

DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DE COEFICIENTE DE TROCA DE CALOR EM UM GERADOR DE PASTA DE GELO

Epifanio Mamani Ticona

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Marquês de São Vicente 225, Rio de Janeiro, RJ - 22453-900 - Brasil
emt@mec.puc-rio.br

Sérgio Leal Braga

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Marquês de São Vicente 225, Rio de Janeiro, RJ - 22453-900 - Brasil
slbraga@mec.puc-rio.br

José Alberto dos Reis Parise

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Marquês de São Vicente 225, Rio de Janeiro, RJ - 22453-900 - Brasil
parise@mec.puc-rio.br

Resumo. Um gerador de pasta de gelo foi desenvolvido para aplicações de condicionamento de ar e resfriamento de processos. O sistema usa um evaporador orbital de haste, um trocador de calor vertical do tipo tubo e carcaça com intensificação mecânica de transferência de calor. A pasta de gelo é produzida continuamente sem acumulação no evaporador, sendo compatível com unidades condensadoras convencionais, tanques de armazenamento e bombas. Soluções aquosas diluídas ou soluções inorgânicas de salmoura promovem a formação de cristais de gelo. A pasta de gelo resultante pode ser bombeada ou, por gravidade, alimentar um tanque de armazenamento. Com isto, o circuito hidráulico de refrigeração, responsável por suprir a carga térmica, pode trabalhar independente da produção do gelo, utilizando a pasta armazenada. Este armazenamento da pasta de gelo fornece ao sistema temperaturas consistentemente baixas, à medida que se derrete o gelo, que por sua grande área superficial pode ser derretida também muito rapidamente. Com suas características altas temperaturas de evaporação e elevados fluxos de calor, os sistemas de geração de pasta de gelo apresentam potencial para reduzir significativamente os custos de capital inicial e operação, quando comparados com tecnologias de sistemas estáticos de gelo ou sistemas dinâmicos como o "ice harvesting".

Palavras chave: Armazenamento de energia térmica, evaporador de superfície raspada, pasta de gelo, fluidos refrigerantes secundários.

1. Introdução

O uso racional de energia tem sido alvo de um grande número de pesquisas, face à importância que o tema assumiu nos últimos anos. A refrigeração é responsável por grande parte do consumo de energia elétrica, é, por este motivo, frequentemente alvo de novos estudos. A termo-acumulação é hoje uma das alternativas mais estudadas para reduzir custos operacionais em instalações de condicionamento ambiental e a "pasta de gelo" é a inovação tecnológica mais recente na área, tendo potencial para alcançar consideráveis benefícios, tanto ambientais como também econômicos. A capacidade de refrigeração de uma solução de pasta de gelo pode ser de quatro a seis vezes maior do que a da água gelada convencional, dependendo da sua **fração de gelo**. Há muitos sistemas de pasta de gelo que já operam pelo mundo. Quando a termo-acumulação se faz com mudança de fase, a grande maioria se baseia em armazenamento de gelo, onde a água de retorno aquecida é usada para derreter o gelo armazenado. Dentro dos estudos realizados anteriormente, (Kim *et al.*, 2001) fizeram um estudo teórico e experimental sobre a produção de pasta de gelo por pulverização de uma solução aquosa em um meio refrigerado. (Bel e Lallemand, 1999), estudaram o comportamento térmico de pasta de gelo com soluções aquosas de etanol, fazendo um estudo do coeficiente interno de troca de calor de um gerador de pasta tipo raspador helicoidal. (Bounopane *et al.*, 1991), estudaram as características de transferência de calor e escoamento do fluido num evaporador orbital de tubo empregado em dessalinização.

2. Pasta de gelo

A tecnologia de pasta de gelo representa um importante desenvolvimento para algumas aplicações de refrigeração, e tem sido referido eventualmente como fluido de sistemas avançados de transporte de energia térmica (Inaba, 2000). Para o desenho destes sistemas torna-se necessário um melhor conhecimento deste particular "novo" fluido. A seguir, algumas definições encontradas na literatura permitirão caracterizar este fluido.

2.1. Definições

Foram encontrados na literatura termos como: pasta de gelo, 'gelo líquido', 'binary ice', 'flo ice', 'mushy ice', etc., estes termos são utilizados para descrever qualquer tipo de cristais de gelo com diâmetros entre $25 \mu\text{m}$ e 4mm suspensos em uma solução aquosa em fase líquida com ou sem um agente que baixa a temperatura do ponto de solidificação (Hansen *et al.*, 2003).

Na realidade não é simples de apresentar uma definição exata do termo 'pasta de gelo'. As duas seguintes definições podem ser consideradas:

Definição 1. Pasta de gelo consiste de partículas de gelo em um fluido formando uma suspensão de dois fases (Egolf e Kauffeld, 2005).

Definição 2 . Uma pasta cristalina-fina de gelo é uma substância compreendida de partículas de gelo com um diâmetro (característico) médio igual ou menor que 1mm (Egolf e Kauffeld, 2005).

A definição 2 como indicam (Egolf e Kauffeld, 2005) é um pouco arbitrária, mas ainda muito útil. Estas definições dirigem-se somente às pastas de gelo, produzidas por exemplo com geradores de pasta de gelo de superfície raspada. Com este método, as partículas do gelo geradas têm um diâmetro característico de aproximadamente $200 \mu\text{m}$.

Existem outras tecnologias de produção de pasta de gelo, como as tecnologias de vácuo de processo direto, que utiliza somente água pura (Meewisse, 2004). Ainda não existe uma definição exata de pasta de gelo, que seja abrangente com todos os tipos de pasta de gelo e métodos de geração.



Figura 1: Fotografia de cristais de gelo em uma pasta de gelo (Egolf e Kauffeld, 2005).

A Figura (1), mostra uma fotografia em escala microscópica (Egolf e Kauffeld, 2005) com cerca de quinze partículas. A dimensão da figura é $1061 \mu\text{m} \times 762 \mu\text{m}$. O comprimento médio das partículas avaliados em 10 fotografias é $344 \mu\text{m}$ e o desvio padrão é $136 \mu\text{m}$. A largura média foi determinado em $234 \mu\text{m}$ e a desvio padrão $85 \mu\text{m}$. A relação largura por comprimento é 0.68.

2.2. Vantagens da tecnologia de pasta de gelo

Altos coeficientes de transferência de calor são possíveis porque as partículas de gelo estão finamente dispersadas na fase líquida como mostra a Fig. (1) com detalhes dos cristais de gelo dispersas na solução, a Fig.

(2) mostra a área total dos cristais em uma amostra de 1 kg de pasta de gelo em função do diâmetro d_p de partículas supostamente esféricas. A figura fornece uma ideia de grandeza da área total de troca. Se for considerada a relação de troca de calor $Q = U \cdot A \cdot \Delta T$ pode-se entender a razão da grande capacidade de transferência de calor.

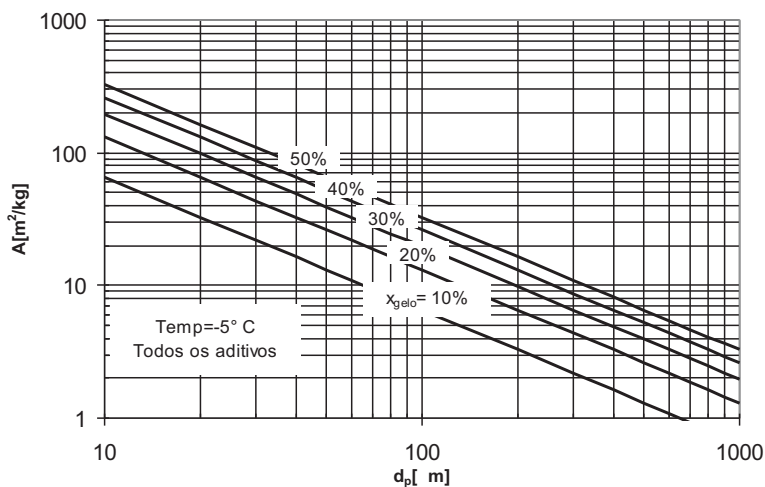


Figura 2: Área total A de todos os cristais de gelo em 1 kg de pasta de gelo

3. Abordagem experimental

3.1. Aparato experimental

Foi construído um protótipo experimental de geração de pasta de gelo que é mostrado nas Figuras (3) e (4). Os principais componentes são: o gerador de pasta de gelo (G); a unidade condensadora que opera com R22 como fluido refrigerante; o sistema de aquisição de dados; bomba de deslocamento positivo; variadores de frequência; banho térmico e tanque de armazenamento (T).

3.2. Procedimento Experimental

O sistema de geração de pasta de gelo é colocado em funcionamento pelo acionamento da unidade condensadora. Neste instante impõe-se a velocidade de rotação do mecanismo raspador e a temperatura de evaporação do fluido refrigerante através do controle da pressão de evaporação. A solução a ser refrigerada é posta em circulação e espera-se que o sistema atinja o regime permanente. Para os resultados aqui apresentados foram empregados uma solução aquosa de 8% em massa de propileno glicol. Outros solutos foram empregados, apresentando rendimento similar, mas não são apresentados aqui. Inicialmente à temperatura ambiente a solução é bombeada ao sistema de geração. A vazão mássica da mistura é ajustada e medida com um medidor de efeito CORIOLIS. Os dados relacionados à transferência de calor entre o fluido refrigerante e a solução aquosa é coletado através do sistema de aquisição de dados. Para cada regime de operação espera-se que o sistema atinja o regime permanente. Esta condição é obtida em aproximadamente 10 minutos. Em seguida é coletada uma amostra da pasta de gelo para cada ponto estabelecido para a experiência. Em um calorímetro Fig. (5) a pasta é fundida por meio de uma resistência elétrica e são tomados os seguintes dados: massa coletada, energia elétrica liberada e temperaturas inicial e final da amostra.

4. Redução de dados

4.1. Propriedades termo-físicas da pasta de gelo

Foram implementados no Microsoft Excel 2002, macros que permitem determinar as propriedades termo-físicas da pasta de gelo. Para tal é preciso conhecer as propriedades termo-físicas do gelo (Fukusako e Yamada, 1993; Lide, 1989), e as propriedades termo-físicas de soluções aquosas esta informação, encontra-se em (Melinder, 1997).

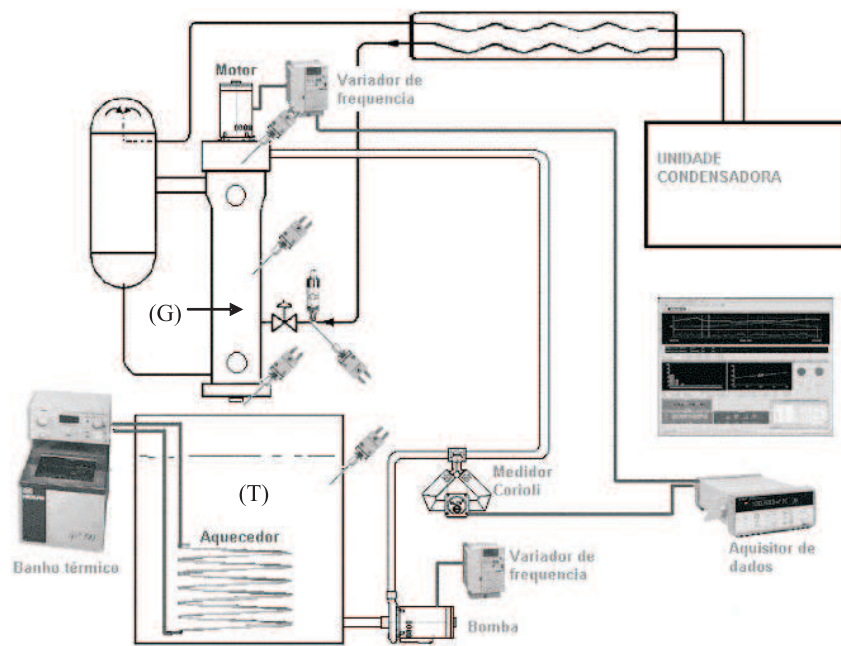


Figura 3: Diagrama esquemático do sistema de geração de pasta de gelo.



Figura 4: Fotografia do gerador de pasta de gelo.

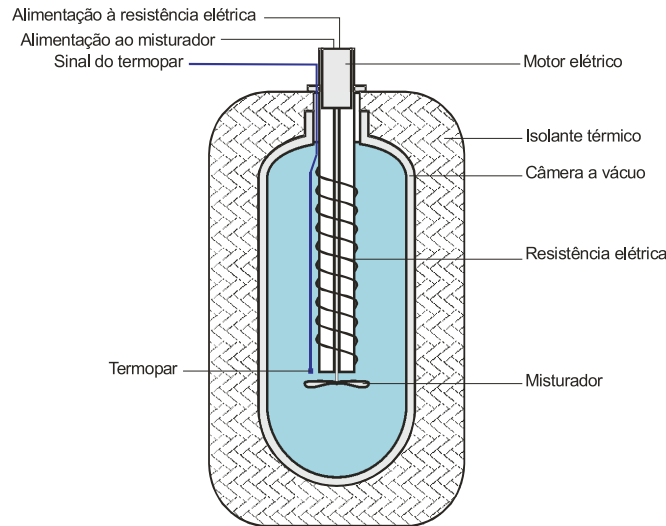


Figura 5: Esquema do calorímetro.

As variáveis principais para calcular as propriedades termo-físicas da pasta de gelo são: concentração em massa do soluto e temperatura da pasta de gelo.

Como exemplo, a Fig (6) mostra a massa específica e a Fig (7) mostra a entalpia da pasta de gelo com solução etanol-água.

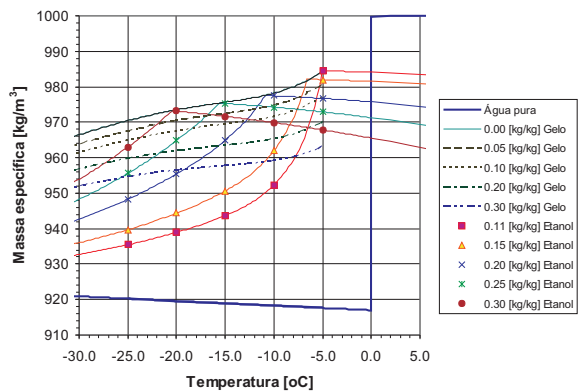


Figura 6: Diagrama da massa específica da pasta de gelo de uma solução etanol-água.

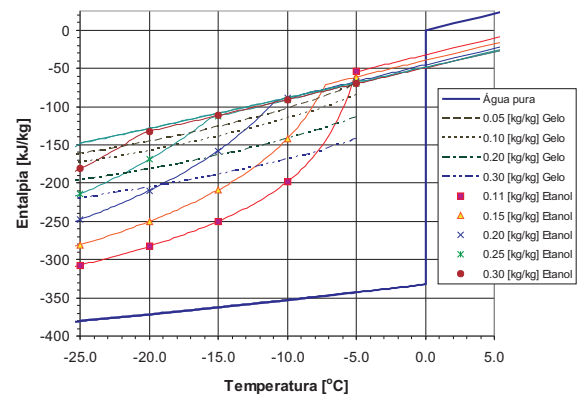


Figura 7: Diagrama de Entalpia da pasta de gelo de uma solução etanol-água.

4.2. Coeficiente Global de Transferência de Calor

O coeficiente global de transferência de calor pode ser determinado experimentalmente aplicando-se a equação de conservação de energia.

$$\dot{Q} = \frac{\delta Q}{\delta t} = \dot{m} \cdot \Delta h = \dot{V} \cdot (\rho \cdot \Delta h) = \dot{m} \cdot (h_{ent} - h_{pg}) \quad (1)$$

Nesta expressão são consideradas as entalpias de entrada da solução aquosa, a vazão mássica e a entalpia da pasta de gelo na saída do gerador.

A entalpia da pasta de gelo h_{pg} é determinada pelo balanço de energia no calorímetro, segundo a seguinte equação:

$$E = \int_0^t q dt = m_{amostra}(h(T_{inicial}) - h_{pg}) \quad (2)$$

Finalmente o coeficiente global de transferência de calor é avaliado pela Eq.(3)

$$U = \frac{\dot{Q}}{A \cdot \Delta T} \quad (3)$$

ΔT é a temperatura de referencia, avaliado como a temperatura média logarítmica das temperaturas de entrada e saída no gerador.

5. Resultados e discussão

5.1. Temperatura da pasta de gelo

A temperatura da pasta de gelo varia com a composição da solução aquosa. Conseguiu-se obter, com êxito, pasta de gelo com soluções aquosas de etileno glicol, propileno glicol e etanol. Do mesmo modo é possível usar água de mar para produzir pasta de gelo. Isto é possível com uma apropriada correção do índice de salinidade e alguma etapa previa de filtração, representando uma grande vantagem para a indústria pesqueira, pois a pasta pode ser aplicada diretamente sobre pescados, podendo ser produzida e usada em alto mar.

A temperatura da pasta formada pode estar compreendida na faixa de 0 até -40 °C, dependendo da concentração inicial da solução aquosa. A figura (8) mostra a variação da fração de gelo com a temperatura (Ticona, 2003), para uma solução de propileno glicol com concentração inicial igual a 8%. Como o processo envolve mudança de fase, grandes variações na fração de gelo, representa pequenas variações de temperatura na pasta de gelo.

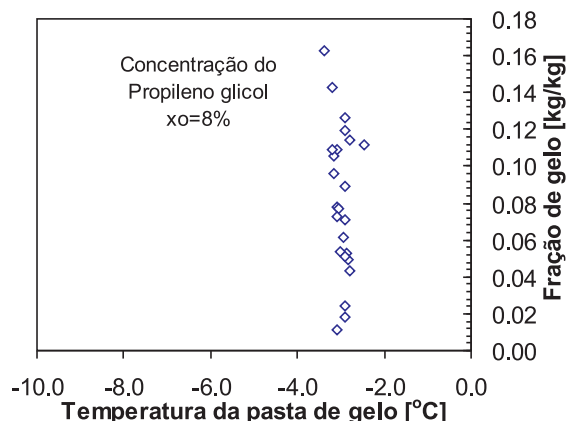


Figura 8: Variação da fração de gelo com a temperatura da pasta de gelo.

5.2. Efeito da velocidade de rotação do raspador

Foi observado, como era de se esperar, que a fração de gelo da pasta aumenta com a redução da vazão mássica da solução que passa pelo evaporador Fig. (9). Também se observa que a fração de gelo aumenta com o acréscimo da rotação do mecanismo raspador do gerador. Este mecanismo é muito importante porque intensifica a transferência de calor (Ticona, 2003).

5.3. Coeficiente global de transferência de calor

A Figura (11) mostra o coeficiente global de transferência de calor para diferentes velocidades de rotação do mecanismo raspador, para diferentes vazões mássicas da solução aquosa que passa pelo gerador (Ticona, 2003).

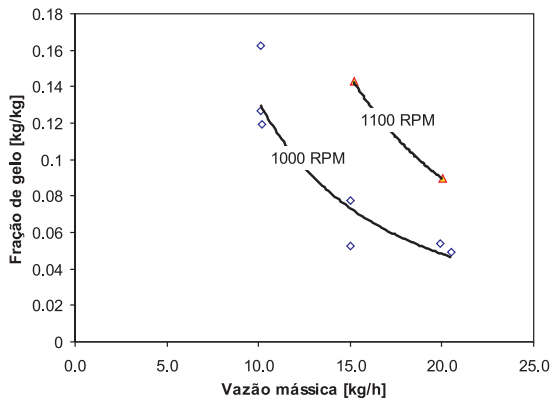


Figura 9: Variação da fração de gelo com a velocidade angular do mecanismo raspador e vazão mássica da solução.

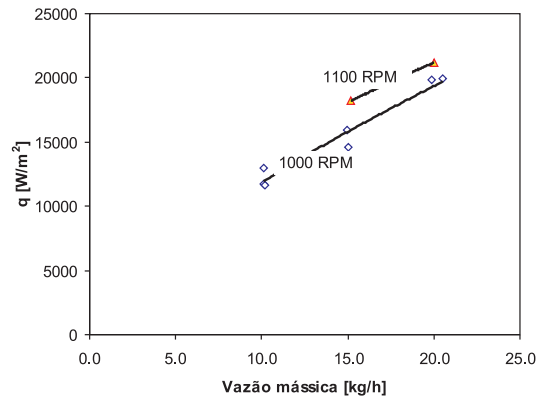


Figura 10: Fluxo de calor no gerador a diferentes vazões mássicas e diferentes velocidades de rotação do mecanismo raspador.

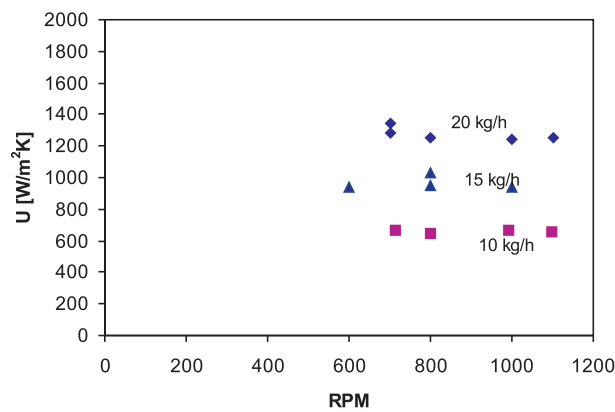


Figura 11: Coeficiente global de transferência de calor versus velocidade angular do mecanismo raspador e vazão mássica da solução.

6. Conclusões

Foi desenvolvido um gerador de pasta de gelo para estudar suas características de transferência de calor. Na superfície do gerador, a transferência de calor envolve mudança de fase líquido-sólido.

Dos resultados obtidos chega-se às seguintes conclusões:

O super-resfriamento da solução aquosa é fundamental na formação da pasta de gelo e é o que possibilita esta formação. É importante ressaltar que fenômenos complexos estão presentes neste processo (exemplo: a nucleação).

A agitação é a principal responsável pelo incremento da transferência de calor no resfriamento da solução aquosa (sem geração de pasta de gelo).

Demonstrou-se que o mecanismo agitação tem forte influência no processo de geração de pasta de gelo.

7. Agradecimentos

Este trabalho de pesquisa foi financiado pelo CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

8. Referências

- Bel, O. and Lallemand, A., 1999, Etude d'un fluide frigoporteur diphasique (1) Caractéristiques thermophysiques intrinsèques d'un coulis de glace (2) Analyse expérimentale du comportement thermique et rhéologique, "International Journal of Refrigeration", Vol. 22, pp. 164–187.
- Bounopane, R. A., Huang, H. D., and Zhang, L., 1991, Orbital tube evaporators-characteristics of fluid flow and heat transfer, "Second world conference on experimental heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics", Vol. 24, pp. 1318–1325.
- Egolf, P. W. and Kauffeld, M., January 2005, From physical properties of ice slurries to industrial ice slurry applications, "International Journal of Refrigeration", Vol. 28, pp. 4–12.
- Fukusako, S. and Yamada, M., 1993, Recent advances in research on Water-Freezing and Ice-Melting problems, "Experimental Thermal and Fluid Science", Vol. 6, pp. 90–105.
- Hansen, T. M., Kauffeld, M., Radosevic, M., and Zwiag, T., 2003, Investigation of ice crystal growth and geometrical characterization in ice slurry (RP-1166), "HVAC&R RESEARCH", Vol. 9, pp. 19–31.
- Inaba, H., 2000, New challenge in advanced thermal energy transportation using functionally thermal fluids, "International Journal of Thermal Sciences", Vol. 39, pp. 991–1003.
- Kim, B., Shin, H., Lee, Y., and Jurng, J., 2001, Study on ice slurry by water spray, "International Journal of Refrigeration", Vol. 24, pp. 176–184.
- Lide, D. R., 1989, "CRC handbook of chemistry and physics", Vol. 1, CRC Press, 69 edition.
- Meewisse, J. W., 2004, "Fluidized Bed Ice Slurry Generator for Enhanced Secondary Cooling Systems", PhD thesis, Delft University, Germany.
- Melinder, Å., 1997, "Thermophysical properties of liquid secondary refrigerants, Tables and diagrams for the refrigeration industry", Vol. 1, International Institute of Refrigeration, France, 1 edition.
- Ticona, E. M., 2003, Determinação experimental do coeficiente de troca de calor em gerador de pasta de gelo, MsC Dissertation, PUC-Rio, Brasil.

TITLE

Epifanio M. Ticona

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Marquês de São Vicente 225, Rio de Janeiro, RJ - 22453-900 - Brasil

emt@mec.puc-rio.br

Sérgio L. Braga

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Marquês de São Vicente 225, Rio de Janeiro, RJ - 22453-900 - Brasil

slbraga@mec.puc-rio.br

José A. dos Reis Parise

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Marquês de São Vicente 225, Rio de Janeiro, RJ - 22453-900 - Brasil

parise@mec.puc-rio.br

Abstract. *An ice crystal slurry generator system, for thermal energy storage (TES) has been developed for both HVAC and process cooling applications. The system uses an orbital rod evaporator (ORE), a vertical shell-and-tube heat exchanger with mechanical heat transfer augmentation, as a dynamic ice maker to generate ice slurry. Ice forms continuously without accumulation in the ORE and is compatible with conventional condensing units, storage tanks, and pumps. Dilute glycol or inorganic brine solutions promote formation of ice crystals, and the resulting liquid ice may be pumped or gravity fed to a storage tank. The cooling load circuit can be hydraulically decoupled from ice production at the storage tank. Stored liquid ice provides consistently low solution supply temperatures over significant portions of the ice melt period and may be melted very rapidly. With its characteristic high evaporator temperatures and high heat fluxes, ORE TES systems have the potential for significantly lower capital and operating costs than static ice or ice harvesting technologies.*

Keywords . *Cold thermal energy storage, Orbital rod evaporator, Ice slurry, Secondary fluid refrigerants*