

Universidade de São Paulo - ESCOLA POLITÉCNICA

Departamento de Engenharia Mecânica

PROJETO MECÂNICO I e II

PMC 580/581

Trabalho de Formatura:

**“Sistema de Termoacumulação para Ar-
Condicionado”**

POR

José Eduardo Elia Gomes

Orientador: Prof. Saburo Ikeda

Coordenador: Prof. José R. Simões Moreira

São Paulo

1997

A minha eterna gratidão ao Prof. Saburo Ikeda,
pela sua ajuda e compreensão.

INDICE

I) TERMOACUMULAÇÃO.....	01
Conceituação.....	02
II) A TARIFA HORO-SAZONAL.....	06
Introdução.....	07
Definições.....	08
Estruturas tarifárias.....	09
Condições de aplicação das tarifas.....	10
III) CALOR SENSÍVEL, LATENTE, E MEIOS DE ARMAZENAMENTO..	11
Calor sensível e calor latente.....	12
Meios de armazenamento.....	13
IV) ESTRATÉGIAS DE TERMOACUMULAÇÃO E MODOS DE OPERAÇÃO..	16
Estratégias.....	17
Modos de operação.....	20
V) SISTEMAS ABERTOS E FECHADOS.....	22
Considerações gerais.....	23
VI) TECNOLOGIAS DE TERMOACUMULAÇÃO.....	24
Sistemas de água gelada.....	25
Sistemas de gelo.....	31
Sistemas de expansão direta.....	32
Sistemas usando fluido térmico.....	35
Sistemas com gelo armazenado em recipientes.....	38
Sistemas de produção de gelo do tipo placa.....	39
Sistemas baseados na mudança de fase de materiais.....	43
Sistemas com clatratos.....	45
Sistemas líquido-líquido.....	49
VII) CONCEITOS DE CONTROLE PARA TERMOACUMULAÇÃO.....	52
VIII) ESTRATÉGIAS DE CONTROLE.....	56
IX) AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS DE TERMOACUMULAÇÃO.....	60
X) DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	67
XI) SELEÇÃO DAS ALTERNATIVAS VIÁVEIS.....	71
Critérios utilizados.....	72
Tabela de comparação entre os sistemas.....	73
XII) DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO E DA CAPACIDADE DE ARMAZENAMENTO NECESSÁRIA.....	75
XIII) DIMENSIONAMENTO BÁSICO.....	79
Alternativa 1 - Sistema do tipo gelo sobre tubo... ..	80
Alternativa 2a - Sistema com gelo em cápsulas em tanque pressurizado.....	84
Alternativa 2b - Sistema com gelo em cápsulas em tanque aberto.....	85
Alternativa 3 - Sistema de produção de gelo do tipo placa.....	86
XIV) AVALIAÇÃO ECONÔMICA.....	89
Custo da vida útil.....	90
Procedimentos básicos para desenvolver uma análise de custo de vida útil.....	91
Considerações adicionais.....	93
Análise simplificada.....	94
Comentários.....	96
XV) CONCLUSÃO.....	97
Bibliografia.....	100

I) TERMOACUMULAÇÃO

CONCEITUAÇÃO

Termoacumulação é o armazenamento temporário de energia a baixa ou a alta temperatura para uso posterior. Exemplos de termoacumulação são: o armazenamento de energia solar para o aquecimento noturno, o armazenamento do calor do verão para uso no inverno, o armazenamento de gelo do inverno para fins de refrigeração durante o verão, e o armazenamento de calor ou de refrigeração, gerados eletricamente durante horários fora de pico de consumo de energia, para uso durante horários de pico de consumo, em que as tarifas elétricas são mais altas. Quando o período de disponibilidade de energia é maior do que o período de utilização final de energia, o emprego de termoacumulação permite a instalação de equipamentos menores tanto para aquecimento quanto para refrigeração, reduzindo os custos do investimento inicial. Condições que favorecem o emprego de termoacumulação incluem cargas altas com duração relativamente curta; altas demandas de potência elétrica; energia elétrica a custos mais baixos durante horários fora de pico; necessidade de reserva de capacidade de refrigeração para casos de falta de energia ou de falhas da unidade de refrigeração(somente as bombas de água gelada devem ser acionadas pelo gerador de emergência); expansão das dependências funcionais do edifício; necessidade de complementar um equipamento de cogeração de capacidade limitada; necessidade de prover um reservatório para combate a incêndios(a água armazenada num sistema a água gelada ou a gelo está disponível para o combate a incêndio numa emergência); e muitas outras. Aqui no Brasil o interesse pela termoacumulação se concentra na utilização para fins de refrigeração, sendo que nos países de clima temperado usa-se acumulação de energia térmica tanto para aquecimento quanto para refrigeração. O conceito de acumulação de energia térmica aplicado a sistemas de refrigeração não é novidade. Logo após a refrigeração mecânica ter sido utilizada para ar condicionado

em 1930, já se pensava em utilizar acumulação de energia térmica para cargas térmicas ocasionais ou de pequena duração, comuns em igrejas, teatros e processos industriais, como laticínios. A razão de se usar esses sistemas de termoacumulação está no menor custo inicial do sistema de refrigeração. Por exemplo, uma igreja que necessita de uma instalação de 50 TR por um período de 5 horas, uma vez por semana. Este sistema irá produzir o equivalente a 250 TR-h de refrigeração, assim sendo, uma instalação de 5 TR de capacidade que opere e acumule frio por 50 horas irá fornecer a mesma capacidade(250 TR-h) e o custo do sistema de refrigeração foi substancialmente reduzido, mesmo quando o custo do sistema de acumulação for incluído. Este conceito é bastante beneficiado quanto maior for o tempo disponível para fabricar "frio" em relação ao tempo de sua utilização. Nestas circunstâncias a redução do custo do sistema de refrigeração será maior do que o custo do sistema de acumulação. Todavia, sistemas de acumulação de energia térmica estão obtendo muito interesse para uma infinidade de aplicações em "conforto" e em processos industriais, devido à diferenciação nas tarifas energéticas que passou a vigorar a partir dos anos 80. O consumo de energia elétrica varia de maneira irregular no decorrer do dia, e esse fato acabou levando as companhias concessionárias de energia elétrica ao estabelecimento de tarifas diferenciadas conforme a hora do dia, sendo mais elevadas durante o horário de pico de consumo. Esta diferenciação nas tarifas acaba por induzir o consumidor a repensar a utilização de energia elétrica dentro dos horários de pico de consumo de energia. É mostrada na Figura 1 uma curva típica de consumo diário de energia elétrica.

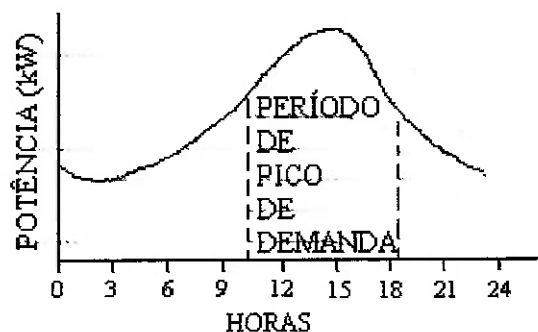


Figura 1 - Curva típica de consumo de energia elétrica

Em muitas instalações a demanda de refrigeração para conforto e também para processos industriais ocorre somente por poucas horas diárias, sendo comum isto acontecer durante as horas de pico da demanda de energia elétrica. A Figura 2 ilustra esta tipo de acontecimento com um perfil de carga térmica típico .

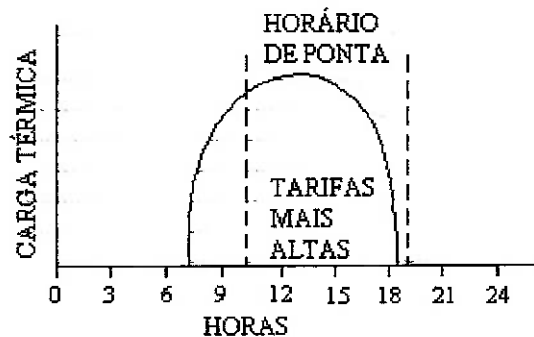


Figura 2 - Perfil de carga térmica típico

Desde que se esteja lidando com um sistema convencional não é possível operar fora deste horário de pico. O sistema de termoacumulação permite que se acumule a energia necessária fora do período de pico (Figura 3) para que seja utilizada quando for necessária.

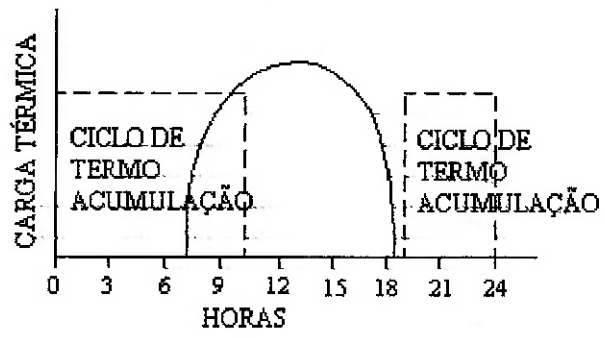


Figura 3 - Ciclo de termoacumulação

II) A TARIFA HORO-SAZONAL

INTRODUÇÃO

A pressão dos custos cada vez mais crescentes da geração, transmissão e distribuição de energia elétrica tem levado as concessionárias a procurarem a racionalização do uso de seus equipamentos, melhorando seu fator de carga e reduzindo ao máximo os "picos" e "vales" de seu perfil de carga. Com essa finalidade, as companhias concessionárias tem recorrido a tarifas "binárias", onde a demanda, ou seja, a potência máxima exigida da rede pelo consumidor é taxada separadamente do consumo. Recorrem também a tarifas diferenciadas por segmentos horários e sazonais, nas quais as taxas de demanda e de consumo nos períodos em que a rede está mais solicitada (horários de ponta) são mais elevadas que nos horários fora de ponta. A partir dos anos 70, nos Estados Unidos, Japão e em outros países com problemas de energia, estas diferenciações tarifárias tem onerado mais e mais os consumidores com baixo fator de carga, bem como o consumo em períodos de ponta. Em contrapartida, tem tornado extremamente vantajoso o consumo em horários fora de ponta, em particular com tarifas muito baixas no período noturno.

No caso do Brasil, o consumo geral de energia elétrica se apresenta distribuído de maneira irregular ao longo do dia e do ano, ocorrendo horários de intensa utilização de eletricidade, normalmente das 17:00 às 21:00 horas, enquanto que o parque gerador apresenta épocas em que existe maior disponibilidade de energia, normalmente nos meses de Dezembro a Abril, em que ocorrem chuvas mais intensas. Para enfrentar esse quadro adverso é importante que se utilize mais racionalmente a capacidade já instalada em geração, transmissão, e distribuição de eletricidade, estimulando seu uso nos horários de menor consumo e nas épocas do ano em que ocorre maior disponibilidade desta fonte de energia. Neste sentido o sistema de tarifas horo-sazonal apresenta valores diferenciados de tarifas conforme a época do ano e conforme os

horários de utilização da eletricidade. Deste modo exige dos consumidores um esforço contínuo no sentido de gerenciar seu uso da energia elétrica, de maneira a utilizar plenamente as vantagens que estas novas tarifas podem possibilitar.

São seguintes os objetivos das companhias concessionárias com a implantação das tarifas horo-sazonais: aumentar a eficiência do sistema elétrico por região geográfica, nos diferentes meses do ano, nas diferentes horas do dia e por categoria de consumidor; orientar o consumo de eletricidade para as horas do dia e períodos do ano em que o fornecimento é menos oneroso para o sistema elétrico; permitir ao consumidor menor custo médio da energia elétrica, conforme as possibilidades de gerenciamento do seu regime de operação.

DEFINIÇÕES

Horário de ponta: Corresponde ao intervalo de três horas consecutivas situado no período compreendido entre as 17:00 e as 23:00 horas de cada dia útil. Este horário é ajustado de comum acordo entre a concessionária e o consumidor.

Horário fora de ponta: Corresponde às horas complementares às três horas relativas ao horário de ponta.

Período seco: Compreende os meses de Maio a Novembro de cada ano.

Período úmido: Compreende os meses de Dezembro de um ano a Abril do ano seguinte.

É importante ressaltar que no período úmido as tarifas são mais baratas que no período seco, da mesma forma que as tarifas nos horários fora de ponta são menores que nos horários de ponta.

Em função das definições acima, as tarifas de fornecimento serão sempre apresentadas segundo os seguintes segmentos horo-sazonais ou "postos tarifários":

PS - horário de ponta em período seco

PU - horário de ponta em período úmido

FS - horário fora de ponta em período seco

FU - horário fora de ponta em período úmido

À cada segmento horo-sazonal são atribuídos preços diferenciados para a demanda de potência e consumo de energia.

Tarifa de ultrapassagem : É a tarifa aplicada à parcela da demanda medida que superar o valor da demanda contratada, no caso de Tarifas Horo-sazonais, respeitados os respectivos limites de tolerância.

Consumidor do grupo A : São aqueles atendidos em tensão de fornecimento igual ou superior a 2,3 kV ou ligados em baixa tensão em sistema de distribuição subterrâneo mas considerado, para efeito de faturamento, como de alta tensão.

ESTRUTURAS TARIFÁRIAS

Tarifa Convencional:

Demanda de potência (kW) preço único

Consumo de energia (kWh) preço único

Tarifa Azul:

Demanda de potência (kW) um preço para a ponta

um preço para fora da ponta

Consumo de energia (kWh) um preço para ponta em período úmido

um preço para fora de ponta em período seco

um preço para ponta em período seco

um preço para fora de ponta em período seco

Tarifa Verde:

Demanda de potência (kW) preço único

Consumo de energia (kWh) um preço para ponta em período úmido

um preço para fora de ponta em período úmido

um preço para ponta em período seco

um preço para fora de ponta em período seco

CONDIÇÕES DE APLICAÇÃO DAS TARIFAS

Tarifa Convencional

Aplicada às unidades consumidoras do Grupo A, atendidas em tensão inferior a 69 kV e com demanda menor do que 500 kW.

Tarifa Azul

Aplicada aos consumidores do Grupo A, segundo os seguintes critérios:

a) Aplicação compulsória

- às unidades consumidoras atendidas em tensão igual ou superior a 69 kV;

- às unidades consumidoras atendidas em tensão inferior a 69 kV, com demanda de potência igual ou superior a 500 kW, desde que não façam opção pela Tarifa Verde.

b) Aplicação opcional

- às unidades consumidoras atendidas em tensão inferior a 69 kV com demanda de potência superior a 50 kW e inferior a 500 kW.

Tarifa Verde

Oferecida, sempre em caráter opcional, aos consumidores do Grupo A atendidos em tensão inferior a 69 kV, com demanda a partir de 50 kW.

III) CALOR SENSÍVEL, CALOR LATENTE, E MEIOS
DE ARMAZENAMENTO

CALOR SENSÍVEL E CALOR LATENTE

Calor sensível é a energia térmica que, quando transferida para uma substância resulta num aumento de sua temperatura. É proporcional à capacidade térmica da substância e à diferença de temperaturas envolvida, sendo importante notar que sua capacidade térmica varia diretamente com a massa. Igualmente importante é a condutividade térmica do material, a qual proporciona um lapso de tempo entre a entrada e a saída de energia térmica. É uma combinação adequada desses dois fatores que é responsável por um meio de armazenamento térmico eficiente. Esses princípios sempre foram incorporados por construtores de habitações desde há muito tempo. Casas de argila e cabanas de terra dos índios Navaho são exemplos primitivos. Suas paredes espessas retardam o pico de temperatura durante o dia. O armazenamento de calor sensível também foi usado diretamente na construção de fontes de calor, tendo como exemplos lareiras de pedra e fogões de tijolos cerâmicos.

Calor latente é a energia absorvida ou liberada durante a mudança de fase de uma substância. O congelamento da água líquida passando para gelo ou a fusão deste passando para o estado líquido são exemplos óbvios. Caracteristicamente, a energia envolvida neste caso é muito maior do que o calor sensível para uma mudança de temperaturas moderada. Esse princípio não foi usado amplamente, no passado, no contexto arquitetônico. É interessante notar, entretanto, que a obtenção de gelo retirando-o de superfícies congeladas já era um fato comum na jovem América do Norte. A Nova Inglaterra teve um próspero comércio de exportação entregando gelo por meio de rápidos "clippers" para mercados tão longínquos quanto a Índia.

Com o passar do tempo e a predominância de edifícios altos, a incorporação de massa térmica adequada tornou-se mais difícil. Correspondentemente, as exigências de aquecimento ou de refrigeração estão baseadas em escalas de tempo muito curtas.

Entretanto, recentemente, essa tendência começou a se inverter com a introdução de componentes para armazenamento térmico.

MEIOS DE ARMAZENAMENTO

A vantagem do armazenamento de calor sensível reside no baixo custo dos materiais e na sua aceitação sob o ponto de vista ambiental. Desvantagens incluem a grande massa e os grandes diferenciais de temperatura necessários. Para aplicações em centrais de ar-condicionado o armazenamento de calor sensível pode consistir em tanques estratificados de água quente ou de água fria. Tijolos ou pedra britada podem ser aquecidos até altas temperaturas à noite e o seu calor ser liberado gradualmente durante os períodos de pico de consumo de eletricidade. Água, resfriada ambientalmente no inverno, pode ser armazenada em aquíferos e ser usada para condicionamento de edifícios no verão. Em cada um desses casos o baixo custo do meio de armazenamento é compensado pelo alto custo do sistema de contenção. Para armazenamento latente de frio também está disponível um meio muito barato, o gelo. Atualmente o armazenamento de frio em bancos de gelo promete tornar-se uma grande indústria. Há um exemplo recente de um edifício em Chicago que armazena mais de 300 toneladas de gelo diariamente, enquanto que um complexo em Atlanta chega a quase 600 toneladas diárias. Em outras faixas de temperatura, entretanto, o uso de materiais em mudança de fase (PCMs-phase change materials) não se tornou ainda uma prática em larga escala. De particular interesse seria a aplicação de armazenamento de calor latente de modo a diminuir a carga térmica devida à radiação direta do sol. Painéis de materiais apropriados podem ter apenas uma fração da espessura necessária de uma parede convencional com as mesmas características. Desde que o calor será liberado numa dada temperatura de transição, os limites de conforto podem ser mantidos mais facilmente. Os problemas são: prover

armazenamento adequado, estabilidade do material, e acima de tudo os custos. Essas aplicações em condicionamento de ar tem suas principais vantagens no tamanho reduzido e na temperatura uniforme de liberação de energia. Para fins de condicionamento de ar e refrigeração, a água e os materiais de mudança de fase constituem os principais meios de armazenamento de energia térmica. Solo, rochas e outros sólidos também podem ser usados. A água apresenta as vantagens da disponibilidade, baixo custo e transportabilidade.

Há cerca de 300 anos atrás, o alquimista Johann Glauber descobriu um novo sal. Há 40 anos atrás sugeriu-se que o sal de Glauber, conhecido como "sal mirabile", daria um material apropriado de mudança de fase para edifícios, porque ele se funde na temperatura ambiente e tem um razoavelmente alto calor latente de fusão. Desde então, houve várias tentativas para incorporar sais de Glauber, hidratos de sais ou outros PCMs em edifícios, nem todas com sucesso. O primeiro problema com muitos PCMs é a estabilidade do material. Quando uma substância sofre um grande número de ciclos de congelamento/fusão, os componentes tendem a se separar fisicamente. Como consequência, os parâmetros do material mudam completamente, tornando-os inadequados para termoacumulação. Esse é um problema sério com os materiais mais baratos. Tenta-se contornar esse problema adicionando agentes geleificantes ou estabilizantes, mas mesmo assim frequentemente ocorre uma dispersão dos pontos de mudança de fase. Outro problema é que uma substância que ora é líquida e ora é sólida precisa ser armazenada de forma apropriada.

Materiais de mudança de fase tem a vantagem de ocupar aproximadamente 80% menos volume do que se usássemos água com uma diferença de 10°C, diferença entre acumulador carregado e descarregado. Alguns materiais de mudança de fase são viscosos e corrosivos e devem ficar isolados dentro do recipiente para o meio de

transferência de calor. Se tanto o aquecimento quanto a refrigeração forem necessários, dois materiais de mudança de fase devem ser providenciados, a menos que se use bombas de calor.

IV) ESTRATÉGIAS DE TERMOACUMULAÇÃO E MODOS DE OPERAÇÃO

ESTRATÉGIAS

Diversas estratégias de termoacumulação para gerenciamento da carga térmica são possíveis:

- deslocamento da carga diária
- deslocamento da carga semanal
- nivelamento da carga diária
- nivelamento da carga semanal

Deslocamento da carga/Acumulação total

O sistema de deslocamento da carga proporciona armazenagem suficiente para atender toda a exigência de refrigeração de um edifício durante o horário de pico. O perfil de carga térmica de um edifício na Figura 4 ilustra como a demanda de carga térmica ocorre em um sistema de refrigeração convencional.

A Figura 5 mostra como a acumulação total desloca a demanda para horários em que outras cargas elétricas (cargas não de refrigeração, como de iluminação ou motores) são desprezíveis e horários em que outras cargas apenas começam a crescer antes da ocupação total do edifício. Todo armazenamento de refrigeração ocorre durante períodos fora de pico, assim proporcionando redução do pico da demanda e redução do consumo nas horas de tarifas mais altas.

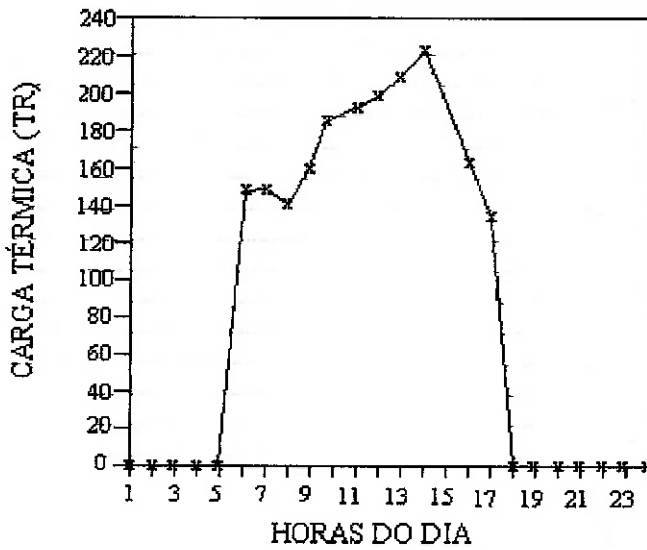


Figura 4 - Perfil de carga térmica de um edifício

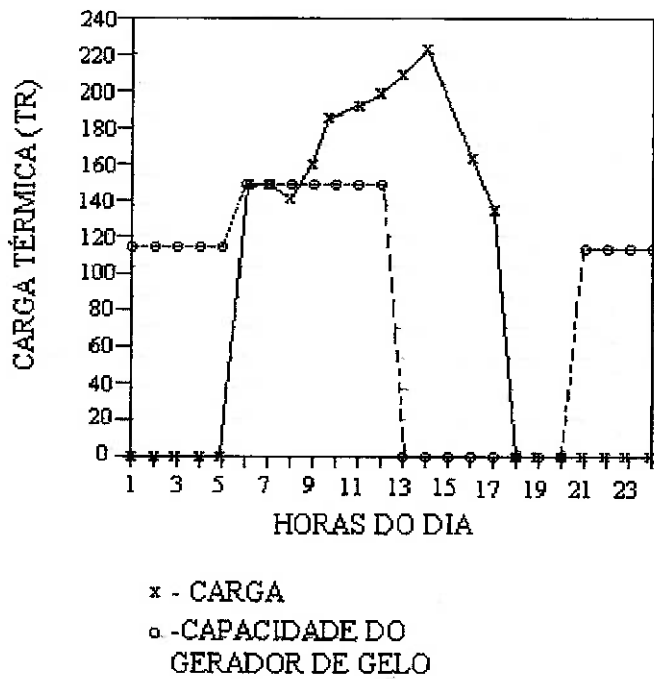


Figura 5 - Sistema utilizando acumulação total

A acumulação total é mais adequada para aplicações de refrigeração de processos em que o tempo do ciclo de refrigeração é relativamente curto em comparação com o

tempo de acumulação; não sendo geralmente prático para aplicações de refrigeração de conforto.

Nivelamento da carga/Acumulação parcial

Um sistema de acumulação parcial opera por muito mais horas do que um sistema de acumulação total, de modo que é obtida uma redução menor da demanda em horários de pico. Entretanto, seu custo inicial é menor do que o do sistema de acumulação total, porque uma capacidade de armazenamento menor é necessária e porque um equipamento de refrigeração com menor capacidade é usado.

Quando é usado o nivelamento da carga, as capacidades do sistema de armazenamento e do equipamento de refrigeração são selecionadas de modo que a carga térmica do dia de projeto seja atendida por operação contínua do equipamento de refrigeração. Essa estratégia minimiza a capacidade do compressor e reduz significativamente a incidência da tarifa de ponta de demanda. Como ilustrado na Figura 6, o efeito global é nivelar a componente de refrigeração da carga do edifício. Durante horas de pico, parte da carga térmica é atendida diretamente pelo equipamento de refrigeração e parte pelo sistema de termoacumulação. O armazenamento necessário neste tipo de sistema deve ser adequado para suprir toda a carga não atendida diretamente pelo equipamento de refrigeração. Na situação da Figura 6, aproximadamente 60% da carga em horário de pico seria suprida pelo armazenamento. Durante os horários fora de pico o equipamento de refrigeração é dedicado inteiramente à acumulação.

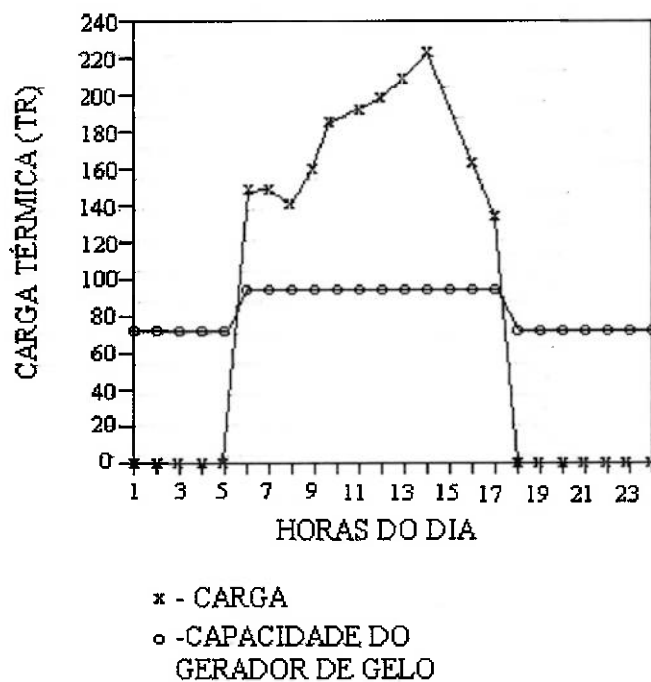


Figura 6 - Sistema utilizando acumulação parcial

Ciclos semanais usam o mesmo princípio mas executam o armazenamento de frio nos fins de semana, podendo ou não permitir uma redução no tamanho do equipamento, mas exigindo um aumento no tanque de armazenamento. É usado apenas com sistemas de gelo, e, quando houver tarifas diferenciadas nos fins de semana.

MODOS DE OPERAÇÃO

1. Carga do acumulador

Envolve a atuação da unidade de refrigeração para preparar o tanque de acumulação para sua função.

2. Recarga do acumulador e resfriamento direto simultaneamente

A unidade de refrigeração usa parte de sua capacidade para vencer a carga térmica, ao mesmo tempo em que recarrega o acumulador.

3. Resfriamento direto

A unidade de refrigeração funciona como num sistema convencional, fornecendo capacidade de refrigeração tanto quanto for requerida.

4. Descarga e resfriamento direto

A unidade de refrigeração está em operação e simultaneamente o tanque de acumulação se descarrega para satisfazer a demanda de refrigeração.

5. Descarga

A demanda de refrigeração é suprida pelo acumulador sem a operação da unidade de refrigeração.

V) SISTEMAS ABERTOS E FECHADOS

CONSIDERAÇÕES GERAIS

Um sistema aberto é aquele em que o armazenamento não é pressurizado; portanto, o fluxo de transferência de calor que retorna ao tanque de armazenagem deve estar à pressão atmosférica. O fluido de transferência de calor (usualmente água) é também normalmente o meio de armazenagem (água ou gelo). Os tanques são normalmente construídos em concreto, no local, ou são pré-fabricados em aço. Em edifícios baixos a energia extra para bombeamento é mínima. Quando a altura dos edifícios aumenta, outras opções devem ser estudadas. Trocadores de calor são frequentemente usados para separar o fluido de transferência de calor do meio de armazenagem. Num sistema fechado, uma separação é executada entre o meio de armazenagem e o fluido de transferência de calor. Essa separação permite que o fluido de transferência de calor seja pressurizado e conserva o sistema fechado para a atmosfera. Assim, a carga estática do edifício não é adicionada às exigências do bombeamento.

VI) TECNOLOGIAS DE TERMOACUMULAÇÃO

Apenas sistemas voltados para aplicações de refrigeração serão apresentados neste trabalho, mas deve-se lembrar que também aplicações para aquecimento, baseadas na acumulação de calor sensível e latente, são bastante difundidas (principalmente em países do Hemisfério Norte de clima temperado) e tem tido grande desenvolvimento nos últimos anos.

SISTEMAS DE ÁGUA GELADA

Conceitualmente, o sistema mais simples de termoacumulação é um tanque de água, baseando-se em acumulação de calor sensível. Durante os períodos fora de pico, água gelada é obtida e armazenada num tanque para ser posteriormente consumida, durante horários de pico. O sistema mais comumente usado é simplesmente um sistema de água gelada convencional mais um tanque de acumulação, como mostrado na Figura 7, utiliza um "chiller"(unidade de refrigeração), consistindo de um compressor, um condensador, e um evaporador. Frequentemente o condensador será resfriado a água e necessitará de um sistema de bombeamento de água de condensação e de uma torre de resfriamento para rejeição do calor de condensação para a atmosfera. O "chiller" resfria a água, esta é bombeada para o tanque de acumulação, e quando for requerida para refrigeração será bombeada do tanque de acumulação até a carga, após o que retornará ao tanque. Embora este sistema seja simples no conceito, ele se torna mais complexo quando executado. Isto se deve, primeiramente à limitada capacidade de armazenamento da água gelada. Os "chillers" comumente são dimensionados para resfriar a água, em capacidade máxima, numa diferença de $5,5^{\circ}\text{C}$, normalmente de 12°C a $6,5^{\circ}\text{C}$. Sendo o calor específico da água $1 \text{ kcal/kg } ^{\circ}\text{C}$, cada kg de água circulada até a carga fornece $5,5 \text{ kcal}$ de refrigeração.

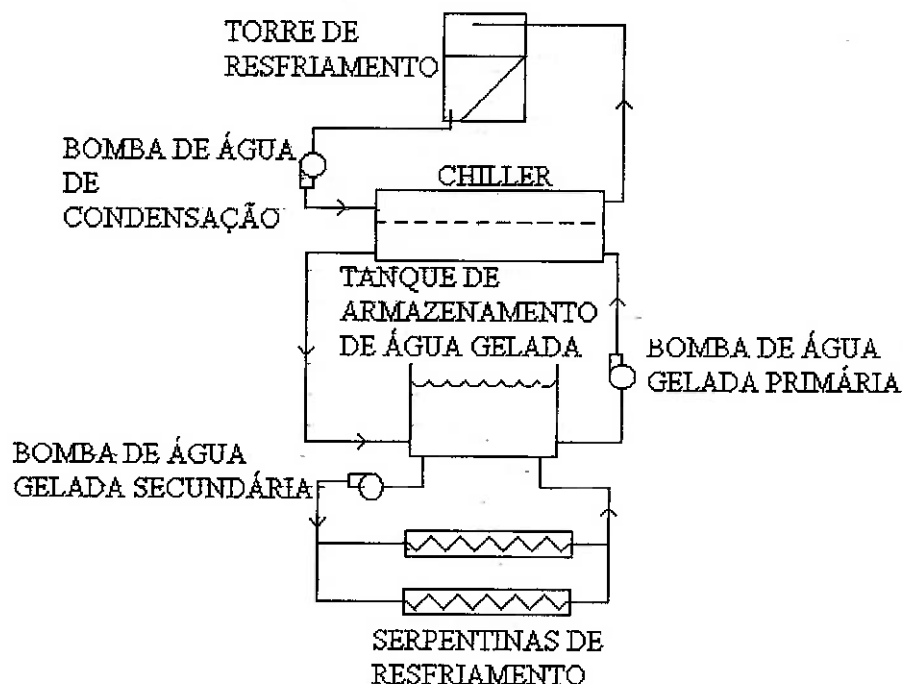


Figura 7 - Sistema de termoacumulação de água gelada

Supondo um edifício com um perfil de carga térmica tal que o pico instantâneo seja de 600 TR, e a carga total diária seja de 5000 TR-h, ou 15,12 Gcal. Se um sistema de termoacumulação de água gelada for considerado para este edifício, com deslocamento total da carga térmica, ou seja acumulação total, a capacidade de armazenagem necessária seria de $(15,12 \text{ Gcal} / 5,5^{\circ}\text{C} \times 1 \text{ kcal/kg}^{\circ}\text{C}) = 2749$ toneladas, ou seja, 2749 m³ de capacidade de armazenamento do tanque. Isso obviamente aumenta os custos e exige bastante espaço, que pode não estar disponível. O problema do espaço (e do custo) pode ser aliviado se aumentarmos o diferencial de temperatura, assim reduzindo o volume de armazenamento. Se o sistema for projetado para um diferencial 50% maior, o volume do tanque de armazenamento será reduzido de 33%. Os tanques podem ser cilindros verticais ou horizontais, ou ainda terem formato retangular. O

material mais comum para tanques na superfície é o aço, sendo o concreto para tanques enterrados. O uso de tanques metálicos, especialmente cilindros com os tampos soldados, podem suportar a pressão hidráulica exercida pelos circuitos de bombeamento dos edifícios, porém o custo e as limitações de tamanho tem restringido a maioria das instalações de tanques aos do tipo não pressurizado. A água armazenada em tanques pode ser estratificada termicamente, com a água mais quente, de menor densidade no topo. A estratificação da termoacumulação sensível pode resultar na diminuição do tamanho do tanque para uma dada capacidade, inclusive melhorando a performance de um sistema que use acumulação de água gelada para refrigeração ou ainda de água quente para fins de aquecimento, incluindo sistemas baseados em energia solar. A estratificação envolve uma região com gradiente vertical de temperatura ou termoclina, entre água mais quente na parte superior de um tanque e a água mais fria na parte inferior. Estratégias de estratificação podem ser separadas em duas categorias: uma é a estratificação natural e a outra é a estratificação com barreira física. A estratificação natural implica no uso de difusores de entrada e de saída do tanque, cuidadosamente projetados, de modo que resultem num fluxo bidimensional, distribuído equitativamente, em baixa velocidade, evitando ao máximo a mistura e a interpenetração entre o fluido que está no tanque e o que entra. A termoclina, que é definida como região onde há um gradiente vertical de temperatura estável ou um gradiente de densidade, trabalha como uma barreira física no sistema de estratificação natural. Em contraste, uma barreira física real pode ser usada para separar o fluido mais quente do mais frio. É uma solução mais cara e pode apresentar frequentes dificuldades operacionais. Eficiência do armazenamento é a razão entre a energia que pode ser aproveitada e a energia que foi acumulada. Eficiências de até 90% podem ser conseguidas com tanques bem estratificados que são carregados e descarregados num

ciclo diário. Todos sistemas de acumulação estão sujeitos a perdas, que normalmente são proporcionais à superfície exposta do tanque de armazenagem. Um sistema ideal, 100% eficiente forneceria água à mesma temperatura em que foi armazenada. Isso exigiria que a água que retorna ao tanque não se misture e nem troque calor com a água armazenada. Na prática, essa situação não ocorre, e deve-se tomar providências para reduzir essa mistura a limites aceitáveis. As seguintes técnicas se desenvolveram para minimizar essa mistura da água mais quente que retorna com a água gelada armazenada. São seguintes as técnicas utilizadas:

- 1- Instalar uma membrana flexível flutuante no tanque, de modo a separar a água gelada da água de retorno, conforme a Figura 8.

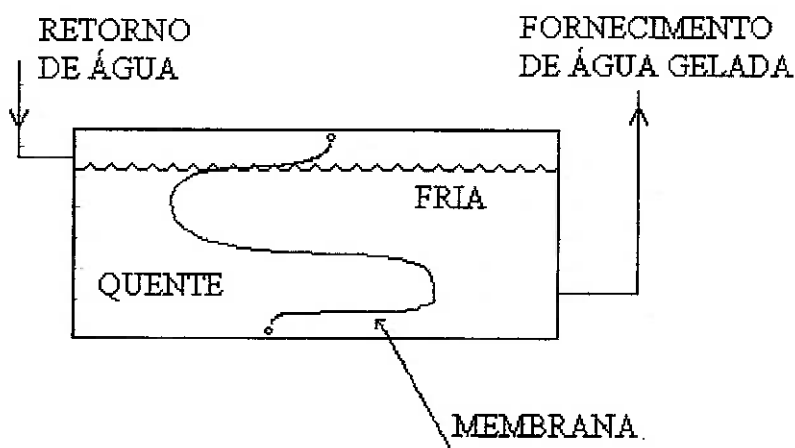


Figura 8 - Tanque com membrana flexível

Nesta técnica ocorrem problemas, pois o atrito da membrana com as paredes do tanque provoca rasgos e permite a mistura; as membranas também tem a tendência de serem puxadas na direção da conexão de saída e se romperem.

2-Dividir em vários compartimentos o tanque de armazenamento, como mostrado na Figura 9. O objetivo é minimizar a interface térmica, pela criação de seções de escoamento estreitas, de célula para célula. Há muitas variações desta técnica, mas em todas ocorre a presença de "espaços mortos" ou de estagnação em áreas das células com velocidades baixas.

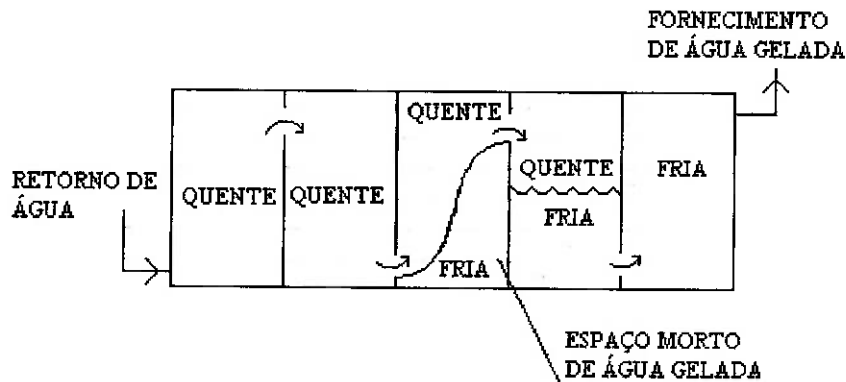


Figura 9 - Tanque com compartimentos

3-O conceito de multi-tanques, mostrado na Figura 10, em que a água de retorno é completamente isolada da água gelada pela armazenagem de cada uma em tanques separados. Diversos tanques são usados, com válvulas que permitem tanto a drenagem quanto o enchimento quer dos tanques de água gelada como dos de água mais quente de retorno. Os tanques são esvaziados e enchidos num rodízio. Existem dois problemas básicos com este conceito, ambos relacionados com custos. Como durante a operação os dois tanques estão apenas parcialmente cheios, a capacidade total dos tanques tem que ser maior do que a capacidade para termoacumulação, o que aumenta os custos da armazenagem. Além disso, o controle dos tanques múltiplos é muito complicado, e a multiplicidade das válvulas de controle faz o sistema muito difícil de operar, sem falar do custo devido ao número de válvulas envolvido.

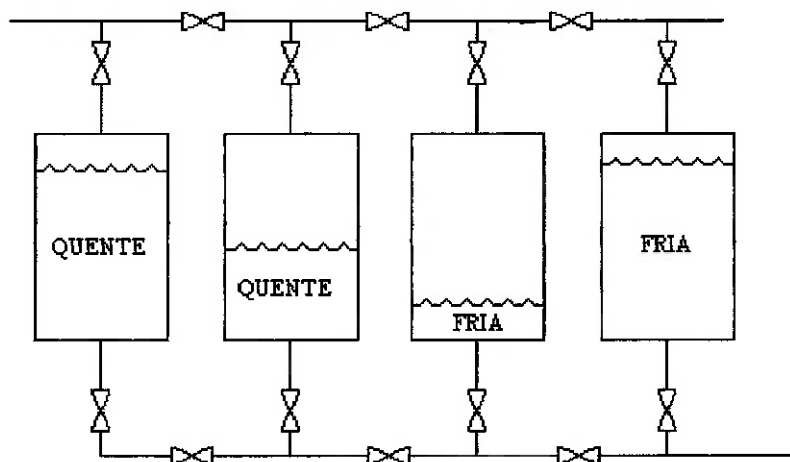


Figura 10 - Tanques múltiplos

4-Armacenamento estratificado, conforme já foi dito antes. Essa técnica permite que se retire ou retorne água do tanque de maneira muito suave, de tal forma que as forças de empuxo superem as forças de inércia. A água se torna menos densa quando sua temperatura cai abaixo de 4°C , portanto a estratificação não funcionaria nesta faixa. Quando um tanque estratificado é carregado, água entre $6,5^{\circ}\text{C}$ e 4°C entra através de um difusor do tipo tubo duplo ou grelha pelo fundo do tanque e retorna ao "chiller" por outro difusor no topo do tanque. Tipicamente a água que entra forma uma zona de mistura de 30 a 90 centímetros de espessura. Essa zona dirige-se para o topo enquanto a recarga do acumulador prossegue. Posteriormente essa zona misturada ou termoclina dirige-se para o fundo de um certo tanto devido à condução e trocas de calor com as paredes do tanque (Ver Figuras 11 e 12). O armazenamento estratificado torna-se mais eficiente à medida que o tanque se tornar mais profundo porque a zona de mistura se torna uma fração menor da altura do tanque. O tanque pode ter qualquer seção transversal, desde que as paredes sejam praticamente verticais. Tanques cilíndricos

horizontais não são bons candidatos para armazenamento estratificado, embora tenham sido usados em séries, com chicanas internas verticais para reduzir a mistura.

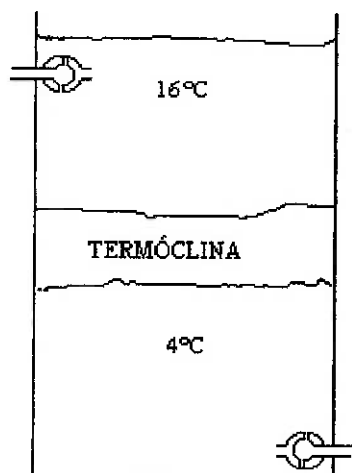


Figura 11 - Armazenamento estratificado termicamente com difusores de tubos concêntricos

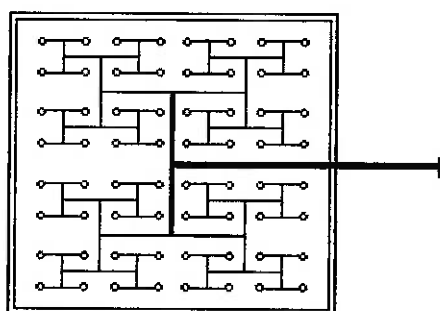


Figura 12 - Vista superior dos bocais distribuídos

SISTEMAS DE GELO

A energia térmica pode ser armazenada como calor latente de fusão do gelo. A água tem o maior calor latente de fusão entre os materiais comuns, 80 kcal/kg. Isso reduz

consideravelmente o volume necessário comparado a sistemas de armazenamento de calor sensível, o que contribui para reduzir o investimento.

SISTEMAS GELO/ÁGUA DE EXPANSÃO DIRETA

É o tipo de sistema de termoacumulação de gelo em uso há mais tempo, em que o evaporador está em contato direto com o meio de armazenamento. Utiliza os componentes básicos de um sistema de refrigeração mecânica: compressor, condensador, geralmente do tipo evaporativo, válvula de expansão, e uma combinação de evaporador com tanque de armazenamento, consistindo de serpentinas de refrigerante imersas num tanque preenchido com água. A água do tanque é congelada externamente às serpentinas do evaporador até uma espessura de no máximo 6 cm. O gelo é derretido pela circulação de água de retorno dos "fan-coils" através do tanque aonde será novamente resfriada. A agitação da água é promovida por circulação de ar comprimido de pressão moderada, que é usado para criar turbulência de modo a promover um congelamento e descongelamento uniformes. A princípio nota-se uma desvantagem potencial de sistemas de gelo, em que mais energia é necessária para fazer gelo do que para resfriar água, porque é preciso uma temperatura mais baixa no evaporador (0°C), do que para produzir água gelada a $5,5^{\circ}\text{C}$.

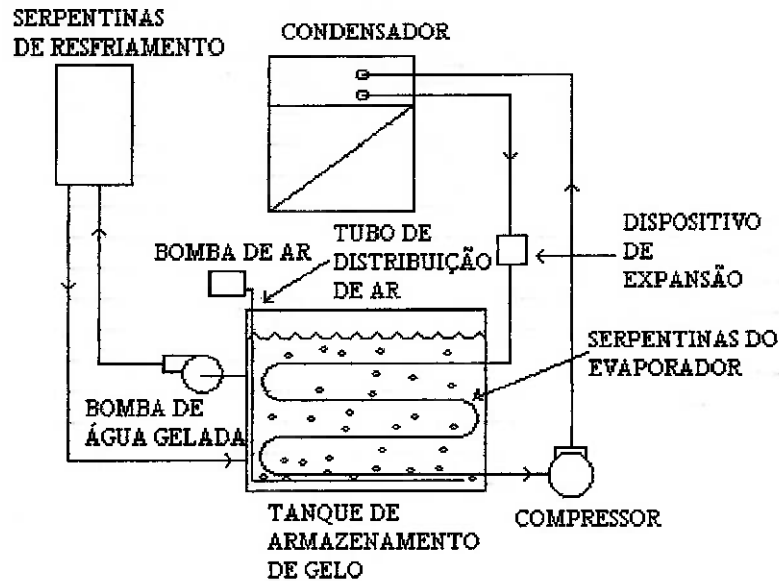


Figura 13 - Sistema básico de acumulação de gelo

Entretanto isso pode ser contornado escolhendo-se adequadamente o método de condensação. A mais frequente escolha de equipamentos para sistemas a água gelada é de "chillers" centrífugos com condensação a água, para a faixa de 200 TR ou mais. Estes "chillers" geralmente requerem 0,80 a 0,85 kW/TR de capacidade, e são projetados para operarem a uma temperatura de condensação de 40°C, resfriado com água a 30°C de uma torre de resfriamento, que é aquecida a 35°C no condensador. Deve-se ressaltar que o sistema a gelo permite o uso de um método de condensação mais eficiente do que o formado por torre de resfriamento mais condensador resfriado a água, ou seja o uso de um condensador evaporativo. Este combina o condensador resfriado a água e a torre de resfriamento numa única peça de equipamento. Isso não só reduz o custo, mas também, principalmente, elimina uma das duas etapas de troca de calor, permitindo a operação a uma temperatura de condensação mais baixa. Consequentemente, um condensador evaporativo pode ser selecionado para operar num sistema de termoacumulação a gelo na temperatura de condensação de 35°C quando um "chiller" resfriado a água operaria na temperatura de condensação de 40°C.

Como resultado a temperatura de condensação mais baixa praticamente compensa o maior gasto de energia que se deve à menor temperatura do evaporador no sistema a gelo. Se um sistema de termoacumulação a gelo for selecionado para temperatura de condensação de 35°C e temperatura de evaporação de -6,5°C o consumo do compressor seria de aproximadamente 0,88 kW/TR. Isso é apenas 5% a 10% a mais do que um "chiller" típico resfriado a água e quando o consumo total, incluindo todos os itens do sistema, for incluído pode-se comparar os resultados conforme a tabela abaixo:

CONSUMO A PLENA CARGA (kW/TR)

	ÁGUA GELADA	GELO
Chiller/compressor	0,840	0,880
Bomba de água gelada primária	0,022	-
Bomba de água gelada secundária	0,240	0,240
Bomba de água do condensador	0,040	-
Ventilador da torre de resfriamento	0,086	-
ventilador do condensador evaporativo	-	0,084
Bomba do condensador evaporativo	-	0,010
Agitador	-	0,050
Total	1,228	1,264

Com base no custo inicial mais baixo, menor espaço ocupado, e sem os problemas da mistura da água, e principalmente sem prejuízo no tocante ao consumo de energia, o sistema de termoacumulação a gelo é normalmente a melhor opção quando se tratar apenas de refrigeração.

SISTEMAS USANDO FLUIDO TÉRMICO

Invés de passar refrigerante pelas serpentinas do evaporador dentro do tanque de armazenamento, pode-se usar um fluido térmico, ou seja um líquido que é resfriado por um refrigerante e que transporta energia sem mudança de estado, atuando como refrigerante secundário. Tem a vantagem de reduzir a quantidade de refrigerante, todavia necessita de um trocador de calor entre o "chiller" e o tanque de armazenamento.

SISTEMAS DE GELO COM FLUIDO TÉRMICO NA SERPENTINA

Neste tipo de dispositivo de armazenamento, quadros de tubos de plástico, contendo as serpentinas de fluido térmico, são conformados e colocados dentro de um tanque de água cilíndrico, conforme a Figura 14. Esses quadros ocupam aproximadamente 10% do volume do tanque; outros 10% do volume são deixados vazios para permitir a expansão da água no congelamento, e o resto é enchido com água. Um fluido térmico, consistindo, por exemplo, de uma solução de 75% de água e de 25% de etileno-glicol, resfriado pelo "chiller", circula através das serpentinas e congela a água do tanque. É formado gelo nas serpentinas até uma espessura de 1 cm. Durante a descarga do acumulador, o fluido térmico, gelado, circula para os "fan-coils" e retorna ao tanque de acumulação para ser resfriado novamente. Um "chiller" padrão fornece refrigeração para esses sistemas. Durante o ciclo de carga do acumulador, o fluido térmico resfriado deixa o "chiller" a uma temperatura de aproximadamente $-3,5^{\circ}\text{C}$ e retorna a $-0,5^{\circ}\text{C}$. Quando o tanque está 90% carregado, as temperaturas de entrada e de saída no "chiller" caem rapidamente porque há pouca água para ser congelada. Quando a temperatura de saída do "chiller" atinge $-5,5^{\circ}\text{C}$, o "chiller" é desligado, e bloqueado para a noite de modo que não curto-circuite através dos tubos. O termostato do

"chiller" é regulado para a temperatura de saída de $-5,5^{\circ}\text{C}$; assim permanecendo a toda carga durante todo o ciclo e mantendo o sistema operando na sua condição mais eficiente. O congelamento e o degelo ocorrem pela mesma superfície de troca de calor, portanto não há prejuízo para congelamento completo a cada noite. Uma válvula de modulação de temperatura na saída do tanque (ver Figura 15) mantém um fluxo constante de líquido para a carga. Quando o sistema de acumulação está totalmente carregado, o "chiller" é mantido desligado, e a válvula de modulação permite que um pouco de fluido desvie do tanque para atender a carga quando necessário. Se um sistema de acumulação parcial for usado, o termostato do "chiller" é mudado da regulação de $-5,5^{\circ}\text{C}$ para a temperatura de projeto nas serpentinas de refrigeração, por exemplo $6,5^{\circ}\text{C}$. Se a carga no edifício for baixa, o "chiller" atende aos $6,5^{\circ}\text{C}$ sozinho. Se a carga for maior do que a capacidade do "chiller", a temperatura do fluido térmico na saída sobe e a válvula de modulação de temperatura abre automaticamente para manter a temperatura de projeto nas serpentinas.

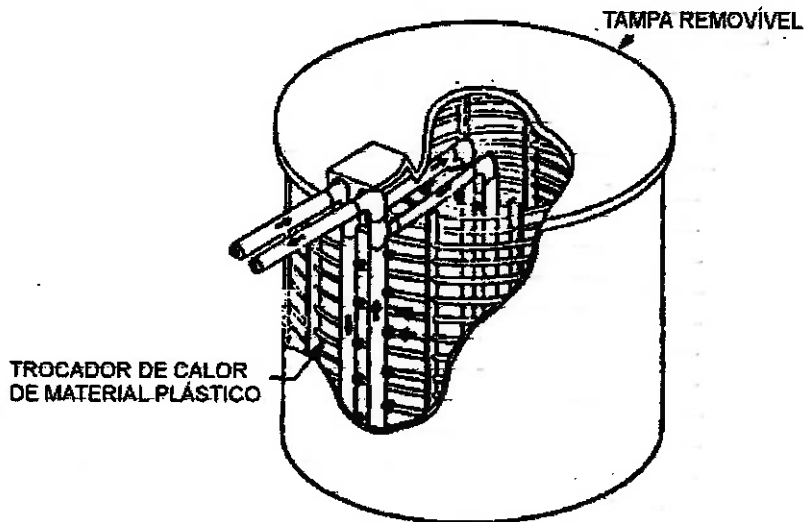


Figura 14 - Tanque com gelo e fluido térmico

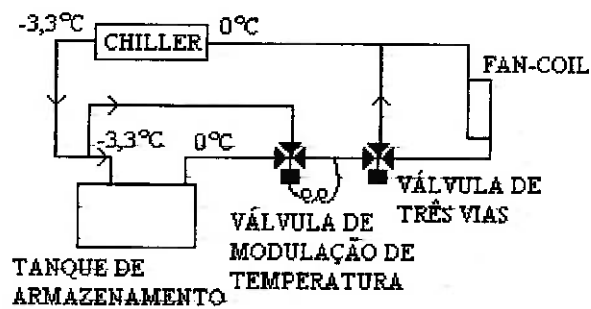


Figura 15 - Acumulação parcial - Carga do acumulador

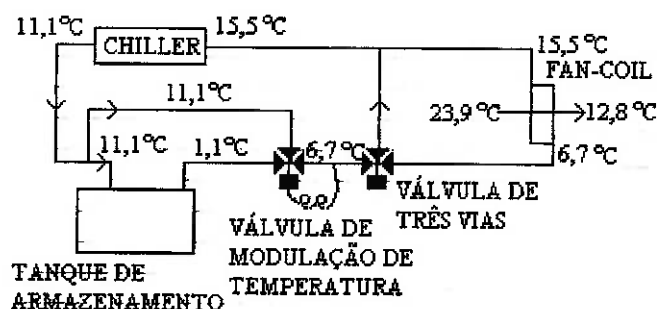


Figura 16 - Acumulação parcial - Descarga do acumulador

SISTEMAS COM GELO ARMAZENADO EM RECIPIENTES

Este tipo de sistema de termoacumulação baseia-se em recipientes plásticos preenchidos com água desionizada e um agente nucleador de gelo. Os sistemas disponíveis comercialmente incluem recipientes esféricos com aproximadamente 10 cm de diâmetro ou retangulares com dimensões de 3,5 cm por 30 cm por 75 cm. Esses recipientes são colocados em tanques de armazenamento, que podem ser tanques de aço pressurizados, tanques abertos de concreto, ou tanques adequados de "fiberglass" ou de polietileno. Essa técnica permite o uso de qualquer tamanho, formato, ou tipo de tanque. Utiliza como fluido térmico uma solução de água e anti-congelante, que é resfriada a -3°C ou -4°C por um "chiller", circula pelo tanque, externamente aos recipientes, formando gelo dentro destes. Os recipientes são projetados para serem flexíveis, de modo a permitir deformação, com o aumento de volume, durante a formação do gelo. Durante a descarga o fluido térmico flui diretamente para os "fan-

coils" ou para um trocador de calor, removendo calor da carga e derretendo o gelo encapsulado nos recipientes plásticos. Quando o gelo derrete os recipientes plásticos retornam à sua forma original. A quantidade de gelo é medida e controlada por um tanque de expansão ligado ao tanque de acumulação principal. Quando o gelo se forma, os recipientes plásticos se flexionam para permitir a expansão e forçam o fluido térmico ao seu redor para dentro do tanque de expansão e o nível de líquido dentro do tanque pode ser monitorado para controlar o sistema e saber quanto gelo há disponível em cada instante, durante a carga ou descarga do sistema.

SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE GELO DO TIPO PLACA

Este sistema consiste de uma seção de produção de gelo e de uma seção de armazenamento de gelo/água gelada, cada seção tendo seu próprio controle. O sistema de produção de gelo é simplesmente um sistema de refrigeração de expansão direta cujo evaporador consiste de placas múltiplas verticais, planas ou cilíndricas. Água é bombeada do tanque de acumulação a baixa pressão e distribuída por sobre as placas do evaporador, aonde flui num filme fino escorrendo sobre estas, e retornando por gravidade ao tanque. Se a temperatura da água estiver morna, a máquina funciona como um "chiller" de Baudelot. Se a temperatura da água estiver baixa, parte da água se congela sobre as placas em lâminas de espessura de 0,6 a 1,0 cm, quando da operação econômica. Periodicamente o gelo é liberado das placas revertendo-se o fluxo do refrigerante e introduzindo gás quente dentro das placas do evaporador, de modo suficiente para esquentar as placas até quebrar a ligação do gelo com as placas, fazendo com que o gelo caia dentro do tanque de armazenamento. As Figuras 17, 18 e 19 mostram, esquematicamente, a produção e o recolhimento do gelo, e uma aplicação para condicionamento de ar. O gelo é formado nas placas circulando-se água a 0°C por

20 a 30 minutos no ciclo de produção, e é recolhido em 20 a 40 segundos. As placas são normalmente agrupadas em conjuntos de três ou seis, de modo que a rejeição de calor das placas ativas é usada para fornecer calor para o recolhimento de gelo de um conjunto de cada vez. O gerador de gelo operará como "chiller" quando a água acima de 0°C for levada às placas. Dependendo da capacidade do compressor, comprimento das placas, e vazão de água, com uma temperatura da água de 13°C sobre as placas, a água sai com temperaturas entre 0,5°C e 7°C. Na Figura 19, água gelada é bombeada do tanque de armazenamento para a carga térmica e retorna ao gerador de gelo. Uma bomba de recirculação de baixa pressão é usada para se obter um fluxo ótimo sobre as placas, conforme necessário. Esse sistema pode ser usado para nivelamento ou para deslocamento de carga térmica.

Em aplicações de nivelamento (ou acumulação parcial), quando o edifício estiver sem carga, é gerado gelo e o tanque de acumulação é carregado. Quando houver carga, a água gelada de retorno flui diretamente para as placas e o gerador de gelo funciona como um "chiller" de alta eficiência. Em aplicações para deslocamento da carga (acumulação total), o gelo é gerado apenas nos horários fora de pico.

A espessura do gelo nas placas é controlada, de modo que a transferência de calor é mantida alta, e portanto a pressão de sucção permanece alta, e o compressor sempre opera no ponto de máxima eficiência.

Uma característica do gelo formado nos trocadores de calor tipo placa plana é que o gelo armazenado no tanque pode ser derretido muito rapidamente. O gelo tem um volume caracteristicamente menor do que 15 cm por 15 cm por 0,6 cm. A área de contato do gelo com a água de retorno é muito grande, e as velocidades da água são baixas. Uma carga de gelo de 24 horas armazenada no tanque pode ser derretida em menos de 30 minutos. Gelo armazenado desta forma pode ser usado para sistemas de

refrigeração de emergência exigindo grande capacidade para curtas durações. Os sistemas de refrigeração usados com esse sistema podem ser alternativos, de parafuso ou centrífugos. As temperaturas de sucção são relativamente constantes entre $-5,5^{\circ}\text{C}$ e -7°C . As temperaturas de condensação irão variar com o tipo de rejeição de calor utilizado e com as condições ambientes. Para os sistemas de produção de gelo do tipo placa, condensadores evaporativos ou torres de resfriamento são recomendados para minimizar os kW/TR.

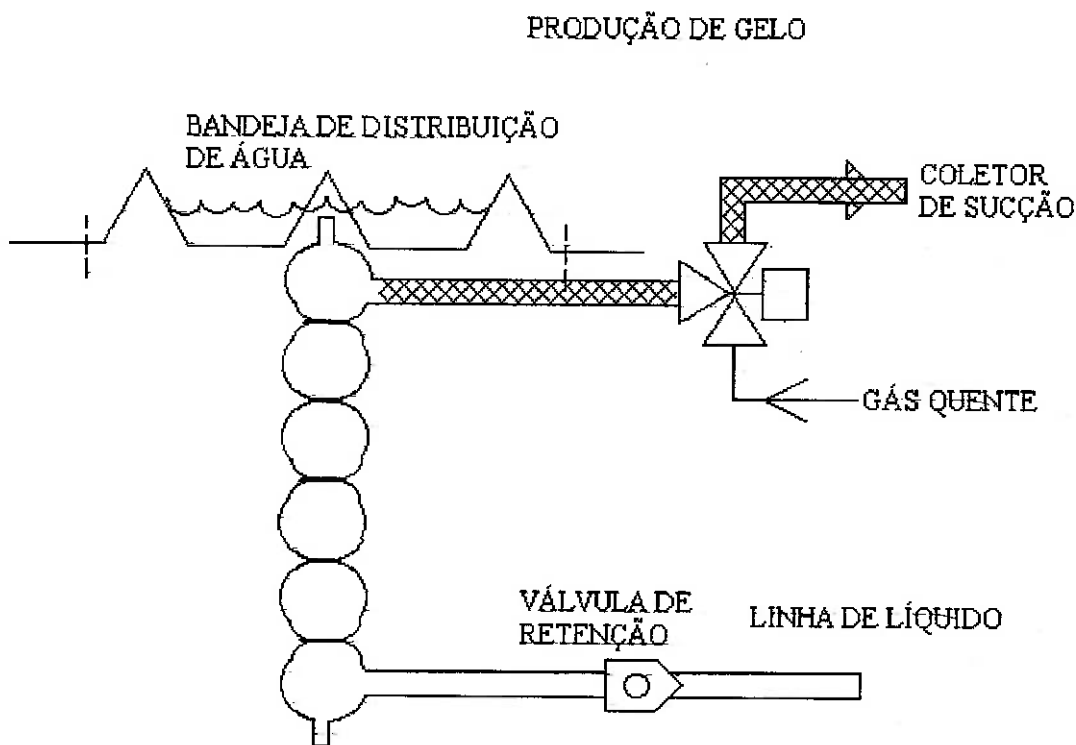


Figura 17 - Produção de gelo

RECOLHIMENTO DE GELO

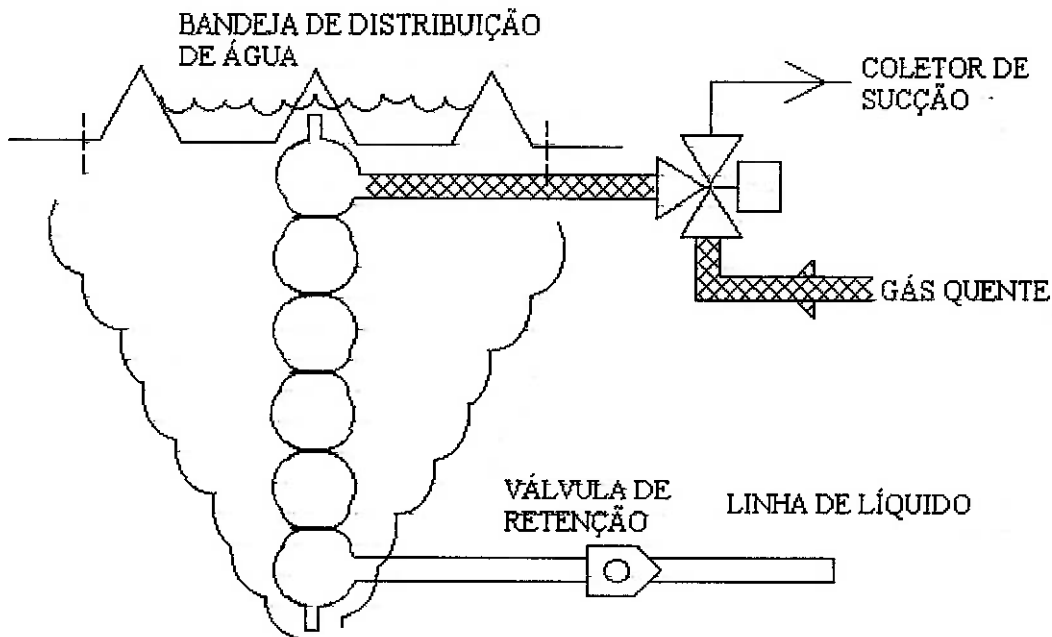


Figura 18 - Recolhimento de gelo

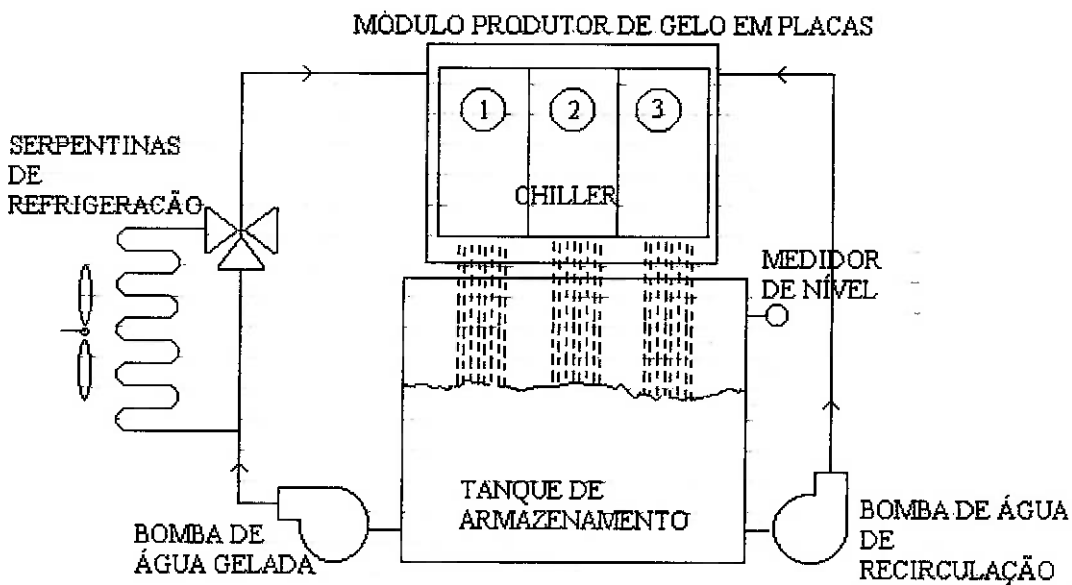


Figura 19 - Sistema de refrigeração com produção de gelo nas placas e recolhimento ao tanque

SISTEMAS BASEADOS NA MUDANÇA DE FASE DOS MATERIAIS

Os sais eutéticos tem sido usados há muitas décadas, tal como os sistemas de armazenamento de água gelada e de gelo. Os materiais de mudança de fase (phase change materials-PCMs) foram desenvolvidos com várias temperaturas de mudança de fase, tais como os sais eutéticos, que fundem e congelam a -16°C , para aplicações de baixa temperatura. Atualmente, o material eutético mais usado para aplicações de armazenamento de refrigeração funde a 8°C . Esse material é uma mistura de sais inorgânicos (sendo o sulfato de sódio o sal primário), água, e agentes nucleantes e estabilizantes. Tem um calor latente de fusão de 23 kcal/kg e densidade de 1490 kg/m³.

O PCM de 8°C precisa de temperaturas de água gelada convencionais ($5,5^{\circ}\text{C}$) para carregar o sistema de armazenamento. Essas temperaturas permitem que qualquer "chiller", novo ou já existente, alternativo, a parafuso, ou centrífugo, seja usado para carregar o sistema de armazenamento em condições de refrigeração comparáveis a um sistema padrão de ar condicionado, e fazem com que os eutéticos sejam particularmente apropriados para aplicações de "retrofit".

Tal como sistemas de gelo, os sistemas eutéticos baseiam-se na mudança de fase. O uso do calor latente dos PCMs requer aproximadamente 0,16 m³/TR-h para todo o conjunto do tanque, incluindo as conexões, tubulação e a água no tanque. Como mostra a Figura 20, o PCM é colocado dentro de um recipiente rígido, e impermeável, feito de polietileno de alta densidade. Os recipientes medem 60 cm por 20 cm por 4,5 cm, e são hermeticamente selados.

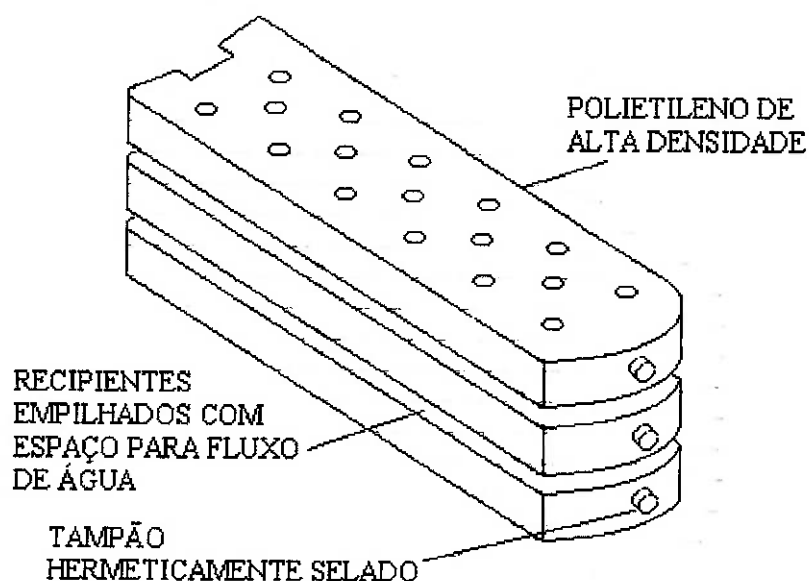


Figura 20 - Recipiente para material de mudança de fase

Os recipientes são projetados com uma razão superfície/volume de 24 para maximizar a transferência de calor, e tem um espaço de 0,64 cm para que a água circule ao redor dos recipientes, e são geralmente empilhados. O sal eutético não se expande ou se contrai nas mudanças de fase.

Os recipientes são normalmente colocados num tanque feito de concreto. Os recipientes deslocam aproximadamente dois terços do volume do tanque, de modo que um terço do volume do tanque seja ocupado pela água, que é usada como meio de transferência de calor. O sal eutético é aproximadamente uma vez e meia mais denso do que a água, assim, quando o PCM congela, o recipiente não flutua nem se expande, e o padrão de transferência de calor/espacamento dos recipientes é mantido através do ciclo de fusão e de congelamento. Tipicamente, água gelada a 4,4°C a 5,5°C é usada para carregar o tanque de armazenamento. A temperatura de saída do tanque permanece relativamente estável a 8°C até que o sal eutético esteja quase

completamente congelado, ponto este em que a temperatura de saída do tanque é a mesma que a temperatura de carregamento do tanque, por exemplo 5,5°C. A diferença de temperatura de 3°C através do tanque poderia corresponder ao "chiller" sendo utilizado a 60%, que é a parte mais eficiente na curva de performance de "chillers" centrífugos. É normalmente preferível carregar os últimos 10 a 20 % da capacidade do tanque quando há carga de refrigeração por causa da baixa diferença de 1,5°C a 2,5°C através do tanque. Durante a descarga do tanque, as temperaturas da água deixando o tanque começam a 5,5°C e sobem até 7,8°C a 8,9°C Uma temperatura de saída de 9,4°C ocorre no fim do período de descarga, quando, em muitos casos, a carga do edifício já começou a diminuir e as serpentinas podem aceitar temperaturas da água ligeiramente superiores.

Existem novos materiais que usam o calor latente sendo pesquisados como meios de armazenamento para uso em resfriamento (e também em aquecimento). São os clatratos, compostos em que uma espécie química é presa dentro da estrutura em forma de jaula da outra espécie, e também os sistemas binários de líquidos conjugados.

SISTEMAS COM CLATRATOS

Clatratos formados com água como constituinte são particularmente atrativos porque eles congelam em temperaturas mais altas do que o gelo, mas baixas o suficiente para a refrigeração de edifícios. Num clatrato de hidrato gasoso, uma molécula de gás é aprisionada dentro da estrutura cristalina da água. Como existem forças atrativas entre o gás e as moléculas de água circundantes, a presença do gás fornece uma estabilidade adicional à estrutura, de modo que o clatrato, compreendido principalmente de água, pode existir como sólido em temperaturas superiores do que o ponto de congelamento

da água. Como no caso do gelo normal, o derretimento dos hidratos faz com que as ligações dos hidrogênios entre moléculas adjacentes de água sejam quebradas, de modo que o calor latente de fusão de um hidrato seja quase o mesmo do gelo. Sendo a estrutura do hidrato formada com água e um gás, as condições de formação dependem da pressão e da temperatura. A estrutura de hidrato coexiste com as espécies químicas do refrigerante como gás, ou como líquido sobre uma certa faixa de condições, como mostra a Figura 21. A temperatura mais alta na qual o hidrato é estável é um ponto invariante(Q2).. Neste ponto, quatro fases e dois componentes existem, com zero grau de liberdade. Uma restrição similar é encontrada no ponto Q1, onde gelo normal pode coexistir com o hidrato. Há várias espécies moleculares que podem formar clatratos com água, e um menor número que pode formar hidratos gasosos. Gases que são capazes de formar hidratos tem as seguintes características:

1. São bastante insolúveis em água.
2. Tem o comprimento da ligação menor do que 7,04 Angstrons.
3. Devem ter um volume molar menor do que $105 \text{ cm}^3/\text{g-mol}$ no ponto de ebulição normal.

Muitos refrigerantes à base de clorofluorocarbonos tem essas características; os mais comuns compostos formadores de hidratos desse tipo são mostrados na tabela seguinte:

COMPOSTO	Q1		Q2	
	T(°C)	P(atm)	T(°C)	P(atm)
CCl ₃ F (R-11)	0	0,08	8,3	0,65
CCl ₂ F ₂ (R-12)	0	0,36	12,2	4,27
CBrF ₃ (R-13b1)	0	0,88	11,1	
CHCl ₂ F (R-21)	0	0,15	8,3	1,00
CHClF ₂ (R-22)	0	0,84	16,1	7,60
CH ₂ ClF (R-31)	0	0,22	17,8	2,83
CH ₃ CClF ₂ (R-142b)	0	0,14	13,3	2,29

O sistema na Figura 22 funciona da seguinte maneira: no estado descarregado o tanque contém refrigerante líquido, água, e refrigerante vapor de modo que a pressão e a temperatura do tanque fiquem sobre a linha Q2-B da Figura 21.

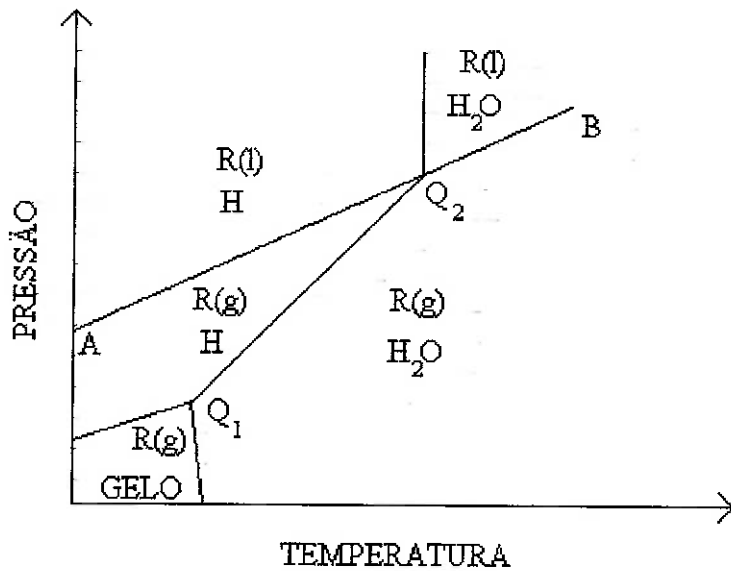


Figura 21 - Diagrama de fase água/gás

Durante períodos fora de pico, o compressor succiona refrigerante vapor pelo topo do tanque de armazenamento/cristalizador. O vapor é comprimido, condensado, e expandido num processo de estrangulamento de modo que ele volta para o tanque como uma mistura bifásica resfriada de líquido e vapor. Enquanto o refrigerante líquido vaporiza, o conteúdo do tanque vai se resfriando até que o ponto invariante Q2 seja atingido, e o hidrato começa a formar no processo de armazenamento latente. O hidrato é consolidado e existe líquido livre no fundo do tanque. Para descarregar o sistema, uma pequena bomba recircula o líquido do fundo do tanque para um "fan-coil" no edifício. A energia térmica absorvida pelo fluido de trabalho irá para o tanque de armazenamento/cristalizador, e o hidrato se funde.

As vantagens do sistema são: (1)transferência de calor por contato direto com uma efetividade da troca de calor próxima da unidade,(2)uso de um meio de armazenamento com temperatura de cristalização apropriada para a refrigeração, e (3) simplicidade. As desvantagens do sistema são o transporte de umidade a partir do cristalizador, considerações adicionais para a lubrificação do compressor, e uma quantidade bem maior de refrigerante.

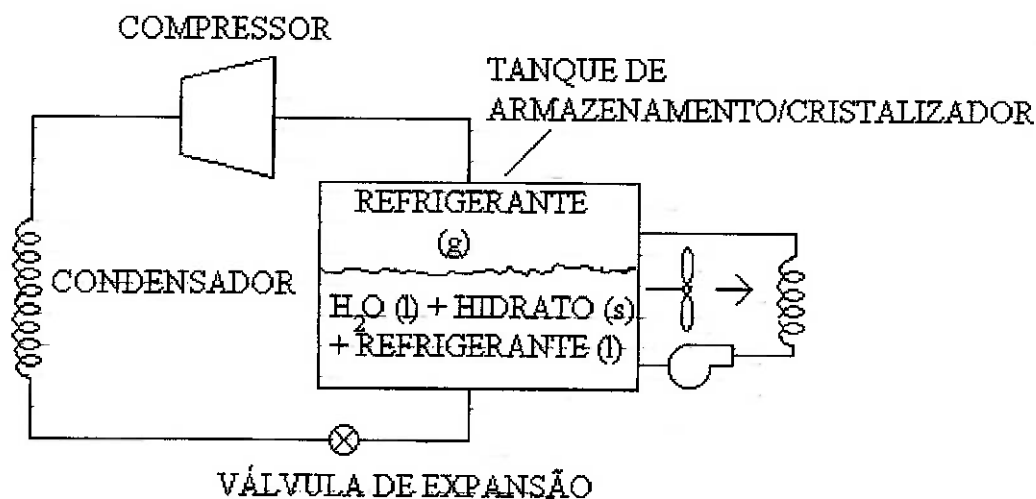


Figura 22 - Sistema de termoacumulação baseado em hidrato gasoso

SISTEMAS LÍQUIDO-LÍQUIDO

Calor latente pode ser armazenado em dois líquidos não ideais que tem grande variação da solubilidade mútua sob uma pequena variação de temperatura. Esses pares líquidos, conhecidos como conjugados binários, misturam-se ou separam-se de acordo com as variações da temperatura, liberando ou absorvendo calor no processo. Essas composições são completamente miscíveis acima de uma temperatura crítica da solução, mas são imiscíveis ou apenas parcialmente miscíveis abaixo desta temperatura crítica. A utilização de um sistema de conjugados binários possibilita o armazenamento de energia térmica lidando-se com a temperatura crítica da solução para induzir mistura ou separação das substâncias. Nesse processo o número de fases líquidas muda, e o calor é liberado ou absorvido. Um sistema de termoacumulação baseado nesta técnica tem a vantagem de que não se forma fase sólida, eliminando problemas de incrustação no trocador de calor.

Um sistema com conjugados binários é representado no diagrama de fases líquido-líquido do tipo "domo", mostrado na Figura 23. Nesta mistura dos compostos A e B, numa composição global XD à temperatura T1, duas fases líquidas distintas estão presentes. A composição dessas duas fases é dada pelos pontos C1 e C2. As quantidades relativas das fases com composição C1 e C2 são proporcionais aos comprimentos dos segmentos horizontais XD-C2 e XD-C1, respectivamente. Quando a temperatura é aumentada a quantidade de C2 irá diminuir e a quantidade de C1 irá aumentar até que na temperatura T2 a fase C2 desapareça. Então, a solução remanescente terá composição XD.

Um sistema com composição global inicial XC, e temperatura T2, também consiste de duas fases. Nesse caso, quando a temperatura sobe, as composições das duas fases se aproximam uma da outra. Na temperatura TC (temperatura crítica da solução) e acima, duas fases separadas deixam de existir. Sistemas de conjugados binários também podem ter outros diagramas de fase, nos quais a curva da solubilidade da Figura 23 é côncava para cima, do tipo "vale", ou completamente fechada.

O sistema de bomba de calor/termoacumulação mostrado na Figura 24 foi projetado com base no armazenamento térmico através das trocas de calor devidas à mistura. No modo de armazenamento de calor, o sistema é carregado bombeando-se composições XD e XE através da serpentina do condensador da bomba de calor. Assim que a temperatura dos dois líquidos atinge a temperatura crítica, uma única fase de composição XC é formada e retorna ao tanque, "reassentando-se" e passando para XE e XD. Para descarregar, XC é bombeada através da válvula A; e o calor extraído pelo "fan-coil", separando o líquido e retornando para o tanque, onde os componentes XD e XE estratificam-se devido a diferenças de densidade. A acumulação de frio pode ser

implementada revertendo-se os procedimentos de carga e de descarga, e usando-se temperaturas críticas mais baixas.

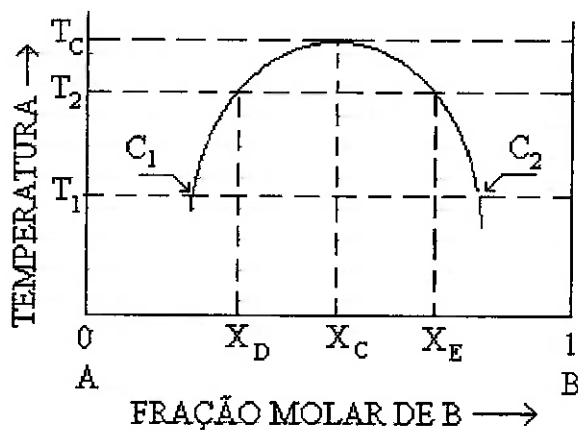


Figura 23 - Diagrama de fase para um conjugado binário

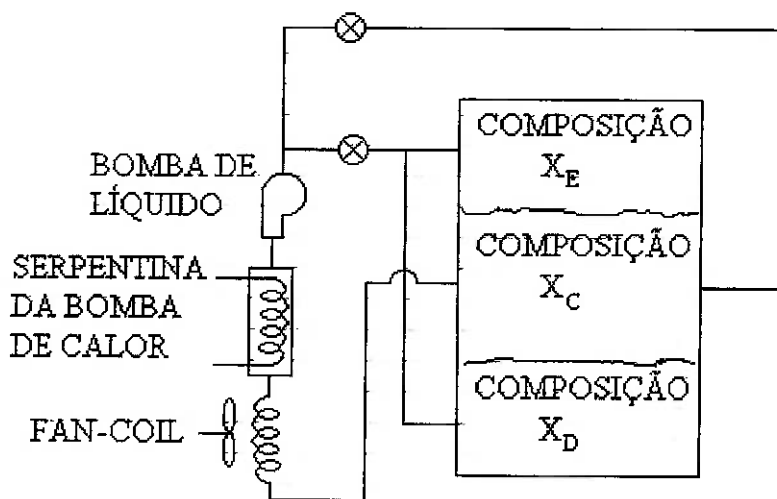


Figura 24 - Sistema usando conjugado binário

VII) CONCEITOS DE CONTROLE PARA TERMOACUMULAÇÃO

Hoje em dia, os dois mais populares candidatos a meio de armazenamento são o gelo e a água. Independente dos prós e contras de cada meio, a maioria das estratégias de controle são comuns para os dois.

Alguns sistemas são projetados com capacidade de armazenagem suficiente para assumir todo o resfriamento necessário durante o horário de pico, e apresentam poucos problemas de controle, mas tem pouca chance de se popularizarem devido ao seu alto custo inicial.

Os conceitos apresentados aqui referem-se a sistemas em que o "chiller" e os tanques de armazenagem atendem conjuntamente a carga térmica durante o horário de pico, tipo de arranjo que permite que estes sejam bem menores, da ordem da metade do tamanho e do custo de um sistema com armazenagem total.

A redução do pico de demanda de energia elétrica é a principal razão de se pensar num sistema de termoacumulação. O objetivo é postergar tanto quanto possível a demanda de eletricidade do "chiller" para um período fora de ponta.

A primeira regra da lógica de controle de termoacumulação é otimizar a redução de demanda para cada período de tarifação. Isso pode exigir que seja imposta uma limitação de demanda de eletricidade máxima diretamente no painel elétrico do "chiller". Seria exigida uma regulagem diferente para cada mês, que, em primeira instância poderia ser calculada, e posteriormente revisada utilizando-se a experiência e dados obtidos na operação.

A segunda regra da lógica de controle é, paradoxalmente, usar o sistema de armazenamento o mínimo possível. O corolário é prover ao máximo refrigeração direta para a carga térmica, dentro da estratégia de demanda mensal desenvolvida anteriormente. Em outras palavras, uma vez que a capacidade crítica de refrigeração para o dado período de tarifação foi estabelecida, é melhor operar a cada dia nesse

nível para assegurar que seja maximizada a refrigeração direta para a carga. Há boas razões para essa estratégia. No caso de se usar armazenamento de gelo, é quase sempre mais barato, em termos de kW/TR, atender a carga numa temperatura do evaporador mais alta, do que fabricar gelo numa temperatura mais baixa. No caso de armazenamento de água, existem perdas inevitáveis. Essas perdas classificam-se em: a curto prazo e a longo prazo, relacionadas à temperatura da água armazenada. Ocorre pequeno ganho de temperatura na água a 15,5 °C que retorna das serpentinas de refrigeração, mas a água do tanque a 5,5°C está sujeita a maiores perdas térmicas (devido ao maior diferencial de temperatura com o meio). As perdas a curto prazo envolvem transferência de calor armazenado nas paredes do tanque. Para tanques de concreto esse acréscimo de temperatura pode variar de 0,25°C a 1,0°C em menos de 24 horas. Tanques grandes, com mais de 2800 m³ sofrem menos com o aumento de temperatura a curto prazo. Tanques com volume de 700 m³ a 2100 m³ degradam-se mais rapidamente se o fundo do tanque estiver sujeito à variação diária de temperatura ambiente. As perdas a longo prazo acontecem em mais de 24 horas e envolvem transferência de calor além das paredes do tanque. Dependendo do volume do tanque essas perdas podem representar um adicional de até 1°C por dia na temperatura da água.

A terceira regra é armazenar para o dia seguinte apenas o que for necessário para complementar a capacidade de refrigeração determinada para aquele período de tarifação. Armazenar mais do que o necessário levaria a maiores perdas térmicas. Essa mesma lógica vale para sistemas de termoacumulação a base de gelo projetados para congelamento a partir do exterior de uma tubulação refrigerada. O congelamento mais econômico é conseguido no início do ciclo, com uma temperatura mais alta no evaporador e baixo kW/TR. A primeira camada de gelo atua como isolante e faz com

que a próxima camada custe mais a se formar. A melhor estratégia, então, é aquela em que o tanque de armazenagem é esgotado a cada dia, de modo que o congelamento ocorra tanto quanto possível na parte mais eficiente do processo de fabricação de gelo. Os controles para sistemas de termoacumulação são fundamentais porque devem operar de modo a reduzir os custos com energia. Um controle pobre pode levar a problemas operacionais tanto quanto à incapacidade de promover a redução desejada nos custos com eletricidade. Um bom controle exige lógica e operação conscientes, e o desafio dirige-se para o projetista e o operador similarmente.

Resumidamente, os princípios para controle de termoacumulação a base de água gelada ou de gelo são:

- 1-Otimizar a redução da demanda para cada período de tarifação.
- 2-Usar o armazenamento o mínimo possível.
- 3-Armazenar apenas o necessário para complementar a capacidade de refrigeração para um particular período de tarifação.

VIII) AVALIAÇÃO DOS SISTEMAS DE TERMOACUMULAÇÃO

Os sistemas de termoacumulação usam as características de calor sensível ou de calor latente do meio de armazenamento.

Os sistemas de calor sensível mais comuns baseiam-se em grandes volumes de água gelada. Os sistemas de calor latente usam mais comumente gelo, mas, sistemas mais recentes empregam materiais de mudança de fase (Phase Change Materials, PCMs), como sais eutéticos ou hidratos gasosos.

Comparando os sistemas de calor sensível e de calor latente nota-se que as principais desvantagens do primeiro tipo residem no grande volume de armazenamento necessário. Os sistemas de água gelada mostram-se vantajosos para "retrofit" de um sistema convencional com aumento de capacidade, já que apenas os tanques de armazenamento de água gelada são necessários. Outra vantagem é que menos energia é necessária para produzirmos água gelada a 5°C do que para produzir gelo a 0°C com menor temperatura do evaporador. Porém, existem dificuldades associadas à manutenção de uma separação adequada entre a água gelada dos tanques e a água mais quente que retorna das serpentinas de refrigeração, afetando a eficiência do armazenamento. As soluções para minimizar essa mistura foram discutidas no capítulo VI, devendo-se lembrar que os tanques de armazenamento estratificados termicamente correspondem à solução de menor custo e maior eficiência.

A utilização do calor latente de mudança de fase permite que uma quantidade muito maior de energia seja adicionada ou removida de um material para armazenamento de energia quando este sofre uma mudança de fase, em relação à energia que pode ser adicionada ou removida de um meio de armazenamento que permaneça em única fase, líquida como a água, ou sólida como rochas ou tijolos. Por isto, sistemas utilizando gelo como meio de armazenamento exigem, em média, apenas de 15 a 20% do volume de armazenamento que seria necessário se usássemos água gelada. Os sistemas a base

de gelo dividem-se em duas categorias: expansão direta e expansão indireta. Num sistema de expansão direta, o evaporador do "chiller" e tanque de armazenamento formam uma única unidade. O gelo é formado diretamente sobre o evaporador e tem influência direta sobre a performance deste. Essas características são comuns aos sistemas água/gelo com refrigerante na serpentina e de produção de gelo tipo placa. Em ambos os casos, o gelo é produzido sobre a superfície do evaporador. No primeiro sistema, o gelo permanece sobre a serpentina até que seja derretido, ou seja, até que se utilize o armazenamento. Conforme aumenta a espessura do gelo sobre a serpentina do evaporador, exige-se uma temperatura mais baixa para a mesma quantidade de calor removido, durante a carga do armazenamento, devido ao fato do gelo ser isolante térmico. No sistema de produção de gelo do tipo placa, o gelo é periodicamente removido da superfície do evaporador, mantendo regularmente uma temperatura constante no evaporador. Mas, enquanto esse sistema pode evitar algumas ineficiências da produção de gelo associadas a menores temperaturas do evaporador, ele introduz perdas através do processo de remoção de gelo das placas. Os sistemas de expansão indireta caracterizam-se pela presença de uma solução de água e anti-congelante, o fluido térmico, que transfere calor entre o evaporador do "chiller" e o tanque de armazenamento. O fluido térmico é resfriado no "chiller" e passa através do tanque de armazenamento, no qual água e gelo permanecem confinados, apenas mudando de fase com a transferência de calor. Estes sistemas apresentam a vantagem do evaporador estar livre do gelo comparado aos sistemas de expansão direta. Esses sistemas são do tipo fechado, com o fluido térmico circulando em um circuito pressurizado, não necessitando tratamento de água, e com a vantagem da carga estática do edifício não ser adicionada às exigências de bombeamento. Os sistemas com gelo em recipientes permitem que seja usada qualquer forma, tamanho ou tipo de tanque de

armazenamento, e o sistema pode ser associado a qualquer tipo de "chiller" padrão. Os sistemas à base de gelo apresentam uma vantagem adicional: podem fornecer água gelada a temperaturas muito mais baixas e com isso os projetistas podem especificar um sistema de distribuição de ar a baixa temperatura. A distribuição de ar numa temperatura mais baixa, entre 5,5°C a 9,4°C , comparando-se com as temperaturas de fornecimento convencionais, normalmente entre 10°C a 15°C , exige menor vazão de ar, resultando em ventiladores menores e dutos menores, o que reduz custos iniciais e custos operacionais. Sobre os sistemas de calor latente, há ainda dois tipos de materiais em que o processo de mudança de fase ocorre numa faixa de temperatura mais elevada comparando-se com a água : os sais eutéticos, que são misturas de sais inorgânicos, água e aditivos, e os hidratos gasosos, que são produzidos misturando-se gás com água. Ambos podem existir como sólidos em temperaturas superiores ao ponto de congelamento da água, o que reduz as exigências de energia. Teoricamente, para propósitos de refrigeração, esses materiais fornecem um meio de armazenamento ótimo. Apresentam a vantagem de ocupar pouco espaço e com o alto ponto de fusão podem usar temperaturas de água gelada convencionais (perto de 5°C) para carregar o sistema de armazenamento, permitindo que qualquer "chiller" alternativo, centrífugo ou a parafuso seja usado, fazendo com que os sais eutéticos sejam particularmente usados para aplicações de "retrofit".

IX) ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

As despesas com a demanda de eletricidade que se obtém de um sistema de termoacumulação a base de gelo são sempre menores do que aquelas de um sistema convencional e podem ainda ser reduzidas por certas estratégias de controle. As três estratégias "clássicas" de controle para um sistema de termoacumulação a base de gelo são: prioridade para o "chiller", prioridade para o gelo, e controle de proporção constante.

Na estratégia de controle prioridade para o "chiller", para sistemas de termoacumulação a base de gelo usando fluido térmico (solução eutética), permite-se ao "chiller" funcionar a plena capacidade durante o dia, sujeito a limitações da carga do edifício, e o gelo só é derretido quando e se a carga exceder a capacidade total do "chiller". Esse método de controle é muito simples, já que a função normal de controle do "chiller" permanece intacta. Sua característica indesejável é que a utilização do gelo armazenado não é controlada de forma a se conseguir a máxima redução de demanda, ou seja, não maximiza o potencial de redução de demanda do dado sistema. O modo mais simples de implementar essa estratégia é tendo um "timer" que altera o modo de operação do sistema para fabricação de gelo durante a noite, atuando uma válvula de três vias que dirige a saída dos tanques de gelo de volta ao "chiller", desviando da carga térmica do edifício, e alterando a regulação do "chiller" para produzir fluido térmico a -3°C necessário para fazer gelo. Para a operação durante o dia, o "timer" atua sobre a válvula de três vias de forma a dirigir a saída do tanque para a carga do edifício e regula o "chiller" para produzir água gelada. Ao mesmo tempo estará em ação um sistema de gerenciamento de energia baseado num microprocessador que faz com que o controle de prioridade do "chiller" prevaleça normalmente, mas parte ou toda a capacidade do "chiller" pode ser desativada sempre que um nível de demanda do edifício pré-determinado for atingido, quando então os tanques de gelo assumem a

carga resultante até que a demanda recue novamente. Isso permite o controle direto da demanda usando os tanques de gelo e pode ser um modo simples de maximizar sua performance. Esse tipo de controle adapta-se melhor a edifícios com um pico de carga bem definido, relativamente estreito. Entretanto, a maioria dos edifícios comerciais tem uma curva de demanda relativamente plana durante o horário de ocupação, de modo que o controle de limite de demanda não é normalmente adequado para esses casos, desrecomendando a estratégia de prioridade para o "chiller".

Em contraste com o controle de prioridade para o "chiller", o objetivo da prioridade para o gelo é derreter tanto gelo quanto possível durante o dia. Os controles normais do "chiller" são empregados, mas o "chiller" seria limitado pela divisão de sua capacidade em estágios e desabilitando cada estágio sempre que possível. Assim, força-se o gelo a derreter em resposta à carga. Os estágios poderiam ser habilitados sucessivamente em resposta a certas condições, para atender a carga e evitar esgotamento prematuro do estoque de gelo. Essas condições são determinadas pelo tipo de controle de prioridade do gelo que for escolhido. A vantagem da estratégia de controle de prioridade para o gelo é que ela maximiza a capacidade dos sistemas de termoacumulação a base de gelo de cumprir seu primeiro propósito, que é reduzir as despesas com demanda elétrica de pico para um dado mês. As desvantagens da prioridade para o gelo são: o equipamento de controle e as sequências de controle podem ser bem mais complicadas que na prioridade para o "chiller", e o volume total do tanque pode ser maior para uma dada taxa de "queima" de gelo, e ainda, se os controles não forem adequadamente projetados o gelo pode esgotar-se cedo demais num dia mais quente, resultando num resfriamento inadequado. Há um outro aspecto do controle de prioridade para o gelo que pode ser uma vantagem ou uma desvantagem, dependendo das tarifas locais, já que obriga a uma utilização maior do

"chiller" à noite, no modo de fabricação de gelo. E como o "chiller" está produzindo temperaturas muito mais baixas nesse modo, ele é menos eficiente em termos de TR/kW. Entretanto, se houver um diferencial entre custos diurnos e noturnos do kWh essa diferença na eficiência pode ser contrabalançada. Pode-se ter um controle preditivo: como a idéia da estratégia prioridade para o gelo é usar tanto gelo quanto possível e como o "chiller" só é dimensionado para atender parte da carga térmica de pico, deve-se tomar cuidado para não se esgotar o gelo prematuramente num dia quente, deixando capacidade de refrigeração inadequada para vencer a carga térmica. Isso implica na necessidade de previsão de dias quentes com antecedência suficiente para que se utilize corretamente o "chiller" e o gelo seja preservado. Uma das maneiras de se prever um dia particularmente quente é observar-se a temperatura bem cedo a cada dia, pois tendo-se temperaturas mais altas desde cedo é estatisticamente provável que se atinja a temperatura de projeto para um dado período. Essas temperaturas podem ser especificadas para cada hora do dia e associadas a diferentes estágios de capacidade de refrigeração. Esse tipo de controle exige a capacidade de tomar decisões de um microprocessador. Por outro lado pode-se ter previsões do tempo disponíveis como um sinal digital, como ocorre nos Estados Unidos. Então é possível ter um computador controlando o equipamento de ar-condicionado para um ou mais edifícios, tomando decisões com base nas previsões e gerenciando a capacidade do "chiller". O controle pode ser do tipo reativo: a maneira mais simples de controlar um sistema com prioridade para o gelo é ter os estágios do "chiller" entrando em operação em resposta à temperatura do fluido térmico que retorna. Isso é similar à maneira normal de se controlar o "chiller", com diferentes regulagens de temperatura acessando sucessivos estágios do "chiller", apenas as temperaturas (set-points) sendo mais altas do que seriam para um "chiller" normal, criando um atraso para fazer com que o gelo derreta-

se antes. Para que a temperatura do fluido térmico que retorna seja usada como um parâmetro de controle, o fluxo do fornecimento de fluido térmico para o edifício deve ser mantido constante de modo que a temperatura da água de retorno varie em proporção à carga do edifício. Esse tipo de controle não dá ao sistema capacidade preditiva, mas se as temperaturas em os sucessivos estágios do "chiller" devem entrar forem selecionadas cuidadosamente, poder-se-á lidar com situações extremas sem que ocorra nenhum infortúnio e ainda preservando as vantagens de redução de carga da estratégia de prioridade para o gelo. Portanto pode parecer que os sistemas de controle mais complicados discutidos anteriormente são desnecessários, e que a performance de sistemas de termoacumulação pode ser maximizada usando controles simples.

Uma parte importante de qualquer sistema de controle para termoacumulação a base de gelo é capacidade de se medir diretamente a quantidade de gelo disponível. No controle de prioridade para o "chiller" essa capacidade pode ser usada simplesmente para soar um alarme no caso do nível de gelo estar perigosamente baixo, no controle de prioridade para o gelo pode ser usada como um controle secundário ou até como um controle primário. Como controle primário, um conjunto de pares do tipo [horário, quantidade de gelo] poderia ser o único meio de determinar quando habilitar capacidade do "chiller". Como controle secundário, o nível do estoque de gelo pode atuar como controle de realimentação para habilitar mais capacidade para o "chiller" se o nível de gelo estiver perigosamente baixo para um dia particular.

Existe uma desvantagem no controle de prioridade para o gelo que veio à luz recentemente, devido a avanços no teste de performance de sistemas de termoacumulação a base de gelo. Com o controle de prioridade para o gelo, não importando qual a configuração do equipamento ou a filosofia de controle, os tanques de gelo terão ocasionalmente que trabalhar sozinhos para trazer o fluido térmico

gelado de volta à sua temperatura de projeto. Quando um sistema de dutos a baixa temperatura estiver sendo projetado, a temperatura de projeto do fluido térmico pode ser 2°C ou menos. Curvas de performance recentes para tanques de gelo mostram que as limitações de transferência de calor são um problema nessas temperaturas baixas. Isso significa que para se obter a taxa de descarga dos tanques desejada para um determinado período de tempo, ou deve-se aumentar o número de tanques ou deve-se especificar um tipo de tanque com densidade de transferência de calor maior do que o normal. Qualquer dessas alternativas aumenta os custos. Nós temos a estratégia prioridade para o "chiller", a qual não aproveita totalmente a capacidade de evitar picos de carga do sistema de termoacumulação a base de gelo e assim possui um custo operacional maior, ou a prioridade para o gelo, que tem um custo de equipamentos superior. Em resposta a essa situação, e como um compromisso entre as duas estratégias, uma terceira foi desenvolvida, chamada controle de proporção constante. Sob esta filosofia de controle, nem o "chiller" nem o gelo recebem prioridade na resposta à carga do edifício. Diferentemente, o "chiller" e os tanques de gelo atendem cada qual a uma certa porcentagem da carga térmica, que permanece constante sob todas as condições de carga. Isso permite que os tanques de gelo sejam projetados para operar em condições ótimas e continua reduzindo a demanda de pico dos edifícios, comparada com a estratégia de prioridade para o "chiller", já que a fração da capacidade total do "chiller" utilizada num certo mês irá seguir a fração da carga de projeto total que o edifício apresenta para esse dado mês. Os tanques de gelo e "chiller" são forçados a atender uma proporção constante da carga do edifício colocando-se os tanques, o "chiller", e a carga térmica em série. A temperatura deixando a carga do edifício é mantida constante variando-se o fluxo de fluido térmico para o edifício (controlando a bomba) em resposta a um sensor de temperatura no

fluido térmico que retorna. Dessa forma a temperatura deixando os tanques de gelo seria mantida constante desviando-se quantidades variáveis de fluido térmico por fora dos tanques. O desvio seria controlado por uma válvula de três vias, que responderia a um sensor de temperatura colocado no fluido térmico que sai dos tanques. A temperatura deixando o "chiller" seria mantida constante variando-se o carregamento do "chiller" em resposta a um sensor de temperatura no fluido térmico saindo do "chiller". Assim, todas as temperaturas do sistema são mantidas constantes sob todas as condições de carga, e o que varia é o carregamento do "chiller" e o vazão do sistema.

X) DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Tendo estudado as várias tecnologias e estratégias de termoacumulação, e analisado suas vantagens e desvantagens, será considerada a seleção de um sistema de termoacumulação para atender a um problema hipotético.

O projeto de um sistema de termoacumulação para uma aplicação de refrigeração com fins de conforto tem como ponto de partida a determinação do perfil de carga térmica diário do edifício, ou seja, a carga térmica do edifício para o dia típico de projeto, calculada de hora em hora. Para esse fim, será admitido o perfil característico de um Shopping Center, localizado em São Paulo (obtido da referência 2), conforme indicado na Figura 25.

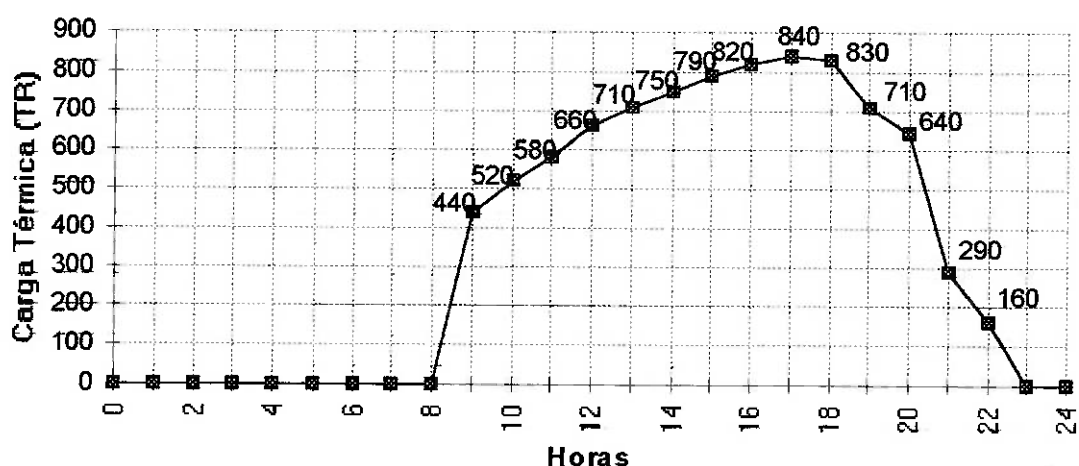


Figura 25 - Perfil de carga térmica diário de um Shopping Center

Deste perfil obtêm-se:

- energia térmica total diária consumida: 8740 TR-h.

- pico de carga térmica: 840 TR, ocorrendo às 17 horas.

O "approach" convencional de projeto para essa aplicação seria especificar um sistema central de água gelada, com os equipamentos auxiliares, e os condicionadores de ar, dimensionando o sistema para atender a capacidade de refrigeração de pico.

Admitindo que o Shopping Center enquadra-se na Tarifa Azul (com tensão maior do que 69 kV ou tensão menor do que 69 kV mas com demanda de potência maior do que 500 kW), subgrupo A4 (2,3 kV a 44kV), está sujeito a tarifas diferenciadas tanto para a demanda de potência quanto para o consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia e períodos do ano, com o horário de ponta estabelecido como sendo das 17 às 20 horas dos dias úteis.

Desta forma, a estrutura tarifária vigente incentiva a utilização de armazenagem total, ou deslocamento de carga, ou seja, armazenagem de frio suficiente para que o "chiller" seja desligado durante o horário de ponta, de modo que as únicas cargas elétricas associadas ao atendimento das necessidades de refrigeração, nesse período, sejam aquelas devidas à operação das bombas de circulação e dos ventiladores, respectivamente no sistema de distribuição de água gelada do edifício e nos condicionadores de ar.

Concomitantemente, pretende-se uma redução da demanda, o chamado nivelamento de carga, armazenando frio fora do período de incidência da carga de refrigeração, para ser usado quando esta ocorrer, tendo o objetivo de diminuir a capacidade necessária do "chiller".

Assim, termoacumulação com o uso da redução de demanda combinada com o deslocamento de carga permite as seguintes vantagens:

- menor capacidade dos "chillers", implicando em equipamentos menores e investimento inicial menor

- menor potência elétrica instalada, com menor investimento inicial em equipamentos para energia elétrica, como transformadores, cabos, etc.
- utilização total das vantagens da Tarifa Azul, horo-sazonal, implicando em custos operacionais reduzidos com relação a um sistema sem termoacumulação.

Será efetuada a seleção das alternativas viáveis, o dimensionamento básico para estas alternativas, e apresentado um procedimento de análise econômica para escolher o melhor sistema.

XI) SELEÇÃO DAS ALTERNATIVAS VIÁVEIS

CRITÉRIOS UTILIZADOS

A escolha da tecnologia de termoacumulação a ser empregada está ligada à análise das seguintes características: meio de armazenamento utilizado, espaço ocupado, eficiência do armazenamento, eficiência energética (kW/TR) do equipamento de refrigeração, custos do equipamento, de instalação, de operação e de manutenção.

Os sistemas a base de água gelada apresentam custo reduzido do meio de armazenamento, da mesma forma que os sistemas a base de gelo, e são mais eficientes energeticamente do que os sistemas a base de gelo já que gasta-se menos energia para produzir água gelada a 5°C do que para produzir gelo a 0°C, porém, apresentam o problema da mistura da água gelada com a água de retorno, diminuindo a eficiência do armazenamento. Nesse caso, a melhor solução é a utilização da técnica de estratificação natural, usando tanques cilíndricos verticais, o que implica em limitações de espaço e de custo devido ao grande volume de armazenamento necessário para sistemas de água gelada.

Tratando-se dos PCMs, de um modo geral, estes apresentam vantagens sobre sistemas de água gelada quanto ao espaço ocupado. O PCM eutético mais utilizado em refrigeração tem seu ponto de fusão em 8,3°C, o que o faz mais eficiente energeticamente do que água gelada, porém, apresenta calor latente menor do que o do gelo. Sobre os PCMs a base de hidratos gasosos e sistemas de conjugados binários não há informações conclusivas, nem disponibilidade comercial, estando ainda em fase de estudos e testes.

As considerações até então levam a escolher dentre os sistemas a base de gelo, comparados na tabela seguinte.

TABELA DE COMPARAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS

Sistemas de termoacumulação com armazenamento de gelo		
Características gerais: -custo reduzido do meio de armazenamento -menos eficientes energeticamente -volume de armazenamento cerca de cinco vezes menor do que para sistemas de água gelada -acrescentam a possibilidade de utilização de distribuição de ar a baixa temperatura		
Tipos de sistemas	Vantagens	Desvantagens
Gelo sobre tubo de expansão direta		O efeito isolante do gelo faz com que a pressão de sucção caia durante a formação de gelo, diminuindo a capacidade e tornando este o menos eficiente dentre os sistemas de gelo
Gelo sobre tubo usando fluido térmico	O fluido térmico circula num circuito fechado eliminando a carga estática das exigências de bombeamento	Ineficiências devido ao uso de um meio de transferência de calor secundário entre o "chiller" e a água a ser congelada. Dificuldade de se manter temperaturas de saída do fluido térmico uniformes durante a descarga do tanque, devido à criação de um filme de água estagnado entre o gelo que se derrete e o fluido térmico nos tubos
Usando fluido térmico com gelo em recipientes	Permite qualquer tipo de tanque, de concreto, de aço, de fiberglass, ou de polietileno, podendo ser aberto ou pressurizado.	Ineficiências devido ao uso de um fluido térmico. O custo adicional dos recipientes com água desionizada
Formador de gelo do tipo placa	Os tanques podem ser de qualquer tipo. O formato do gelo produzido proporciona enorme área de transferência de calor, podendo ser derretido rapidamente. A separação entre o gerador de gelo e o tanque permite maior flexibilidade de operação.	O equipamento de produção de gelo tem de ficar em cima do tanque de armazenagem.

Uma análise imediata exclui o sistema de gelo sobre tubo de expansão direta, e indica que a escolha será feita entre os outros sistemas de gelo. Existem três opções dentre os sistemas viáveis:

- 1-sistema de gelo sobre tubo usando fluido térmico.
- 2-sistema usando fluido térmico com gelo em recipientes.
- 3-sistema formador de gelo do tipo placa.

Será feito o dimensionamento básico dos equipamentos principais e depois será apresentado o procedimento de análise econômica.

Para efeito de dimensionamento dos sistemas, serão admitidas as seguintes condições:

- temperatura de suprimento de água gelada para os condicionadores de ar: 2°C.
- temperatura de retorno da água gelada dos condicionadores de ar: 16°C.
- temperatura de suprimento de ar de projeto: 10°C.

**XII) DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DO
SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO E DA CAPACIDADE
DE ARMAZENAMENTO NECESSÁRIA**

Como foi definido que o sistema fabricará gelo no período em que não há carga térmica, ele funcionará continuamente durante o dia, excetuado o horário de ponta.

Durante o seu funcionamento, o "chiller" atenderá a carga térmica diretamente ou com ajuda do gelo armazenado, caso tenha sido excedida sua capacidade de refrigeração.

De acordo com o critério de projeto (deslocamento da carga do horário de ponta), o "chiller" fica parado das 17 às 20 horas, sendo utilizado o gelo armazenado para suprir as exigências de refrigeração nesse período.

Para efetuar um pré-dimensionamento do equipamento deve-se especificar alguns parâmetros e determinar suas relações. Esses parâmetros são: a carga de projeto, o número de horas destinadas ao carregamento do tanque de gelo, o número de horas de descarga do tanque, e um fator que relaciona a capacidade do "chiller" refrigerando com a capacidade do "chiller" fabricando gelo.

As relações entre esses parâmetros e a capacidade do "chiller" e a capacidade de armazenamento do tanque são as seguintes:

$$\frac{\text{CAPAC. TANQUE}}{\text{HORAS DE DESCARGA}} + \text{CAPAC. CHILLER. REFRIG.} = \text{CARGA DE PROJETO}$$

$$\text{CAPAC. REFRIG.} \times \frac{\text{CAPAC. FABR. GELO}}{\text{CAPAC. REFRIG.}} \times \text{HORAS DE CARGA} = \text{CAPAC. TANQUE}$$

A primeira equação garante que exista uma capacidade de refrigeração adequada para atender a carga de projeto. A segunda garante que toda a capacidade devida ao gelo possa ser gerada no período estabelecido.

A carga de projeto é 840 TR, o número de horas disponível para a fabricação de gelo corresponde ao período em que não há carga térmica, ou seja das 23 às 8 horas. O

número de horas de descarga do tanque que minimiza a capacidade do "chiller" corresponde ao esgotamento do tanque de gelo ao fim do período de ponta, sendo as subsequentes exigências de refrigeração atendidas apenas pelo "chiller". Portanto, o número de horas de descarga do tanque é 12, das 8 às 20 horas.

Admitindo que a capacidade do "chiller" no modo de refrigeração corresponda a 1,5 vezes a capacidade no modo de fabricação de gelo, pode-se resolver o sistema de duas equações a duas incógnitas, chegando-se a :

- capacidade do "chiller" refrigerando = 560 TR
- capacidade do tanque de armazenamento = 3360 TR-h.

Porém, utilizando-se essas capacidades, ao analisar a energia armazenada nos tanques ao fim do período de ponta nota-se que ainda estão disponíveis 430 TR-h o que indica que a capacidade do "chiller" pode ser ainda reduzida, contanto que seja suficiente para atender sozinho a carga térmica após o período de pico. Para isso, deve ser verificada a seguinte condição: ao final do período de ponta, às 20 horas, ao ser religado o "chiller", ocorre uma demanda de 640 TR, exigindo um estoque de gelo nos tanques suficiente para, somado à capacidade do "chiller", atender a essa demanda (que supera a capacidade de refrigeração do "chiller", cotada inicialmente em 560 TR). Essa situação ocorre apenas nos primeiros minutos após o religamento do "chiller", pois logo mais a carga térmica diminui, podendo ser atendida somente pela capacidade do "chiller". Assim, às 20 horas, essa situação traduz-se na equação:

$$\frac{640 - \text{CAPAC. REFRIG.}}{2} = \text{CAPAC.REFRIG.} \times 9 \text{ HS.} + \text{CAPAC. TANQUE} - 5690 - 2280$$

$$\text{COM } \text{CAPAC. TANQUE} = \frac{\text{CAPAC. REFRIG.}}{1,5} \times 9 \text{ HS.}$$

fornecendo:

- capacidade de refrigeração do "chiller" = 535 TR
- capacidade de armazenamento do tanque = 3210 TR-h.

A vazão de água gelada para a condição de máxima carga térmica de 840 TR, para um

$\Delta T = 16 - 2 = 14 \text{ }^\circ\text{C}$ é:

$$Q = \frac{\text{CARGA TÉRMICA}}{\Delta T \times \text{CALOR ESPECÍFICO}} = \frac{840 \text{ TR} \times 3024 \text{ kcal/h} / \text{TR} \times (1/3600 \text{ h/s}) \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}}{14 \text{ }^\circ\text{C} \times 1 \text{ kcal/kg }^\circ\text{C}} = 0,0504 \text{ m}^3/\text{s}$$

XIII) DIMENSIONAMENTO BÁSICO

ALTERNATIVA 1:

SISTEMA DE GELO SOBRE TUBO USANDO FLUIDO TÉRMICO

Este sistema utiliza um "chiller" padrão para produzir gelo. O fluido térmico, constituído usualmente de uma mistura de 25% de etileno-glicol inibido e 75% de água, é refrigerado pelo "chiller", e circulado através de tanques modulados de polietileno, termicamente isolados, que contém trocadores de calor de tubos de plástico, enrolados em forma de espiral e imersos em água. A configuração do sistema é de fluxo em série, com o "chiller" a jusante do tanque, que permite a otimização das condições de temperatura do fluido térmico que entra e que sai do tanque.

A capacidade do "chiller" no modo de refrigeração foi determinada em 535 TR e a capacidade de armazenamento do tanque em 3210 TR-h. O dimensionamento será efetuado com base no sistema Banco de Gelo da Alpina-Calmac.

Tempo de descarga: 12 horas (considerando que o tanque será esgotado logo após o horário de pico)

Fator de diversidade: carga média/carga de pico =

$$[(5690+2280)/12]/840=0,79$$

Tempo de descarga corrigido: $0,79 \times 12 = 9,5$ h

Temperatura de entrada no tanque = temperatura da água que retorna dos condicionadores = 16°C

Temperatura máxima de saída do tanque = admitida 7°C

Utilizando tanques modelo 1190 com capacidade unitária de 190 TR-h, e com os dados anteriores obtêm-se o fator $K=0,9$, e dos gráficos do fabricante segue-se:

$$\begin{aligned} \text{Número de tanques} &= (\text{Capac. armazen.}) / (\text{capac. unit.} \times \text{fator } K) = \\ &= 3210 / 190 \times 0,9 = 18,77 \end{aligned}$$

portanto 19 tanques, modelo 1190, com capacidade armazenada total = $190 \times 19 = 3610$ TR-h.

Vazão do sistema para a condição de pico:

$$\text{Vazão (GPM)} = [\text{carga de pico} / \Delta T(^{\circ}\text{F})] \times 25,5 = 840 / 15 \times 25,5$$

$$\text{Vazão} = 1428 \text{ GPM}$$

Vazão por tanque = $1428 / 19 = 72,5$ GPM/tanque, que leva a uma perda de carga total de 13 psi no sistema de tanques.

O tanque modelo 1190 pesa 7640 kgf quando cheio de água.

A serpentina de plástico dos bancos de gelo tem o limite de 6 kgf/cm^2 , se a pressão requerida for mais alta deve ser usado um trocador de calor com uma segunda bomba no lado de alta pressão.

Esse sistema exige ainda uma torre de resfriamento e bomba de água de condensação.

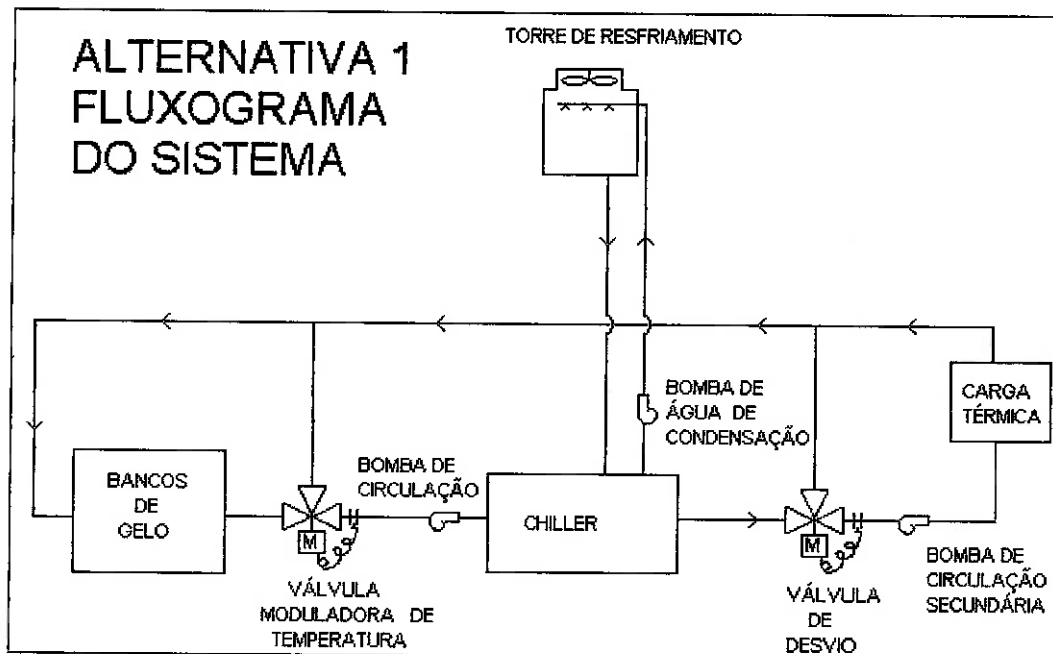
LISTA DE EQUIPAMENTOS

-“CHILLER” 535 TR, 0,6 kW/TR no modo de refrigeração

357 TR, 0,9 kW/TR no modo de fabricação de gelo

-19 tanques de gelo do tipo Banco de Gelo Alpina-Calmac, modelo 1190, com capacidade de 190 TR-h cada

- bomba de circulação do fluido térmico
- torre de resfriamento
- bomba de água de condensação
- válvula moduladora de temperatura
- válvula direcional de três vias



ALTERNATIVA 2:

SISTEMA DE TERMOACUMULAÇÃO COM GELO EM CÁPSULAS

Este sistema é constituído de um tanque de armazenamento isolado termicamente, que pode ou não ser pressurizado, e dependendo disso pode ser construído com vários materiais, de aço, de concreto, polietileno, etc. O tanque é preenchido com cápsulas de material plástico, que podem ter formato esférico ou retangular, e são preenchidas com água desionizada. Uma solução de água e etileno-glicol resfriada por um "chiller" padrão circula por entre essas cápsulas, passando por dentro do tanque, e também pelos condicionadores de ar. Dependendo da temperatura da solução, a água contida nas cápsulas se congela ou se funde. Basicamente é a mesma solução da Alternativa 1, com a diferença na especificação do tanque de armazenamento e na necessidade das cápsulas preenchidas com água desionizada.

Admitindo que o volume ocupado pelos recipientes expandidos após o congelamento será 1,1 vezes o volume de água neles contido, o volume interno do tanque necessário para armazenar a capacidade de 3210 TR-h será dado por:

$$\text{Volume} = 37,8 \text{ kg de gelo/TR-h} \times (1/917) \text{ m}^3/\text{kg} \times 1,1 = 145,55 \text{ m}^3$$

Pode-se utilizar dois tipos de tanque:

- a) tanque pressurizado, de aço, mantendo o fluido térmico num circuito fechado
- b) tanque aberto, podendo ser de concreto, polietileno, ou fiberglass, nesse caso exigindo um trocador de calor entre o circuito de congelamento e o circuito da carga térmica.

ALTERNATIVA 2a

LISTA DE EQUIPAMENTOS

-“CHILLER” 535 TR, 0,6 kW/TR no modo de refrigeração

357 TR, 0,9 kW/TR no modo de fabricação de gelo

-bomba de circulação do fluido térmico

-torre de resfriamento

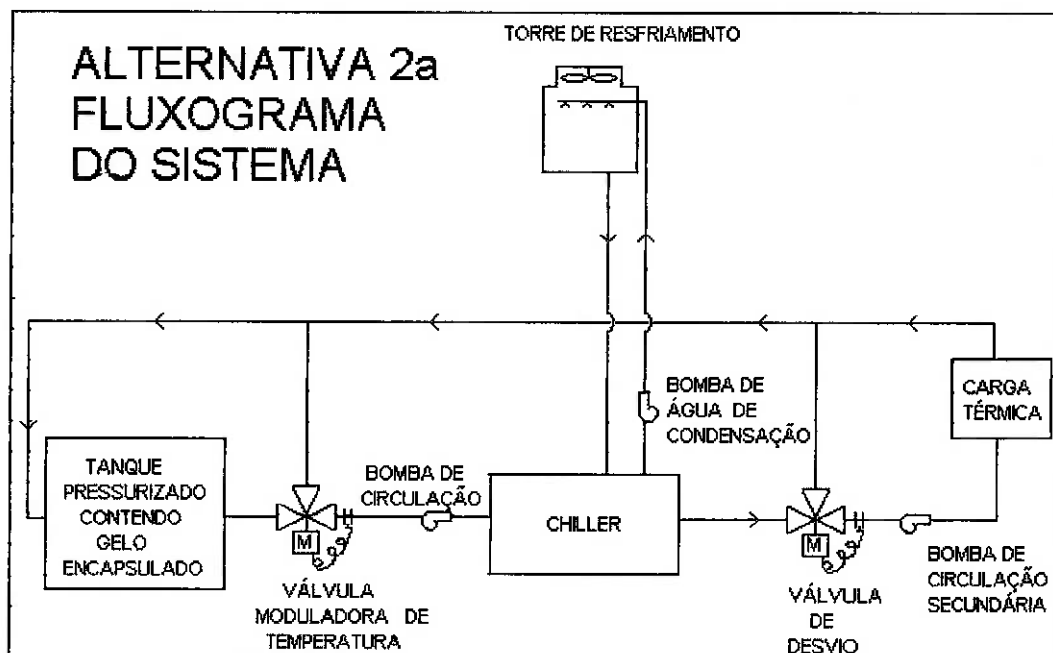
-bomba de água de condensação

-válvula moduladora de temperatura

-válvula direcional de três vias

-tanque de aço pressurizado, com volume interno de 145,6 m³, mais isolamento térmico

-recipientes de plástico contendo água desionizada mais agente nucleante de gelo, resultantes na capacidade total de 3210 TR-h



ALTERNATIVA 2b

LISTA DE EQUIPAMENTOS

-“CHILLER” 535 TR, 0,6 kW/TR no modo de refrigeração

357 TR, 0,9 kW/TR no modo de fabricação de gelo

-bomba de circulação do fluido térmico

-torre de resfriamento

-bomba de água de condensação

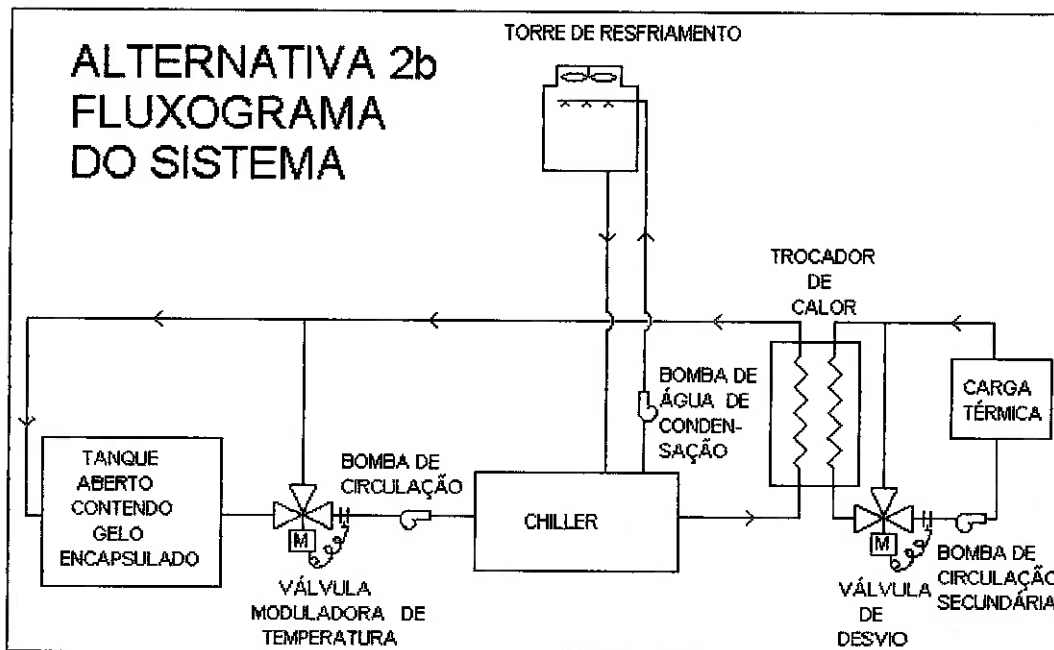
-válvula moduladora de temperatura

-válvula direcional de três vias

-tanque aberto, com volume interno de 145,6 m³, mais isolamento térmico

-recipientes de plástico contendo água desionizada mais agente nucleante de gelo, resultantes na capacidade total de 3210 TR-h

-trocador de calor



ALTERNATIVA 3:

SISTEMA DE PRODUÇÃO DE GELO DO TIPO PLACA

Este tipo de sistema é fornecido pela firma Turbo Refrigerating Company, e inclui evaporador, compressor, condensador, e todos os controles, em módulos compactos, com capacidade de refrigeração de até 450 TR no modo de refrigeração. A capacidade do compressor foi determinada em 535 TR, o que obriga a aquisição de dois conjuntos, combinados de tal forma que suas capacidades somadas cheguem a 535 TR. A capacidade necessária de armazenamento do tanque é 3120 TR-h e segundo a Turbo

Refrigerating Company a densidade no armazenamento do gelo produzido por este sistema é 445 kg/m^3 , o que leva a um volume de tanque de

$$\text{Volume} = [3210 \text{ TR-h} \times (37,8 \text{ kg de gelo/TR-h})] / (445 \text{ kg/m}^3) = 273 \text{ m}^3$$

O tanque deve ficar num local que permita a instalação dos dois conjuntos de refrigeração em cima deste, que pode ser construído de aço, concreto, polietileno ou fiberglass. É necessário, ainda, a aquisição de torre de resfriamento e bomba de água de condensação.

O circuito hidráulico de fornecimento de água gelada é aberto, sendo a água succionada diretamente do tanque de armazenamento.

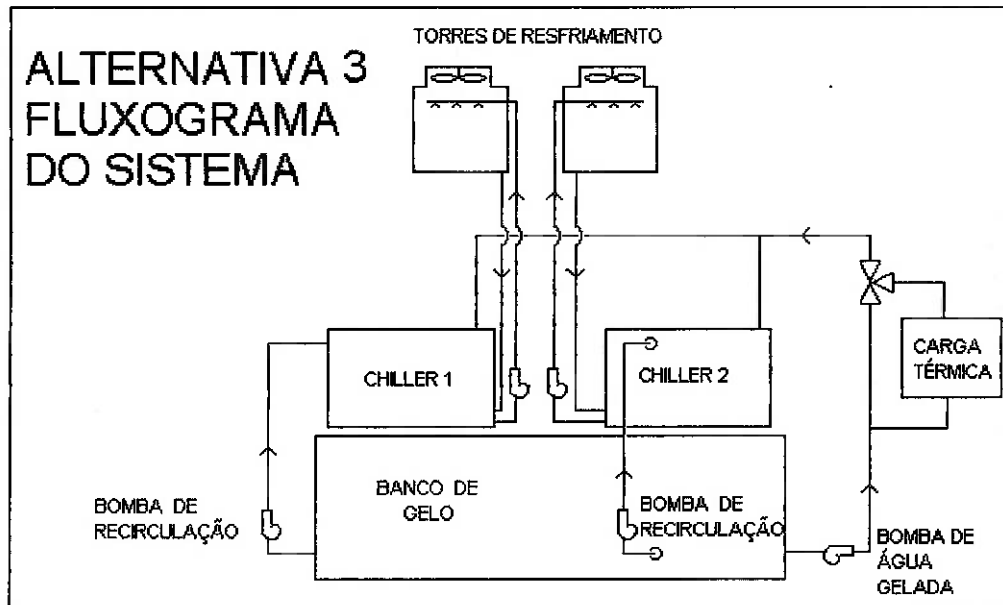
LISTA DE EQUIPAMENTOS

-dois "CHILLERS" formadores de gelo do tipo placa, cuja capacidade somada alcance 535 TR no modo de refrigeração, tendo no modo de fabricação de gelo 67% da capacidade refrigerando, com eficiência de 0,8 kW/TR refrigerando e 0,95 kW/TR fabricando gelo

-tanque de armazenamento aberto, podendo ser de aço, de concreto, polietileno ou fiberglass, com volume de 273 m^3

-duas torres de resfriamento

-duas bombas de água de condensação



QUADRO COMPARATIVO DAS ALTERNATIVAS

ALTERNATIVAS	SISTEMA DE GELO SOBRE TUBO USANDO FLUIDO TÉRMICO	SISTEMA COM GELO EM CÁPSULAS EM TANQUE PRESSURIZADO	SISTEMA COM GELO EM CÁPSULAS EM TANQUE ABERTO	SISTEMA DE PRODUÇÃO DE GELO DO TIPO PLACA
LISTAGEM DO EQUIPAMENTO BÁSICO	Bomba de circulação do fluido térmico	Bomba de circulação do fluido térmico	Bomba de circulação do fluido térmico	Duas bombas de recirculação de água
	Torre de resfriamento	Torre de resfriamento	Torre de resfriamento	Duas torres de resfriamento
	Bomba de água de condensação	Bomba de água de condensação	Bomba de água de condensação	Duas bombas de água de condensação
	Válvula moduladora de temperatura	Válvula moduladora de temperatura	Válvula moduladora de temperatura	Válvula moduladora de temperatura
	Válvula direcional de três vias	Válvula direcional de três vias	Válvula direcional de três vias	Válvula direcional de três vias
	Chiller convencional 535TR 0,6 kW/TR refrigerando 357TR 0,9 kW/TR fazendo gelo	Chiller convencional 535TR 0,6kW/TR refrigerando 357TR 0,9kW/TR fazendo gelo	Chiller convencional 535TR 0,6 kW/TR refrigerando 357TR 0,9 kW/TR fazendo gelo	Dois Chillers formadores de gelo do tipo placa, cuja capacidade somada atinja 535TR no modo de refrigeração
		Recipientes de plástico contendo água desionizada, com capacidade de 3210 TR-h	Recipientes de plástico contendo água desionizada, com capacidade de 3210 TR-h	
	19 Tanques de gelo com capacidade unitária de 190 TR-h	Tanque de aço pressurizado com volume de 145,6 m ³ e isolamento térmico	Tanque aberto com volume de 145,6 m ³ e isolamento térmico	Tanque aberto com volume de 273 m ³ e isolamento térmico
		Trocador de calor		

XIV) AVALIAÇÃO ECONÔMICA

CUSTO DA VIDA ÚTIL

Frequentemente, o custo inicial tem levado o investidor a negligenciar as considerações a respeito da vida dos sistemas e dos custos operacionais. Um sistema barato para se comprar poderá ser caro para ser operado mantido.

O custo do dinheiro e da energia cresce com a inflação, mas nem sempre na mesma proporção. Esses fatores levaram a uma aproximação mais racional e factível para os custos reais de um sistema em analisando-se ambos os investimentos e os custos operacionais durante um período fixo de tempo, a chamada vida útil do sistema. O custo da vida útil pode ser definido como sendo o custo total de ser proprietário, de operar e de manter um empreendimento durante o seu ciclo de vida econômico.

Chegou-se a quatro alternativas viáveis para o sistema de refrigeração com termoacumulação. Será admitido que para todas as alternativas o lado da carga térmica apresenta as mesmas características, e assim não precisa ser considerado na análise, sendo relevantes apenas as diferenças entre as alternativas.

De acordo com “Applications Handbook” da ASHRAE, capítulo 33, pode-se estimar em 20 anos a vida útil do sistema, incluindo “chillers”, bombas, trocadores de calor e torres de resfriamento.

O custo da vida útil é a soma de todos os custos do empreendimento e dos custos operacionais durante o período esperado de vida. Para comparar o custo da vida útil de diferentes sistemas ou empreendimentos, somente as diferenças entre os totais de custos iniciais mais custos de operação e manutenção precisam ser comparadas.

Os juros do dinheiro emprestado devem ser incluídos no cálculo e este pode ser um dos maiores custos.

A análise levará em conta:

- custos iniciais, que incluem os custos de aquisição e de instalação dos equipamentos
- custos operacionais, que incluem custos com energia e manutenção.

PROCEDIMENTOS BÁSICOS PARA DESENVOLVER UMA ANÁLISE DE CUSTO DA VIDA ÚTIL

- Identificar as alternativas viáveis para atingir o objetivo.
- Estabelecer um tempo definido para a análise.
- Identificar os parâmetros de custo que deverão ser considerados na análise.
- Converter custos e economias que ocorrem em tempos diferentes e trazê-los para um tempo comum.
- Determinar a eficiência dos custos das alternativas.

Complexos procedimentos são necessários para se fazer uma completa análise de custo de vida útil. Entretanto, os elementos básicos estão descritos a seguir:

CUSTOS DO EMPREENDIMENTO

1- Custo inicial do sistema

- Equipamentos.
- Sistemas de controle.
- Tubulações e fiação próprios para o sistema.
- Qualquer aumento nos custos de construção do edifício atribuível ao sistema.
- Qualquer decréscimo nos custos de construção do edifício atribuível ao sistema.
- Custos de instalação.

CUSTO INICIAL TOTAL = CIT

2- Custos fixos anuais

- Custo uniforme equivalente anual.
- Impostos sobre a propriedade.
- Outros impostos.
- Seguros.
- Aluguel.

TOTAL DE CUSTOS FIXOS ANUAIS = CFA

CUSTOS OPERACIONAIS

3 - Custos de manutenção anuais

- Contratos de manutenção.
- Mão de obra e peças de reposição para substituir partes sujeitas à desgaste.
- Custos de zeladoria.
- Custos de gases refrigerantes, óleos e graxas.

- Produtos químicos e de limpeza.
- Testes.
- Limpeza e pintura.
- Lixo.

TOTAL DE CUSTOS DE MANUTENÇÃO ANUAIS = CMA

4-Custos anuais de energia elétrica, combustíveis e água

TOTAL DE CUSTOS DE ENERGIA ANUAIS = CEA

5-Salários de engenheiros e operadores

TOTAL DE CUSTOS DE SALÁRIOS ANUAIS = CSA

TOTAL DE CUSTOS OPERACIONAIS = CMA + CEA + CSA

Com CIT, CFA, CMA, CEA, e CSA computados, convertidos para um tempo comum e somados, para cada alternativa, finalmente chega-se ao custo da vida útil e pode-se escolher por este critério econômico a melhor alternativa, dentre as tecnicamente viáveis .

CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS

Intangíveis:

Nenhuma análise está completa sem a descrição e a consideração cuidadosas dos intangíveis, ou seja aquelas consequências prospectivas das alternativas de investimento que não podem ser prontamente reduzidas a termos monetários. Em muitos casos, uma proposta parecerá não atrativa em termos de consequências econômicas, mas será aprovada devido aos aspectos favoráveis dos intangíveis. É aconselhável relacionar os intangíveis mais relevantes por categoria quando se usam

procedimentos de orçamento de capital. Essa lista de verificação tem como resultado assegurar a consideração de certas consequências importantes na decisão final.

Riscos e incertezas:

Devido à inevitável incerteza associada às estimativas de eventos futuros, é desejável, senão essencial, que as medidas de atratividade sejam adequadamente qualificadas. Algumas técnicas podem ser utilizadas para considerar formalmente o risco e incerteza na análise econômica. Uma dessas técnicas, a análise de sensibilidade deve ser empregada, examinando a sensibilidade da solução a variações nos seguintes dados de entrada:

- taxa mínima de retorno
- vida do projeto
- valor residual
- estimativa do retorno(da economia conseguida)
- custos operacionais(variação de taxas de serviço, da inflação, de aumento da energia, etc.)
- valor e época das principais adições de capital
- esquema de depreciação permissível

ANÁLISE SIMPLIFICADA

Tendo selecionado as alternativas viáveis e definido o tempo para análise, deve-se proceder à conversão dos custos listados anteriormente, que ocorrem em tempos diferentes, para uma mesma data comum, e, assim verificar os custos de vida útil para cada alternativa.

Pode-se propor uma análise bastante simplificada de custo de vida útil que considera equivalentes para todas as alternativas selecionadas os custos fixos, os custos de manutenção e custos com salários de todo o ciclo de vida. Desta forma, é necessário somar-se ao custo inicial dos equipamentos e instalação para cada alternativa apenas os custos operacionais com energia elétrica. Para fazer uma estimativa dos custos anuais com energia elétrica é necessário dados da eficiência energética dos equipamentos de refrigeração (kW/TR) em cada modo de operação (refrigerando ou fabricando gelo) e consumo de eletricidade de todos equipamentos auxiliares, bem como valores para demanda e consumo da tarifa horo-sazonal Azul para subgrupo A4, procedendo da seguinte forma:

- determinando o perfil de carga térmica diário para o dia médio, e para o dia de máximo de cada mês do ano.
- calculando o custo de consumo de energia para o dia médio.
- calculando o custo de demanda de energia elétrica para o dia de máximo.

Depois de fazer essa estimativa de custo anual para cada alternativa viável, aplicando os valores da tarifa horo-sazonal, que varia conforme a hora do dia, o dia da semana, e o mês do ano, pode-se levar em conta a inflação usando uma taxa efetiva de juros, que leve em conta a inflação da energia elétrica:

i' = taxa de juros efetiva ou real

i = taxa de desconto

f_e = taxa de inflação da energia elétrica

$$i' = (1+i)/(1+f_e) - 1$$

P = valor presente F = valor futuro n = períodos considerados

$$F = P(1+i')^n$$

COMENTÁRIOS

Para o caso analisado, a escolha de sistemas a base de gelo mostra-se mais adequada, devido ao custo reduzido do meio de armazenamento térmico e a seu alto calor latente de fusão que possibilita um menor volume de armazenamento.

A definição do tipo de sistema a ser adotado fica prejudicada pois a análise econômica não pode ser levada até o fim, devido ao fato de fabricantes, fornecedores e escritórios de projeto não fornecerem valores relativos aos preços de equipamentos e dos serviços de instalação e de manutenção, dados indispensáveis para se fazer as contas dos custos e assim selecionar a melhor dentre as alternativas.

XV) CONCLUSÃO

Sistemas de termoacumulação tem sido usados há muito tempo para reduzir custos iniciais em aplicações onde as cargas de refrigeração são pouco frequentes e de curta duração. Entretanto, como hoje em dia a demanda de potência elétrica não para de crescer, as companhias concessionárias de energia elétrica aproximam-se da sua plena capacidade e tem implementado estruturas tarifárias que penalizem a operação durante horários de pico. Aqui, no Brasil, a estrutura tarifária define como horário de pico um período de três horas consecutivas entre as 17:00 e as 22:00 horas dos dias úteis, acertado entre o usuário e a concessionária, usualmente das 17:00 às 20:00 horas, mas durante o horário de verão o horário de ponta poderá ser situado no intervalo entre 18:00 e 23:00 horas. Nos Estados Unidos, o período de pico é normalmente mais extenso, abrangendo muitas vezes todo o período diurno, considerado das 8:00 às 18:00 horas, dando origem a maiores vantagens quando da utilização de sistemas de termoacumulação, sendo que lá também existem tarifas reduzidas para os fins de semana, possibilitando outras estratégias de termoacumulação, e também, nesse país, várias concessionárias de energia oferecem incentivos para o desenvolvimento de projetos, instalações e reformas (retrofit) que racionalizem a utilização de energia elétrica, oferecendo consultoria para os projetos e fornecendo dinheiro na forma de empréstimos e financiamentos. Como resultado geral, nota-se uma pressão para que os usuários de energia elétrica, a nível industrial ou comercial, de todos os tipos, desloquem as cargas de refrigeração para os períodos em que os custos da eletricidade sejam mais baixos. No caso do Brasil, estima-se que, em breve, seja alterada a estrutura tarifária, de modo a oferecer ainda mais incentivos para o uso racional de energia.

Para o caso analisado, a utilização de um sistema de termoacumulação constitui um modo efetivo para reduzir o tamanho do “chiller” e para deslocar as cargas de

refrigeração, possibilitando, assim, economia no investimento inicial, e também economia resultante da diminuição das contas de demanda e consumo de energia elétrica.

Neste caso, a escolha de sistemas a base de gelo como meio de armazenamento térmico mostra-se mais adequada, graças a seu custo reduzido como meio de armazenamento (comparado com o uso de sais eutéticos) e seu alto calor latente de fusão que implica num menor volume de armazenamento necessário (comparado com a utilização de sistemas a base de água gelada), e assim, ocupando menos espaço no empreendimento comercial, e oferecendo características de simplicidade de operação e controle. O sistema de termoacumulação a base de gelo permite a utilização de um sistema de distribuição de ar a baixa temperatura. A vazão de ar necessária é reduzida com o suprimento de ar a uma temperatura menor, resultando em ventiladores menores e menor tamanho de dutos, reduzindo custos iniciais.

O critério do custo de vida útil leva em conta todos os custos do empreendimento durante o período esperado de vida. Para comparar o custo de vida útil de diferentes sistemas ou empreendimentos somente as diferenças entre o total de custo inicial mais custo de operação e de manutenção de cada alternativa precisam ser comparadas.

BIBLIOGRAFIA

- 1-ABRAVA. 1991. Curso ABRAVA de Divulgação Tecnológica: Sistema de Termoacumulação em Banco de Gelo.
- 2-Agência para Aplicação de Energia. 1991. Workshop: Tecnologias para uso racional de energia.
- 3-ASHRAE. 1991. ASHRAE Applications Handbook , Chapter 39 "Thermal Storage".
- 4-Asbury,J.G. e Dougherty,D. 1981. "Economics of Cool Storage for Electric Load Leveling" Vol.43 Proceedings of the American Power Conference.
- 5-B.A.C. 1982. Bulletin S140/1-0 "Ice Chiller, Thermal Storage Units".
- 6-B.A.C. 1982. Bulletin E140/1-0 "A Guide to Ice Storage System Design".
- 7-CESP. 1989. Estrutura Tarifária Horo-Sazonal:Tarifa Azul,Tarifa Verde.
- 8-Energy Engineering. 1990. Vol.87, No.6
- 9-Gyuk,I. 1985. "Phase change materials in buildings: Problems and progress". ASHRAE Transactions Vol.91 Part 2B, HI-85-38 No.5
- 10-Knebel,D.E. 1988. "Economics of harvesting thermal storage systems: A case study of a merchandise distribution center". ASHRAE Transactions Vol.94 Part 1, DA-88-25-4.
- 11-Portaria DNAEE Nº 33
- 12-Portaria DNAEE Nº 1233
- 13-Rawlings,L.K. 1985. "Ice storage system optimization and control strategies". ASHRAE Transactions Vol.91 Part 1B, CH-85-01 No.2
- 14-Reardon,J.G. e Penuel,K.M. 1985. "An ice-making showcase". ASHRAE Journal,27(5).
- 15-Strand,R.K., Pedersen.C.O. e Coleman,G.N. 1994. "Development of direct and indirect ice-storage models for energy analysis calculations". ASHRAE Transactions Vol.100 Part 1, NO-94-17-1

16-Tamblyn,R. 1982. "Chilled water X ice storage". ASHRAE Journal,24(12).

17-Tamblyn,R. 1985. "Control concepts for thermal storage".ASHRAE Transactions
Vol.91 Part 1B, CH-85-01 No.1

18-Tomlinson,J. 1985. "Clathrates and conjugating binaries: New materials for thermal
storage".ASHRAE Transactions Vol.91 Part 2B, HI-85-38 No.4

