880
5	25	9.6	790	$4,66 \times 10^3$	630–652	0.12	0.18	1650 – 2480
6	30	9.3	816	$4,66 \times 10^3$	630–652	0.0	0.2	1678 – 2535

Nota importante: Usando exclusivamente (h_i) de correlações para (Re) transicional ($\sim 630 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$), alguns ensaios geram **incompatibilidades** (h_o matematicamente negativo). Pela LPA2v, isso aciona a **revisão da hipótese** sobre h_i , 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 h_i restabelece a consistência dos resultados de h_o .

Figura 1. Gráfico $h_o \times VFF$

Discussão

Tendência física: O coeficiente convectivo externo (h_o) 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 (Q_c) supera o do lado quente (Q_h), gerando contradições. A LPA2v lida com isso ajustando o grau de confiança nos dados sem descartá-los.

Influência de h_i : O lado interno, com menor vazão, pode limitar o desempenho. No entanto, os dados sugerem que o coeficiente interno real (h_i) 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 (h_o) em trocadores casco-tubo, conciliando medições experimentais de U com incertezas. Os resultados mostram que h_o varia entre 0,8 e 2,5 $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ para vazões de 5 a 30 LPM, com tendência de aumento com a vazão. A LPA2v permite tratar contradições entre Q_h e Q_c 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.