

EXPERIMENTO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR REALIZADO REMOTAMENTE PELA INTERNET

Antonio J. G. Cruz¹; Charles F. D. Jesus¹; Ivan C. Nali²; Paulo Olivi²; Roberto C. Giordano¹

¹ Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Química
Rodovia Washington Luis (SP 310), km 235
CEP 13565-905 – São Carlos – São Paulo
ajgcruz@ufscar.br

² Universidade de São Paulo, Faculdade de Filosofia Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Departamento de Química
Av. Bandeirantes, 3900 - Monte Alegre
CEP 14040-901 - Ribeirão Preto, São Paulo
olivip@ffclrp.usp.br

Resumo: Este trabalho descreve a realização de experimento didático de transferência de calor em barras cilíndricas (aletas) operado remotamente pela Internet. O experimento encontra-se fisicamente implementado no Departamento de Química (DQ) da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Ribeirão Preto (FFCLRB - USP - Ribeirão Preto), como parte integrante do projeto Tidia/KyaTera-FAPESP. O acesso ao experimento (WebLab) foi realizado através do endereço: <http://143.107.221.168/condtemp.html>. O experimento foi operado por equipes de alunos da disciplina de “Análise e Simulação de Processos Químicos” durante o segundo semestre letivo do ano de 2007 (curso de Engenharia Química da UFSCar). Este trabalho apresenta esta nova tecnologia, faz uma breve descrição do experimento e de sua operação a distância. Durante a aula experimental, além da obtenção dos dados experimentais, foi apresentada aos alunos a modelagem matemática do problema, suas condições de contorno e hipóteses simplificadoras adotadas, bem com a técnica utilizada para resolver as equações resultantes (método das diferenças finitas) e sua simulação no computador. Devido ao resultado atingido, pode-se considerar o WebLab como uma ferramenta de ensino de grande valia, que proporciona melhoria no aprendizado e estímulo aos alunos, além de seu caráter inovador.

Palavras-chave: WebLab, i-Lab, Internet.

1. INTRODUÇÃO

WebLabs ou iLabs são definidos como laboratórios de qualquer ciência experimental (Física, Engenharia, Psicologia, por exemplo) que possam ser remotamente controlados/operados em tempo real através da internet com auxílio de um programa navegador (web browser).

A partir da última década, os WebLabs estão sendo cada vez mais utilizados em muitas instituições educacionais, como por exemplo: Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT,

USA), Universidade de Deusto (Espanha), Universidade de Siena (Itália), Universidade de Cambridge (Inglaterra) (HARWARD et al., 2004).

Em 2005, durante o *Workshop* sobre *WebLabs* em Engenharia Química realizado em Cambridge (Inglaterra) (WORKSHOP, 2007), três tipos de *WebLabs* foram apresentados:

i) *WebLabs* que utilizam experimentos que não necessitam de supervisão local para serem operados. Neste tipo de *WebLab* os experimentos ficam disponíveis para acesso remoto a qualquer tempo (normalmente encontrados na área de Engenharia Elétrica);

ii) *WebLabs* que consistem de equipamentos em escala piloto, sendo operados por dois grupos de estudantes (um deles localizado próximo ao equipamento e o outro distante do mesmo, ou seja, remoto). Ambos grupos acessam o experimento via Internet. As principais vantagens deste tipo de *WebLab* são operar um equipamento a distância como em uma planta industrial e também propiciar a troca de experiências interculturais entre os grupos de alunos;

iii) *WebLabs* de experimentos específicos os quais são pouco utilizados e de implementação ou operação onerosa. A vantagem deste tipo de *WebLab* é permitir que mais pessoas tenham acesso ao equipamento.

Este trabalho descreve a prática de um experimento de transferência de calor em barras cilíndricas (*WebLab*) por equipes de alunos da disciplina de “Análise e Simulação de Processos Químicos” do curso de Engenharia Química da UFSCar. Explorou-se a abordagem denominada de “Computer-based Teaching” (BELHOT et al., 2001). Buscou-se com esta prática introduzir conhecimentos teóricos e conceitos gerais durante uma aula assistida por computador. O trabalho faz uma breve descrição do experimento e de sua operação a distância. Durante a aula apresentou-se o desenvolvimento do modelo matemático e a técnica utilizada para resolver a equação resultante, bem como sua simulação no computador. O artigo tece considerações a respeito desta experiência didática inovadora.

2. TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM ALETAS CILÍNDRICAS

O aparato experimental foi implementado utilizando *hardware* desenvolvido no Departamento de Química da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras de Ribeirão Preto e programa LabVIEW (versão 8.1) para elaboração do aplicativo de supervisão e controle do processo. Uma fotografia do aparato experimental é apresentada na Figura 1(A). O aparato experimental consiste de duas barras cilíndricas de latão (diâmetro de 0,5” e 1,0”, respectivamente) dispostas horizontalmente e tendo ao longo do seu comprimento termopares conectados nas posições (da direita para esquerda): 0,0 cm, 5,5 cm, 10,0 cm, 14,5 cm, 19,0 cm, 23,5 cm, 28,0 cm, 32,5 cm, 37,0 cm. Na base das barras encontram-se dois módulos aquecedores, responsáveis pelo fornecimento de calor durante a realização do experimento. Na outra extremidade das barras encontra-se um mini ventilador, que pode ser acionado ou não durante o experimento. Esse acessório permite que haja duas situações para as quais serão estimados os valores do coeficiente de transferência de calor por convecção: convecção natural ou convecção forçada. Com auxílio do navegador de Internet (*web browser*), o acesso ao endereço <<http://143.107.221.168/condtemp.html>> permite a visualização da página principal do experimento (*WebLab*), ilustrado na Figura 1 (B).



(A)

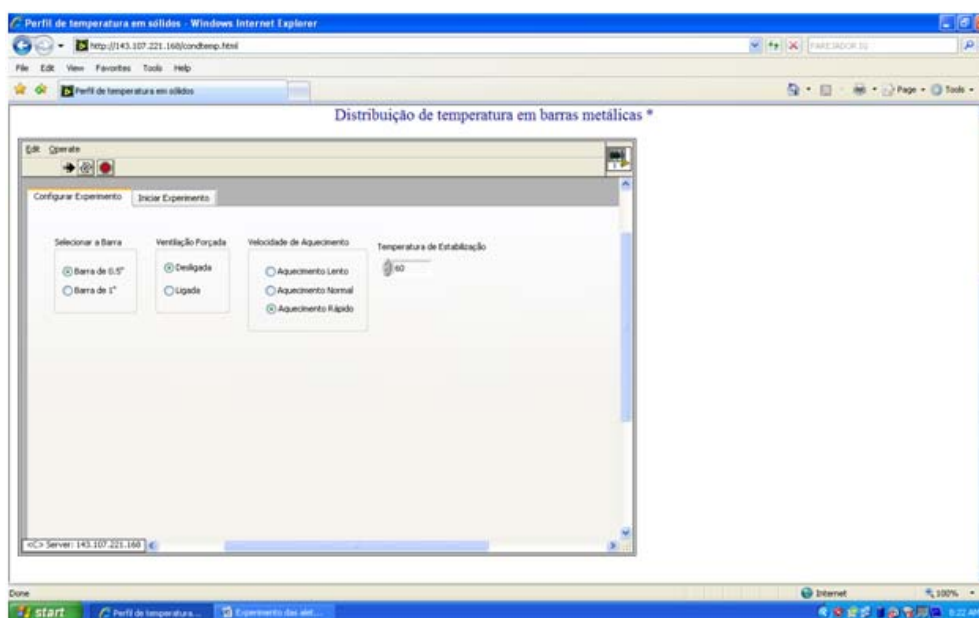
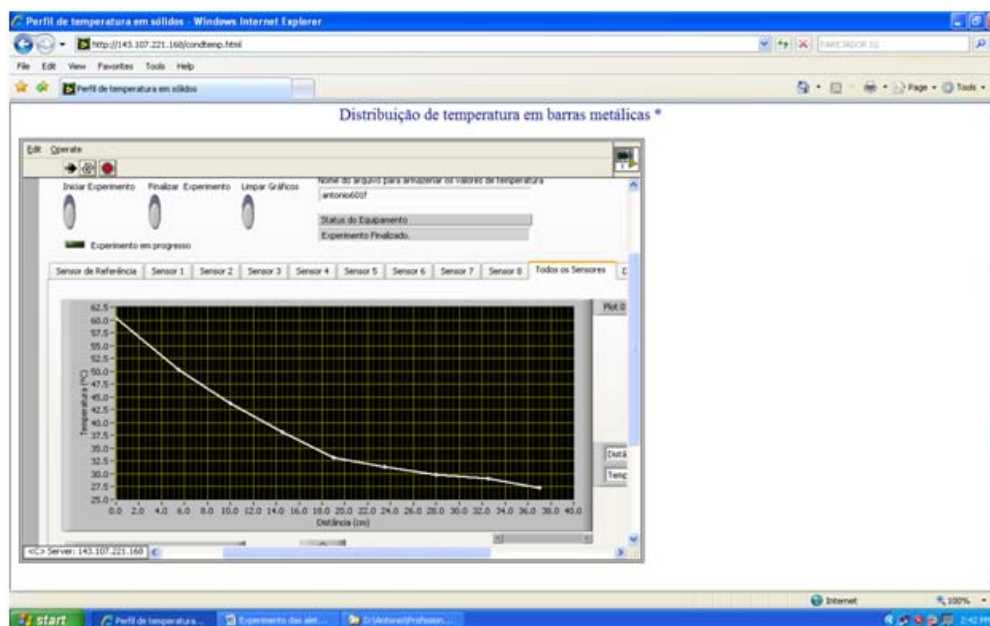


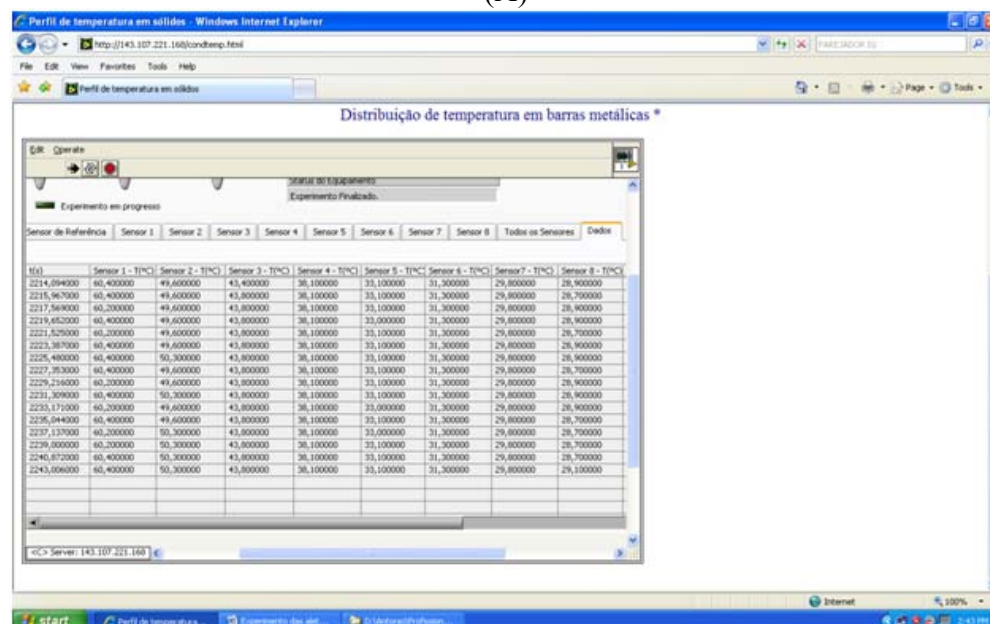
Figura 1. (A) Fotografia ilustrando o *WebLab* de transferência de calor em barras cilíndricas (aletas), localizado no departamento de Química da FFCL-USP-Ribeirão Preto, SP; (B) Tela inicial de apresentação do experimento.

Nesta tela, o(s) usuário(s) (alunos das equipes) deve(m) configurar o experimento através de ações como: selecionar o diâmetro barra a ser utilizada (0,5'' ou 1,0''); optar por experimento em convecção natural ou forçada; escolher a velocidade do aquecimento (lento, normal ou rápido); e ajustar a temperatura de estabilização da base da aleta.

O próximo passo consiste em avançar para a próxima tela e iniciar o experimento (Figura 2A). Ao término do experimento, a barra escolhida entra em regime exibindo um perfil de temperatura ao longo de seu comprimento. Os dados das temperaturas medidas ao longo do tempo (em cada posição) pelos termopares são salvos em arquivo com codificação ASCII (Figura 2B).



(A)



(B)

Figura 2. (A) Tela para acompanhamento do experimento de distribuição de temperatura em barras cilíndricas (aletas); (B) Dados experimentais armazenados ao longo do experimento.

3. METODOLOGIA

A realização da prática experimental consistiu de três etapas. Na primeira, o professor apresentou o estudo de caso (experimento de transferência de calor) e motivou os alunos a realizarem a modelagem fenomenológica do processo a partir dos conhecimentos por eles já adquiridos. As hipóteses simplificadoras adotadas foram discutidas e foi apresentado o método numérico para solução do equacionamento resultante com auxílio do computador (método das diferenças finitas). Na segunda, foi realizada uma apresentação desta nova tecnologia (WebLab). Os alunos foram alocados em equipes e estas realizaram o acesso remoto ao experimento (em sala de informática do DEQ/UFSCar). Cada equipe realizou dois

experimentos de aquecimento em diferentes condições. Ao final da sessão, os dados experimentais em arquivo formato ASCII foram salvos e disponibilizados às equipes para posterior elaboração de relatório. A última etapa consistiu da simulação do modelo desenvolvido para ajustar o parâmetro de transferência de calor por convecção utilizando os dados experimentais obtidos. Por fim, as equipes apresentaram ao professor um relatório da prática experimental.

4. MODELO MATEMÁTICO

O problema de troca de calor convectiva em barra submetida a brusca variação de temperatura em um de seus extremos consiste em considerar ao longo da barra fluxo de calor condutivo, unidimensional e as propriedades físicas do material constante com a temperatura. Assume-se que a perda de calor entre a barra e o meio ambiente (ar) possa ser representada por um valor médio caracterizado por um coeficiente de película constante ao longo da barra. A Figura 3 apresenta um esquema da aleta cilíndrica.

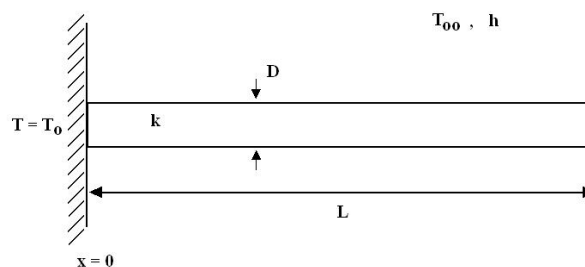


Figura 3: Esquema da aleta cilíndrica e a nomenclatura adotada.

Adotando-se estas hipóteses simplificadoras, o balanço de energia no estado estacionário resulta na seguinte equação diferencial ordinária:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = \frac{4 \cdot \bar{h}}{k \cdot D} \cdot (T - T_{\infty}) \quad (1)$$

onde: T é a temperatura da barra na posição x ;
 T_{∞} é a temperatura ambiente;
 h é o coeficiente médio de transferência de calor por convecção
 k é a condutividade térmica do material da aleta
 D é o diâmetro da aleta

As condições de contorno para a equação (1) são:

C1. Na posição $x = 0$, a temperatura é mantida em valor fixo (temperatura da base), assumindo o valor $T = T_0$.

C2. Na posição $x=L$, onde L é o comprimento da aleta, a extremidade da aleta, três condições podem ser assumidas:

- 1) $T = T_{\infty}$, hipótese de que a barra tem um comprimento muito longo (pode ser considerada infinita);

- 2) $\frac{dT}{dx} = 0$, hipótese de extremidade da barra isolada;
- 3) $-k \cdot \frac{dT}{dx} \Big|_{x=L} = \bar{h} \cdot (T - T_{\infty}) \Big|_{x=L}$, hipótese da barra trocando calor por convecção em sua extremidade.

Este modelo apresenta solução analítica para as condições de contorno apresentadas (Kreith e Bohn, 2003). A Tabela 1 ilustra as condições de contorno e as respectivas soluções da equação.

Tabela 1 – Soluções analíticas do problema de condução de calor unidimensional em estado estacionário em aleta cilíndrica.

Caso	Condição de contorno	Solução analítica
1	$x = 0 \quad T = T_o$ $x = L \quad T = T_{\infty}$	$\frac{T - T_{\infty}}{T_o - T_{\infty}} = e^{-m \cdot x}$
2	$x = 0 \quad T = T_o$ $x = L \quad \frac{dT}{dx} = 0$	$\frac{T - T_{\infty}}{T_o - T_{\infty}} = \frac{\cosh[m \cdot (L - x)]}{\cosh(m \cdot L)}$
3	$x = 0 \quad T = T_o$ $x = L \quad -k \cdot \frac{dT}{dx} \Big _{x=L} = \bar{h} \cdot (T - T_{\infty}) \Big _{x=L}$	$\frac{T - T_{\infty}}{T_o - T_{\infty}} = \frac{\cosh[m \cdot (L - x)] + \left(\frac{\bar{h}}{m \cdot k}\right) \cdot \sinh[m \cdot (L - x)]}{\cosh(m \cdot L) + \left(\frac{\bar{h}}{m \cdot k}\right) \cdot \sinh(m \cdot L)}$

$$* \quad m^2 = \frac{4 \cdot \bar{h}}{k \cdot D}$$

Como o objetivo da disciplina é apresentar técnicas numéricas para solução de problemas, empregou-se a técnica das diferenças finitas (PINTO e LAGE, 2001) para sua solução numérica. Com esta técnica, o problema é transformado em um sistema de equações algébricas sendo resolvido por algum método adequado (algoritmo de Gauss, LU, etc).

O problema foi discretizado com a aplicação de uma malha na direção x (número de pontos igual a NP = 21) ao longo do comprimento da aleta ilustrada na Figura 3 (δ é a espessura de cada elemento da barra, ou seja, $\delta = \frac{L}{(NP - 1)}$). Aplicando fórmulas de diferença progressiva e centrada, discretizou-se a equação (1) sujeita as condições de contorno dadas pelo caso 2 (Tabela 1). A equação (2) apresenta a equação discretizada.

$$T_{i-1} - (2 + \delta^2 \cdot m^2) T_i + T_{i+1} = -\delta^2 \cdot m^2 \cdot T_{\infty} \quad i=2, \dots, (NP-1)$$

$$\begin{aligned} \text{C.C 1:} \quad T_i &= T_o & i &= 1 \\ \text{C.C. 2:} \quad T_{NP-1} &= T_{NP} & i &= NP \end{aligned} \quad (2)$$

A equação diferencial ordinária de segunda ordem é transformada em 21 equações algébricas lineares, expressa na forma matricial pela equação (3).

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -(2+\delta^2 \cdot m^2) & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -(2+\delta^2 \cdot m^2) & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -(2+\delta^2 \cdot m^2) & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -(2+\delta^2 \cdot m^2) & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 2 & -(2+\delta^2 \cdot m^2) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ T_{N-1} \\ T_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_o \\ -\delta^2 \cdot m^2 \cdot T_\infty \\ -\delta^2 \cdot m^2 \cdot T_\infty \\ -\delta^2 \cdot m^2 \cdot T_\infty \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ -\delta^2 \cdot m^2 \cdot T_\infty \\ -\delta^2 \cdot m^2 \cdot T_\infty \end{pmatrix} \quad (3)$$

O sistema matricial dado pela equação (3) foi resolvido empregando as condições experimentais obtidas durante a realização do *WebLab*. Estimou-se, por meio de ajuste visual, o valor do coeficiente de transferência de calor por convecção, $h = 15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ para o caso de convecção natural (aleta de 0,5" de diâmetro).

A Figura 4 ilustra os valores simulados e experimentais obtidos para aleta de 0,5" em convecção natural. O equacionamento foi implementado no programa Scilab.

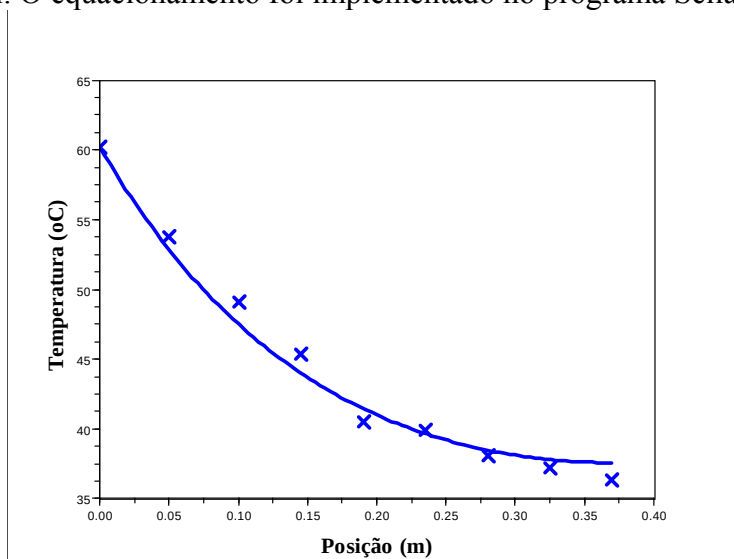


Figura 4: Dados experimentais e simulados para aleta de 0,5", em convecção natural (coeficiente médio de transferência de calor por convecção ajustado visualmente, $h = 15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$).

5. IMPRESSÃO DOS ALUNOS

Após a realização do experimento, foi entregue aos alunos um formulário com as seguintes questões:

- Q₁) Qual a sua opinião sobre o uso de experimentos realizados através da Internet nesta disciplina ou em outras disciplinas?;
- Q₂) Qual foi a dificuldade em operar esse experimento?;
- Q₃) O que você achou dessa prática experimental?;
- Q₄) Este tipo de experimento tem impacto positivo em sua formação?;

Q5) A realização desta prática aumentou sua motivação?

A Tabela 1 apresenta algumas das respostas fornecidas pelos estudantes.

Tabela 1. Transcrição de algumas respostas fornecidas pelos alunos.

Q1	1) “Muito importante sob diversos aspectos, como a maior praticidade da aula, interação dos alunos com a prática de simulação de experimentos, melhor visualização das técnicas empregadas e interpretação do fenômeno em estudo e seus resultados, bem como oportunidade de interagir com outras instituições de ensino através deste tipo de colaboração.”; 2) “Com certeza foi muito legal, para dizer a verdade não conhecia essa possibilidade, achava que isso só iria ocorrer muito adiante, mas realmente valeu a pena. Com certeza isso facilitaria muito se fosse aplicado em outras disciplinas.”
Q2	1) “Muito importante sob diversos aspectos, como a maior praticidade da aula, interação dos alunos com a prática de simulação de experimentos, melhor visualização das técnicas empregadas e interpretação do fenômeno em estudo e seus resultados, bem como oportunidade de interagir com outras instituições de ensino através deste tipo de colaboração.”; 2) “Com certeza foi muito legal, para dizer a verdade não conhecia essa possibilidade, achava que isso só iria ocorrer muito adiante, mas realmente valeu a pena. Com certeza isso facilitaria muito se fosse aplicado em outras disciplinas.”
Q3	1) “É uma experiência bastante pertinente ao curso, estudada principalmente nas disciplinas de fenômenos de transporte 2 e laboratório de fenômenos de transporte, possibilitou a oportunidade de compreender sob uma nova ótica, os conceitos de transferência de calor abordados.”; 2) “Por ser computadorizada, conseguimos uma tabela com as temperaturas durante o regime transiente, o que seria difícil na prática que fizemos no laboratório de FT, isso o que torna a experiência mais interessante.”
Q4	1) “Sim, pois descobrimos que podemos fazer experimentos quando necessitarmos, mesmo estando longe. Além disso, esse experimento realizado na faculdade, nos acrescenta uma experiência e nos mostra como fazer, caso precisemos realizar algo do tipo no futuro.”; 2) “Sim. Foi uma nova experiência do ponto de vista didático, apresentou uma abordagem clara e objetiva da prática sem descuidar dos conceitos fundamentais relacionados.”
Q5	1) “Sim, tornou a aula mais interessante e dinâmica.” 2) “Essa prática serviu para fazer com que possamos ver como a tecnologia evoluiu e como ela está servindo para ajudar no nosso curso, e o uso da tecnologia sempre nos motiva a fazer as coisas.”

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A interpretação das respostas dos estudantes conduz a conclusão de que o uso dessa nova ferramenta, o *WebLab*, aumenta o interesse na medida em que proporciona o contato com recursos informatizados e com uma nova tecnologia de ensino. A experiência mostrou que durante a realização da prática experimental é importante também que os alunos sejam acompanhados por um tutor ou professor.

Apesar das várias vantagens dos *WebLabs*, se um experimento não for atrativo, os estudantes podem perder o entusiasmo e o objetivo da prática experimental pode não ser alcançada (fato que também ocorre em experimentos presenciais). Por esta razão, muita atenção deve ser tomada quando da elaboração e preparo do conteúdo teórico da atividade e quando da realização da prática em si.

Devido ao resultado atingido, pode-se considerar o *WebLab* como uma ferramenta de ensino de grande valia, que proporciona melhoria no aprendizado e estímulo aos alunos, além de seu caráter inovador.

Agradecimentos

Os autores agradecem a FAPESP pelo apoio financeiro para o desenvolvimento do projeto (Processo 2003/08270-5). Este trabalho foi apresentado na forma de painel durante a II Semana de Inovações Pedagógicas da UFSCar (2008).



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BELHOT, R. V.; FIGUEIREDO, R. S.; MALAVÉ, C. O. O Uso da Simulação no Ensino de Engenharia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA (COBENGE), 1, 2001, Rio Grande do Sul. **Anais**. Rio Grande do Sul: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2001, p. 1-11.

HARWARD, V.J.; Del ALAMO, J.A.; CHOUDARY, V.S. DeLONG, K. i-Labs: A Scalable Architecture for Sharing Online Experiments. **Intern. Conf. on Engineering Education**, Gainesville, Florida-USA, Oct. 2004.

KREITH, F. e BOHN, M. S. **Princípios de Transferência de Calor**. São Paulo, Pioneira Thomson Learning, 2003.

PINTO, J. C. e LAGE, P. L. **Métodos Numéricos em Problemas de Engenharia Química**. Rio de Janeiro, Série Escola Piloto em Engenharia Química COPPE/UFRJ, E-papers serviços editoriais Ltda, 2001.

WORKSHOP Citação de referências e documentos eletrônicos. Disponível em: <<http://como.cheng.cam.ac.uk/conf.workshop.html>> Acesso em: 16 fevereiro 2008.

HEAT TRANSFER EXPERIMENT OPERATED REMOTELY OVER THE INTERNET

Abstract: *This work describes the use of a didactic experiment of heat transfer due to conduction in a cylinder rod subject to convection from the surface. The experiment was remotely operated throughout the internet during a lecturer of “Analysis and Simulation of Chemical Processes” at UFSCar campus. The experiment was performed by teams of third*

year chemical engineering students during the second semester (2007 academic year). The experiment is physically located in the Chemistry Department of Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras of Ribeirão Preto city (FFCLRB – USP – Ribeirão Preto). This experiment was developed in Tidia/KyaTera-FAPESP project. The WebLab access is made by means of an Internet navigator in the following address: <http://143.107.221.168/condtemp.html>. During the experimental lecture the mathematical modelling of the problem, their boundary conditions and the simplify hypothesis used in the problem statement was presented to the students. A numerical solution of the problem using the finite difference technique was presented. The temperature profile simulated by the model was compared to the collected experimental data. The convective heat transfer coefficient was adjusted to fit the model to the experimental data. From the results obtained, it can be considered that the WebLab is an important tool that brings lab experiences into the lecture hall. Weblabs can provide an experience of collecting data from real experimental equipment without having to physically be in the laboratory.

Key-words: *WebLab, Education, Internet.*