

ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA NOS PROCESSOS DE EBULIÇÃO E ABSORÇÃO DE SOLUÇÕES DE H₂O-LiBr.

José de Araujo Fonseca Junior

UnB – Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica, LaAr – Laboratório de Ar condicionado e Refrigeração. Asa Norte, Brasília/DF.
zkaraujo@brturbo.com.br

João Manoel Dias Pimenta

pimenta@unb.br

Mirna Alexandra Costa Carvalho

mirna_alex@hotmail.com

Felipe Guimarães dos Santos

felipegs.br@gmail.com

Resumo: O presente artigo descreve trabalho de mestrado em ciências mecânicas, visando determinar os coeficientes de transferência de calor e massa nos processos de ebulição e absorção de soluções aquosas de brometo de lítio. Para tal será necessário o uso de uma unidade de refrigeração por absorção experimental, que permitirá confrontar dados experimentais com valores de simulações de desempenho obtidos da modelagem do ciclo por absorção e com correlações disponíveis em literatura. Será assim possível prover informações para aplicações em projetos e construções de unidades compactas de absorção.

Palavras-chave: Refrigeração, Absorção, Filme vertical descendente, Coeficiente de transmissão de calor, Coeficiente de transferência de massa.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de refrigeração baseados no ciclo por absorção tem experimentado altos e baixos desde sua primeira aplicação efetiva em 1859. Predominantes no início da indústria de refrigeração e ar condicionado, tais sistemas perderam competitividade quando do advento da distribuição de energia elétrica a baixos custos entre o final do século XIX e o início do século XX.

Atualmente, porém, face aos crescentes cuidados com questões energéticas e ambientais envolvendo o uso da refrigeração e ar condicionado, tem-se observado um interesse renovado nos ciclos de absorção. Além disso, um novo contexto de aplicação de sistemas de refrigeração por absorção tem se apresentado como desafio tecnológico: a aplicação de sistemas compactos para aplicações de pequeno porte nos setores residencial e comercial.

Para o desenvolvimento de sistemas por absorção compactos, um tema de pesquisa é de fundamental importância: o estudo dos processos de intensificação da absorção e ebulição de soluções água-brometo de lítio (H₂O-LiBr), o que tem motivado diferentes pesquisas recentes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Revisões sobre tecnologias por absorção (Srikhirin et al, 2001) e sobre correlações para descrever o processo de transferência de calor e massa para soluções aquosas de LiBr (brometo de lítio) são encontradas na literatura científica (Iyer et al, 1988, Killion e Garimella, 2001, Martínez e Pinazo, 2003, Yokozeki, 2005) colocando em evidência a importância da definição de correlações adequadas para o projeto e análise do processo de absorção e ebulição de soluções aquosas de LiBr em equipamentos de refrigeração e ar condicionado.

Alguns trabalhos (Joudi et al, 2001, Florides et al, 2002) têm procurado desenvolver a modelagem matemática do ciclo por absorção, e enfatizam a importância de se dispor de correlações adequadas para a quantificação dos coeficientes de transferência de calor e massa nos processo de absorção e ebulição.

A necessidade de um maior desenvolvimento de correlações tem motivado sobretudo a pesquisa experimental dos processos de absorção (Rivera et al, 2000, Medrano et al, 2002, Takamatsu et al, 2003) e de ebulição (Lee et al, 1991, Varma et al, 1994, Rivera et al, 1999).

No que diz respeito ao presente trabalho, os resultados de Medrano et al (2002) e de Takamatsu et al. (2003) são de particular interesse. Nos mesmos os autores investigaram experimentalmente a absorção do vapor d'água em um filme laminar ondulado de H_2O -LiBr, escoando sobre a superfície lisa de um tubo vertical, analisando os diferentes parâmetros operacionais e construtivos afetando o escoamento e tendo por consequência a modificação dos coeficientes de transferência de calor e massa durante a absorção.

Por sua vez, a ebulição de soluções aquosas de LiBr é investigada por trabalhos como os de Lee et al (1991), Varma et al. (1994) e Rivera et al (1999), nos quais o processo é estudado para diferentes condições e geometrias, demonstrando a necessidade de estudos adicionais.

Takamatsu et al (2003) e Medrano et al (2001) são os trabalhos que nos dão a base para o projeto e construção do aparato, conforme as Figuras 1 e 2.

O sistema opera de forma contínua. É constituído basicamente, de um gerador, um absorvedor, trocadores de calor, bombas para circulação dos fluidos envolvidos e uma bomba de vácuo. A instrumentação consta de medidores de vazão, transdutores de pressão, sensores de temperatura e densímetros.

O absorvedor consiste de dois tubos verticais concêntricos, com 1,2 a 1,5 m de comprimento. Por dentro do tubo interno escorre um filme contínuo de solução de LiBr em contato com vapor d'água, ambos admitidos a partir dos seus respectivos distribuidores, na parte superior do absorvedor. O tubo externo forma então uma "camisa" por onde circula água, em contracorrente com a solução de LiBr, removendo o calor do processo de absorção.

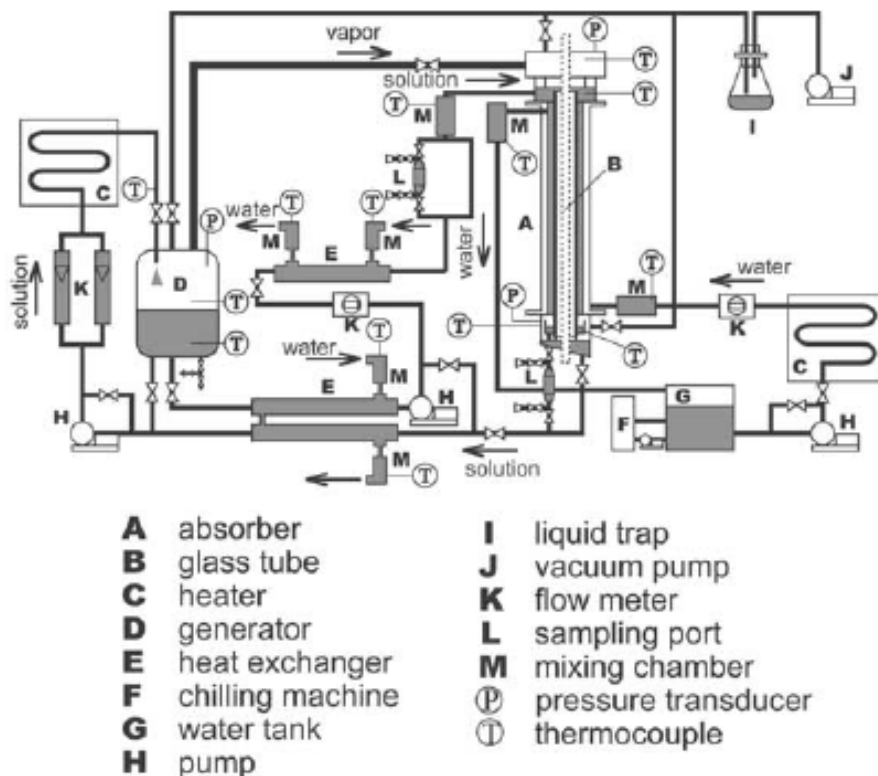


Figura 1: Aparato experimental utilizado por Takamatsu et al (2003)

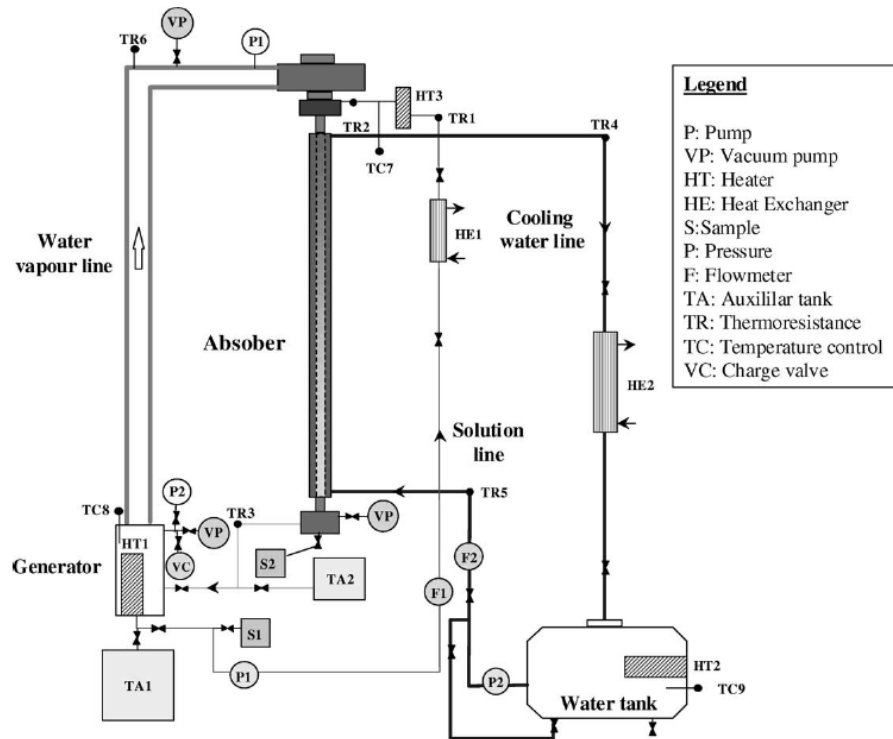


Figura 2: Aparato experimental utilizado por Medrano et al (2001).

3. CONCEITOS TEÓRICOS

O processo de evaporação de um líquido na sua interface com uma superfície sólida, tem o nome de *ebulição*. O fenômeno ocorre quando a temperatura da superfície do sólido T_s excede a temperatura de saturação do líquido T_{sat} , para a pressão reinante sobre a superfície do líquido. O calor é transferido da superfície sólida para o líquido, de acordo com a lei de resfriamento de Newton,

$$q'' = h (T_s - T_{sat}) = h \Delta T_e \quad (1)$$

onde,

q''	fluxo de calor convectivo	$[W/m^2]$
h	coeficiente de transferência por convecção	$[W/m^2 \cdot K]$
ΔT_e	diferença de temperatura ($\equiv T_s - T_{sat}$)	$[K]$

A ebulição pode ocorrer sob várias condições, dando-se foco neste trabalho à ebulição em piscina, onde o líquido encontra-se em repouso e seu movimento próximo à superfície ocorre devido à convecção natural e à mistura induzida pelo crescimento e desprendimento das bolhas de vapor formadas sobre a superfície. Tal forma de ebulição predomina em geradores de sistemas de refrigeração por absorção.

Existem vários regimes de ebulição em piscina. Trabalhos de Nukiyama (1934) e Drew e Mueller (1937), caracterizam bem essas diversas formas em função da diferença de temperatura (ΔT_e).

Ebulição com Convecção Livre: Ocorre quando se tem $\Delta T_e \leq 5^\circ C$. Nesse regime, há uma quantidade insuficiente de vapor em contato com a fase líquida para causar a ebulição na temperatura de saturação, o movimento do fluido é determinado quase que exclusivamente pelos efeitos da convecção livre.

Ebulição Nucleada: Ocorre no intervalo $5^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_e \leq 30^{\circ}\text{C}$. Nessa faixa, dois regimes diferentes de escoamento podem ser distinguidos. Na faixa em que $5^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_e \leq 10^{\circ}\text{C}$, formam-se bolhas isoladas no sítio de nucleação que ao se desprenderem da superfície, induzem uma considerável mistura do fluido próximo à superfície, aumentando substancialmente q'' e h . Já na faixa em que $10^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_e \leq 30^{\circ}\text{C}$, mais sítios de nucleação tornam-se ativos, instensificando-se a formação de bolhas. O aumento na formação de bolhas faz com que o vapor escape como jatos ou colunas, que se misturam subseqüentemente em cogumelos de vapor. Devido às altas taxas de transferência de calor comparadas com pequenos valores de ΔT_e , muitos dispositivos de engenharia são projetados para operarem no regime de ebulição nucleada.

Ebulição no Regime de Transição: Ocorre no intervalo $30^{\circ}\text{C} \leq \Delta T_e \leq 120^{\circ}\text{C}$. Também conhecida como região de ebulição em película instável ou ebulição em película parcial. Nesse regime, a formação de bolhas é tão rápida que uma película ou manta de vapor começa a se formar sobre a superfície. Devido à condutividade térmica do vapor ser muito menor do que a do líquido, h e q'' decrescem com o aumento de ΔT_e .

Ebulição em Película: Ocorre quando $\Delta T_e > 120^{\circ}\text{C}$. A superfície encontra-se completamente tomada por uma camada de vapor, a transferência de calor da superfície para o líquido ocorre por condução e radiação através do vapor.

Vários mecanismos físicos caracterizam os diferentes regimes de ebulição em piscina, por isso existe uma multiplicidade de correlações de transferência de calor para os processos de ebulição.

Ebulição Nucleada em Piscina: A dependência entre q''_{sup} em relação à ΔT_e caracteriza a primeira e a mais utilizada correlação para ebulição nucleada, desenvolvida por Rohsenow (1952):

$$q''_{\text{sup}} = \mu_l h_{fg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left(\frac{C_{p,l} \Delta T_e}{C_{s,f} h_{fg} \text{Pr}_l^n} \right)^3 \quad (2)$$

Onde os índices subscritos l e v indicam, respectivamente, os estados de líquido saturado e vapor saturado. O aparecimento da tensão superficial σ (N/m) se dá pelo efeito significativo que esta propriedade do fluido possui sobre a formação e o crescimento das bolhas. O coeficiente C_s , f e o expoente n dependem da combinação superfície – fluido.

Fluxo Térmico Crítico na Ebulição Nucleada em Piscina: O fluxo térmico crítico representa um ponto importante sobre a curva de ebulição, onde $q''_{\text{sup,c}} = q''_{\text{max}}$. Podemos desejar operar um processo de ebulição em uma região próxima a este ponto, mas devemos reconhecer o perigo de dissipar calor a uma taxa além desse limite. Kutateladze (1948), através de uma análise dimensional, e Zuber (1958), por meio de uma análise de estabilidade hidrodinâmica, obtiveram uma expressão que após substituições se apresenta como:

$$q''_{\text{max}} = 0,149 h_{fg} \rho_v \left[\frac{\sigma g(\rho_l - \rho_v)}{\rho_v^2} \right]^{1/4} \quad (3)$$

É importante observar que o fluxo térmico crítico depende significativamente da pressão, sobretudo através da dependência em relação à pressão da tensão superficial e do calor de vaporização.

Fluxo Térmico Mínimo: A ebulição no regime de transição possui pouco interesse prático, uma vez que ela só pode ser obtida com o controle da temperatura da superfície do aquecedor. Apesar de nenhuma teoria adequada ter sido desenvolvida para esse regime, as condições podem ser caracterizadas pelo contato periódico *instável* entre o líquido e a superfície aquecida. Contudo, o limite superior desse regime possui interesse, uma vez que ele corresponde à formação de uma manta ou película estável de vapor para uma condição de fluxo mínimo. Se o fluxo térmico cair abaixo desse fluxo mínimo, a película irá colapsar, causando o resfriamento da superfície e o estabelecimento de uma condição de ebulição nucleada. Através da Teoria da Estabilidade foi desenvolvida a seguinte expressão para o fluxo térmico mínimo $q''_{\text{sup}} = q''_{\text{min}}$ em uma grande placa horizontal.

$$q_{\min}^* = C \rho_v h_{fg} \left[\frac{g \sigma (\rho_l - \rho_v)}{(\rho_l + \rho_v)^2} \right]^{1/4} \quad (4)$$

Onde $C = 0,09$.

Ebulição com Película Estável em Piscina: Para excessos de temperatura além do ponto de Leidenfrost, uma película contínua de vapor cobre a superfície e não há contato entre a fase líquida e a superfície. Uma vez que as condições na película estável de vapor possuem uma grande semelhança com as existentes na condensação em película laminar, é usual basear as correlações da película de ebulição nos resultados obtidos da teoria da condensação. Assim o resultado que se aplica à ebulição em película sobre um cilindro ou esfera de diâmetro D é da forma:

$$\overline{Nu}_D = \frac{\overline{h}_{conv} D}{k_v} = C \left[\frac{g (\rho_l - \rho_v) h'_{fg} D^3}{\nu_v k_v (T_{sup} - T_{sat})} \right]^{1/4} \quad (5)$$

A constante C da correlação é igual a 0,62 para cilindros horizontais e 0,67 para esferas. O calor latente corrigido h'_{fg} leva em consideração a energia sensível necessária para manter a temperatura no interior da película de vapor acima da temperatura de saturação.

Em temperaturas elevadas ($T_{sup} \geq 300^\circ\text{C}$), a transferência de calor por radiação através da película de vapor se torna significativa. Uma vez que os efeitos da radiação atuam para aumentar a espessura da película, não é razoável admitir que o processo radiante e o convectivo sejam simplesmente aditivos. O cálculo do coeficiente total de transferência de calor pode ser obtido através de uma equação transcendental na forma:

$$\overline{h}^{4/3} = \overline{h}_{conv}^{4/3} + \overline{h}_{rad} \overline{h}^{1/3} \quad (6)$$

Se $\overline{h}_{rad} < \overline{h}_{conv}$, uma fórmula mais simples pode ser usada:

$$\overline{h} = \overline{h}_{conv} + \frac{3}{4} \overline{h}_{rad} \quad (7)$$

O coeficiente efetivo de radiação é determinado por:

$$\overline{h}_{rad} = \frac{\varepsilon \sigma (T_{sup}^4 - T_{sat}^4)}{T_{sup} - T_{sat}} \quad (8)$$

onde ε é a emissividade do sólido e σ é a constante de Stefan – Boltzmann.

O termo absorção descreve a transferência do vapor de uma mistura binária para um absorvente líquido. A absorção guarda uma similaridade com a condensação, uma vez que ocorre uma mudança de fase de vapor para líquido. Contudo, o processo de absorção implica na existência prévia de uma substância na fase líquida à entrada do absorvedor (Figura 3).

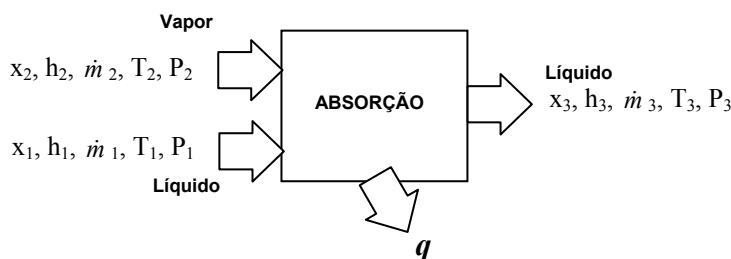


Figura 3: Representação esquemática do processo de absorção.

Vapor e a substância na fase líquida entram no absorvedor. Após o vapor ser absorvido pelo líquido na câmara de absorção, com a liberação do respectivo calor de absorção (processo exotérmico), o produto da reação (líquido) deixa o absorvedor. Aplicando-se o balanço de energia e massa podemos escrever que,

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad (9)$$

$$x_1 + x_2 = 1 \quad (10)$$

$$\dot{m}_1 x_1 + \dot{m}_2 x_2 = \dot{m}_3 x_3 \quad (11)$$

$$h_1 \dot{m}_1 + h_2 \dot{m}_2 = h_3 \dot{m}_3 \quad (12)$$

$$h_1 x_1 + h_2 x_2 = h_3 \quad (13)$$

$$q = h_2 - h_1 + f(h_1 - h_3) \quad (14)$$

onde,

q	quantidade de calor por unidade de massa de vapor absorvido	[kJ/kg]
h	entalpia	[kJ/kg]
$\dot{m}$	vazão em massa	[kg/s]
f	relação de circulação da solução (= $\dot{m}_3 / \dot{m}_2$)	
x	fração de massa (= massa de um componente [kg] / massa total de ambos componentes [kg])	

O brometo de lítio é um sal sólido cristalino altamente higroscópico. Quando dissolvido, tem uma tremenda afinidade por vapor d'água. Solução aquosa de brometo de lítio é utilizada como fluido de trabalho em sistemas de absorção, porque é uma das melhores opções entre centenas de combinações de fluidos pesquisadas. Apesar das inúmeras vantagens associadas com tal solução, alguns aspectos operacionais relacionados com a sua utilização em sistemas de absorção devem ser observados. Uma delas é a *cristalização* da solução, que pode ocorrer, dependendo das variações operacionais do sistema. A outra, é a *corrosão* que está associada com a utilização da solução de LiBr, que exige a adição de inibidores de corrosão para que os equipamentos tenham uma longa vida útil.

As pressões de trabalho em sistemas de absorção são subatmosféricas, e são determinadas pelas características da pressão de vapor dos fluidos em jogo. Como praticamente só existe água pura no condensador e no evaporador, a temperatura de operação desses componentes define a pressão. Para uma temperatura de evaporação de 5°C a correspondente pressão de vapor da água é 0,872 kPa, ou aproximadamente 0,009 atm, que é a mesma pressão no absorvedor. Tais níveis de pressão são conseguidos por meio de bombas de vácuo, consistindo para os projetistas de equipamentos um desafio no que toca a soluções que garantam recipientes herméticos.

4. METODOLOGIA

Na presente pesquisa, será inicialmente realizado um aprofundamento da revisão bibliográfica em torno dos processos de transferência de calor e massa envolvendo soluções aquosas de brometo de lítio. Simultaneamente, será desenvolvido projeto térmico e mecânico de uma bancada experimental (já iniciado) para investigação detalhada dos processos em questão, com a adoção de soluções técnicas quanto à garantia da estanqueidade.

Uma vez construído o aparato e realizados os testes que atendam as condições operacionais exigidas, passaremos às medições daqueles parâmetros associados com a performance dos processos de ebulição e absorção, são eles:

- Vazão volumétrica da solução na entrada e na saída do absorvedor;
- Temperatura da solução na entrada e na saída do absorvedor;
- Temperatura da água de arrefecimento na entrada e na saída do absorvedor;
- Pressões no absorvedor e no gerador;
- Concentração da solução entrando no absorvedor;
- Concentração da solução saindo do absorvedor.

Tais parâmetros sofrerão variação dentro da faixa compatível com as condições reinantes num equipamento de simples efeito.

Os ensaios deverão permitir uma investigação detalhada da influência destes parâmetros, tendo em vista: i) a intensificação dos processos de transferência de calor e massa nos processos de geração e absorção e, ii) a determinação de correlações para geometrias não convencionais. Adicionalmente, pretende-se avaliar o efeito da inclusão de aditivos nas soluções de água-brometo de lítio.

Os resultados serão então comparados com aqueles oriundos de modelagem matemática de sistemas de absorção, e com dados disponíveis em literatura.

5. CONCLUSÕES

Nossa proposta de dissertação de mestrado em ciências mecânicas prevê a medição de parâmetros que definem coeficientes de transferência de calor e massa em processos de ebulição e absorção de soluções aquosas de brometo de lítio, como aquelas que ocorrem em equipamentos de refrigeração por absorção. Para tal um aparato experimental será projetado e construído no Laboratório de Ar Condicionado e Refrigeração (LaAr), do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília.

6. REFERÊNCIAS

- FLORIDES, G.A. et al. *Modeling, simulation and warming impact assessment of a domestic-size absorption solar cooling system*. Applied Thermal Engineering, n. 22, p. 1313–1325, 2002.
- INCROPERA, Frank P.; DeWITT, David P. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- IYER, P.S.A.; MURTHY, S.; MURTHY, M.V.K. *Correlations for evaluation of the performance characteristics of vapor absorption refrigeration cycles: short communication*. Solar & Wind Technology, Volume 5, Issue 2, 1988, Pages 191-197
- JOUDI, K.A.; LAFTA, A.H. *Simulation of a simple absorption refrigeration system*. Energy Conversion and Management, v. 42, n. 13, Pages 1575-1605, Set. 2001.
- KILLION, J.D.; GARIMELLA, S. *A critical review of models of coupled heat and mass transfer in falling-film absorption*. International Journal of Refrigeration, Volume 24, Issue 8, December 2001, Pages 755-797
- LEE, C. C. et al. *Experimental investigation of pool boiling of lithium bromide solution on a vertical tube under subatmospheric pressures*. International Communications in Heat and Mass Transfer, Volume 18, Issue 3, May-June 1991, Pages 309-320
- MARTÍNEZ, P.J.; PINAZO, J.M. *A method for obtaining performance correlations of absorption machines*. International Journal of Thermal Sciences, Volume 42, Issue 4, April 2003, Pages 379-384
- MEDRANO, M.; BOUROUIS, M.; CORONAS, A. *Absorption of water vapour in the falling film of water–lithium bromide inside a vertical tube at air-cooling thermal conditions*. International Journal of Thermal Sciences 41 (2002) 891–898
- RIVERA, W.; BEST, R. *Boiling heat transfer coefficients inside a vertical smooth tube for water/ammonia and ammonia lithium nitrate mixtures*. International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 42, Issue 5, 1 March 1999, Pages 905-921

- RIVERA, W.; VÉLEZ, V.; XICALE, A. *Heat transfer coefficients in two-phase flow for mixtures used in solar absorption refrigeration systems*. Solar Energy Materials & Solar Cells 63 (2000) 401-411
- SRIKHIRIN, P.; APHORNRATANA, S.; CHUNGPAIBULPATANA, S. *A review of absorption refrigeration technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, n. 5, 343-372, 2001.
- TAKAMATSU, H. et al. *Vapor absorption by LiBr aqueous solution in vertical smooth tubes*. International Journal of Refrigeration 26 (2003) 659-666
- VARMA, H. K.; MEHROTRA, R. K.; AGRAWAL, K. N. *Heat transfer during pool boiling of LiBr-water solutions at subatmospheric pressures*. International Communications in Heat and Mass Transfer, Volume 21, Issue 4, July-August 1994, Pages 539-548
- YOKOZEKI, A. *Theoretical performances of various refrigerant-absorbent pairs in a vapor-absorption refrigeration cycle by the use of equations of state*. Applied Energy, Volume 80, Issue 4, April 2005, Pages 383-399

HEAT AND MASS TRANSFER STUDY APPLIED TO BOILING AND ABSORPTION OF H₂O-LiBr.

José de Araujo Fonseca Junior

UnB – Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Faculdade de Tecnologia,
ENM – Departamento de Engenharia Mecânica, LaAr – Laboratório de Ar condicionado e Refrigeração.
L3N, Asa Norte, Brasília – DF.
CEP: 70.910-900
zkaraujo@brturbo.com.br

João Manoel Dias Pimenta

pimenta@unb.br

Mirna Alexandra Costa Carvalho

mirna_alex@hotmail.com

Felipe Guimarães dos Santos

felipegs.br@gmail.com

Abstract: *This paper presents a M.Sc. work proposal in mechanical sciences degree, with the main goal of determining heat and mass transfer coefficients in the generator and absorber of a experimental absorption unit to be built in the Air Conditioning and Refrigeration Laboratory – LaAr. Experimental data will be compared to theoretical results from mathematical modeling of absorption refrigeration systems, as well as with correlations available from technical literature. The final goal of this work is to provide information to future application and design of compact absorption refrigeration machines.*

Keywords: *Refrigeration, Absorption, Falling film, Heat-transfer coefficient, Mass-transfer coefficient.*