

1

Introdução

O objetivo do presente trabalho é a determinação experimental do coeficiente de troca de calor por convecção em um gerador de pasta de gelo de película descendente agitado. Para tal foi desenvolvido um prévio estudo teórico baseado nos coeficientes de troca de calor esperados, que deu origem à construção de um protótipo experimental. Um sistema de refrigeração de média capacidade foi empregado para a produção do frio.

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 hoje responsável por grande parte do consumo de energia elétrica e, por este motivo, tem sido também frequentemente alvo de novos estudos. A “termoacumulação de frio” procura reduzir custos iniciais de instalação de sistemas de refrigeração e sua posterior operação. A tarifa elétrica diferenciada, já em vigor, deve atingir cada vez mais consumidores, indicando que esta técnica será cada vez mais explorada. As vantagens surgem da utilização de frio armazenado em horas de baixo custo da energia elétrica e melhor rendimento do sistema de refrigeração (funcionando durante a noite quando a temperatura é mais baixa, por exemplo). Além disso, é possível desacoplar os equipamentos no período de máxima demanda, usando-se a energia acumulada. A base do estudo é a mudança de fase líquido-sólido (ou vice-versa) de substâncias multicomponentes.

Outro fator que ganha espaço dia após dia é a redução do impacto ambiental global, porque é vital estabelecer um equilíbrio entre “consumo de energia” e “proteção” do meio ambiente. Desta forma, qualquer mudança nas tecnologias de refrigeração tem que levar em consideração fatores ambientais. Foi o que se viu na década passada, quando da introdução dos novos refrigerantes por causa do alto potencial de depleção da camada de ozônio dos CFCs então utilizados. A termoacumulação 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 e tem potencial para alcançar consideráveis benefícios tanto ambientais como também econômicos.

Qualquer refrigerante primário convencional pode ser usado para produção de pasta de gelo. 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 fração de gelo. Há muitos sistemas de pasta de gelo que já operam pelo mundo. Quando a termoacumulação 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. No processo em estudo aqui, a pasta de gelo é posta a circular em redes de sistemas de distribuição de ar condicionado, o que traz muitos benefícios para o processo.

1.1. Tecnologia de pasta de gelo

Pasta de gelo é uma suspensão de cristais de gelo em uma solução aquosa. Esta pasta gelada pode ser bombeada e é também chamado de *Binary-ICE*, *Liquid-ICE* ou *Pumpable-ICE*. As características de manipulação, assim como as capacidades de refrigeração podem ser combinadas para servir a qualquer aplicação, por meio, simplesmente, de ajustar a concentração do gelo. A pasta de gelo é compreendida de cristais de gelo microscópicos que dão uma área de superfície total para a troca de calor muito maior do que as observadas nos bancos de gelo convencionais. Conseqüentemente o gelo pode ser derretido rapidamente. Isto assegura um sistema estável e um preciso controle de temperatura, além de permitir altas potências de refrigeração.

1.2. Motivação

A emergente tecnologia de pasta de gelo ("Ice Slurry") para o uso em sistemas de refrigeração, ar condicionado, processamento de alimentos e outros, pode ser o desenvolvimento técnico mais significativo no campo da termoacumulação. A grande capacidade de armazenamento de energia da pasta de gelo, comparada aos sistemas convencionais de água gelada, pode potencialmente reduzir a vazão do fluido de circulação em cerca de 80% em plantas existentes, ao manter-se a mesma capacidade de refrigeração e potência de bombeamento. Em plantas novas, vazões mais baixas resultam em reduções do diâmetro da tubulação de até 65% e, proporcionalmente, no uso de menores bombas, com tanques de acumulação obviamente menores. Estes fatores combinam-se para reduzir custos iniciais e de operação. Para sistemas de água gelada existentes, as pastas de gelo e água podem significativamente aumentar a capacidade de refrigeração, sem requerer aumentos em vazões, tamanho do sistema ou da tubulação de distribuição. Estas mudanças potenciais são possíveis produzindo só uma fração de pasta de gelo (porcentagem de massa do gelo na pasta de gelo e água) próxima aos 30%. Uma fração relativamente baixa do gelo (ao redor de 5%), segundo Choi *et al.* 1992, faz com que a capacidade térmica de um sistema existente aumente em um fator de dois, usando-se a mesma potência de bombeamento. Este aumento de 100% na capacidade de refrigeração, introduzindo-se uma fração de gelo tão baixa, suporta pesquisas e discussões quanto ao significado desta tecnologia.

O uso de pastas de gelo e água em sistemas de refrigeração requer o conhecimento da mecânica dos fluidos e da transferência de calor em escoamentos característicos da pasta. Publicações apresentam estudos sobre a queda de pressão e características de escoamento do gelo líquido, mas poucas referências foram encontradas sobre a geração de pasta de gelo, onde a transferência de calor é investigado, motivo pelo qual torna-se importante abordar este tema.

A nova tecnologia de pasta de gelo ainda não é utilizada no Brasil porque as unidades de geração de pasta de gelo importadas têm custo muito elevados. Esta tecnologia no País está sendo divulgada por um importante fabricante

internacional, a YORK, em feiras e workshops, com um único protótipo trazido para o Brasil. Uma cuidadosa revisão bibliográfica mostrou que o número de publicações na área é bastante reduzido, o que motivou este trabalho.

Acredita-se ainda que, por suas características de facilidade de bombeamento e armazenamento de frio via calor latente, este meio de termoacumulação tem forte potencial de desenvolvimento.

1.3.

Vantagens do sistema de pasta de gelo

Pasta de gelo oferece várias vantagens quando comparado aos sistemas tradicionais que operam com gelo estático ou sistemas de “ceifeira de gelo” dinâmicos:

Energia Eficiente. Nos sistemas de gelo estáticos, o sólido adere às superfícies de transferência de calor, elevando gradualmente a resistência à troca de calor. No caso da pasta de gelo, não há aderência a qualquer área de troca de calor, resultando em processos de troca de calor mais eficientes.

Quando comparado as ceifeiras de gelo, o sistema de pasta não necessita do descongelamento exigido para “descolar” o gelo, para posterior armazenamento em tanques. Isto implica, mais uma vez, em eficiência global de armazenamento mais elevada.

Desenho de Tanque Simplificado. Pasta de gelo pode ser armazenada em tanques sem a necessidade de apoio estrutural extra como requerido no caso das ceifeiras de gelo localizadas sobre os tanques de armazenamento.

Flexibilidade de Armazenamento. A pasta de gelo pode ser armazenada em tanques de qualquer formato. Como exemplo, pode-se aumentar a altura destes tanques, resultando em uma redução da área da base, resultando numa valiosa economia de espaço. Isto é difícil de se alcançar em sistemas estáticos e outros sistemas de armazenamento de gelo dinâmicos.

Economia de Espaço. Equipamento compacto, acarretando em redução de espaço no local de instalação do equipamento de refrigeração.

Grandes Potências de Refrigeração. Grandes cargas para uma duração curta podem ser fornecidas através de sistemas de gelo em pasta devido ao derretimento rápido de gelo alcançado por uma área grande de contato entre a solução de retorno morna e gelo armazenado.

1.4.

Classificação dos sistemas de termoacumulação

A termoacumulação opera como uma bateria elétrica recarregável, onde, no lugar da energia elétrica, acumula-se ou utiliza-se energia térmica.

Os mais conhecidos sistemas de termoacumulação são sistemas de armazenamento de calor sensível e de calor latente.

1.4.1.

Acumuladores de calor sensível

O processo de acumulação se realiza através de calor sensível. O acumulador mais comum é a água. Aproveita-se a tendência da água de formar camadas (estratificação) horizontais de densidade (e temperatura), em este sistema são utilizados grandes tanques de água para armazenar energia térmica, este sistema é bastante utilizado porque é simples.

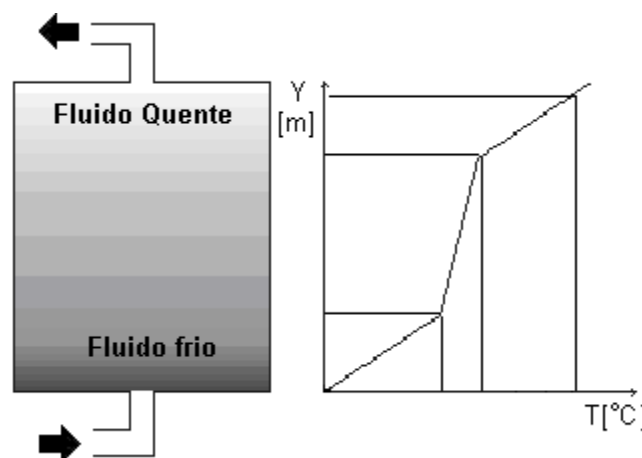


Figura 1 - Termoacumulação de calor sensível.

1.4.2. Acumuladores de calor latente

1.4.2.1. Sistemas de transferência alternada

Nesta configuração a água armazenada fora dos tubos não é posta em circulação (só acumula a energia). O fluido que circula no interior dos tubos é responsável pela carga e descarga de energia térmica, a diferentes temperaturas. Gelo se forma na superfície externa dos dutos. O sistema é classificado também como sistema estático.

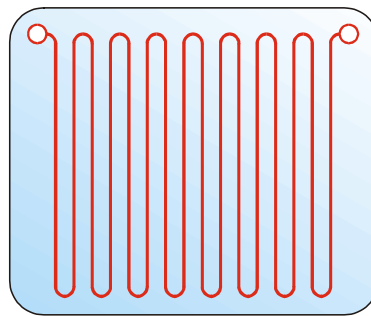


Figura 2 - Sistema de transferência alternada "Ice on coil"

1.4.2.2. Sistemas de transferência alternada exterior. Encapsulados

Consiste em um tanque cheio de cápsulas que armazenam a energia. Estas encerram materiais de mudança de fase (água, por exemplo). Em torno das cápsulas circula um fluido de transporte, responsável pelos processos de carga e descarga (Etileno Glicol, por exemplo). As cápsulas são de geometrias variáveis: esferas, cilindros ou paralelepípedos, e de diferentes tamanhos. São também classificados como sistemas estáticos.

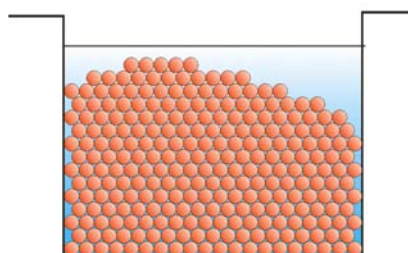


Figura 3 - Sistema de gelo encapsulado

1.4.2.3.**Sistemas de transferência alternada exterior. "Ice Harvester"**

Este é um sistema dinâmico, consiste na formação de placas de gelo em evaporadores planos localizados acima do tanque de armazenamento. Sistemas de controle derivam gás quente aos evaporadores e, com isto, as placas de gelo caem pela ação da gravidade no tanque de armazenamento.

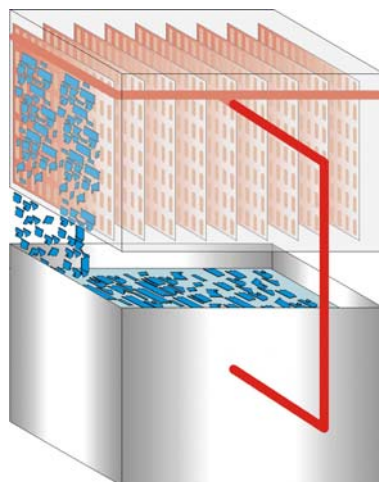


Figura 4 - Sistemas de transferência alternada exterior

1.4.2.4.**Sistema de Pasta de Gelo**

É um sistema dinâmico de formação de gelo em cristais finos obtidos do super resfriamento de uma solução aquosa que escoar a través de um sistema. O resultado é uma pasta de gelo com notáveis características. Esta pasta é armazenada em um tanque para posterior utilização, como mostra a figura 5 abaixo.

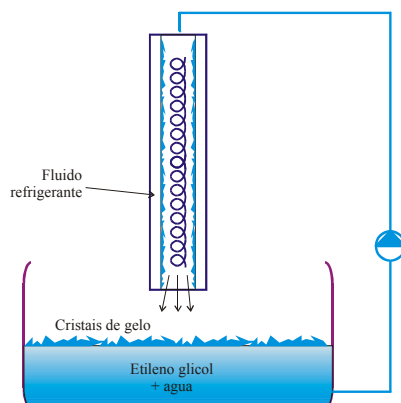


Figura 5 - Sistema de geração de pasta de gelo

1.5. Geradores de pasta de gelo

As técnicas de geração de gelo podem ser divididas em duas categorias principais, denominadas de sistemas *dinâmicos e estáticos*. A pasta de gelo é produzida em sistemas dinâmicos e o gelo produzido pode ser usado de duas formas: *diretamente* para resfriar um produto como alimentos, ou *indiretamente* como um refrigerador secundário em sistemas de armazenamento de energia térmica, ar condicionado e processos de resfriamento.

1.5.1. Gerador de pasta de gelo por super-resfriamento

Uma das formas utilizadas para se produzir a pasta de gelo baseia-se em um evaporador que opera sobre o princípio de super-resfriamento. Uma corrente da água, quando é resfriada lentamente, pode ser super-resfriada em vários graus Celsius abaixo do ponto de congelamento normal, sem que haja a formação de gelo. Antes de deixar o evaporador, o escoamento da água super-resfriada é perturbado fisicamente a fim de gerar cristais de gelo. A fração do gelo depende do nível do super-resfriamento do líquido que sai pelo evaporador.

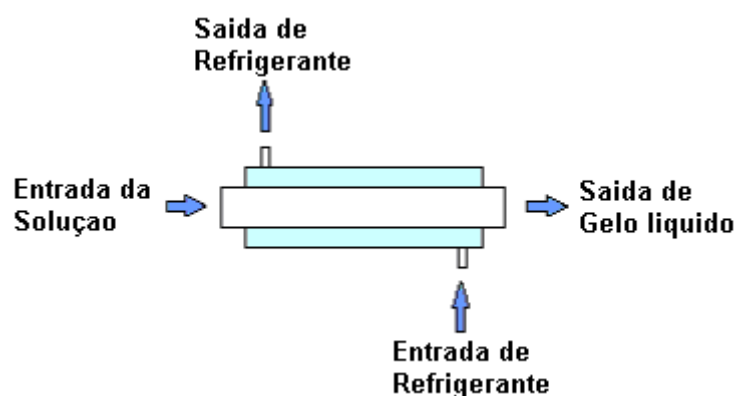


Figura 6 - Produção de gelo por super-resfriamento de água

1.5.2. Gerador de pasta de gelo usando raspadores

Os geradores de pasta de gelo do tipo raspador produzem o gelo em uma solução do tipo salmoura, em várias escalas de temperatura, dependendo da concentração da solução.

A diminuição do ponto do congelamento e o raspador mecânico impedem a aderência do gelo na parede do evaporador.

O evaporador com raspador recebe a solução salina da água ou a pasta de gelo. Enquanto o líquido é refrigerado, os cristais de gelo são formados no interior do líquido. Um sistema agitador é usado para mover a água fria na vizinhança da parede. O aumento na fração do gelo para cada passagem depende da vazão mássica através do evaporador.

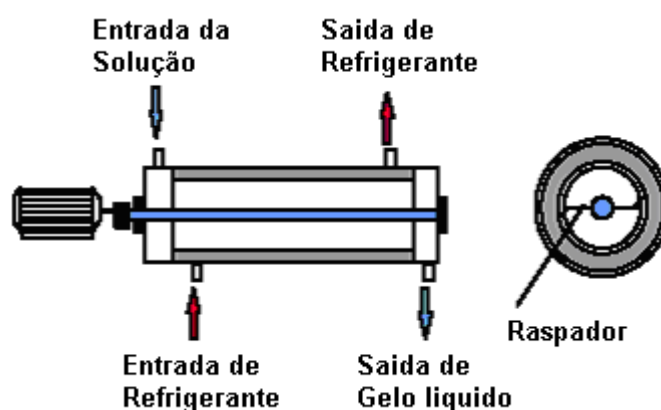


Figura 7 - Produção de gelo por ação de raspador.

1.5.3. Gerador de pasta de gelo produzido por ejetor

O sistema ejetor baseia-se em uma troca de calor entre dois líquidos. Um líquido mais pesado do que a água e imiscível é resfriado abaixo da temperatura de congelamento da água através de um sistema de refrigeração secundário convencional. O líquido passa então através de um sistema ejetor que cria

turbulência suficiente para, a partir do efeito de refrigeração do líquido, transformar a água em cristais de gelo. Uma vez que a mistura alcança o tanque os cristais de gelo mais leves flutuam no alto do tanque e o líquido de transferência de calor, mais pesado, estabelece-se no fundo do tanque para a recirculação.

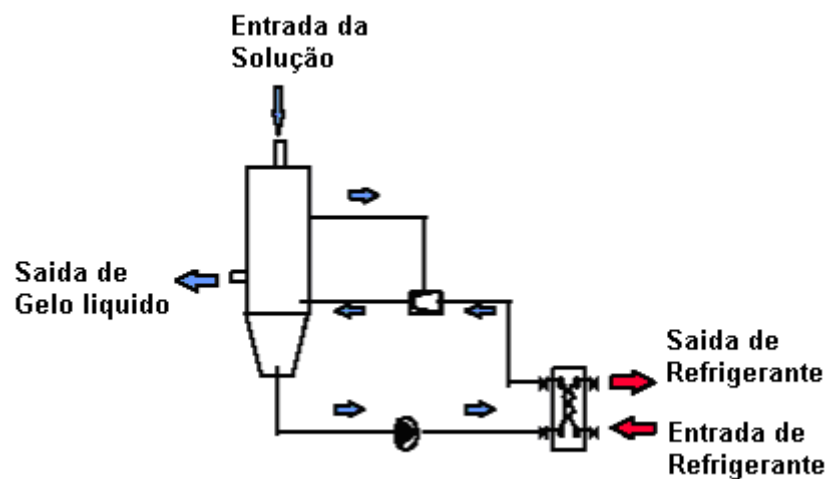


Figura 8 - Produção de gelo por ejetor

1.5.4. Gerador de pasta de gelo produzido por vácuo

A tecnologia do gelo produzido por vácuo (desenvolvida por IDE Technologies Ltd.) esta baseada no fenômeno do ponto triplo da água, onde o vapor, o líquido e o gelo coexistem (0,0061 bar e 0,01 °C). A temperatura de saturação da água varia com a pressão então é possível atingir o ponto triplo. Dentro do VIM (*vaccum ice machine*), a água está sujeita às condições do ponto triplo em um tanque sob condições de vácuo, é produzida um processo denominado “flash evaporation”, parte da água de alimentação evapora subitamente enquanto o líquido restante se congela. Dentro deste ciclo fechado, o calor latente da cristalização causa a evaporação. Por cada 1,0 kg de vapor gerado, são formados cerca de 7,5 kg de cristais de pasta de gelo.

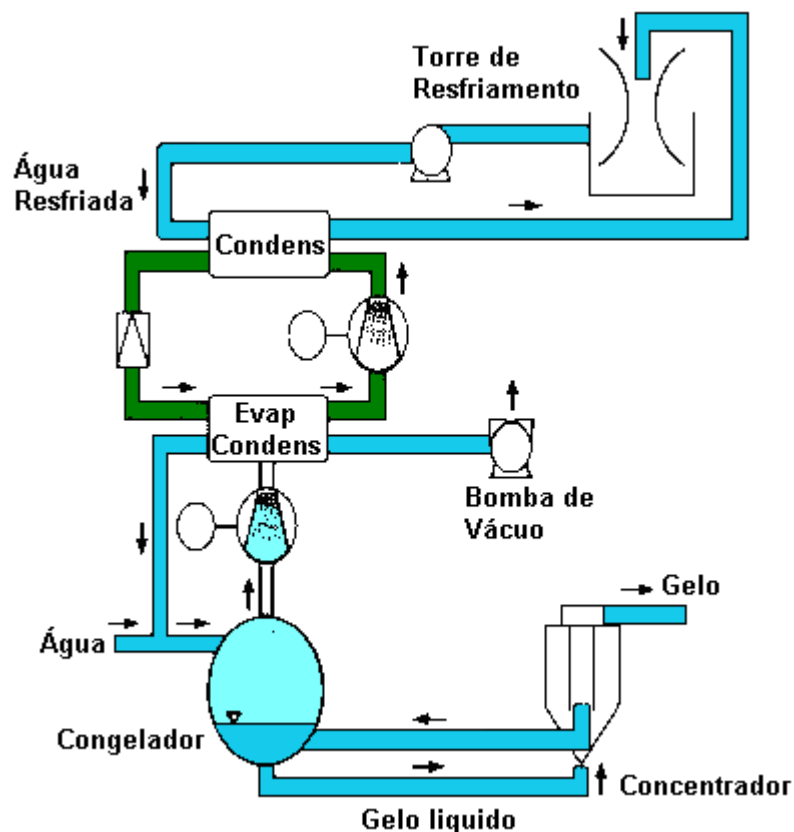


Figura 9 - Produção de gelo por vácuo

1.5.5. Gerador de película descendente agitado

O gerador de pasta de gelo deste tipo é tratado nesta dissertação. Este tipo de gerador está baseado em um trocador de calor convencional de tubo e carcaça vertical e um agitador mecânico. No processo fluido refrigerante e uma solução aquosa trocam calor. O processo formação da pasta de gelo está baseado no super-resfriamento da solução, uma película descendente desta solução escoar por gravidade pelo trocador de calor, esta película é perturbada pela ação de um agitador mecânico a fim de intensificar a transferência de calor e remover a formação de gelo, impedindo que o mesmo cole na superfície interna do tubo.

Uma vez que a solução é super-resfriada e perturbada, formam-se finos cristais de gelo microscópicos na solução que são coletados para a distribuição ou armazenamento. Não há nenhuma fricção entre o agitador mecânico e a parede do tubo. A solução do pasta de gelo age como um lubrificante.

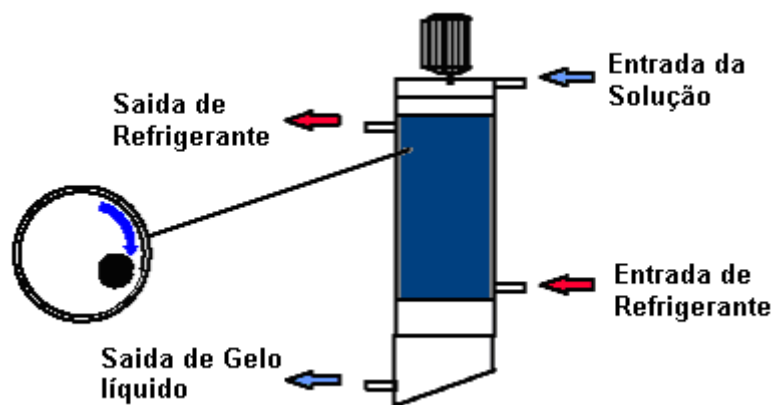


Figura 10 - Produção de gelo por película descendente agitada

O evaporador orbital de tubo (OTE) é um evaporador vertical de filme de tubo/raspador. Tem a vantagem de aglomerar um grande número de tubos de transferência do calor em cada recipiente de transferência de calor, como nos evaporadores verticais tradicionais de tubo. Tem também como vantagem um elevado coeficiente de troca de calor e distribuição uniforme da película fluida fina nas superfícies de evaporação como em um evaporador da película do tipo raspador. A ação do limpador é realizada pela haste revolvendo dentro de cada tubo de evaporação.

As características superiores do *OTE* são derivadas de uma haste que revolve dentro de cada tubo para espalhar o líquido numa película fina e uniforme para facilitar a transferência de calor, permitindo que o escoamento vertical flua livremente.

Nesta dissertação o objeto de estudo é um elemento unitário de um trocador de calor composto de vários tubos, ou seja, um único tubo é analisado, como mostra a figura 11. As linhas são divisões imaginárias e, externamente aos tubos, escoo o fluido refrigerante.

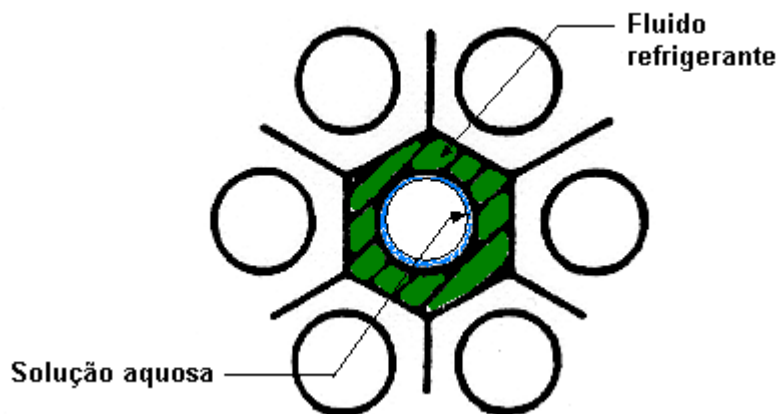


Figura 11 - Elemento unitário de um trocador de calor de tubos

1.6.

Componentes de um sistema de refrigeração com pasta de gelo

Como mostrado na figura 12, este tipo de sistema de refrigeração está basicamente formado pelos seguintes componentes:

1. Unidade condensadora: Elemento que produz o frio;
2. Gerador da pasta de gelo: Evaporador orbital de tubo;
3. Tanque de armazenamento;
4. Sistema de controle;
5. Trocador de calor.

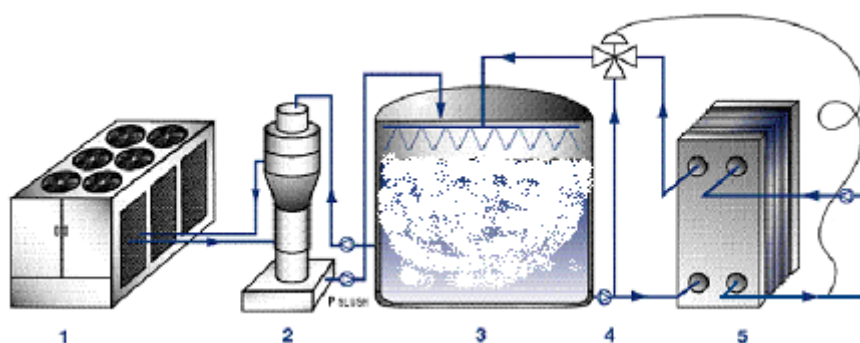


Figura 12 - Esquema do sistema de gerador de pasta de gelo.

Na literatura disponível existe um número limitado de trabalhos nesta área, Seguem alguns dos trabalhos que serviram para definir o tratamento dado ao problema em questão.

Kim B.S. 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.

Oliver Bel & André Lallemand (1998), 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. Neste trabalho é apresentada uma correlação para o coeficiente de troca de calor.

Bounopane, R.A, & H.D. Huang (1991), estudaram as características de transferência de calor e escoamento do fluido num evaporador orbital de tubo empregado em dessalinização.

1.7.

Conteúdo do trabalho

No segundo capítulo é apresentada uma breve análise teórica, onde se descreve a tecnologia de filmes finos, um estudo sobre os coeficientes de troca de calor e as vantagens desta tecnologia. Ainda neste capítulo são apresentados um estudo da transferência de calor do fluido refrigerante e uma análise do seu coeficiente de troca de calor.

O dispositivo experimental é descrito no terceiro capítulo. O protótipo foi projetado com base nas referências apresentadas no capítulo 2. Neste capítulo apresenta-se ainda uma expressão para a determinação experimental do coeficiente de troca de calor no evaporador.

No quarto capítulo descreve-se o procedimento experimental, desde a produção da solução aquosa empregada na formação da pasta até o método de avaliação da fração de sólido na pasta de gelo, o parâmetro mais importante na determinação do coeficiente de troca de calor. Discute-se aí amplamente os diversos métodos para determinar a fração de sólido.

No quinto capítulo são apresentados os resultados.

Conclusões e as sugestões para trabalhos futuros aparecem no capítulo seis.