

1

Introdução

O objetivo deste trabalho é a determinação das características de transferência de calor de um gerador de pasta de gelo de superfície raspada. Pasta de gelo é uma tecnologia relativamente nova, utilizada com uma variedade de propósitos diferentes, onde alta performance de resfriamento é requerida. Seu uso mais difundido é como fluido refrigerante secundário em sistemas de ar condicionado e armazenamento de energia térmica [1]. Outras aplicações da pasta de gelo incluem áreas tais como a engenharia de alimentos e a indústria pesqueira [1]. Sua aplicação se estende, também, à área da medicina, onde é utilizada em técnicas menos invasivas, tais como a cirurgia laparoscópica no tratamento de rins. Neste caso específico, induz-se uma hipotermia localizada nos rins com a ajuda de pasta de gelo, para evitar danos por isquemia (falta de oxigenação) [2].

Ciclos secundários de refrigeração, operando com pasta de gelo como fluido de trabalho, podem representar uma alternativa aos sistemas de refrigeração tradicionais, reduzindo níveis de consumo de energia e de investimento e trazendo benefícios ao meio ambiente.

1.1

Fluidos refrigerantes primários e secundários

Em virtude da legislação que regula as substâncias que destroem a camada de ozônio e provocam o aquecimento global, a indústria de refrigeração voltou sua atenção aos fluidos refrigerantes que vinham sendo usados antes da era dos CFCs e que nunca foram abandonados completamente. Alguns destes refrigerantes alternativos são conhecidos como refrigerantes naturais, porque são parte do ambiente natural ou porque, no longo prazo, não prejudicam o meio ambiente no caso de vazamento para a atmosfera. Estes

refrigerantes incluem, principalmente, o ar, a água, o dióxido de carbono, os hidrocarbonetos e a amônia [3, 4, 5].

Alguns destes refrigerantes alternativos apresentam algumas desvantagens, em função de sua segurança e perigos de saúde imediatos. O propano, por exemplo, é inflamável e a amônia, igualmente inflamável e também tóxica. Os riscos associados da refrigeração com o uso da amônia ou propano são contornáveis, mas as medidas de segurança requeridas podem exigir investimentos custosos [5]. Um caminho para reduzir os perigos da inflamabilidade é diminuir a carga total de refrigerante, instalando um ciclo de refrigeração secundário. Num sistema como este, o frio é gerado em um ciclo de refrigeração primário, sendo eventualmente armazenado, e, então, transferido a um ciclo de refrigeração secundário através de um trocador de calor intermediário. Neste ciclo de refrigeração secundário um fluido térmico a baixa temperatura, “portador de frio”, não-tóxico, não-inflamável é, então, utilizado para distribuir a potência de refrigeração para as posições requeridas. Um diagrama básico de um sistema que opera com um ciclo secundário com termoacumulação é apresentado na Fig. 1.1.

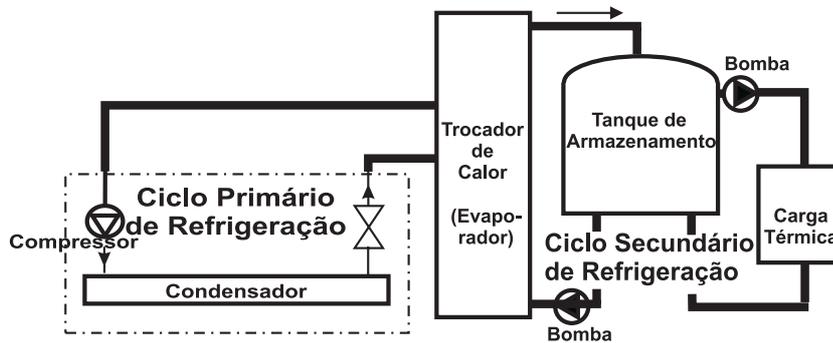


Figura 1.1: Diagrama de um sistema de refrigeração com ciclos primário e secundário e termoacumulação.

Os sistemas convencionais de evaporação diretos, isto é, sem ciclo secundário de refrigeração, é normalmente de baixo custo e são tecnicamente confiáveis. Sem a necessidade de um trocador de calor indireto, podem operar com temperaturas de evaporação mais favoráveis. Entretanto, utilizam o mesmo fluido refrigerante tanto para a “produção” quanto para o “transporte” de frio de uma unidade central de refrigeração aos usuários finais. Como resultado, estes sistemas contêm grandes quantidades de fluido refrigerante e, no caso de vazamento permanente ou acidental, podem levar a perdas elevadas com danos maiores para o meio ambiente. Além do mais, cargas elevadas e vazamentos de refrigerante elevam os custos

de operação [6]. Um sistema com ciclo de refrigeração secundário permitiria reduzir, portanto, a quantidade de fluido refrigerante no ciclo primário.

A utilização de um ciclo de refrigerante secundário também aumenta a flexibilidade de um sistema de refrigeração. Se o frio for armazenado em um tanque, durante o ciclo de resfriamento, as demandas de energia elétrica podem ser deslocadas para os horários de baixo custo da energia elétrica ou de melhor rendimento do sistema de refrigeração. Mesmo se não houver nenhuma estrutura de tarifa dupla ou diferenciada de eletricidade, ainda assim benefícios energéticos podem ser obtidos, em virtude de a eficiência do ciclo de refrigeração primário ser mais elevada durante o período noturno, visto que a temperatura de condensação será mais baixa. Também as cargas de pico podem ser reduzidas nivelando-se a demanda de frio por um período mais longo do dia, de modo que a capacidade do compressor do fluido refrigerante do ciclo primário possa ser menor.

As pastas de gelo têm sido introduzidas recentemente como fluidos de refrigeração secundários [7, 4, 8]. Sua diferença principal, se comparada aos fluidos secundários tradicionais, reside no uso da mudança de fase (calor latente) para armazenar o frio, na forma de cristais de gelo, em vez de usar a capacidade de calor sensível. Sua utilização pode aumentar substancialmente o desempenho energético e econômico de sistemas de refrigeração.

1.2 Pasta de gelo

A tecnologia da pasta de gelo representa um importante desenvolvimento para algumas aplicações de refrigeração. A pasta de gelo tem sido referida eventualmente, como fluido de sistemas avançados de transporte de energia térmica [9]. Para o projeto destes sistemas torna-se necessário um melhor conhecimento a respeito deste “novo” fluido. A seguir, algumas definições encontradas na literatura permitirão caracterizar a pasta de gelo.

1.2.1 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 quaisquer tipos de cristais de gelo com diâmetros entre 25 μm e 4 mm suspensos em uma solução aquosa em fase líquida, com ou sem um agente que baixe a temperatura do ponto de solidificação [10].

Na realidade não é simples apresentar uma definição exata do termo ‘pasta de gelo’. A definição seguinte pode ser adotada para descrever pastas de gelo:

Definição. Pasta de gelo consiste de partículas de gelo dispersas em um fluido formando uma suspensão de duas fases [4].

Por outro lado, a pasta cristalina fina de gelo (“fine-crystalline ice slurry”) consiste de uma pasta de gelo na qual ocorre uma suspensão de partículas de gelo com um diâmetro (característico) médio igual ou menor que 1 mm [4].

Esta última definição, para a pasta cristalina fina de gelo, é um pouco arbitrária com respeito ao tamanho dos cristais. Entretanto, estas definições dão uma idéia da espécie de suspensões as quais são denominadas pastas de gelo. Na atualidade, para a produção de pasta de gelo são mais utilizados os geradores do tipo de superfície raspada, os quais produzem pasta de gelo com cristais de diâmetro de partícula médio característico de aproximadamente 200 μm [4].

Existem outras tecnologias de produção de pasta de gelo, como as tecnologias por processo direto a vácuo, que utiliza somente água pura [5]. Ainda não existe uma definição exata de pasta de gelo que seja abrangente a todos os tipos de pasta de gelo e métodos de geração.

A Fig. 1.2, mostra uma fotografia em escala microscópica de cristais de gelo em uma solução, formando uma pasta de gelo com cerca de quinze partículas. A dimensão da figura é 1061 μm \times 762 μm . O comprimento médio das partículas, avaliado em 10 fotografias, é 344 μm e o desvio padrão é 136 μm . A largura média foi determinada em 234 μm e o desvio padrão 85 μm . A relação largura por comprimento é da ordem de 0,68 [4].



Figura 1.2: Fotografia de cristais de gelo em uma pasta de gelo (tamanho da fotografia $1061 \mu\text{m} \times 762 \mu\text{m}$) [4].

1.2.2

Vantagens da tecnologia de pasta de gelo

A seguir, são descritas algumas vantagens da utilização de pasta de gelo.

Área maior de troca de calor. Altas taxas de transferência de calor são possíveis porque as partículas de gelo estão finamente dispersas na fase líquida, como mostra a Fig. 1.2, com detalhes dos cristais de gelo dispersas na solução. A Fig. 1.3 mostra a área total dos cristais de gelo em uma amostra de 1 kg de pasta de gelo com diferentes frações de gelo, em função do diâmetro d_p de partículas de gelo supostamente esféricas. A Fig. 1.3 fornece uma idéia de grandeza da área total de troca. Se for considerada a relação de troca de calor $\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T$ pode-se entender a razão da grande capacidade de transferência de calor da pasta de gelo.

Transporte facilitado de energia. A pasta de gelo, como já foi mencionado, é um fluido capaz de ser bombeado. Por este motivo tem a capacidade de transportar grandes quantidades de energia, devido à entalpia de fusão do gelo (calor latente), que é da ordem de 332,4 kJ/kg. A pasta de gelo apresenta uma densidade de armazenamento de energia entre 4 a 7 vezes maior do que a água gelada. Isto permite a redução das dimensões das tubulações de transporte e das bombas do sistema. Os diâmetros das tubulações podem ser reduzidos em até 40% e os custos do sistema de tubulações, em 70% [11].

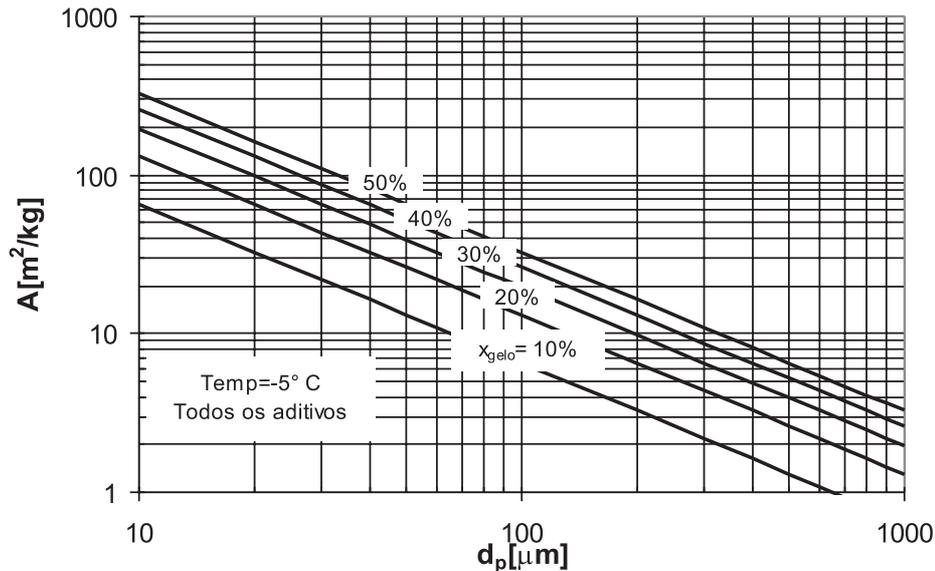


Figura 1.3: Área total, A , de todos os cristais de gelo supostamente esféricos de diâmetro d_p em 1 kg de pasta de gelo [4].

Tanques de armazenamento de energia menores. A grande densidade de armazenamento de energia da pasta de gelo torna possível a utilização de tanques de armazenamento menores, se comparado com sistemas de água gelada. A redução do volume dos tanques de armazenamento é da ordem de 1/4 a 1/5 do volume requerido para água gelada [12].

Uso eficiente de energia. Nos sistemas estáticos de geração de gelo, a fase sólida 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 às ceifeiras de gelo, “ice harvesters”, o sistema de pasta de gelo não necessita do descongelamento exigido para “descolar” a fase sólida, para posterior armazenamento em tanques, descongelamento este que demanda um consumo adicional de energia. Tal processo de descongelamento, que não é necessário em sistemas que operam com pasta de gelo, implica, mais uma vez, uma maior eficiência global de armazenamento de energia [13].

Economia de custo dos tanques de armazenamento . A pasta de gelo pode ser armazenada em tanques sem a necessidade de apoio estrutural extra, como o requerido no caso das ceifeiras de gelo, localizadas

sobre os tanques de armazenamento [14].

Formato flexível dos tanques 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, com uma conseqüente economia de espaço. Isto é difícil de se alcançar em sistemas estáticos e outros sistemas de armazenamento de gelo dinâmicos, tais como às ceifeiras de gelo, “ice harvesters” [14].

Conforme descrito acima, a tecnologia de pasta de gelo apresenta numerosos atrativos: energéticos, econômicos, de segurança e, sobretudo do ponto de vista do meio ambiente. Entretanto, podem-se enumerar dois obstáculos à utilização desta tecnologia:

1. A necessidade de se utilizar um aparato particular para a geração dos cristais de gelo e de assegurar que permaneçam em suspensão na solução aquosa.
2. A necessidade da medição da fração de gelo em linha na pasta de gelo, por medidas de segurança e operação. Tem-se reportado que o transporte da pasta de gelo com frações de gelo acima de 0,25 kg/kg produz um aumento significativo na queda de pressão. E com frações de gelo maiores, problemas com a operação das bombas [15]. A determinação da fração de gelo somente é possível por uma medição muito cuidadosa da temperatura e apresenta numerosos problemas. A determinação da fração de gelo mais confiável é por medição da massa específica da pasta de gelo.

1.3

Objetivos da presente pesquisa

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 superfície raspada. Para tal foi desenvolvido um protótipo experimental. Um sistema de refrigeração de média capacidade foi empregado para a produção do frio.

1.4

Revisão Bibliográfica

Inicialmente é apresentado um breve histórico e características deste tipo de trocador de calor. Em seguida são considerados os trabalhos encontrados na literatura, sobre transferência de calor sem e com mudança de fase.

Atualmente, os geradores de pasta de gelo por superfície raspada são os mais desenvolvidos tecnologicamente e amplamente aceitos para sistemas de geração daquele fluido. Tradicionalmente, os geradores de pasta de gelo, conhecidos também como Cristalizadores de Superfície Raspada “Scraped Surface Crystallizers (SSC)”, têm sido utilizados na indústria química de processos, para a separação de compostos orgânicos tais como o paraxileno de seus isômeros (ortoxileno, metaxileno, etilbenzeno) [16]. Estes cristalizadores são tipicamente mais longos (6-12 m) do que os geradores de pasta de gelo, com diâmetros nos limites de 0,15 a 0,30 m. Estes SSC, tipicamente, para a separação dos compostos orgânicos, necessitam velocidades de raspagem muito mais baixas (15-30 revoluções por minuto) do que os geradores de pasta de gelo. A indústria alimentícia também faz uso dos SSC para o resfriamento, pasteurização e cristalização de meios que são muito viscosos, pegajosos ou particulados, tais como sorvetes, produtos concentrados congelados, margarina, manteiga, processamento de queijo, produtos de carne e peixe. Estes cristalizadores são tecnologicamente semelhantes aos geradores de pasta de gelo [16].

Na literatura encontram-se vários trabalhos, que tratam da transferência de calor em trocadores de superfície raspada sem mudança de fase. Independentemente, vários pesquisadores desenvolveram um modelo teórico para o número de Nusselt, denominado “modelo de penetração de calor” [17, 18, 19]. Também foram apresentados modelos semiempíricos para a determinação do número de Nusselt.

Muitos estudos sobre a dinâmica de fluidos e transferência de calor sem mudança de fase foram apresentados na literatura [19, 20, 21, 22]. Entretanto o comportamento, no que diz respeito à transferência de calor, de fluidos viscosos com baixo número de Reynolds, especialmente com mudança de fase, ainda não foi inteiramente estudada [23]. Este é o caso da pasta de gelo.

São poucos os trabalhos na literatura que avaliaram as características

de transferência de calor com mudança de fase, em trocadores de calor de superfície raspada. Os primeiros trabalhos nesta área foram direcionados para o estudo de cristalizadores (SSC, Scraped Surface Crystallizers) [24, 25]. Weisser [25] apresentou uma correlação que, funcionalmente, é parecida com o modelo teórico de penetração de calor. Cabe salientar que este modelo teórico é utilizado como referência nos trabalhos que tratam da transferência de calor em superfície raspada.

Especificamente em pasta de gelo, tem-se dois trabalhos. Bel & Lallemand [26] estudaram a transferência de calor em um trocador de calor de superfície raspada. O mecanismo de raspagem utilizado foi de uma lâmina helicoidal (Fig. 1.7d). Estudaram pasta de gelo de soluções aquosas de etanol com concentração em massa de 10%.

Lakhdar et al. [27] estudaram um trocador de calor com sistema de raspador de lâminas planas (Fig. 1.7a). Entre os parâmetros que avaliaram incluem-se a separação do raspador e a parede interna. Foram empregadas soluções aquosas de etanol e sacarose.

Lakhdar et al. [27] compararam seus resultados com os resultados de Bel & Lallemand [26], apontando que a correlação destes últimos estima valores mais baixos, aproximadamente 8 vezes menores, nos resultados com etanol.

Recentemente, no ano 2006, Kauffeld et al. [15] publicaram um manual (handbook) sobre pasta de gelo, que contém a experiência e conhecimento acumulados sobre esta tecnologia. O manual trata da criação dos cristais de gelo, propriedades termofísicas de pastas de gelo, sua dinâmica de fluidos, termodinâmica e transferência de calor, produção de pasta de gelo, transporte, trocadores de calor, sistemas de controle, otimização de sistemas que funcionam com pasta de gelo, aplicações atuais e possíveis aplicações futuras, entre outros.

Entretanto, por ser esta área de pesquisa relativamente nova, existem processos para os quais a literatura ainda não apresenta informação conclusiva. O mecanismo de cristalização dos cristais de gelo em geradores de superfície raspada é um exemplo, visto que a maior parte de teorias de mecanismos de cristalização de gelo basicamente depende de evidências circunstanciais e um tanto quanto subjetivas.

Wang & Kusumoto [28], Wang & Goldstein [29], Snoek [30] e Gladis et al. [12], por exemplo, defendem que, durante o processo de geração de pasta de gelo, a solução aquosa é super-resfriada abaixo da temperatura de solidificação. Uma nucleação espontânea inicia, então, o crescimento de cristais de gelo no volume líquido. Acreditam que os raspadores continuamente perturbam a camada limite térmica, e previnem a formação de depósitos cristalinos de gelo na superfície do gerador, transferindo o fluido resfriado da parede para a vizinhança, isto é, para o volume líquido.

Por outro lado, Russell et al. [31], Schwartzberg & Liu [32], Schwartzberg [33] e Hartel [34] estudaram o mecanismo de cristalização dos cristais observando a produção de sorvete, e Armstrong [35] e Patience et al. [36] estudaram a cristalização na produção de paraxileno. Estes autores sugerem que os cristais de gelo se formam próximo à parede resfriada e se dispersam para o centro do gerador pela ação dos raspadores.

Conclui-se, portanto, pela necessidade de um aprofundamento no estudo dos mecanismos de formação da pasta de gelo e da transferência de calor em sua interação com sistemas de refrigeração.

O presente trabalho pretende apresentar contribuição para esta área de pesquisa ainda incipiente.

1.5 Produção de pasta de gelo

Dentre as tecnologias de produção de gelo há os **sistemas estáticos**, tais como: bancos de gelo e sistemas encapsulados, para citar alguns exemplos. Há, por outro lado, os **sistemas dinâmicos**, nos quais inclui-se o sistema com raspador de superfície. O presente trabalho concentrar-se-á neste último.

São descritos, a seguir, os meios mais comumente empregados para a produção da pasta de gelo.

1.5.1

Geração 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 sob 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 de gelo depende do nível do super-resfriamento do líquido que sai pelo evaporador. A Fig. 1.4 mostra o esquema de um sistema de produção de pasta de gelo por super-resfriamento da água

A vantagem desta técnica é que utiliza tecnologia simples e não precisa de energia extra para funcionar. Contudo, a principal desvantagem é que a cristalização pode ocorrer no evaporador, interrompendo o processo. Este método requer um controle preciso da temperatura [37].

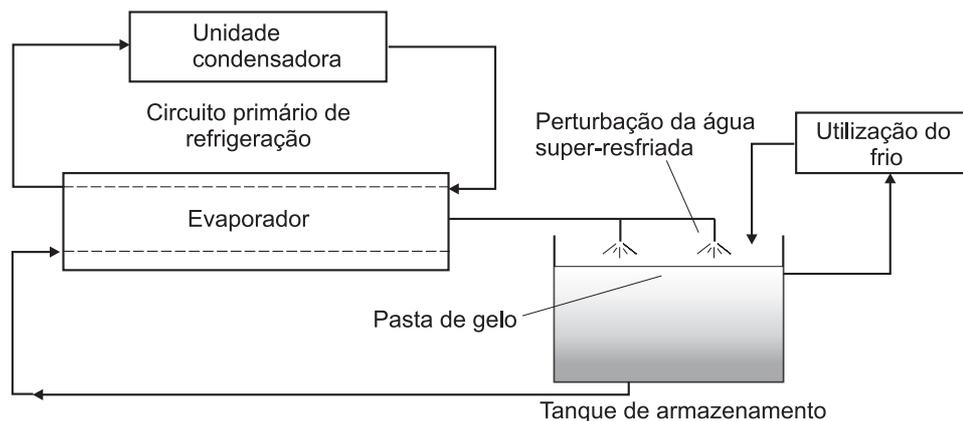


Figura 1.4: Esquema de sistema de produção de pasta de gelo por super-resfriamento da água.

1.5.2

Geração de pasta de gelo por contato direto

O sistema de geração por contato direto baseia-se em uma troca de calor entre dois líquidos. Um líquido mais pesado do que a água e, imiscível com esta, 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 [1]. O esquema típico de funcionamento deste sistema está mostrado na Fig. 1.5.

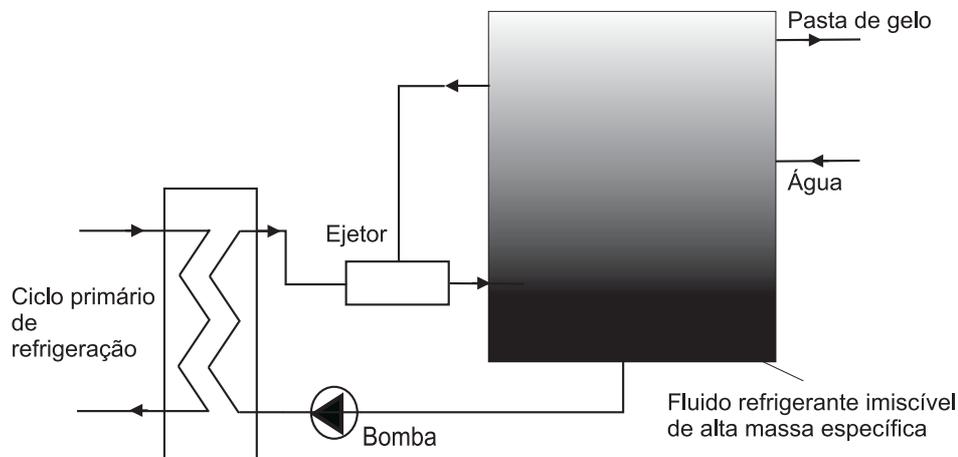


Figura 1.5: Esquema de sistema de produção de pasta de gelo por contato direto de fluidos.

1.5.3 Geração de pasta de gelo por vácuo

A tecnologia de pasta de gelo produzido por vácuo baseia-se no fenômeno do ponto triplo da água, onde vapor, líquido e gelo coexistem (a 0,0061 bar e 0,01 °C). Como a temperatura de saturação da água varia com a pressão, é possível atingir-se o ponto triplo controlando-se esta última. Dentro de um dispositivo denominado VIM (“vacuum ice machine”), a água está sujeita às condições do ponto triplo em um tanque sob condições de vácuo. Precede-se, então, a um processo denominado evaporação em “flash”, no qual parte da água de alimentação evapora subitamente, enquanto que o líquido restante se solidifica. Dentro deste ciclo fechado, a entalpia de solidificação causa a evaporação. Para cada 1,0 kg de vapor gerado, são formados cerca de 7,5 kg de cristais de pasta de gelo [38].

Sistemas de refrigeração de grande potência, da ordem de 150 kW a 3000 kW, funcionam com este processo. São sistemas relativamente complexos, pois utilizam um compressor de grande capacidade volumétrica para deslocar, sem contaminação de óleo, o vapor de água a baixa pressão. A Fig. 1.6 mostra o esquema de funcionamento de tal sistema [39].

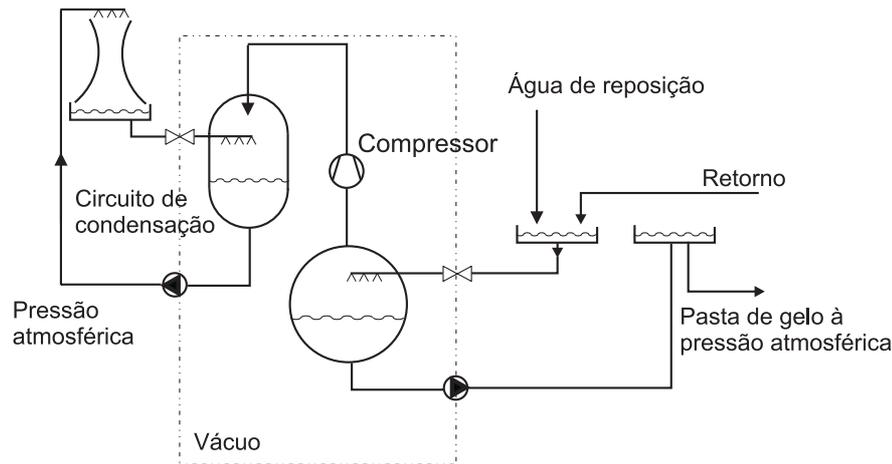


Figura 1.6: Esquema de sistema de produção de pasta de gelo por vácuo [15].

1.5.4 Geradores de pasta de gelo de superfície raspada

Em geral, a pasta de gelo formada por super-resfriamento de água pura apresenta elevada aderência (“very sticky”). Entretanto, a pasta de gelo formada a partir de uma solução aquosa não apresenta aderência tão elevada devido à existência de uma camada fina de solução aquosa rodeando os cristais de gelo. Esta camada evita a formação de blocos de gelo por sinterização [9]. Na superfície onde ocorre formação dos cristais de gelo, muito embora estes cristais apresentem pouca aderência, forma-se uma camada progressiva de cristais de gelo que aumenta gradualmente a resistência térmica. É preciso, então, um mecanismo que remova esta camada de cristais de gelo.

O gerador de pasta de gelo de superfície raspada consiste de um evaporador tipo tubo e carcaça, onde um fluido refrigerante primário, como R22, R-404 ou R717, resfria, por evaporação, o espaço anular externo, promovendo a transferência de calor. Um sistema de raspadores, montados em um eixo giratório, e que podem ser hastes metálicas (Fig. 1.7b), raspadores planos (Fig. 1.7a) ou raspadores helicoidais (Fig. 1.7d), evitam a deposição da camada de gelo que se forma nas paredes do gerador, raspando-as periodicamente. A Fig. 1.7c mostra uma variante dos geradores de pasta de gelo de tubo e carcaça. Este sistema apresenta um sistema de discos planos resfriados internamente, onde os cristais de gelo são formados e removidos por uma raspador nas faces. A ação mecânica dos raspadores induz turbulência no meio, isto, intensificando a transferência de calor.

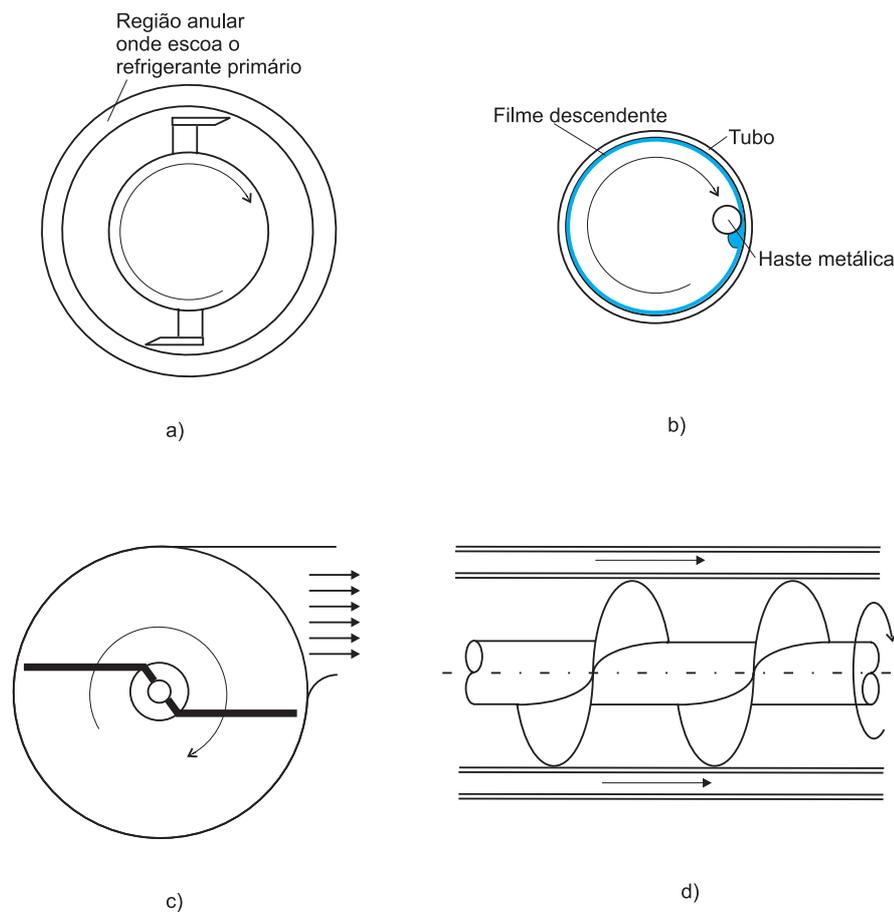


Figura 1.7: Esquema de sistemas de geração de pasta de gelo. a) Gerador com raspadores planos [27], b) Gerador com raspadores de haste metálica Paul Mueller Co. [14], c) Gerador de discos [15], d) Gerador com raspador helicoidal [26].

Os sistemas de geração de pasta de gelo utilizam uma unidade condensadora convencional, composta por: compressor, condensador, tanque de líquido e um dispositivo de expansão termostático. Normalmente fornece fluido refrigerante à região anular do gerador, constituindo-se em um evaporador (Fig. 1.1). O fluido refrigerante evapora-se a uma baixa pressão através da região anular resfriando a solução aquosa que escoia pelo tubo interior do gerador. Do processo de resfriamento forma-se a pasta de gelo.

Pelas características de funcionamento dos trocadores de calor tipo tubo e carcaça, estes, na condição de evaporadores, trabalham inundados com o fluido refrigerante. Foram reportados na literatura problemas com a acumulação de óleo lubrificante (isto é, não retorno ao compressor) no gerador de pasta de gelo, devido às baixas temperaturas de operação o que reduz as taxas de transferência de calor [40]. Ticona [41] desenvolveu um

gerador com estas características e observou a acumulação de óleo no gerador resultando em dano ao compressor do sistema por falta de lubrificação.

1.6 Organização do trabalho

O presente trabalho encontra-se dividido em seis capítulos.

O capítulo 1 trata da introdução, motivação, revisão bibliográfica e objetivos.

O capítulo 2 trata da determinação das propriedades termofísicas da pasta de gelo incluindo: massa específica, condutividade térmica, viscosidade dinâmica, entalpia e calor específico aparente. A determinação destas propriedades é feita a partir das propriedades termofísicas do gelo e da solução aquosa utilizada.

No capítulo 3 detalha-se o aparato experimental utilizado.

O equacionamento para a redução de dados é apresentado no capítulo 4.

No capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados obtidos.

Finalmente, no capítulo 6, são apresentadas as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.