

Determinação e análise das constantes de tempo de um sensor anelar de temperatura em leito fixo

Luiz Mario de Matos Jorge^{1*}, Gustavo Piras de Oliveira², Regina Maria Matos Jorge³ e Reinaldo Giudici²

¹Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil. ²Departamento de Engenharia Química, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Caixa Postal 61548, 05424-970, São Paulo, São Paulo, Brasil. ³Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Paraná, Caixa Postal 19011, 81531-900, Curitiba, Paraná, Brasil. *Autor para correspondência. e-mail: lmmj@deq.uem.br

RESUMO. Neste trabalho foi desenvolvida uma metodologia teórico-experimental que possibilitou a determinação e a análise das constantes de tempo dos cinco termopares que compõem um sensor anelar de temperatura instalado em leito fixo. Para tal, foram efetuadas perturbações tipo degrau na temperatura do ar que passa pelo sensor, sendo as respostas térmicas registradas mediante medidas periódicas de temperatura até que o sensor alcançasse a condição de regime permanente. Posteriormente, as constantes de tempo foram estimadas a partir do ajuste de um modelo matemático do sensor por regressões lineares. Tanto o modelo matemático como a técnica utilizada para o ajuste das constantes de tempo foram adequados. Cada um dos termopares que compõem o sensor anelar apresentou constantes de tempo distintas. O termopar anelar externo, $r = 0,027\text{m}$, e o termopar central, $r = 0\text{m}$, apresentam o maior e o menor valor de constante de tempo, respectivamente, independentemente da vazão utilizada.

Palavras-chave: sensor anelar de temperatura, constantes de tempo, termopares, leito fixo.

ABSTRACT. Time constants determination and analysis for a ring-shaped temperature sensor in fixed bed. A theoretical and experimental methodology was developed and made possible to evaluate and analyse the time constants of five thermocouples of a ring-shaped sensor installed in a fixed bed. In this sense, step disturbances were applied to the temperature of the air that flows across the sensor and the step responses were registered by periodic measures of temperature until the sensor reached steady state. The time constants were evaluated by linear regressions of the sensor mathematical model. Both the mathematical model and the technique used for the adjustment of the time constants were satisfactory. Each thermocouple from the ring-shaped sensor has presented distinct time constants. The external ring-shaped thermocouple, $r = 0,027\text{m}$, and the central thermocouple, $r = 0\text{m}$, has presented the higher and the lower value of time constant, respectively, independent of the volumetric gas flow.

Key words: temperature ring-shaped sensor, time constant, thermocouples, fixed bed.

Introdução

O estudo da transferência de calor em leito fixo pode ser efetuado em regime permanente ou em regime transiente, mas em qualquer caso há a necessidade de se medir, da forma mais confiável possível, os perfis de temperatura que se desenvolvem no leito.

Nestes estudos a utilização de termopares é de uso corrente. Entretanto, quando utilizados para efetuar medidas em regime transiente surge a inércia térmica como agente complicador, podendo levar a medidas não-realistas.

A inércia térmica é um fenômeno inerente a qualquer termopar, podendo ser caracterizada pela constante de tempo, τ , sendo tanto mais significativa quanto maior for o seu valor.

Muitos pesquisadores se dedicaram ao estudo da transferência de calor em leito fixo, utilizando diferentes técnicas para medir as temperaturas. Dentre estas destacam-se: (1) - inserção radial de termopares no leito (Chalbi *et al.*, 1987); (2) - fixação de um conjunto de termopares acima do leito (Dixon, 1985; Thoméo, 1990), sendo que normalmente o suporte destes termopares é na forma de cruz; (3) - inserção de

termopares nos alvéolos de um monolito cerâmico com vários alvéolos longitudinais, disposto entre duas partes do leito (Hofmann, 1986); (4) - uso de termopares anelares dispostos no interior do leito (Ziolkowski e Legawiec, 1987) ou sobre o mesmo (Giudici, 1990; Jorge, 1992 e 1998).

Em condições de escoamento em leito fixo, tanto a velocidade do gás como a temperatura apresentam variações angulares significativas numa dada posição radial, devido à variações nas características locais do empacotamento. Este comportamento, comum a qualquer leito fixo, torna trabalhosa a determinação dos perfis de temperatura radiais quando se usam sensores pontuais (tipo 1, 2 e 3), pois devido à manifestação de flutuações angulares da temperatura do leito torna-se necessário efetuar a média de várias tomadas de temperatura em diferentes posições angulares para obter uma medida representativa. A fim de contornar este problema, Ziolkowski e Legawiec (1987) fizeram uso de termopares anelares que automaticamente obtinham a média das temperaturas angulares.

Um sensor similar foi proposto por Giudici (1990) e também utilizado por Jorge (1992) em estudos de transferência de calor em leito fixo em condições de regime permanente. Adicionalmente, Giudici (1990) mostrou experimentalmente e comprovou através de simulações que a temperatura em cada anel que compõe o sensor anelar realmente representa a média das temperaturas angulares numa determinada posição radial. Uma síntese destes resultados pode ser encontrada em Giudici e Nascimento (1994).

Desta forma, fica evidente que a utilização de termopares anelares para obter medidas de temperaturas em equipamentos de leito fixo, operando em regime permanente é vantajosa. Entretanto, a utilização destes sensores para medir temperaturas em equipamentos de leito fixo operando em regime transiente depende do conhecimento das suas constantes de tempo, o que possibilita avaliar a inércia térmica.

Material e métodos

Aparato experimental

O equipamento utilizado, Figura 1, é formado basicamente por uma célula de medição, um sistema de aquisição de dados (SAD) e um sensor anelar de temperaturas.

A célula de medição é composta de duas seções: uma seção aquecida (seção térmica) que é construída em aço inox e aquecida através de uma camisa de vapor e uma seção não aquecida (seção calma) construída em PVC. As duas seções estão unidas por uma flange de nylon a fim de reduzir a condução de calor entre estas.

A célula de medição foi preenchida com esferas de aço de 6,3mm de diâmetro e imediatamente acima do leito foi posicionado o sensor anelar apresentado em detalhe na Figura 2.

O sensor anelar é composto de quatro anéis de cobre concêntricos com um mini-termopar soldado em cada anel e um quinto termopar soldado numa pequena haste de cobre posicionada no centro, cujas posições radiais, T1, T2, T3, T4 e T5, estão indicadas na Figura 1. Este conjunto é sustentado através de um suporte de nylon na forma de cruz, o qual é fixado a uma barra central de nylon. Tanto os anéis como a pequena haste central foram confeccionados a partir de um fio de cobre de 2,5mm de diâmetro.

Adicionalmente foram instalados dois termopares na parede interna da célula de medição para avaliar a temperatura da parede interna da célula de medição, T6 e T7, e um terceiro termopar, T₀, imediatamente abaixo da seção de entrada para medir a temperatura do ar injetado.

Todos os termopares do equipamento são do tipo K e estão ligados a duas placas amplificadoras e multiplexadoras (PCLD-779). Estas, por sua vez, transmitem o sinal para uma placa expansora, que retransmite a informação para a placa-mãe (PCL-812PG), instalada dentro de um microcomputador PC368DX-40, no qual é feita a leitura e aquisição das temperaturas através do *software LabTech control*. A instalação, ajustes e testes preliminares, deste sistema de aquisição de dados (SAD) no equipamento foi descrita por Oliveira et al. (1995).

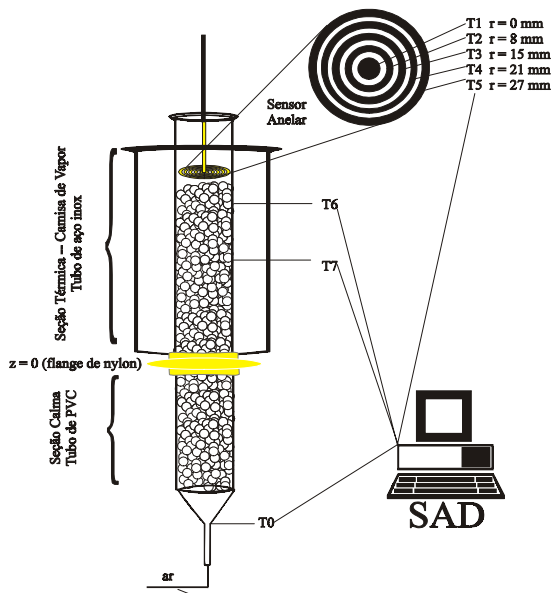


Figura 1. Esquema do equipamento

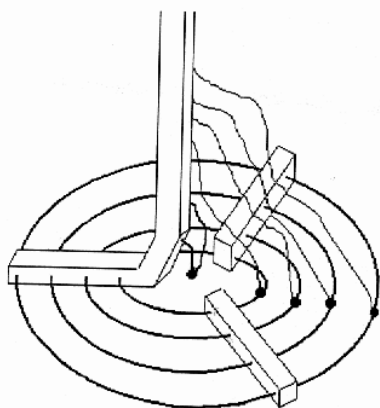


Figura 2. Sensor anelar em detalhe.

Procedimento experimental

A metodologia desenvolvida visa medir a resposta térmica dos termopares que compõem o sensor anelar frente a uma perturbação degrau na temperatura do ar (T_g), conforme descrito a seguir:

- preenche-se a célula de medição com esferas de aço de 6,3mm de diâmetro até a altura de 30cm ($Z=30\text{cm}$);
- posiciona-se o sensor anelar sobre o leito;
- fixa-se a vazão do ar alimentado em 40, 80, 120, 160 ou 200 l/min em condições normais de 1 atm e 25°C;
- injeta-se vapor saturado na camisa de aquecimento da seção térmica;
- após o equipamento entrar em regime permanente, retira-se o sensor anelar para o meio ambiente (Figura 3– sensor fora do leito);
- assim que o sensor atinge o equilíbrio térmico com o meio externo, este é introduzido novamente na célula de medição no instante de tempo t_0 (Figura 3 – sensor sobre o leito);
- aguarda-se o tempo necessário para que todos os anéis do sensor anelar alcancem condições de regime permanente.

Modelagem matemática

Para obter as constantes de tempo do sensor anelar, foi proposto um modelo a parâmetros concentrados, obtido a partir do balanço de energia em regime transiente num determinado anel do sensor, conforme Equação (1).

$$\tau \frac{dT}{dt} = (T_g - T) \quad (1)$$

$$\text{onde } \tau = m_a c_{pa} / hA \quad (2)$$

Admitindo que a temperatura do gás que circunda o anel permaneça constante e que no instante inicial (t_0) a temperatura do anel é conhecida: $T(t_0) = T_o$, obtém-se a solução analítica para uma perturbação degrau, representada pela Equação (3).

$$\ln T^* = -K(t - t_0) \quad (3)$$

onde $T^* = [T_g - T(t)]/[T_g - T_o]$ e $K = 1/\tau$.

Resultados e discussão

Metodologia experimental

Conforme pode ser observado na Figura 3, quando o sensor anelar é retirado para fora do leito, cada um dos termopares que o compõe perdem calor continuamente para o meio ambiente e tendem a indicar a mesma temperatura, correspondente à temperatura ambiente, 27°C.

No instante de tempo, $t_0 = 137$ s, o sensor é re-introduzido na célula de medição e posicionado imediatamente acima do leito, experimentando uma perturbação degrau na temperatura do gás, T_g , que circunda os anéis do sensor anelar. Com o decorrer do tempo as temperaturas de todos os termopares do sensor anelar, T1 a T5, tendem a ficar em equilíbrio com o ar circundante. Conforme pode-se constatar nas Figuras 4 e 5, após 380 s o sensor anelar encontra-se praticamente em equilíbrio térmico, indicando que o perfil radial de temperaturas existente no leito apresenta um comportamento parabólico, com um máximo próximo à parede (T5, $r = 27\text{mm}$) e um mínimo no centro do leito (T1, $r = 0\text{mm}$).

De fato, o leito encontra-se em condição de regime permanente durante todo o período de tempo apresentado nas Figuras 3 e 4, $0\text{ s} < t < 380\text{ s}$, mas devido à inércia térmica, as temperaturas indicadas pelo sensor anelar, T1 a T5, só serão representativas do perfil radial de temperaturas do leito após todos os termopares do sensor alcançarem equilíbrio térmico com as condições existentes no leito, o que ocorre em torno de 243 s após a fixação do sensor sobre o leito (t_0), ou seja, após o instante de tempo $t = 380$ s.

Durante a re-inserção do sensor anelar no leito em t_0 até este alcançar a condição de regime permanente ($t > 380$ s), os termopares do sensor anelar, T1 a T5, experimentam uma variação gradual das temperaturas, partindo de temperaturas praticamente uniformes em $t = 137$ s que se alteram ao longo do tempo até alcançar um perfil radial parabólico completamente desenvolvido em $t = 300$ s, conforme apresentado na Figura 4.

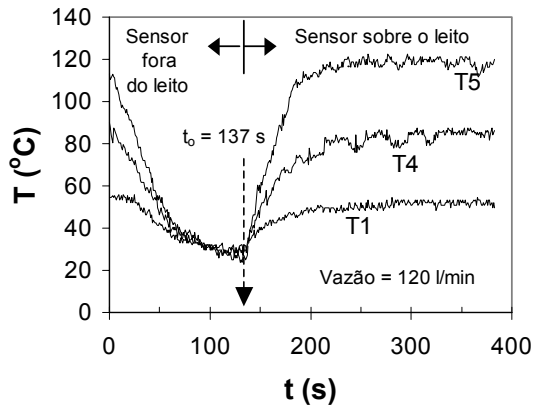


Figura 3. Acompanhamento da dinâmica do sensor anelar.

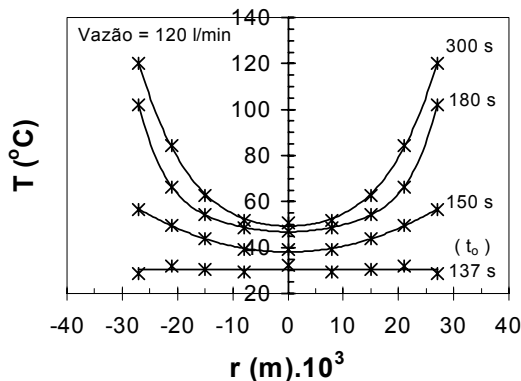


Figura 4. Perfis radiais de temperatura.

Ajuste do modelo

Conforme pode-se observar, a constante de tempo, τ , pode ser obtida pela inclinação da reta representada pela solução analítica do modelo, Equação 3. Logo, o ajuste do modelo matemático para os cinco termopares, T1 a T5, foi efetuado a partir de simples regressões lineares.

Para a determinação dos valores de τ a partir de regressões individuais para cada termopar do sensor anelar em condições de escoamento em leito fixo, há a necessidade de que se conheça a temperatura inicial, T_0 , de cada termopar que compõe o sensor anelar, bem como o histórico destas temperaturas no decorrer do tempo, $T(t)$, frente a uma perturbação de grau na temperatura do gás, T_g . Os históricos de temperaturas correspondem àquelas medidas efetuadas quando o sensor anelar é re-inserido na célula de medição, em $t = t_0$, e posicionado sobre o leito, experimentando um aumento de temperatura, conforme Figura 3.

Na Figura 5 está ilustrada uma regressão linear dos dados experimentais para o termopar T2. Constata-se a existência de um erro crescente em torno da reta ajustada, cuja inclinação $K = 0,02861 \text{ s}^{-1}$

¹ é inversamente proporcional à constante de tempo do anel T2. Este comportamento deve-se ao fato de tratar-se de um gráfico semi-logarítmico, em que as flutuações experimentais ficam amplificadas à medida em que a temperatura do termopar anelar T2 se aproxima da temperatura do gás que circunda o anel, T_g , diminuindo a diferença entre T e T_g . Além do que, o valor do coeficiente de correlação linear igual a 0,9 indica que o modelo é adequado.

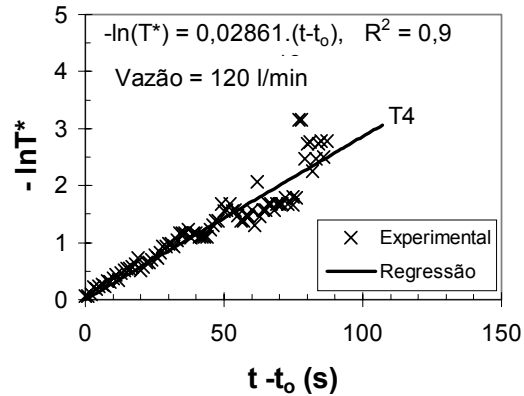


Figura 5. Ajuste do modelo por regressão linear.

A fim de se verificar a qualidade do ajuste do modelo utilizado às medidas de temperatura, T_{exp} , de todos os cinco termopares do sensor anelar, T1 a T5, nas diversas vazões de ar, estas foram comparadas com as previsões do modelo matemático, T_{calc} , conforme Figura 6.

Constata-se que a maioria das temperaturas calculadas pelo modelo matemático apresentou desvios inferiores a 10% em relação às temperaturas experimentais.

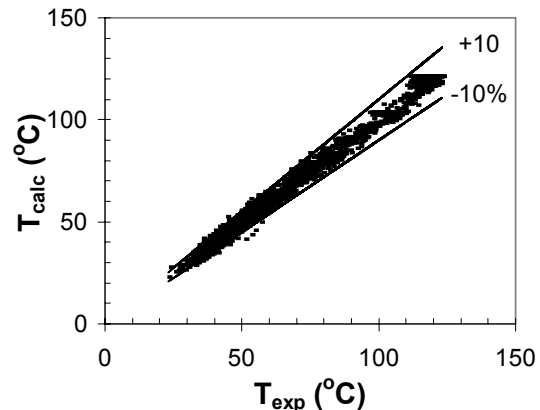


Figura 6. Verificação do ajuste global do modelo.

Além da maioria das previsões do modelo matemático apresentarem um pequeno desvio em

relação aos dados experimentais, $< 10\%$, pode-se observar na Figura 7 que este modelo também representa as principais tendências do processo de transferência de calor no sensor anelar, representando adequadamente o comportamento verificado experimentalmente tanto em condições de regime transiente como em regime permanente.

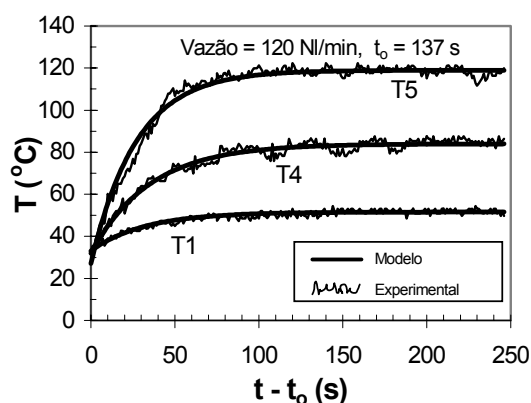


Figura 7. Avaliação do comportamento do modelo frente aos dados experimentais.

Comportamento das constantes de tempo

O comportamento das constantes de tempo para os quatro termopares anelares, T1 a T4, e para o minitermpar central, T5, que compõem o sensor anelar em função das vazões de ar é mostrado na Figura 8. Observa-se que para uma mesma vazão os valores de τ apresentam diferenças entre os cinco termopares: T1 a T5, alocados em cinco posições radiais distintas. Entretanto, para todos os termopares, T1 a T5, as constantes de tempo tendem a diminuir com o aumento da vazão.

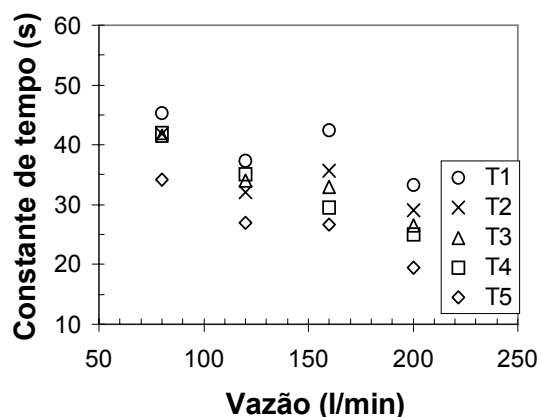


Figura 8. Influência da vazão sobre as constantes de tempo dos cinco termopares que compõem o sensor anelar.

Ambos os efeitos (da vazão e da posição radial) podem ser explicados analisando a Equação 2 que

define a constante de tempo. Como os quatro termopares anelares e o suporte do minitermpar central que compõem o sensor anelar foram confeccionados com o mesmo fio de cobre, todos os cinco termopares apresentam os mesmos valores de calor específico (mesmo material), e a mesma área por unidade de massa (desprezando-se aqui efeitos menores devido à curvatura dos anéis). Dessa forma, a variação de τ pode ser atribuída à variação do coeficiente de transferência de calor entre o gás e o sensor (h). Sabe-se que h aumenta com a velocidade do gás, portanto com a vazão (Giudici e Nascimento, 1994). Logo, como τ é inversamente proporcional a h , o aumento da vazão acarretaria a diminuição dos valores de τ , conforme observado na Figura 8.

Quanto à influência da posição radial, sabe-se que próximo à parede a velocidade do gás apresenta valores elevados para escoamento em leito fixo, devido à alta porosidade nesta região, diminuindo até valores praticamente constantes na região central, conforme Schwartz e Smith (1953) e Price (1968). Credita-se a este fato a constatação de que as constantes de tempo do termopar T5 foram as menores em toda a faixa de vazões exploradas, por tratar-se do termopar mais próximo da parede, onde as velocidades são maiores; enquanto as constantes de tempo do termopar T1, posicionado no centro do leito, apresentam os maiores valores para toda a faixa de vazões.

Análise do tempo de resposta do sensor anelar

Como todos os termopares, T1 a T5, comportam-se como sistemas de primeira ordem, Equação 1, e foram submetidos a uma perturbação degrau na temperatura do gás, pode-se admitir que o tempo necessário para que cada um dos termopares que constituem o sensor anelar alcance 98% da temperatura final de equilíbrio, corresponde a 4τ (Coughanour e Koppel, 1978).

Considerando que 98% da temperatura de equilíbrio seja representativo do tempo de resposta de cada um dos termopares que compõem o sensor anelar, apresentam-se na Figura 9 os valores dos tempos de resposta do termopar T1 e do termopar T5 por representarem os menores e os maiores valores de tempos de resposta, respectivamente, para cada vazão.

Constata-se que os tempos de resposta tendem a diminuir com o aumento da vazão, entretanto, independente da vazão utilizada a diferença entre o maior e o menor tempo de resposta dentre os cinco termopares que compõem o sensor anelar não varia significativamente, apresentando um valor médio de

51,2 s. No entanto, individualmente os tempos de resposta sofrem influência tanto da vazão como da posição radial em que os termopares do sensor anelar se encontram.

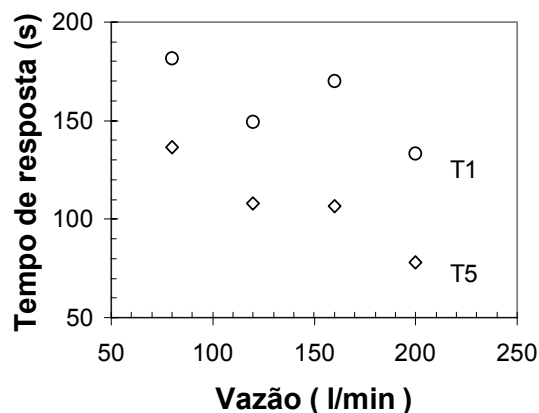


Figura 9. Tempos de resposta do sensor anelar.

Para uma determinada vazão, o termopar T1 ($r = 27\text{mm}$) e o termopar T5 ($r = 0\text{mm}$) apresentaram o maior e o menor tempo de resposta respectivamente. Além da influência da posição, observa-se que os tempos de resposta de todos os termopares do sensor anelar tendem diminuir com o aumento da vazão. O maior tempo de resposta, 181,41 s, foi o do termopar T1 para a menor vazão, 40 l/min, enquanto o menor, 77,87 s, foi o do termopar T5 para a maior vazão, 200 l/min.

Conclusão

O modelo matemático proposto para o sensor anelar pode ser utilizado para simular o seu comportamento dinâmico, comprovando que este se comporta como um sistema de primeira ordem.

A metodologia utilizada para o ajuste do modelo e determinação das constantes de tempo foi satisfatória.

Em condições de escoamento em leito fixo, cada um dos termopares que compõem o sensor anelar apresentam constantes de tempo distintas. O termopar externo, T5, e o termopar central, T1, do sensor anelar apresentam o maior e o menor valor de constante de tempo, respectivamente, independente da vazão utilizada.

As diferenças entre os valores das constantes de tempo dos termopares T1 a T5 foram atribuídas principalmente às variações da velocidade do ar em função da posição radial, decorrentes da maior porosidade do leito próximo à parede.

Os valores das constantes de tempo dos termopares que compõem o sensor anelar tendem a diminuir com o aumento da vazão.

Os tempos de resposta de todos os termopares que compõem o sensor anelar diminuem com o aumento da vazão de ar.

Independente da vazão utilizada, a diferença entre o maior e o menor tempo de resposta dentre os cinco termopares que compõem o sensor anelar não variam significativamente, apresentando um valor médio de 51,2 s.

O maior tempo de resposta, 181,41 s, foi o do termopar T1 para a menor vazão, 40 l/min, enquanto o menor, 77,87 s, foi o do termopar T5 para a maior vazão, 200 l/min.

Agradecimentos

Ao CNPq, CAPES e FAPESP pelo apoio concedido a este trabalho.

Nomenclatura

A	área	[L ²]
C _{pa}	capacidade calorífica do anel	[L ² T ⁻² θ ⁻¹]
h	coeficiente de transferência de calor entre o gás e o sensor	[M.T ⁻¹ .θ ⁻¹]
r	posição radial	[L]
T	temperatura	[θ]
T _{exp}	temperatura experimental	[θ]
T _{calc}	temperatura calculada	[θ]
T _g	temperatura do gás	[θ]
T _{exp}	temperatura experimental	[θ]
T _o	temperatura no instante inicial	[θ]
T*	temperatura adimensional	[θ]
t	tempo	[T]
t _o	instante de tempo inicial	[T]
K	velocidade térmica característica	[T ⁻¹]
z	posição axial	[L]
τ	constante de tempo	[T]

Referências

- COUGHANOWR, D.R.; KOPPEL, L.B. *Análise e controle de processos*. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1978.
- CHALBI, M. et al. Heat transfer parameters in fixed bed exchangers, *Chem. Eng. J.*, Amsterdam, v. 34, p 89-97, 1987.
- DIXON, A.G. The length effect on packed bed effective heat transfer parameters, *Chem. Eng. J.*, Amsterdam, v.31, p.163-173(b), 1985.
- GIUDICI, R. *Modelagem de reator de oxidação de etileno: estudo de parâmetros térmicos e estratégia de diluição de catalisador*. 1990. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.
- GIUDICI, R.; NASCIMENTO, C.A.O. Analysis of a ring-shaped sensor for use in packed-bed heat transfer studies, *Can. J. Chem. Eng.*, Ottawa, v.72, p.43-49, 1994.
- HOFMANN, H. Kinetic data analysis and parameter estimation, *Chemical Reactor Design and Technology*,

- Hugo I (Ed.). *Chemical reactor design and technology*, Martinus Nijhoff Publishers, 1986, p 69-105.
- JORGE, L.M.M. *Transferência de calor em reator catalítico de leito fixo*. 1992. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.
- JORGE, L.M.M. *Estudo experimental e modelagem matemática de reator catalítico de leito fixo: transferência de calor em sistemas sem e com reação de reforma a vapor de metano*. 1998. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- OLIVEIRA, G.P. *et al.* Implementação de um sistema de aquisição de dados para estudo de transferência de calor em leito fixo. In: 1º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA – INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 1, 1995, São Carlos. *Anais...* São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 1995, p.168-171.
- PRICE, J. The distribution of fluid velocities for randomly packed beds of spheres. *Mechanical and Chemical Engineering Translations*, p 7-14, 1968.
- SCHWARTZ, C.E.; SMITH, J.M. Flow distribution in packed beds. *Ind. Eng. Chem.*, v. 45, p 1209-1218, 1953.
- THOMÉO, J.C. *Análise experimental dos efeitos de entrada térmicos sobre os coeficientes de transferência de calor em leito fixo*. 1990. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 1990.
- ZIOLKOWSKI, D.; LEGAWIEC, B. Remarks upon thermokinetic parameters of the one- and two-dimensional mathematical models of heat transfer in a tubular flow apparatus with a packed bed. *Chem. Eng. Prog.*, New York, v.21, p.65-76, 1987.

Received on January 29, 2003.

Accepted on June 21, 2003.