

2. Conceitos Gerais

2.1. Termoacumulação

Os sistemas de termoacumulação armazenam energia térmica quando esta não é necessária (para aproveitar a energia disponível, ou para aproveitar o menor custo de produzi-la nesse momento) em tempos discretos, para que esteja disponível quando se precise a mesma energia, ou produzindo uma maior potência em um tempo reduzido a partir da energia acumulada (Braga, 2003).

2.1.1. Classificação dos sistemas de termoacumulação

Segundo o aproveitamento da energia armazenada classificam-se em sistemas de calor sensível ou sistemas de calor latente. O primeiro deles é realizado através do fornecimento de calor sensível a um meio, que pode ser líquido ou sólido. Os elementos comumente utilizados em sistemas de conforto térmico são a água ou as soluções salinas.

Em sistemas de calor latente, aproveita-se o ponto de congelamento de alguma substância, como é o caso da água nos sistemas de gelo sobre tubos, sistemas com parafina, ou utilizando materiais com mudança de fase ou pasta de gelo a partir de soluções binárias compostas de água e algum aditivo, entre outras.

2.1.2. Modos de armazenamentos

Apresentam -se os métodos mais conhecidos para armazenamento de energia térmica:

- Armazenamento por Água resfriada (Chilled water)
- Armazenamento por Gelo sobre tubo (Ice on Pipe)
- Armazenamento com Geradoras de gelo (Ice Harvesters)
- Armazenamento por Glicol (Glycol Systems)
- Armazenamento por Encapsulamento e Mudança de fase.

Num sistema de armazenamento térmico de água resfriada, aproveita-se o calor sensível para armazenar energia, podendo-se utilizar algumas variantes para seu modo de armazenamento, como o caso por estratificação, que é baseado na formação de camadas estanques separadas graças à diferença de densidade da água com a temperatura, a qual varia em função do tempo e a descarga.

No modo de membranas ou diafragmas, utiliza-se, como seu nome indica, uma membrana para manter separadas as zonas de água fria e a de retorno.

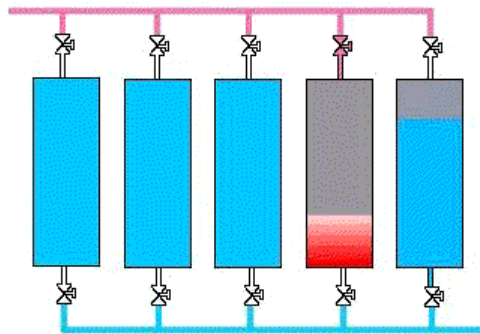


Figura 1 – Tanques de armazenamento térmico por estratificação.

Outro método para conseguir armazenamento de energia é utilizando labirintos e aletas, em diferentes compartimentos. Para recuperar o calor inverte-se o fluxo do fluido neste sistema (Braga, 2003).

Num sistema de armazenamento térmico de gelo sobre tubo, aproveita-se o calor latente para armazenar energia. Estes sistemas também são conhecidos como sistemas “ice-builder”. Durante o processo de carga, forma-se gelo no redor das muitas tubulações que ingressam ao tanque de armazenamento, e durante a descarga passa-se um fluido pelo seu interior, a uma maior temperatura, para inverter o sentido de transferência de calor e recuperar o frio (energia).

Um sistema de armazenamento térmico por Geradoras de Gelo, ou “Ice Harvester”, consiste de um painel onde é formado o gelo, para ser removido de tempos em tempos armazenando-se, por gravidade, num reservatório (ASHRAE, 1999).

Outros modos de armazenamento de energia utilizam um fluido secundário, geralmente etileno glicol, em um sistema fechado para carga e descarga de energia térmica.

Podem-se aproveitar materiais com mudança de fase como elementos acumuladores de energia latente. Estes materiais são misturas químicas de líquido com sais, os quais apresentam uma temperatura específica de mudança de fase de líquido para sólido.

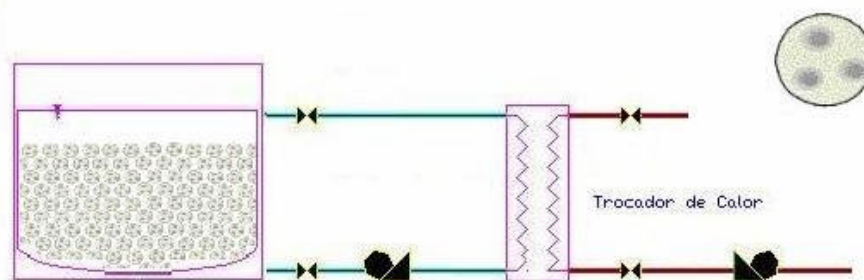


Figura 2 - Armazenamento térmico utilizando PCMs.

2.1.3. Vantagens da Termoacumulação

Quando, em sistemas de água gelada, se utiliza sistema de termoacumulação, os equipamentos trabalham mais próximos às suas máximas eficiências de operação, podendo ainda aproveitar-se das tarifas diferenciadas de energia horo-sazonais.

Os volumes dos tanques de armazenamento térmico podem ser reduzidos, diminuindo assim os custos iniciais, facilitando o manejo dos mesmos.

2.2. A Pasta de Gelo

Uma das novas tecnologias no setor de refrigeração é a aplicação da pasta de gelo ou “ice slurry” (também chamado flo ice, gelo dinâmico, etc), indicado para a indústria de alimentos (frutas, pescados, empacotamento de alimentos, cervejarias, entre outros processos), e outras áreas em pesquisa, devido, entre outros, ao potencial de rápido resfriamento que apresenta.

A pasta de gelo consiste de uma solução aquosa com finos cristais de gelo em suspensão, a qual pode ser obtida de misturas de água mais algum aditivo. Sua produção ou utilização pode se dar em diferentes concentrações, tendo como vantagem principal a “forma líquida” para ser bombeada. Pode ser utilizada como um refrigerante secundário, diretamente sobre produtos a resfriar ou como elemento para armazenar frio. Experiências mostram que, para percentuais relativamente altos, da ordem de até 20% na fração de gelo, a pasta de gelo é bombeável, o que simplifica seu transporte. Pode ser armazenada em concentrações de até 50 ou 60% de fração de gelo, ASHRAE (1999).

Um sistema típico de geração para pasta de gelo consiste de uma unidade condensadora, uma unidade de geração de pasta de gelo (na qual geralmente escoa pelo interior do trocador a solução aquosa super-resfriada e utilizando uma haste mecânica para raspar o gelo que se forma na superfície fria do trocador), uma bomba e um tanque de armazenamento (ASHRAE, 1999).

O uso da pasta de gelo pode se dar de maneira direta ou indireta. A técnica geralmente aplicada é o método direto.

Em aplicações diretas, devido ao contato intenso dos cristais de gelo com o produto, o resfriamento é imediato, o que pode ser muito interessante segundo as aplicações.

Para o uso indireto da pasta de gelo, como fluido refrigerante secundário, precisa-se de uma bomba adicional, e a uma unidade de aplicação (ventilador, trocador, etc). Na figura 3 pode-se apreciar um sistema para uso indireto com pasta de gelo.

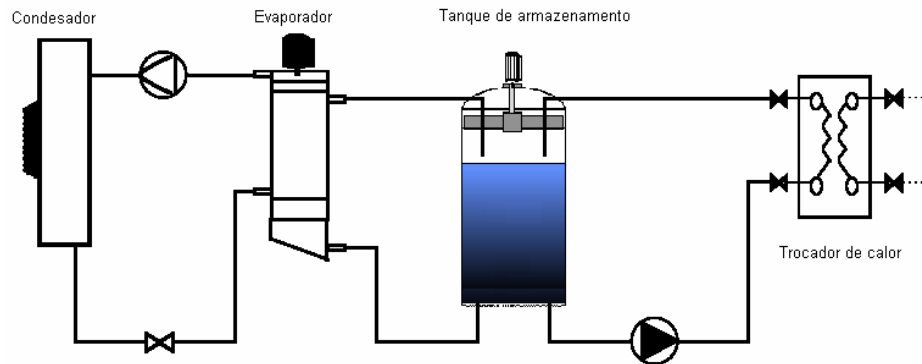


Figura 3 – Sistema de termo acumulação com pasta de gelo.

Refrigerantes secundários são utilizados em sistemas de refrigeração e bombas de calor de uso indireto para manter um ambiente seguro dos refrigerantes primários (Melinder,1997).

Uma das principais razões de se usar refrigerantes secundários com mudança de fase, como é o caso da pasta de gelo ou CO_2 , é aproveitar a vantagem da diferença de entalpia de evaporação ou fusão. Nos casos de CO_2 com mudança de fase, o sistema deve ser altamente pressurizado, o que limita suas aplicações.

Têm-se muitas possibilidades de aditivos para obter a solução da qual se gera a pasta de gelo, como o etileno glicol (perigoso para a saúde, e com impacto ambiental negativo), o propileno glicol (altamente viscoso em baixas temperaturas, com alguns riscos na poluição ambiental), o álcool etílico (inflamável, com baixo ponto de ebulição, podendo causar intoxicação se for consumido), o álcool metílico, (perigoso para a saúde, pode causar cegueira se for consumido), o glicerol (alta viscosidade para baixas temperaturas), o cloreto de cálcio (altamente corrosivo na presença de oxigênio), e outros similares, segundo Melinder (1997). Utilizou-se, no presente trabalho, uma solução de água e propileno glicol.

2.2.1. Tipos de Geração de Pasta de Gelo

Apresentam-se a seguir algumas das maneiras de geração de pasta de gelo, muitas delas baseadas em métodos de super-resfriamento com alguma perturbação mecânica.

Ao resfriar lentamente a água, pode-se conseguir baixar sua temperatura além do ponto de congelamento da solução, sem a formação de gelo (super-resfriamento) sobre as paredes do evaporador. Logo, pode-se gerar cristais de gelo aplicando um distúrbio físico sobre o fluxo de água super-resfriada. A fração de gelo depende do grau de super-resfriamento do líquido, entre outras características (ASHRAE, 1999).

Na geração de pasta de gelo por raspador, o gelo é formado na parede do evaporador e removido periodicamente por um sistema mecânico interno. O ponto de congelamento e a mecânica do raspador evitam a acumulação de gelo na parede do evaporador. Pode-se controlar a fração de gelo da pasta gerada variando-se a vazão mássica da mesma.

Na geração por sistema de injeção, o fluido passa através de um sistema de injeção na entrada do evaporador o qual eleva a pressão do fluido. A função do injetor é criar suficiente turbulência para a geração e desprendimento dos cristais de gelo.

A geração da pasta de gelo pode se realizar por vácuo, aproveitando o ponto triplo da água (0,0061Bar e 0,01°C). A evaporação e congelamento são produzidos pela troca de calor latente. Este fenômeno é conhecido como “evaporação flash”, o qual requer a remoção de vapor por compressão mecânica, formando assim a pasta de gelo.

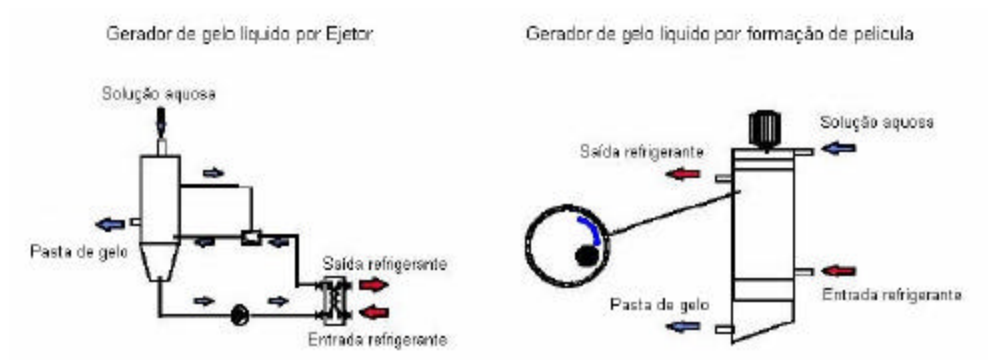


Figura 4 – Tipos de Geração de pasta de gelo.

A geração de pasta gelo por filme, ou película, na parede, troca-se calor em um evaporador de tubo duplo vertical. Normalmente o refrigerante sobe pelo espaço anular, enquanto um filme da solução escoo pelo tubo interno. Cria-se nesta solução um distúrbio, mediante a passagem periódica de uma haste giratória.

2.2.2. Vantagens da pasta de gelo

Dentre os critérios para a seleção de um refrigerante secundário, além das variáveis características de transmissão de calor e a viscosidade, incluem-se a toxicidade, a inflamabilidade e o custo. Neste sentido o uso da pasta de gelo é segura, se comparada ao amoníaco e outras substâncias (Melinder, 1997).

Outra grande vantagem é a possibilidade de se armazenar energia, sob a forma de calor latente, em um elemento que possa ser facilmente bombeado dentro de um sistema. Como consequência chega-se ao aumento na capacidade de resfriamento ao se comparar com sistemas tradicionais de armazenamento via calor sensível de água gelada.

A quantidade de fluido refrigerante no circuito se reduz muito para um dado tamanho da planta. Para os casos onde se necessita temperaturas abaixo de zero graus Celsius, é comum o uso das soluções salinas (salmouras), misturas de água-glicol ou álcool-água, entre outras substâncias aquosas.

A elevada transmissão de calor conduz a trocadores de calor menores. O contato direto com a pasta de gelo, ou imersão direta do produto é um novo conceito que elimina virtualmente perdas durante o resfriamento. Por serem muito finas, as partículas de gelo não apresentam praticamente risco de dano mecânico às superfícies dos produtos ou de abrasão nas bombas e tubulações (Grupta e Fraser, 1990).

Ao trocar sistemas de água gelada por sistemas utilizando pasta de gelo, tem-se a possibilidade de um resfriamento muito mais rápido e de uma redução no tamanho das instalações, nos serviços de manutenção, controle e manejo do mesmo (ASHRAE, 1999).

2.2.3. Propriedades Termofísicas da Pasta de Gelo

Para a determinação das propriedades, pode-se supor que as partículas de gelo consistem de água pura, onde o líquido remanescente consiste de água e aditivos, onde a concentração do aditivo se incrementa na fase líquida à medida que se formam os cristais de gelo.

As propriedades de cada fluido foram determinadas, respectivamente, pelas correlações de Melinder (1997), para a solução aquosa, e de Azevedo (1985), para a água.

Fração de Gelo

É a relação entre a massa de gelo e a massa total da pasta de gelo.

Fluido Portador

É o fluido remanescente que contém o gelo. É uma mistura de água mais um aditivo.

Pasta de Gelo

A pasta de gelo é a soma do fluido portador mais a massa de cristais de gelo.

Concentração

A concentração do aditivo no fluido portador depende da concentração inicial do aditivo (para a solução sem gelo) e da fração de gelo instantânea.

$$C_{fp} = \frac{C_0}{1 - X_g} \quad (1)$$

Onde:

C_{fp} : Concentração do aditivo no fluido portador, [-].

C_0 : Concentração inicial de aditivo, [-].

X_g : Fração de gelo, [-].

Fração volumétrica

A fração em volume de gelo relaciona-se à fração em massa pela seguinte relação:

$$Cv_g = \frac{X_g}{X_g + (1 - X_g) \cdot \frac{\rho_g}{\rho_{fp}}} \quad (2)$$

Onde:

Cv_g : Fração volumétrica do gelo, [-].

X_g : Fração de gelo, [-].

ρ_g : Massa específica de gelo, [kg / m³].

ρ_{fp} : Massa específica do fluido portador, [kg / m³].

Massa Específica

A massa específica da pasta de gelo pode ser calculada por ponderação linear das propriedades das duas fases.

$$\rho_{pg} = \frac{1}{\frac{X_g}{\rho_g} + \frac{(1 - X_g)}{\rho_{fp}}} \quad (3)$$

Onde:

ρ_{pg} : Massa específica da pasta de gelo, [kg / m³].

X_g : Fração de gelo, [-].

ρ_g : Massa específica do gelo, [kg / m³].

ρ_{fp} : Massa específica do fluido portador, [kg / m³].

Entalpia Específica

Para a entalpia se faz um cálculo ponderado das propriedades.

$$h_{pg} = h_g \cdot X_g + h_{fp} \cdot (1 - X_g) \quad (4)$$

Onde:

h_{pg} : Entalpia da pasta de gelo, [J / kg].

h_g : Entalpia do gelo, [J / kg].

h_{fp} : Entalpia do fluido portador, [J / kg].

Calor Específico à pressão constante

Relacionando de maneira linear as propriedades das fases obtêm-se o calor específico o da pasta de gelo.

$$Cp_{pg} = Cp_g \cdot X_g + Cp_{fp} \cdot (1 - X_g) \quad (5)$$

Onde:

Cp_{pg} : Calor específico da pasta de gelo, [J / kg.K].

Cp_{fp} : Calor específico do fluido portador, [J / kg.K].

Cp_g : Calor específico do gelo, [J / kg.K].

Condutividade Térmica

A condutividade térmica pode ser expressa pela formulação de Eucken, à qual se faz referência no trabalho de Kauffeld (1999).

$$k_{pg} = k_{fp} \cdot \left[\frac{1 + 2 \cdot Cv_g \cdot y}{1 - Cv_g \cdot y} \right] \quad (6)$$

$$y = \frac{1 - \frac{k_{fp}}{k_g}}{1 + 2 \cdot \frac{k_{fp}}{k_g}} \quad (7)$$

Onde:

k_{pg} : Condutividade térmica da pasta de gelo, [W / m. °C].

k_{fp} : Condutividade térmica do fluido portador, [W / m. °C].

k_g : Condutividade térmica do gelo, [W / m. °C].

Cv_g : Fração volumétrica, [-].

Viscosidade Dinâmica

A viscosidade da pasta de gelo é uma importante propriedade de transporte. Pode determinar-se pela correlação muito conhecida, em suspensões newtonianas homogêneas, de Christensen e Kauffeld (1997) a qual é válida para números de Reynolds entre 3 e 2000, e com frações de gelo entre 0 e 35%. Esta correlação é baseada num fator de correção para a viscosidade do fluido portador, dito fator depende primariamente da concentração em volume do gelo.

$$\mathbf{m}_{pg} = \mathbf{m}_{fp} \cdot (1 + 2,5 \cdot C_{v_g} + 10,05 \cdot C_{v_g}^2 + 0,00273 \cdot e^{16,6 \cdot C_{v_g}}) \quad (8)$$

Onde:

μ_{pg} : Viscosidade dinâmica da pasta de gelo, [Pa . s].

μ_{fp} : Viscosidade dinâmica do fluido portador, [Pa . s].

2.3. Método do Calorímetro

Para o cálculo da fração de gelo presente na pasta de gelo, se utilizou o método do calorímetro. Este método é baseado no fornecimento de calor, por meio de uma resistência elétrica, a uma amostra de pasta de gelo, de massa definida, num calorímetro. Aplica-se uma potência elétrica à resistência durante um tempo determinado. Parte do calor gerado é absorvida pela pasta de gelo.

O calor gerado corresponde à integral da potência fornecida ao longo do tempo.

$$\int Q dt = \int P dt = \int V I dt = m \cdot (h_{T_{pg-i}} - h_{T_{pg-f}}) \quad (9)$$

Onde:

- Q : Energia elétrica, [J].
- P : Potência elétrica, [W].
- V : Voltagem no calorímetro, [V].
- I : Corrente elétrica no calorímetro, [A].
- m : Massa da pasta de gelo no calorímetro, [kg].
- $h_{T_{pg-i}}$: Entalpia inicial da pasta de gelo, [J / kg].
- $h_{T_{pg-f}}$: Entalpia final da pasta de gelo, [J / kg].

A energia absorvida pela pasta de gelo pode ser dividida em duas parcelas: uma de calor sensível, responsável pela variação da temperatura do fluido portador, e outra, de calor latente usada na fusão do gelo.

$$\int P dt = Q_{el} = (Q_{sen} + Q_{lat}) \quad (10)$$

Onde:

- Q_d : Calor elétrico subministrado á mostra, [J].
- Q_{sen} : Calor sensível na mostra da pasta de gelo, [J].
- Q_{lat} : Calor latente na mostra da pasta de gelo, [J].

Energia Absorvida pelo Calorímetro

A energia transferida para as mostras de pasta de gelo se obtém de:

$$Q_{el} = P_{el} \cdot t \tag{11}$$

Onde:

- Q_{el} : Energia elétrica, [J].
- P_{el} : Potência elétrica média, [W].
- t : Tempo de funcionamento do calorímetro, [s].

Onde a potência média elétrica do calorímetro calcula-se com os valores médios de voltagem e corrente elétrica.

$$P_{el} = V_m \cdot I_m \tag{12}$$

Onde:

- P_{el} : Potência elétrica média, [W].
- V_m : Voltagem média no calorímetro, [V].
- I_m : Corrente elétrica média no calorímetro, [A].

Na figura 5, podem-se observar os sinais de temperatura, amperagem e voltagem aqusitados pelo computador, durante uma análise da fração de gelo para uma mostra depositada no calorímetro.

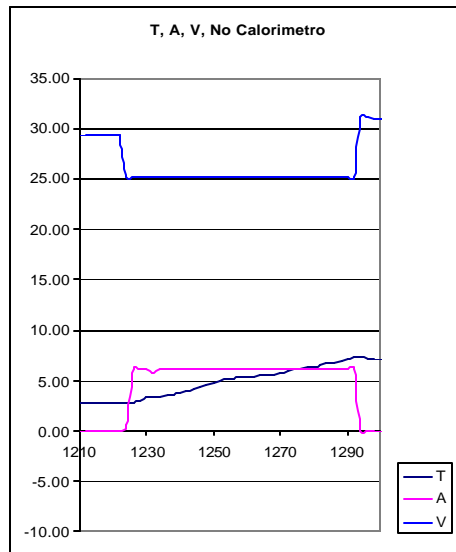


Figura 5 – Curvas típicas para uma mostra no calorímetro.

Calor Sensível da pasta de gelo

A variação de calor sensível no calorímetro tem os seguintes termos.

$$Q_{sen} = (m_{pg} \cdot Cp_{fp} + m_{re} \cdot Cp_{re} + m_{ca} \cdot Cp_{ca} + m_{xx} \cdot Cp_{xx}) \cdot (T_{f-pg} - T_{i-pg}) \quad (13)$$

Onde:

- Q_{sen} : Calor sensível da pasta de gelo, [J].
- m_{pg} : Massa da pasta de gelo no calorímetro, [kg].
- Cp_{fp} : Calor específico do fluido portador, [J / kg.°C].
- m_{re} : Massa do recipiente do calorímetro, [kg].
- Cp_{re} : Calor específico do recipiente do calorímetro, [J / kg.°C].
- m_{ca} : Massa do conjunto agitador e resistência elétrica, [kg].
- Cp_{ca} : Calor específico conjunto agitador e resistência elétrica, [J/kg.°C].
- m_{xx} : Massa dos demais elementos no calorímetro, [kg].
- Cp_{xx} : Calor específico dos demais elementos no calorímetro, [J / kg.°C].
- T_{i-pg} : Temperatura inicial da pasta de gelo no teste, [°C].
- T_{f-pg} : Temperatura final da pasta de gelo no teste, [°C].

Fazendo um equivalente em água dos elementos do calorímetro (Apêndice C), tem-se:

$$Q_{sen} = (m_{pg} \cdot Cp_{fp} + m_{eq-ag} \cdot Cp_{ag}) \cdot (T_{f-pg} - T_{i-pg}) \quad (14)$$

Onde:

- m_{eq-ag} : Massa equivalente do calorímetro em água, [kg].

Calor latente da pasta de gelo

A energia por mudança de fase para a amostra de pasta de gelo é dada por:

$$Q_{lat} = m_{pg} X_g L \quad (15)$$

Onde:

- Q_{lat} : Calor latente da pasta de gelo, [J].
- X_g : Fração de gelo, [J / kg.°C].
- L : Calor latente de formação do gelo, [J / kg].

Cálculo da Fração de gelo considerando a variação da concentração do aditivo e do efeito da temperatura

A partir do balanço de energia no calorímetro.

$$Q_{el} = Q_{sen} + Q_{lat} \quad (16)$$

No presente trabalho considera-se uma análise diferencial para o cálculo da fração de gelo, para levar em conta a variação das propriedades da pasta de gelo com a temperatura, e com a concentração do aditivo no fluido portador, durante o processo de aquecimento da amostra no calorímetro, (Apêndice D).

$$\int_{t_1}^{t_2} \dot{Q}_{el} . dt = \int_{T_1}^{T_2} m_{pg} \cdot \left(\frac{\%C_0}{\%C_m} \right) . Cp_{f \neq T, \phi, X_m} . dT + \int_{T_1}^{T_2} m_{eq-ag} . Cp_{ag(T)} . dT + m_{pg} . L . (X_2 - X_1) \quad (17)$$

A primeira parcela do lado direito da equação representa o calor sensível do fluido portador. A segunda parcela é o calor sensível dos componentes do calorímetro e a última é o calor latente responsável pela variação da fração de gelo.

Considerando o instante de tempo i , a fração de gelo sofre uma variação diferencial ao longo de um intervalo diferencial de tempo. Pode-se assumir como constante, para o referido intervalo diferencial de tempo, o valor do calor específico do fluido portador ($C_{p_{m-fp}}$).

$$X_{i+1-t} = X_i + \frac{1}{L} \cdot \left[\frac{\dot{Q} \cdot (t_{i+1} - t_i)}{m_{pg}} - \frac{\%C_0}{\%C_{i+1}} \cdot Cp_{m-fp} \cdot (T_i - T_{i+1}) - m_{eq-ag} \cdot Cp_{m-ag} \cdot (T_i - T_{i+1}) \right] \quad (18)$$

Integrando ao longo de todo o intervalo de tempo obtém-se a fração de gelo da amostra de pasta de gelo. Os resultados obtidos por este método de análise diferencial apresentam, em média, um valor 8% maior para a fração de gelo do que os resultados obtidos ao se desprezar os efeitos da temperatura e da variação da concentração do aditivo.

2.4. Trocadores de calor de placas

2.4.1. Conceitos gerais

O tipo de trocador de calor de placas mais comum é o “trocador de calor de placas com gaxetas” (*gasketed plate heat exchanger* ou *plate and frame heat exchanger*), simplesmente denominado “trocador de placas” (*plate heat exchanger*, PHE). Existem porém outros tipos menos comuns de trocadores de placas, como o trocador de espiral ou o de lamela, (ver figura 6). Em todos estes tipos de trocadores de calor, os fluidos escoam por estreitos canais, trocando calor através de finas chapas metálicas.

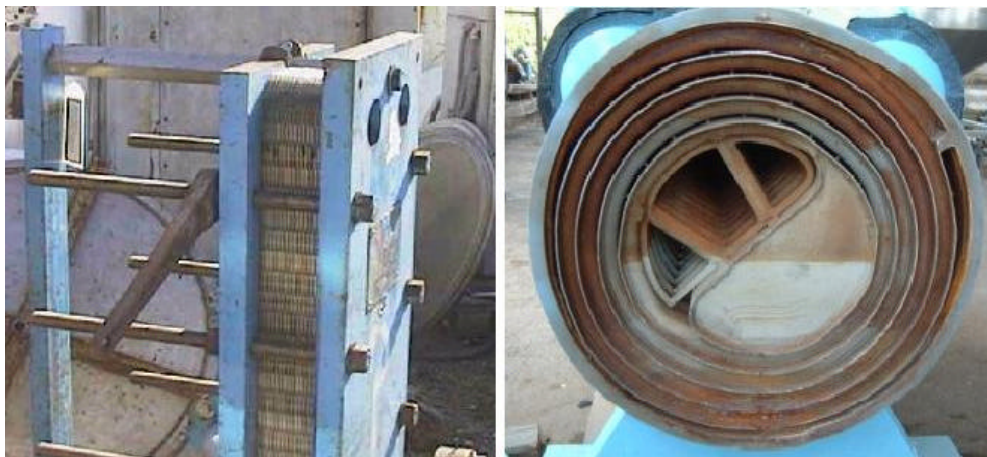


Figura 6 – Tipos de trocadores de calor de placas.

Os PHEs foram introduzidos comercialmente na década do 30 para atender às exigências de higiene e limpeza das indústrias alimentícias e farmacêuticas, devido à sua facilidade para desmontagem, limpeza e inspeção. Com o tempo, contínuos aperfeiçoamentos tecnológicos tornaram o PHE um forte concorrente quando comparado aos tradicionais trocadores tubo-carcaça ou duplo-tubo, em várias aplicações industriais. Atualmente os PHEs são empregados em diversos processos de troca térmica entre líquidos, com pressões e temperaturas moderadas (até 1,5 MPa e 150°C) com uma alta efetividade térmica (Gut e Pinto, 2001).

Um PHE é formado basicamente por um pacote de finas placas metálicas prensadas num pedestal, o qual possui uma placa fixa, uma placa de aperto móvel, barramentos inferior e superior assim como parafusos de aperto. As placas fixa e de aperto possuem bocais para a conexão das tubulações de alimentação e de coleta dos fluidos.

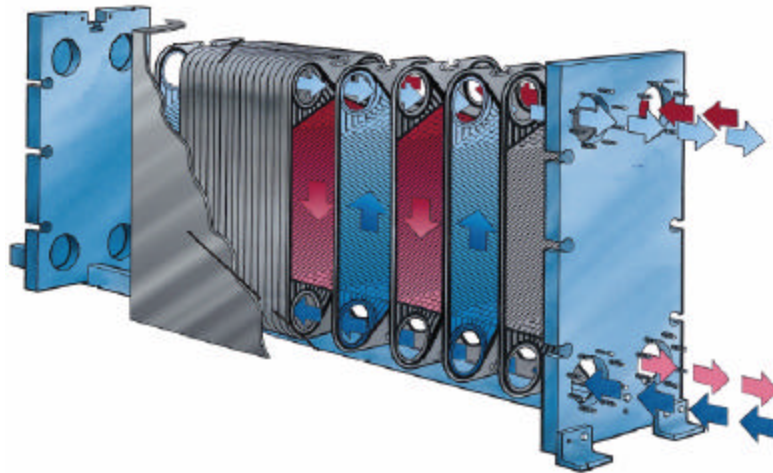


Figura 7 – Trocador de calor de placas.

As placas do PHE possuem orifícios nos cantos para a passagem dos fluidos, sendo seladas no redor por gaxetas, de material elastomérico. As placas prensadas se alinham no pedestal e forma-se uma série de canais paralelos de escoamento entre elas. A zona central das placas apresenta uma corrugação especial, o qual aumenta a turbulência de escoamento nos canais além de aumentar a resistência mecânica do trocador de calor.



Corrugação washboard



Corrugações chevron



Figura 8 – Padrões comuns de corrugação de placas.

A área de troca de calor por placa vai de 0,03 a 3,6m², com placas com espessura da ordem de 1 mm. Os padrões mais comuns de corrugação são o padrão chevron (ou “espinha de peixe”) e washboard (ou “tábua de lavar”), os quais se apresentam na figura 8. O ângulo de inclinação das ranhuras no padrão chevron é um parâmetro importante no dimensionamento de um PHE, já que tem influi sobre o coeficiente de troca de calor assim como nas quedas de pressão através do trocador. Os ângulos comerciais mais comuns no padrão chevron são os H-Plates (com angulo de 70° aprox) e os S-Plates (com angulo de 30° aprox) ou soft que apresentam uma baixa resistência ao fluxo (Gut e Pinto, 2001).

O pedestal é composto normalmente de aço carbono. As placas são geralmente de algum metal dúctil, que apresente fácil laminado e prensado, resistente à corrosão. Na maioria das aplicações usa-se o aço inoxidável AISI-316, sendo também utilizados titânio ou ligas de cobre e níquel, segundo sua aplicação. As gaxetas são fabricadas com elastômeros (em especial de borrachas butílicas e nitrílicas). Para aplicações onde as temperaturas são maiores a 150°C as gaxetas são fabricadas de amianto.

2.4.2. Configuração do Trocador

O espaço compreendido entre duas placas é um canal de escoamento, o qual geralmente tem uma espessura de 1,5 a 5mm. Os fluxos através do trocador de calor estão definidos pelo desenho das gaxetas, pelos orifícios, abertos e fechados, das placas e pela localização das conexões de entrada e saída dos fluidos. Ao se definir de uma maneira as trajetórias dos fluxos, está se definindo uma configuração para o trocador de calor. Pode se ter uma variedade de configurações para um mesmo trocador de calor.

Uma distribuição de fluxo é feita na forma de “passes”, e cada passe pode estar composto por um número de “passagens”. Quando o fluxo muda de sentido, está mudando de passe. Na figura 9 se pode observar uma configuração com nove placas com oito canais de escoamento, o fluido quente apresenta dois passes de duas passagens e o fluido frio, quatro passes de uma passagem.

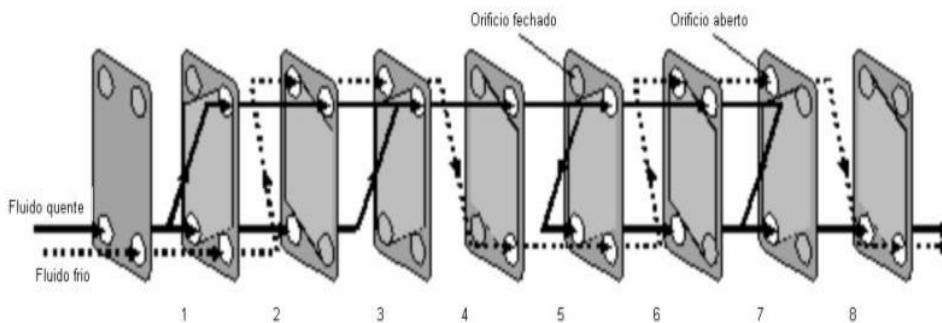


Figura 9 – Uma configuração para um trocador com nove placas.

O número de passes e passagens definem o “arranjo de passes”. Para o caso da figura 9 tem-se 2/4 (dois passes por quatro passes) ou 2x2/4x1 (dois passes de duas passagens por quatro passes de uma passagem). Os tipos de arranjos mais comuns são em paralelo, onde cada fluido faz só um passe de varias passagens (arranjo 1xn/1xm), e o arranjo em série onde os fluxos não sofrem divisões, ou seja, cada passe tem apenas uma passagem (arranjo nx1/mx1). Quando se utiliza outro tipo de arranjo sempre se procura configurar o fluxo entre os canais vizinhos de maneira que fiquem em contra-corrente, para maximizar a troca de calor.

Os arranjos em paralelo de tipo em U são muito utilizados, tendo uma das placas com todas as conexões de tubulação, ficando a outra placa de aperto livre para facilitar a desmontagem. Neste tipo de arranjo todos os canais ficam com escoamento em contra-corrente com relação aos canais vizinhos. Num arranjo multipasse assimétrico predomina o escoamento paralelo entre canais vizinhos. De um modo geral, este outro tipo de arranjo é utilizado quando existe uma grande diferença entre as capacidades térmicas dos fluidos (Gut e Pinto, 2001).

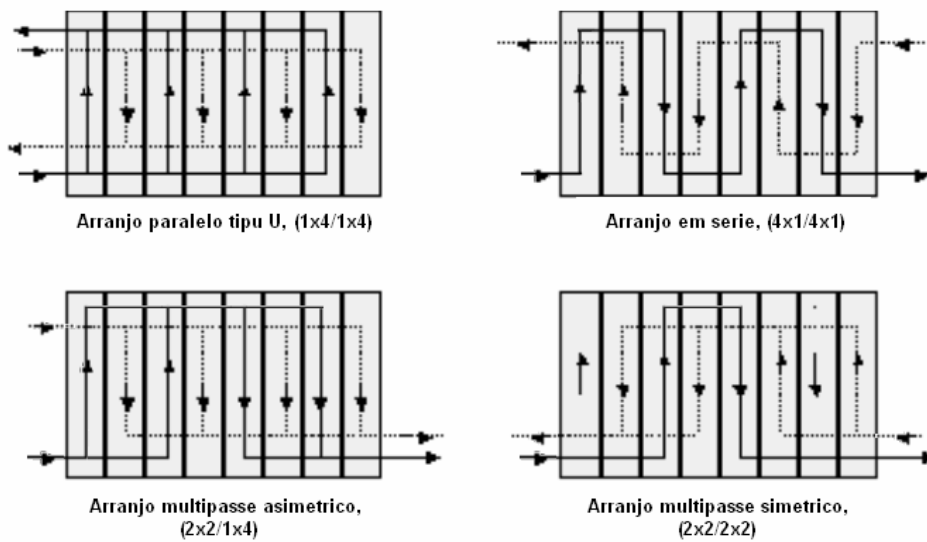


Figura 10 – Possíveis arranjos num trocador de placas.

2.4.3. Vantagens

Podem-se citar as seguintes vantagens para a utilização do trocador de placas:

- 1) Facilidade para desmontar, inspecionar e limpar todas as partes em contato com os fluidos.
- 2) Flexibilidade para adicionar ou remover placas, o qual facilita o redimensionamento para novas condições de uso.
- 3) Ao ser compacto o trocador, as placas podem ser fabricadas de materiais mais nobres (o que não acontece num trocador de casco e tubos) com espaços de instalação reduzidos. Com ajuda de placas especiais chamadas “grades conectoras”, podem-se acomodar mais de uma seção de troca térmica (como nos processos de pasteurização onde o fluido de processo é aquecido e depois resfriado no mesmo trocador).
- 4) Uma alta eficiência térmica sendo possível obter diferenças de temperaturas de até 1°C entre os fluidos.
- 5) A corrugação das placas aumenta a turbulência do escoamento dentro dos canais. Desta forma, é possível obter o regime turbulento de escoamento com valores de número de Reynolds da ordem de 20 a 400 dependendo do tipo de placa (vale lembrar que o número de Re turbulento em tubos lisos é 2300). Esta turbulência reduz a formação de incrustações, pois mantém os sólidos em suspensão. Os fatores de incrustação (fouling factors) para os PHEs são aproximadamente dez vezes menores daqueles adotados para os trocadores casco-e-tubos (Gut e Pinto, 2001).
- 6) As gaxetas possuem respiros que impedem que os fluidos se misturem no caso de alguma falha, o que também facilita a localização de vazamentos.

2.4.4. Desvantagens

Por outro lado, são as seguintes as desvantagens dos PHE:

- 1) Pressões superiores a 1,5MPa não são toleradas, pois ocasionam vazamentos nas gaxetas. Existe a possibilidade de soldar as placas umas às outras para operar sob altas pressões, como nos trocadores a placas brazados, mas o PHE perde a sua flexibilidade e não pode mais ser limpo internamente.
- 2) Para temperaturas acima de 150°C é necessário utilizar gaxetas especiais, pois as de material elastomérico não suportam tal condição.
- 3) Devido às placas corrugadas e ao pequeno espaço de escoamento entre elas, a perda de carga por atrito é alta, o que eleva os custos de bombeamento. Para diminuir a perda de carga pode-se aumentar o número de passagens por passe para que o fluxo seja dividido em um número maior de canais. Desta forma a velocidade de escoamento dentro dos canais será menor, reduzindo a queda de pressão, porém isto também reduzirá o coeficiente convectivo de troca térmica e a eficiência do trocador (A Laval, 2002).