

# CONSTRUÇÃO DE UMA TORRE DE RESFRIAMENTO DE BANCADA PARA O ENSINO DE OPERAÇÕES UNITÁRIAS

Ricardo Schimtz Ongaratto<sup>a</sup>, Júlia Ribeiro Sarkis<sup>b</sup>, Rosane Rech<sup>c</sup>

## RESUMO

Este estudo apresenta a construção de uma torre de resfriamento de bancada para a utilização na disciplina de Operações Unitárias da Engenharia de Alimentos III do curso de Engenharia de Alimentos da UFRGS. Também se avaliou a influência da vazão e da temperatura da água de entrada e de diferentes recheios sobre o coeficiente volumétrico global de transferência de massa e sobre a eficiência da torre. A torre foi construída em acrílico, com altura de 0,85 m e base quadrada de 0,0225 m<sup>2</sup>. Para cada recheio montou-se um planejamento experimental do tipo delineamento composto central rotacional com as variáveis temperatura e vazão da água de entrada. A partir disso é possível concluir que o aumento da temperatura diminui o coeficiente de transferência de massa e aumenta a eficiência da torre e que o aumento da vazão, ao contrário, diminui sua eficiência. Além disso, pode-se afirmar que, tanto para o coeficiente de transferência de massa quanto para a eficiência, torres recheadas são melhores que torres sem recheio e que os anéis vazados foram melhores que os anéis fechados.

*Palavras-chave:* Coeficiente volumétrico. Eficiência. Torre de resfriamento. Transferência de massa.

## ABSTRACT

In this work, a bench scale cooling tower was built to be used in Unit Operations of Food Engineering class. The influence of temperature and flow of entering water over the over-all mass-transfer coefficient and over the efficiency was evaluated for three different tower packaging and for the empty tower. The cooling tower was constructed with acrylic material with 0.85 m height and 0.0225 m<sup>2</sup> square cross-sectional area. An experimental central composite design was used to obtain values for the over-all mass-transfer coefficient and for the efficiency of the cooling tower. Using these results it was possible to conclude that temperature increase decreases the over-all mass-transfer coefficient and increases the efficiency of the tower. The increase of the water flow, instead, decreases its efficiency. Also, it's possible to affirm that, for the over-all mass-transfer coefficient and for the efficiency the cooling tower, packaged towers are better than non-packaged ones and that pack-rings with void spaces on the ring wall are better than the ones without.

*Keywords:* Cooling tower. Efficiency. Mass transfer. Volumetric coefficient.

<sup>a</sup> Engenheira de Alimentos. Aluna do P PG em Engenharia Química da UFRGS. Rua Engenheiro Luiz Englert, s/nº - Prédio 12104 - Campus Central - Porto Alegre - RS - CEP: 90040-040. E-mail: juliasarkis@gmail.com

<sup>b</sup> Orientador. Doutor em Ciências. Departamento de Tecnologia de Alimentos, Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500 - Prédio 43.212 - CEP: 91540-000 - Bairro Agronomia - Campus do Vale - Porto Alegre - RS. Fone: (51) 33086683. Fax: (51) 33087048. E-mail: rrech@ufrgs.br

<sup>c</sup> Orientador. Doutor em Ciências. Departamento de Tecnologia de Alimentos, Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Av. Bento Gonçalves, 9500 - Prédio 43.212 - CEP: 91540-000 - Bairro Agronomia - Campus do Vale - Porto Alegre - RS. Fone: (51) 33086683. Fax: (51) 33087048. E-mail: rrech@ufrgs.br

## INTRODUÇÃO

Os métodos tradicionais de ensino de engenharia baseados em aulas exclusivamente expositivas, repetitivas e de memorização, têm se mostrado pouco eficientes para motivar o aluno a aprender. O uso de *softwares* de simulação tem se tornado um recurso didático estratégico, e estes têm sido aplicados com ótimos resultados (MASSUKADO; SCHALCH, 2007; MARIANI; MARTIM, 2007). Contudo, a utilização de plantas reais num curso de engenharia agrega muito valor à formação dos alunos. Apesar dos resultados obtidos em simuladores computacionais serem similares aos obtidos em uma planta didática, nota-se um interesse e entusiasmo maior por parte dos alunos em realizar trabalhos em plantas reais do que em simuladores. Numa planta real os alunos veem na prática que seus projetos realizados em teoria funcionam e que os cálculos que levaram a estes são válidos (MARTIN; KASSAB, 2006).

A maior parte da água utilizada em processos industriais tem como função o resfriamento de produtos e processos. A grande disponibilidade de água nas áreas industriais e a sua capacidade de troca térmica fizeram da água o meio para transferência de calor mais usado em processos industriais e nas suas utilidades (KEMMER, 1998). Como quase todos os processos industriais requerem controle de temperatura, as torres de resfriamento de água fazem parte de muitas fábricas. Seu funcionamento se baseia em um princípio no qual energia é removida da água quente em contato direto com ar seco relativamente frio (MILOSAVLJEVIC; HEIKKILÄ, 2000).

O resfriamento da água é resultante da transferência simultânea de calor e massa. A transferência de calor ocorre como resultado da diferença de temperatura entre a água e o ar. A transferência de massa ocorre devido à diferença de pressão parcial do vapor do ar seco e da interface ar-água, o que resulta na evaporação de uma porção de água para o ar. A entalpia necessária para esta evaporação é retirada da água remanescente que, como resultado, é resfriada (IBRAHIM; NABHAM; ANABTAWI, 1995).

O projeto de torres de resfriamento é ensinado na disciplina de Operações Unitárias da Engenharia de Alimentos III, do curso de Engenharia de Alimentos da UFRGS. Com o objetivo de enriquecer as aulas teóricas e possibilitar uma melhor visualização do processo de resfriamento

e suas variáveis, foi projetada e construída uma torre de resfriamento de bancada. O trabalho ainda avaliou a influência de três variáveis independentes no coeficiente volumétrico global de transferência de massa da fase gasosa e na eficiência da torre de bancada. As três variáveis analisadas foram vazão, temperatura da água a ser resfriada, e diferentes recheios para a torre.

## CONSTRUÇÃO DA TORRE DE RESFRIAMENTO

A torre de resfriamento foi construída com peças de acrílico transparente de 4 mm de espessura (4 peças 10 cm x 15 cm, 4 peças 5 cm x 20 cm, 1 peça 21 cm x 21 cm, 2 peças 70 cm x 15 cm, 2 peças 75 cm x 15 cm, 1 peça 15 cm x 15 cm). Utilizou-se ainda duas telas de aço-inoxidável de 14,0 cm por 14,5 cm, quatro parafusos de 6 mm de diâmetro e 20 cm de comprimento, 1 tubo de PVC com 2 cm de diâmetro e 20 cm de comprimento, 1 terminação de tubo de PVC de 2 cm de diâmetro, 1 adaptador de PVC de 2 cm para rosca de ½ polegada, uma torneira de ½ polegada, uma rosca dupla de ½ polegada, mangueira de silicone de 2,5 cm de diâmetro, 1 miniventilador (NETWORK, modelo NW309RT-620). A entrada de água na torre foi realizada através de um banho termostático (Haake, modelo DC30) dotado de uma bomba de circulação de água.

A torre de resfriamento foi montada conforme mostrado na Figura 1. É composta por um corpo de acrílico, um ventilador, um corpo coletor de gotículas, um aspersor de água, uma válvula conectada a um banho termostático e uma bandeja coletora de água. A torre possui 0,85 m de altura total e base quadrada 0,0225 m<sup>2</sup>. Em sua base, está colocada uma bandeja para coleta da água que foi resfriada e a ela está conectado o duto que devolve a água ao banho termostático. O ventilador fica na parte superior da torre, acima do corpo coletor de gotículas e tem como função aspirar o ar que passará em contracorrente com a água quente.

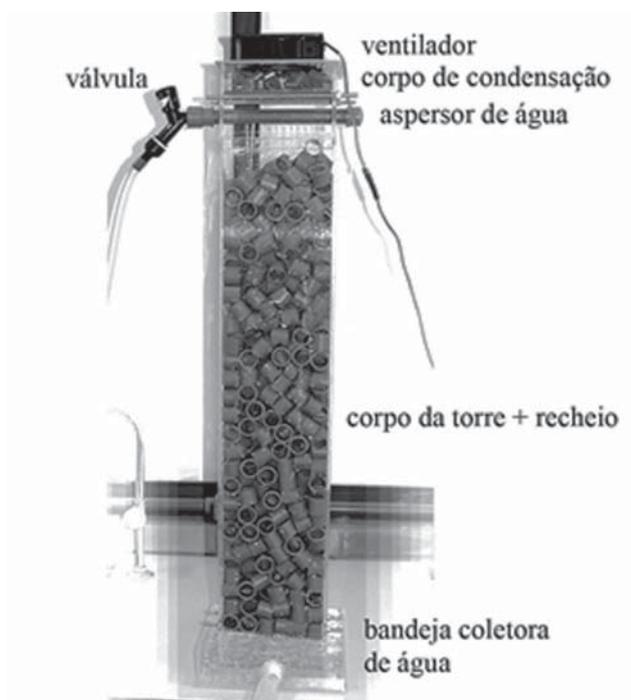


Figura 1 - Torre de resfriamento de bancada

O corpo coletor de gotículas é composto por uma camada de 3 cm de um recheio de anéis de plástico com 1,2 cm de diâmetro e 1,0 cm de comprimento apoiados sobre uma tela de aço. Sua função é reter as gotas de água que são arrastadas pela corrente de ar antes de atingir o topo da torre, a fim de evitar alterações nas medidas de temperatura efetuadas. Imediatamente abaixo do corpo coletor de gotículas está o aspersor de água, feito com um tubo de PVC, que está conectado ao banho termostático e tem como função distribuir a água quente através do recheio. A válvula conectada ao aspersor de água é utilizada para regular a vazão de entrada de água. O recheio fica distribuído de maneira aleatória, ocupando toda a área transversal da torre e 0,70 m de altura.

O aspersor de água foi montado com um tubo de PVC com 20 cm de comprimento no qual foram feitos 16 furos para a distribuição da água sobre o recheio conforme o padrão mostrado na Figura 2.

Como recheios para a torre utilizou-se anéis de PVC com 2,5 cm de diâmetro e 2,0 cm de altura, anéis vazados com 2,5 cm de diâmetro e 2,0 cm de altura, e anéis vazados com 2,0 cm de diâmetro e 2,0 cm de altura, mostrados na Figura 3.

A instrumentação utilizada consistiu de 3 termômetros e 1 psicrômetro (Wilh Lambrecht, modelo Typ0002520170300).



Figura 2 - Padrão de furos do aspersor de água da torre de resfriamento

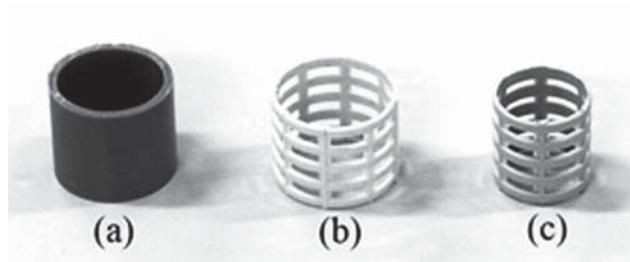


Figura 3 - Recheios da torre de resfriamento: (a) anéis de PVC com 2,5 cm de diâmetro e 2,0 cm de altura, (b) anéis vazados com 2,5 cm de diâmetro e 2,0 cm de altura, (c) anéis vazados com 2,0 cm de diâmetro e 2,0 cm de altura

## ESTUDO DA VARIAÇÃO DO $K_y a$ COM A VAZÃO E A TEMPERATURA DA ÁGUA QUE ESCOA PELA TORRE

Para estudar o comportamento do coeficiente volumétrico global de transferência de massa da fase gasosa ( $K_y a$ ) com a variação da temperatura e da vazão da água que escoava através da torre, foi utilizado um delineamento composto central rotacional (DCCR) (RODRIGUES; IEMMA, 2005). Os parâmetros analisados nesse experimento foram organizados conforme mostrado na Tabela 1.

Este estudo foi realizado para os três recheios e para a torre vazia (sem recheio). Durante os experimentos foram coletados os seguintes dados: temperatura de bulbo seco e de bulbo úmido do ar na saída da torre, temperatura e umidade relativa do ar na entrada da torre, e temperatura de saída da água da torre. A temperatura de entrada da água na torre foi controlada através do banho termostático e a vazão de água foi acertada cronometrando-se o tempo de escoamento de 1 (um) litro de água através da torre.

Tabela 1 - DCCR utilizado neste experimento

Variáveis codificadas		Variáveis reais	
$X_1$	$X_2$	Temp. (°C)	Vazão (L/s)
-1	-1	33	0,023
-1	1	33	0,037
1	-1	47	0,023
1	1	47	0,037
-1,414	0	30	0,030
1,414	0	50	0,030
0	-1,414	40	0,020
0	1,414	40	0,040
0	0	40	0,030
0	0	40	0,030
0	0	40	0,030

O coeficiente volumétrico global de transferência de massa da fase gasosa ( $K_y a$ ) e a eficiência ( $\eta$ ) da torre foram calculados conforme a metodologia apresentada na literatura (FOUST et al., 1982). Sobre os parâmetros calculados,  $K_y a$  e  $\eta$ , foi realizada uma análise de variância (ANOVA) e elaborada uma superfície de resposta utilizando o programa *STATISTICA 7.0 (StatSoft)*.

A Figura 4 apresenta a variação do  $K_y a$  com a vazão e a temperatura da água que entra na torre para os diferentes recheios e para a torre vazia. Observa-se que em todos os casos a temperatura possui uma forte influência sobre o coeficiente volumétrico global de transferência de massa, que aumenta com a diminuição da temperatura da água.

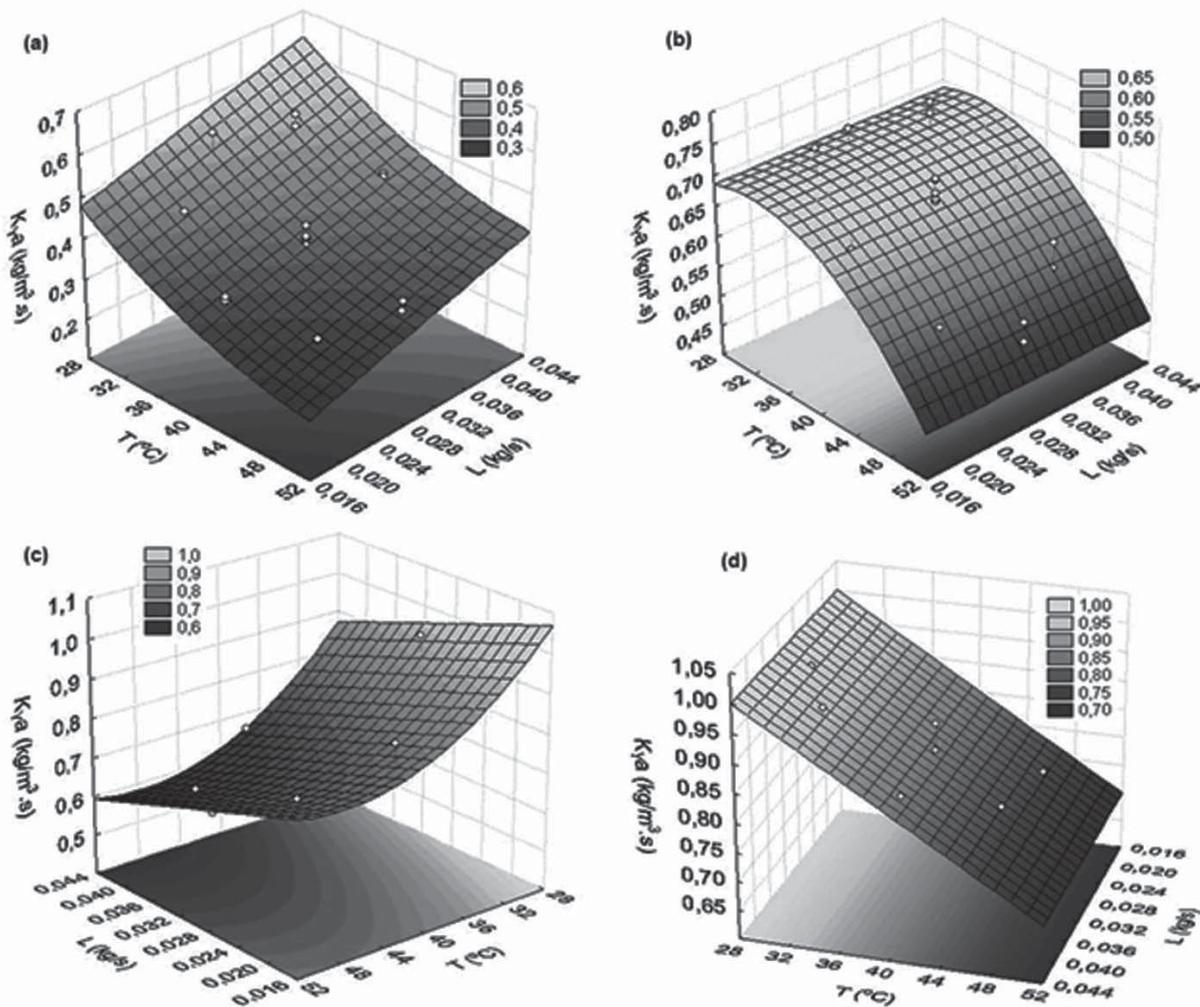


Figura 4 - Influência da vazão ( $L$ ) e da temperatura ( $T$ ) da água de entrada sobre o coeficiente volumétrico global de transferência de massa da fase gasosa ( $K_y a$ ) da torre. (a) torre sem recheio:  $K_y a = 1,076 + 0,000291 T^2 - 0,00328 T - 5,785 L$ ;  $R^2 = 0,93$ ; (b) torre com anéis de PVC com 2,5 cm de diâmetro:  $K_y a = 0,1004 - 0,000571 T^2 + 0,0369 T$ ;  $R^2 = 0,77$ ; (c) torre com de anéis vazados com 2,0 cm de diâmetro:  $K_y a = 2,59 + 0,00075 T^2 - 0,0715 T - 7,02 L$ ;  $R^2 = 0,87$ ; (d) com o recheio de anéis vazados com 2,5 cm de diâmetro: Equação:  $K_y a = 1,35 + 0,0125 T$ ;  $R^2 = 0,83$

O aumento da temperatura da água de entrada aumenta também a temperatura do ar. Com este aumento de temperatura o ar tem um aumento na sua viscosidade, o que aumenta a espessura da camada limite. Uma camada limite mais espessa dificulta a transferência de massa da fase gasosa, e, conseqüentemente, diminui o valor do coeficiente de transferência de massa da fase gasosa,  $K_y$ . A temperatura não deve ter influência na área de transferência de massa,  $a$ , do coeficiente volumétrico,  $K_y a$ , estudado neste trabalho.

Já a vazão da água possui pouca (torre com anéis vazados com 2,0 cm de diâmetro e torre sem recheio) ou nenhuma (torre com anéis vazados e de PVC com 2,5 cm de diâmetro) influência sobre a transferência de massa nas torres.

Na torre sem recheio o aumento da vazão, aumenta  $K_y a$ . A influência no coeficiente de transferência de massa da torre sem recheio ocorre porque, nos experimentos com menor vazão, a água desce diretamente para a parte inferior da torre, enquanto nos experimentos com maior vazão a água, devido à maior pressão com que é dispersa, atinge as paredes da torre, aumentando a área para transferência de massa.

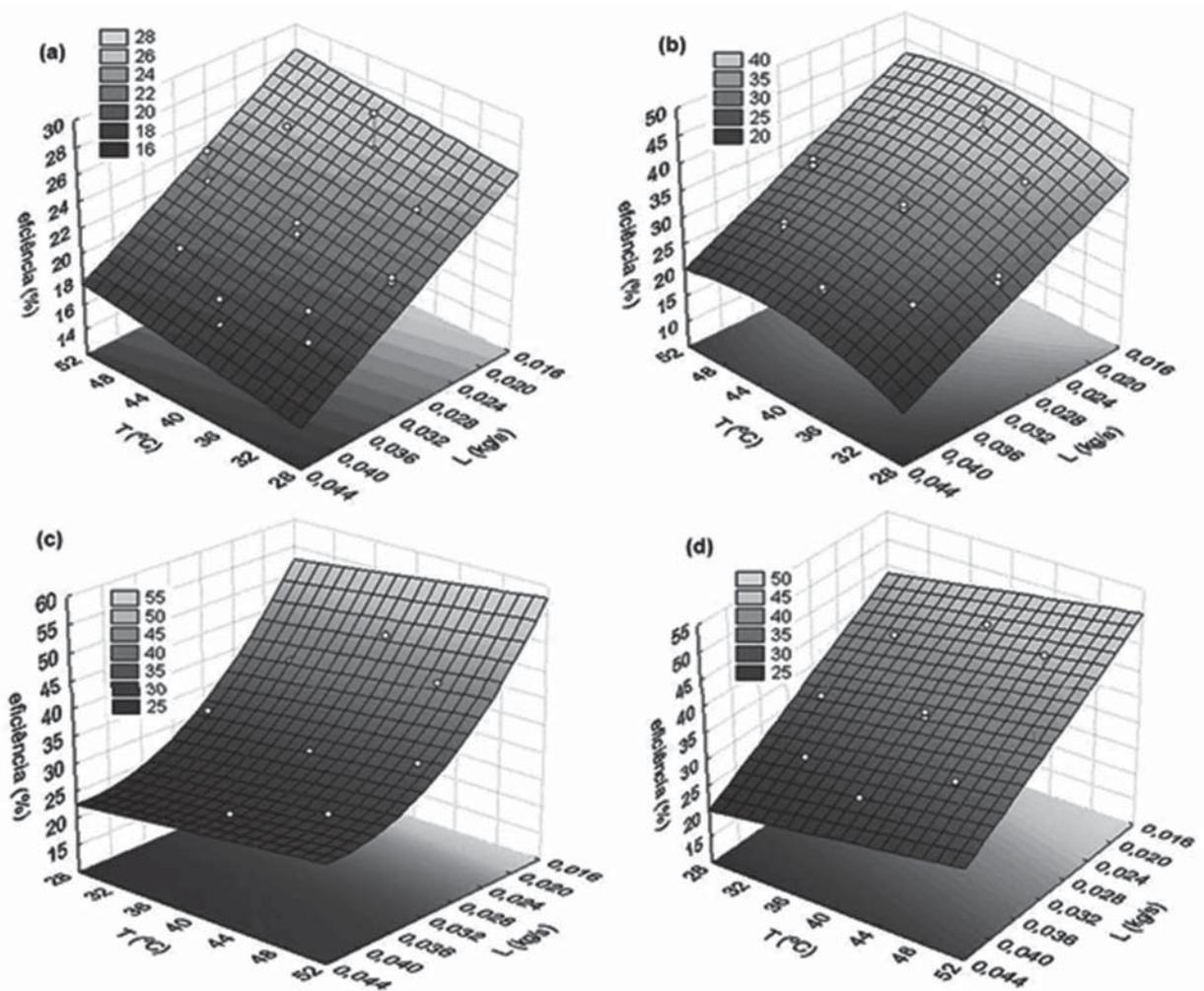


Figura 5 - Influência da vazão ( $L$ ) e da temperatura ( $T$ ) da água de entrada sobre a eficiência ( $\eta$ ) da torre. (a) torre sem recheio:  $\eta = 29,01 + 0,099 T - 375,52 L$ ;  $R^2 = 0,81$ ; (b) torre com anéis de PVC com 2,5 cm de diâmetro:  $\eta = 5,628 + 2,316 T - 0,026 T^2 - 791,73 L$ ;  $R^2 = 0,95$ ; (c) torre com anéis vazados com 2,0 cm de diâmetro:  $\eta = 32,27 + 3,037 T + 3,985 L^2 - 15,103 L$ ;  $R^2 = 0,98$ ; (d) torre com anéis vazados com 2,5 cm de diâmetro:  $\eta = 35,44 + 4,164 T - 11,682 L$ ;  $R^2 = 0,94$

Na torre com recheio de anéis vazados com 2,0 cm de diâmetro o aumento da vazão, diminui  $K_y a$ . Este resultado pode ser explicado pelo fato de que o aumento da vazão diminui a área de contato para a transferência de massa em relação ao volume de água que passa pela torre, o parâmetro  $a$  do coeficiente volumétrico de transferência de massa,  $K_y a$ .

Os resultados obtidos neste estudo estão de acordo com o enunciado por Khan (2003), que mostrou que mantendo a vazão de ar constante e aumentando a vazão de água, a área de contato necessária para a convecção e para evaporação é reduzida, resultando em temperaturas de saída mais altas e redução das taxas de transferência de calor. Para os recheios de 2,5 cm, tanto anéis vazados, como anéis de PVC, este fenômeno não foi observado para a faixa de vazões estudada.

A Figura 5 mostra a variação da eficiência da torre ( $\eta$ ) com a temperatura e a vazão da água que entra na torre. Em todos os casos a eficiência da torre aumenta com o aumento da temperatura da água de entrada, ao contrário do que ocorre para o  $K_y a$ , que diminui com o aumento da temperatura. Este resultado ocorre porque o aumento da temperatura aumenta também o gradiente de transferência de calor da torre. Sendo esta uma Operação Unitária controlada simultaneamente pelas transferências de calor e massa, o aumento do gradiente de temperatura, aumenta a transferência de calor, que, por sua vez, aumenta a transferência de massa (umidade), aumentando a eficiência global do sistema.

A vazão teve influência significativa na eficiência em todos os experimentos. O aumento da vazão fez com que o valor da eficiência diminuísse significativamente, devido ao fato de terem sido testadas diferentes vazões de água e a vazão de ar ter sido mantida constante. Como o ventilador usado não possui controle de velocidade, não foi possível alterar a vazão de ar, por isso, aumentando a vazão de água, aumentamos a quantidade de água que deve ser resfriada pela mesma quantidade de ar em contracorrente.

Estes resultados estão de acordo com os encontrados por Kim e Smith (2001), cujo trabalho mostrou que a eficiência de um sistema de resfriamento aumenta com a temperatura e diminui com a vazão da água que entra na torre.

## INFLUÊNCIA DOS DIFERENTES RECHEIOS SOBRE O $K_y a$ E A EFICIÊNCIA DA TORRE

Para avaliar os recheios utilizados deve ser levada em conta a influência, tanto da temperatura, quanto da vazão. Com o objetivo de comparar os recheios utilizados foram elaborados dois tipos de gráfico: variando a vazão e mantendo a temperatura constante e variando a temperatura e mantendo a vazão constante. As Figuras 6 e 7 apresentam o  $K_y a$  para vazão constante de 0,030 kg/s em três diferentes temperaturas: 30 °C, 40 °C e 50 °C e para temperatura constante de 40 °C utilizando três diferentes vazões: 0,020 kg/s, 0,030 kg/s e 0,040 kg/s. Os resultados mostram que a transferência de massa é melhor nas torres recheadas do que na torre vazia. Também se observa que a transferência de massa é mais eficiente nos anéis vazados do que nos anéis de PVC e que entre os recheios vazados, o de maior diâmetro teve desempenho levemente melhor.

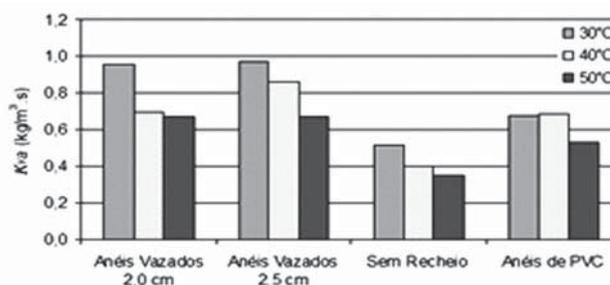


Figura 6 - Comparação entre o  $K_y a$  nos diferentes para diferentes recheios na vazão de 0,030 kg/s de água

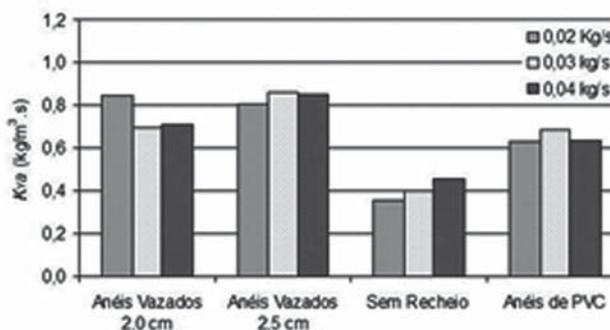


Figura 7 - Comparação entre o  $K_y a$  dos recheios testados para a temperatura de 40 °C

As Figuras 8 e 9 mostram os mesmos gráficos para a eficiência da torre. A partir da análise dos mesmos é possível concluir que a torre sem recheio apresentou menor eficiência que as torres recheadas e que para os anéis vazados a eficiência foi maior do que para os anéis fechados de PVC.

Com isto podemos ver que a mudança de recheios afetou os resultados obtidos, o que confirma o que foi dito por Bedekar (1998) que os recheios têm um importante papel no aumento da área de contato efetiva entre o ar e a água para promover melhor transferência de calor e massa.

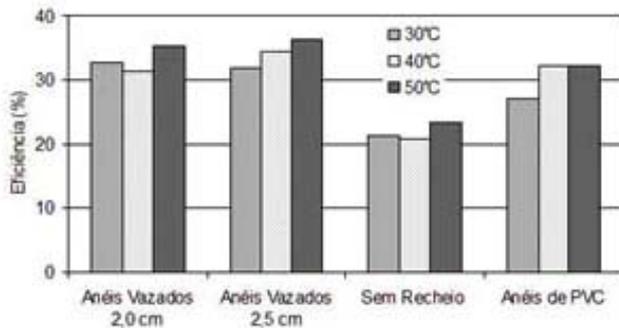


Figura 8 - Comparação entre a eficiência dos recheios testados na vazão de 0,030 kg/s de água

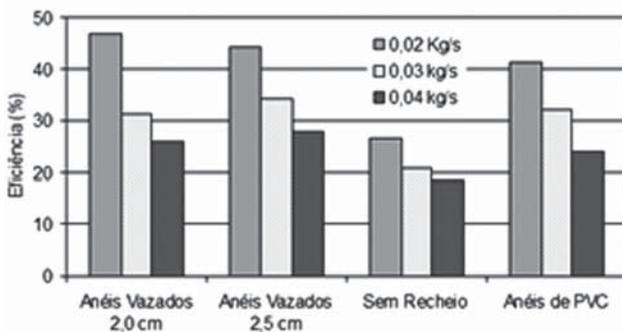


Figura 9 - Comparação entre a eficiência dos recheios testados para a temperatura de 40 °C

## CONCLUSÕES

A montagem da torre de resfriamento e o estudo dos diferentes recheios permitiu aos estudantes envolvidos, além de utilizar os conhecimentos adquiridos durante o curso nas disciplinas de Transferência de calor e massa e Operações unitárias, desenvolverem autonomia e criatividade para a solução do problema (construção da torre e utilização de recheios) proposto. Uma vez pronta, o estudo da variação dos parâmetros

de projeto  $K_y a$  e eficiência com a variáveis de entrada possibilitou aos estudantes visualizar na prática o que haviam aprendido na teoria em sala de aula. Atualmente a torre de resfriamento está sendo utilizada na disciplina de Operações Unitárias da Engenharia de Alimentos III.

O custo total da torre, excluindo-se o banho termostático e o higrômetro, já existentes no laboratório e utilizados também para outros experimentos, ficou em torno de R\$ 500,00. Desta forma, acreditamos que o projeto e a construção de equipamentos é uma forma eficiente e de baixo custo para proporcionar aos alunos dos cursos de engenharia um aprendizado mais efetivo dos processos industriais com os quais terão contato em sua vida profissional.

A experiência positiva sobre a construção da torre de resfriamento também inspirou a criação de uma nova disciplina eletiva no curso de Engenharia de Alimentos da UFRGS – Projetos e práticas em operações unitárias – implementada a partir do primeiro semestre de 2009. Nesta disciplina o aluno desenvolverá uma atividade prática na área de operações unitárias. Esta prática poderá ser: a) projeto, construção e validação com experimentos de um equipamento de operações unitárias; b) proposta de modificações e/ou melhorias em um equipamento já existente, construção e validação das modificações implementadas; c) o estudo aprofundado de uma dada operação unitária, com atividades práticas que permitam ao aluno visualizar a influência dos diferentes parâmetros do processo na operação estudada, modelagem matemática e cálculo de parâmetros das equações de projeto que governam a operação escolhida.

Nesta nova disciplina pretende-se desenvolver um processo de aprendizagem com autonomia, onde a aprendizagem seja compartilhada entre o educador e o educando, em que o docente atue como um mediador do processo de aprendizagem e estimule os processos de indução e dedução de hipóteses e soluções, conforme proposto por Nori (2003, p. 5), citado por Massukado e Schalch (2007).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEDEKAR, S. V.; NITHIARASU, P.; SEETHARAMU, K. N. Experimental Investigation of the performance of a counter-flow, packed-bed mechanical cooling tower. *Energy*, Oxford, v. 23, n. 21, p. 943-947, 1998.

FOUST, A. S. et al. *Princípios das Operações Unitárias*. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1998. 670p.

IBRAHIM, G. A.; NABHAM, M B.W; ANABTAWI, M. Z. An investigation into a falling film type cooling tower. *International Journal of Refrigeration*, Surrey, v. 18, n. 48, p. 557-564, 1995.

KEMMER, F. N. *The NALCO Water Handbook*. 2.ed. New York: McGraw-Hill, 1998. 985p.

KHAN, J.; YAQUB, M.; ZUBAIR, S. M. Performance characteristics of counter flow wet cooling towers. *Energy Conversion and Management*, Oxford, n. 44, p. 2073-2091, 2003.

KIM, J.; SMITH, R. Cooling water system design. *Chemical Engineering Science*, Oxford, n. 56, p. 3641-3658, 2001.

MARIANI, V. C.; MARTIM, E. Ferramentas computacionais na sala de aula: minimizando o descompasso entre o conhecimento acadêmico e a realidade. *Revista de Ensino de Engenharia*, v. 16, n. 1, p. 19-26, 2007.

MARTIN, P. A.; KASSAB, F. Uso de trocador de calor como ferramenta didática para o ensino de modelagem e sistemas de controle. *Revista de Ensino de Engenharia*, v. 25, n. 2, p. 3-9, 2006.

MASSUKADO, M. M.; SCHALCH, V. Simulação no ensino de engenharia – Avaliando a aplicação do software SIMGERE sob o paradigma do “aprender a aprender”. *Revista de Ensino de Engenharia*, v. 26, n. 2, p. 40-46, 2007.

MILOSAVLJEVIC, N.; HEIKKILÄ, P. A Comprehensive approach to cooling tower design. *Applied Thermal Engineering*, Oxford, v. 21, p. 899-915, 2001.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. *Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos*. Campinas: Casa do Pão Editora, 2005. 326p.

## DADOS BIOGRÁFICOS DOS AUTORES

### Ricardo Schimtz Ongaratto



Possui graduação em Engenharia de Alimentos pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2006). Atualmente, é aluno de mestrado em Engenharia de Alimentos com ênfase em engenharia de processos na Universidade Estadual de Campinas.

### Júlia Ribeiro Sarkis



Possui graduação em Engenharia de Alimentos pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2008) e atualmente é aluna de mestrado do Departamento de engenharia química da UFRGS. Áreas de interesse: transferência de calor e massa e processos na indústria de alimentos.

### Rosane Rech



Formada em Engenharia Química pela UFRGS, possui Mestrado em Engenharia Química e Doutorado pelo PPG em Biologia Celular e Molecular, ambos da UFRGS. Atualmente é professora do Instituto de Ciência e Tecnologia de Alimentos (ICTA) da UFRGS e coordenadora do curso de Engenharia de Alimentos. Suas áreas de atuação são operações unitárias e bioengenharia.