

2

Fundamentos da termoacumulação

Com o propósito de embasar o entendimento do uso da termoacumulação como estratégia de racionalização do uso de energia elétrica pelo deslocamento de cargas em horários de maior consumo, o capítulo apresenta os conceitos básicos, vantagens e aplicações desta tecnologia alternativa. Contextualiza o importante papel que a termoacumulação pode desempenhar para o setor elétrico, em particular as oportunidades que oferece para as questões tarifária e comercial.

Os sistemas de termoacumulação transformam a energia elétrica disponibilizada em períodos fora de ponta em energia térmica interna (passível de ser armazenada em bancos de gelo ou tanques de água gelada). Ou seja, armazena-se a energia em períodos fora de ponta (aos quais os custos de geração são inferiores) para utilizá-la em períodos de ponta com elevado fator de carga. Esta operação se dá em tempos discretos, para que esteja disponível em horários de alta demanda, possibilitando, inclusive, uma maior potência.

Fazendo uso do jargão do setor, de forma simplificada, a termoacumulação consiste na produção de um efeito frigorífico (“armazenagem de frio”, jargão que contraria o rigor da termodinâmica) em tanques. Com o uso dessa tecnologia consegue-se eliminar a dependência instantânea entre a produção e o consumo, ou entre a oferta e a demanda do efeito frigorífico gerado. Assim, torna-se possível, por exemplo, operar sistemas de condicionamento de ar de forma mais eficiente. O propósito é efetuar um nivelamento de carga térmica entre os períodos de alta e de baixa solicitação, ou de nenhuma utilização. Desta forma, diminui a solicitação por grandes equipamentos para realizar, por exemplo, a climatização do ambiente. O uso dessa tecnologia torna-se atraente já que a termoacumulação pode ser utilizada como grande aliada para a redução de cargas de ponta do sistema elétrico, transferindo-as para os períodos em que há baixa utilização do sistema elétrico.

A implantação da termoacumulação é uma aplicação do tipo ganha-ganha. Toda a cadeia do sistema elétrico (geração, transmissão e distribuição), consumidores e meio ambiente ganham, pois permite o deslocamento da demanda elétrica no “horário de ponta” do sistema elétrico para o “horário

fora de ponta”. Resulta em um grande benefício para o setor já que evita a produção, a aquisição e a entrega de energia em condições adversas associadas a investimentos mais elevados. No período da ponta entram em funcionamento os tipos de gerações (óleo, gás) com custos bem mais elevados e em muitos casos também com baixos rendimentos (este assunto será discutido no capítulo 3, seção 3.3: Geração). Desta forma, buscando a redução do período de ponta, o uso da termoacumulação reduz investimentos econômicos em toda a cadeia do sistema elétrico.

A termoacumulação é uma técnica bastante antiga. Mesmo assim, limitado é o seu conhecimento pelos usuários de sistemas de condicionamento de ar. Para os casos de consumos de energia com elevadas cargas nos horários de ponta, o seu deslocamento para o horário fora de ponta permite um ganho econômico já que as tarifas são mais atraentes. Centros comerciais de grande porte (“shopping centers”), hospitais, prédios comerciais, escritórios, hotéis, universidades entre outros, são candidatos potenciais para fazer uso da termoacumulação como alternativa de racionalização do uso da energia elétrica.

Dentre as principais vantagens da termoacumulação [13–27] destacam-se:

- redução da capacidade (e do tamanho físico) do sistema de refrigeração (compressores de refrigeração, bombas de água, torres de resfriamento etc.) e, conseqüentemente, do custo de investimento da unidade de resfriamento;
- redução da potência instalada do sistema de frio, o que resulta em uma menor demanda de energia;
- redução da infra-estrutura elétrica (subestações, quadros de distribuição de energia etc.) e hidráulica;
- maior confiabilidade do sistema de refrigeração, devido a “reserva de frio”;
- deslocamento de carga para fora do horário de ponta do sistema elétrico;
- aproveitamento das diferentes modalidades de tarifa de energia horosazonais para reduzir o custo com energia elétrica;
- melhor aproveitamento de energia durante as 24 horas do dia, aumentando o fator de carga do sistema de frio e
- ganhos de eficiência dos equipamentos, que passam a trabalhar mais próximos às condições ideais de operação.

Dentre as principais barreiras ou restrições para uso da termoacumulação destacam-se:

- Necessidade de espaços adicionais aos sistemas de refrigeração para a instalação dos tanques de armazenagem;
- Investimento inicial maior do que por um sistema de refrigeração convencional;

- Menores incertezas no dimensionamento da carga térmica a ser atendida.

A implantação desse tipo de projeto, que permite alterar o perfil histórico da utilização de sistemas de refrigeração convencional, pode trazer benefícios para o sistema elétrico. Benefícios esses que se verificam, em particular, no que diz respeito ao aumento do fator de carga e postergações de investimentos. Isto pode ser conseguido pela retirada de cargas no período de ponta e pelo aumento de utilização da energia elétrica em outro período (período de fora de ponta ou patamar de carga leve¹).

2.1

Classificação dos sistemas de termoacumulação

A classificação dos sistemas de termoacumulação pode ser efetuada segundo o fluido de trabalho do termoacumulador utilizado. Os elementos comumente utilizados em sistemas de conforto térmico são:

- a substância pura [28–30]² água, na fase líquida;
- a substância pura água, na fase sólida (gelo) ou
- soluções salinas.

Alternativamente, a classificação dos sistemas de termoacumulação pode ser realizada pelo aproveitamento da energia armazenada:

- calor sensível³ ou
- calor latente⁴.

¹Patamar de Carga é a classificação das horas de utilização, por dia e semana, de acordo com o perfil de carga definido pelo ONS podendo ser: “leve” (horários de baixo consumo), “médio” (horários de consumo médio) e “pesado” (horários em que se verificam picos de consumo). O período leve está definido entre 01h00min e 07h00min de 2^a a 6^a feira, sábado (24 h), e domingo de 01h00min às 17h00min.

²Uma substância pura é aquela que tem composição química invariável e homogênea. Pode existir em mais de uma fase, mas a composição química é a mesma em todas as fases (Fundamentos da Termodinâmica Clássica - 1990 - Van Wylen, Gordon John).

³Calor sensível é a quantidade de calor necessário para elevar a temperatura de um corpo.

⁴Calor latente é a energia necessária para promover a mudança de fase de uma substância (variação de entalpia) de um corpo a uma dada pressão de saturação.

2.1.1

Termoacumulação com água na fase líquida (água subresfriada)

Num sistema de armazenamento térmico de água (água subresfriada na classificação termodinâmica)⁵ aproveita-se o calor sensível (aumento de temperatura da água) para armazenar energia na forma de energia térmica interna, podendo-se utilizar algumas variantes para seu modo de armazenamento, como o caso por estratificação, que é baseado na formação de camadas estanques separadas graças à diferença de densidade da água com a temperatura, a qual varia em função do tempo e a descarga.

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

Os acumuladores mais comuns utilizam a água ou as soluções salinas.

Esta alternativa de termoacumulação faz uso de um tanque de água que é resfriada a baixas temperaturas geralmente na temperatura de ajuste (*setpoint*) dos “*chillers*”⁶, porém nunca em temperaturas inferiores a 4 °C. Suas principais desvantagens em relação à alternativa da termoacumulação por gelo são: (i) a baixa densidade de armazenamento (1 kcal/kg °C), que implica em grandes volumes de água acumulada e (ii) a dificuldade de se evitar a mistura entre água fria armazenada e água quente de utilização que chegam ao mesmo depósito. Utilizando uma diferença de temperatura de 7 a 8 °C em instalações com este tipo de acumulação obtém-se uma capacidade térmica de 7 a 8 kcal/kg de água.

A principal vantagem de se utilizar a água (em relação ao gelo) refere-se à temperatura mais elevada de evaporação no ciclo de refrigeração. A alternativa pelo uso da água é mais eficiente e consome menos energia.

2.1.2

Termoacumulação com água na fase sólida (gelo)

Nos sistemas de armazenamento que fazem uso da mudança de fase, o calor latente permite o armazenamento de energia. Esses sistemas também são conhecidos como sistemas “*ice-builder*”. Durante o processo de carga, gelo é formado ao redor das muitas tubulações que ingressam no tanque de armazenamento enquanto, durante a descarga, um fluido é circulado pelo interior do tanque a uma temperatura mais elevada assim permitindo inversão no sentido da transferência de calor. Como resultado desta operação resgata-se o efeito frigorífico gerado (“recupera-se o frio”, i.e., a energia).

⁵No jargão popular também denominada de água gelada.

⁶Já introduzido no jargão dos sistemas de refrigeração, a denominação “*chiller*” refere-se especificamente a um sistema de compressão de vapor de grande porte.

Um sistema de armazenamento térmico por geradoras de gelo, ou “*ice harvester*”, consiste de um painel no qual é formado o gelo, para ser removido de tempos em tempos armazenando-se, por gravidade, num reservatório Ashrae [16].

Quando se utiliza água na fase sólida (gelo) como meio de acumulação, a principal fonte de energia utilizada é o calor latente (mudança de estado termodinâmico, que para o caso da água é de 80 kcal/kg).

Na prática, devido ao volume do tanque não ser totalmente ocupado por gelo (sistemas de distribuição, fluido circulante), o volume de um tanque de gelo é 6 a 8 vezes menor que o correspondente de água gelada. Isso representa um elevado ganho em áreas utilizadas pelos tanques, que podem ser utilizadas para outras aplicações, além de reduzir o impacto sobre a arquitetura da obra.

2.1.3

Termoacumulação com soluções aquosas

Podem-se aproveitar materiais com mudança de fase como elementos acumuladores de energia latente resultante da mudança de fase. Nesses sistemas é aproveitado o ponto de congelamento de alguma substância, como é o caso da água nos sistemas de gelo sobre tubos, sistemas com parafina, ou utilizando materiais com mudança de fase ou pasta de gelo a partir de soluções binárias compostas de água e algum aditivo, entre outras. Ticona [31] em sua pesquisa de doutorado, realizou extensa revisão da literatura especializada sobre as alternativas de solução. Dentre elas, as proposições formuladas por uso de soluções de etanol Bedecarrats et al [32], Olivier Bel and André Lallemand 1999, Mohamed et al [33]. 2005) e cloreto de sódio Stamatiou and M. Kawaji [34].

Para outras aplicações, soluções aquosas de glicóis Kauffeld et al [35] e sacarose Frank Qin et al [36] 2006, Mohamed et al [33] também são mencionadas como alternativas eficazes. Na realidade representam misturas químicas de líquido com sais que possuem uma temperatura de mudança de fase de líquido para sólido que viabiliza esse processo.

Melinder [37] apresenta diagramas e tabelas das propriedades termofísicas de diferentes soluções aquosas que podem ser utilizadas para a produção de pasta de gelo, e que fazem uso das seguintes soluções:

- Etileno glicol;
- Propileno glicol;
- Etanol;
- Metanol;
- Glicerina;

- Amônia;
- Carbonato de potássio;
- Cloreto de cálcio;
- Cloreto de magnésio;
- Cloreto de sódio;
- Acetato de potássio.

A tabela 2.1 resume as principais vantagens e desvantagens associadas com os sistemas que fazem uso da água gelada e do gelo [38–40].

Tabela 2.1: Vantagens e desvantagens dos sistemas de termoacumulação

<i>Sistemas de Termoacumulação</i>	<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
Água gelada	<p>Produção de água gelada a uma temperatura de evaporação mais alta, consumindo menos energia.</p> <p>Utilização de um sistema convencional ("chillers").</p> <p>O funcionamento simultâneo do "chiller" e do armazenamento é facilitado.</p> <p>É possível combinar o reservatório de água gelada com o reservatório para combate a incêndio.</p>	<p>Necessidade de um grande espaço para a instalação dos tanques de armazenagem.</p> <p>Grande volume de água no circuito.</p> <p>Mistura de água quente com a água fria (difícil de ser evitada).</p>
Gelo	<p>Redução do tamanho do acumulador.</p> <p>Produção de água gelada a temperaturas muito mais baixas.</p> <p>Vazão menor de água gelada.</p> <p>Menores serpentinas nos fan-coils.</p> <p>Menor vazão de ar.</p>	<p>Requer equipamento especial de refrigeração.</p>

2.2 Alternativas para uso da termoacumulação

Para entendimento das vantagens propiciadas pela termoacumulação, o item se inicia com a descrição de um sistema clássico de refrigeração que não faz uso da termoacumulação. Num sistema de refrigeração central do tipo convencional, a "carga de frio" gerada é atendida conforme a demanda da instalação. A figura 2.1 ilustra o perfil de carga térmica de uma instalação comercial existente⁷, abastecida por meio de uma central deste tipo, cuja carga máxima é de 1.350 TR às 14h00min. Esta demanda dimensionada só ocorrerá

⁷Atendendo pedido da parte interessada, foi preservada a confidencialidade da instalação comercial aqui mencionada.

em torno deste horário durante o período de verão, quando as temperaturas são mais elevadas durante o ano. Assim, todos os equipamentos da central de água gelada (resfriadores de líquidos, torres de arrefecimento, bombas, rede hidráulica etc.) foram dimensionados para atender a essa demanda máxima.

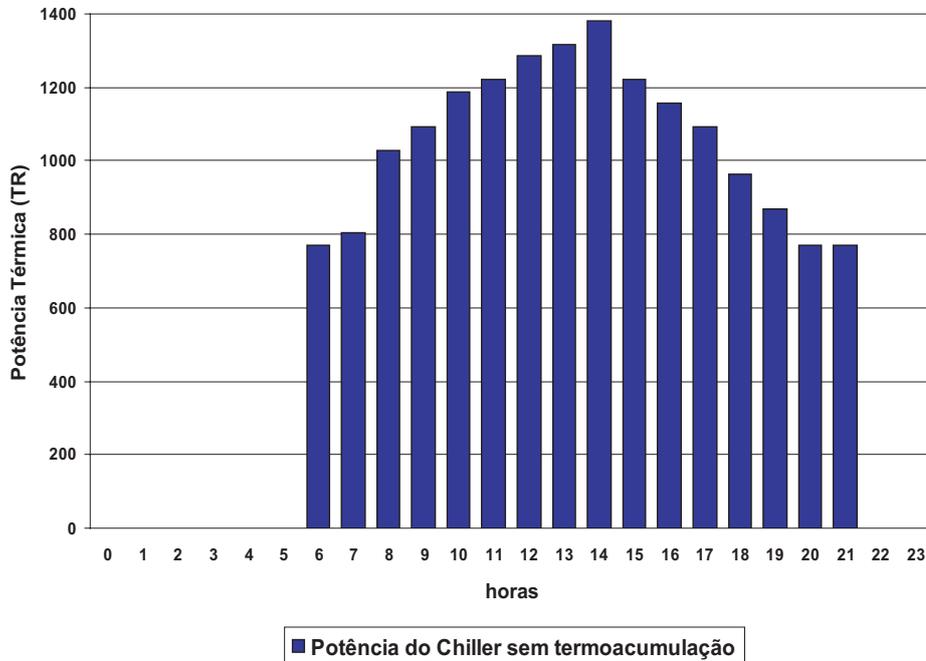


Figura 2.1: Sistema de refrigeração convencional (sem termoacumulação).

Ilustra-se a seguir (figura 2.2) o uso da termoacumulação para uma situação similar àquela da distribuição de carga apresentada na figura 2.1, situação em que é atendida por um sistema de refrigeração convencional. Pode-se observar que, no início, a potência instalada sem o uso da termoacumulação é de 1350 TR. Fazendo uso da termoacumulação, a potência térmica instalada fica reduzida para cerca de 750 TR (redução de 37%), com a vantagem adicional de que o equipamento passa a funcionar com 100% de potência (máxima eficiência) para ser desligado no horário de ponta (17h às 19h). A área mostrada na cor azul denota a energia gerada pelo “*chiller*” e que vai ser termoacumulada (por exemplo, em tanques). A área mostrada em vermelho representa a energia que é gerada pelo “*chiller*” e que se destina a suprir a carga térmica. A área na cor verde é a energia que foi armazenada para complementar a potência gerada pelo “*chiller*” para atender à carga térmica.

Conforme evidenciado pela figura 2.3 [41], o uso da termoacumulação proporcionou uma redução da capacidade nominal dos “*chillers*” para 750 TR (37% de redução da capacidade nominal do sistema de refrigeração

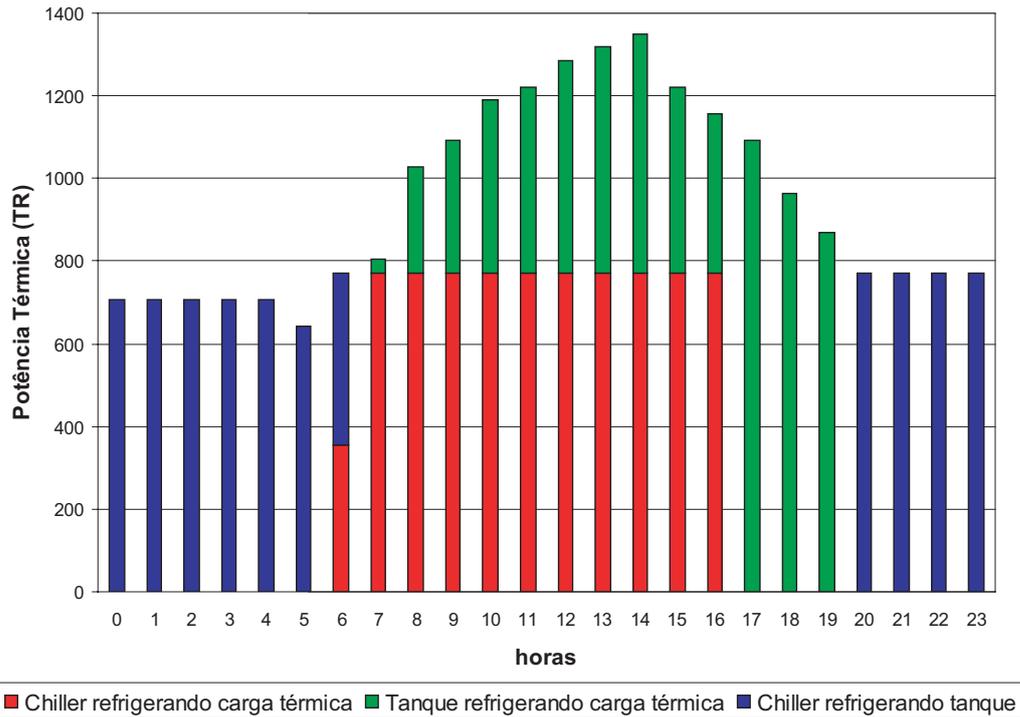


Figura 2.2: Perfil de carga térmica com o uso do sistema de termoacumulação
Ref.: Modificado de Guzmán

convencional 1.350 TR). Assim, sem reduzir o nível de conforto térmico da instalação, consegue-se estabilizar a sua curva de consumo.

A implantação de um sistema de termoacumulação é bastante simples, não necessitando grandes alterações no circuito básico da instalação convencional.

O circuito básico de uma central de água gelada (CAG) convencional é mostrado no desenho esquemático da figura 2.4 Dorgan [42], enquanto a figura 2.5 apresenta uma visão de uma instalação real.

A termoacumulação pode ser utilizada segundo quatro alternativas: armazenamento total de cargas; armazenamento parcial com nivelamento de cargas e armazenamento operando com vários “chillers”. No contexto da termoacumulação, cada uma dessas alternativas é sucintamente caracterizada no próximo bloco.

2.2.1 Operação da termoacumulação

A redução de custos com energia elétrica com a aplicação da termoacumulação depende, principalmente, do modo como se desliga o resfriador (“chiller”) nas horas de ponta. Normalmente a economia propiciada pelo des-

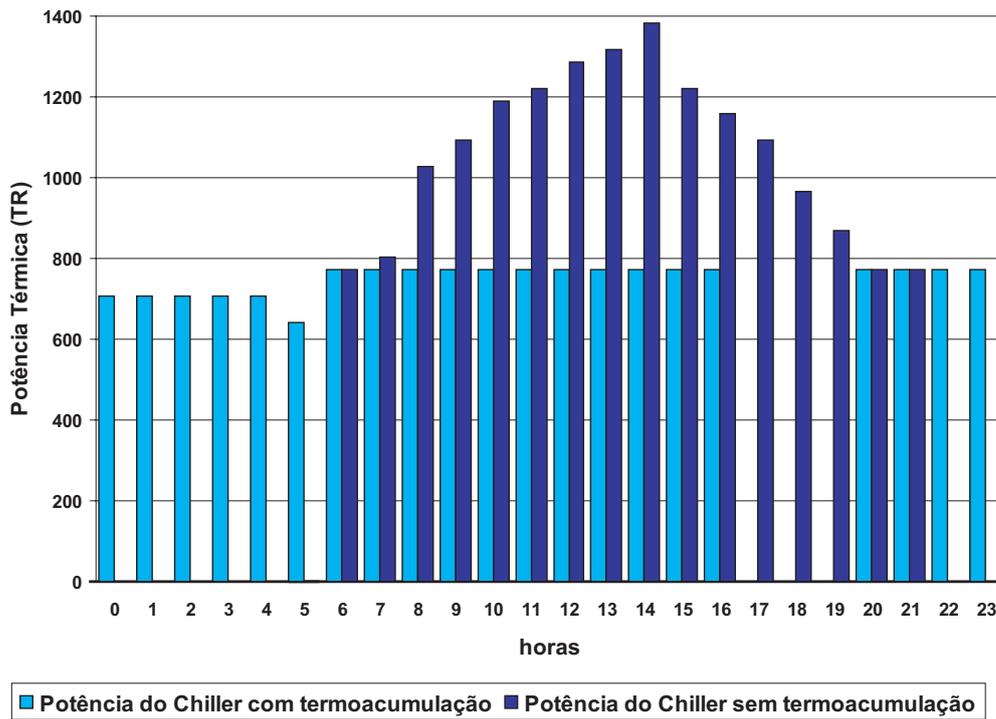


Figura 2.3: Perfil de carga térmica total com e sem o efeito da termoacumulação

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0713645/CA

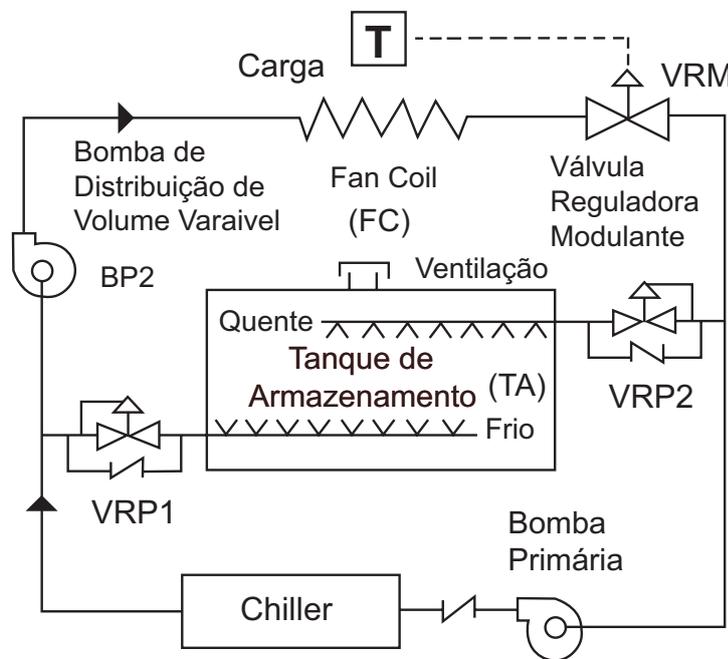


Figura 2.4: Sistema típico de uma central de água gelada (CAG). Fonte: Chumioque [43]



Figura 2.5: Sistema com Termoacumulação - Banco de gelo - Aplicação em uma unidade comercial - Fonte: Jamil Haddad - Apresentação CPFL.

ligamento compensa a diferença do custo inicial entre sistemas que operam com e sem termoacumulação.

A termoacumulação permite operar o sistema a uma carga constante, o que aumenta a eficiência do “*chiller*” devido à operação com carga constante nas horas noturnas, período em que a temperatura de condensação é mais baixa. Entendida a lógica do funcionamento da termoacumulação, descrevem-se, então, as quatro alternativas mencionadas da termoacumulação. O descritivo das alternativas foram baseados em Chumioque [43].

2.2.1.1

Armazenamento total

No que concerne à termoacumulação, o que se denomina “armazenamento total” (energia térmica interna) refere-se à transferência da “carga de frio” no período de ponta para os períodos fora desta. Os “*chillers*” operam à capacidade total e são desligados na hora de pico, quando a carga de refrigeração é provida pelo armazenamento. Esses sistemas normalmente requerem equipamentos e tanques de armazenamento de grande capacidade. Têm muita aceitação em situações em que a demanda na ponta é alta e o período de ponta é de curta duração. Esta estratégia torna-se viável quando o custo da energia no período de produção de energia térmica é consideravelmente menor que no período de utilização. Também é utilizada no caso de aplicações quando o tempo de ocupação é relativamente curto e o ruído da operação do “*chil-*

ler” não é desejado. Dentre as aplicações típicas destacam-se aquelas em casas de espetáculos, teatros, igrejas etc. O sistema de refrigeração é relativamente simples.

A figura 2.6 ilustra a distribuição de carga atendida e os benefícios do uso da termoacumulação quando o “*chiller*” deixa de funcionar. O exemplo concentra-se no período de máxima demanda, i.e.: quando a energia acumulada é utilizada. Recomenda-se o uso desta técnica quando a demanda máxima coincide com o período de pico, período em que o custo de energia é mais elevado Dorgan [42].

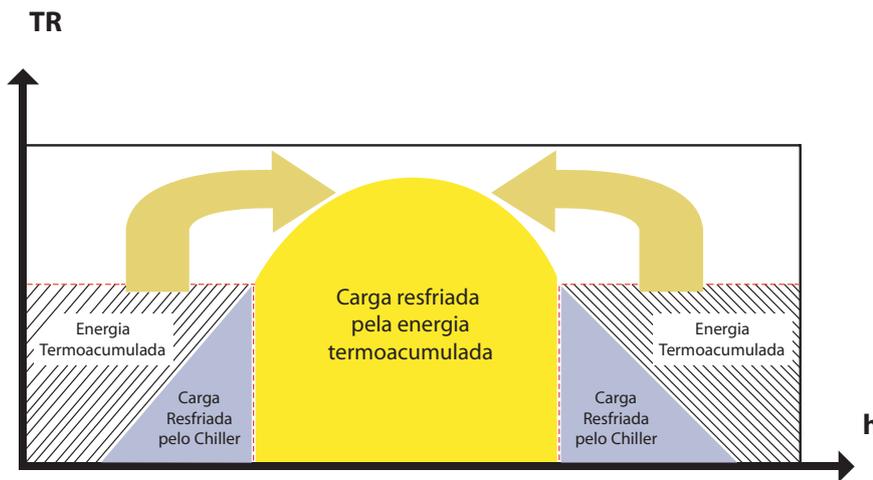


Figura 2.6: Armazenamento a carga total

2.2.1.2

Armazenamento parcial com nivelamento de carga

Usualmente “*chillers*” operam de forma contínua, i.e., 24 horas por dia. Em sua operação, estocam energia térmica interna durante um período. Geralmente durante a noite ou madrugada, quando fornecem energia para o sistema de termoacumulação e durante o restante do período, quando suprem parte da carga solicitada pelo sistema. A parcela complementar da energia utilizada provem do sistema de termoacumulação.

O sistema de armazenamento parcial pode ser subdividido em: carga nivelada e demanda limitada. Nos sistemas de carga nivelada, o equipamento de refrigeração opera em regime constante de 24 horas por dia. E, nos casos de demanda limitada, o “*chiller*” opera à capacidade reduzida atingindo 100% de sua capacidade apenas em algumas condições de operação.

Consegue-se, assim, otimizar a potência do “*chiller*” e a capacidade do sistema de termoacumulação. Esse sistema de termoacumulação é empregado

quando se têm picos no perfil de carga térmica e não existe tarifação de energia no sistema horo-sazonal.

A Figura 2.7 ilustra um caso típico de demanda atendida com um sistema de termoacumulação com carga nivelada. A linha de potência sem termoacumulação (parte cinza no gráfico) é nivelada a um consumo constante (linha horizontal). Essa potência instalada dos equipamentos é reduzida para funcionamento ao máximo da eficiência.

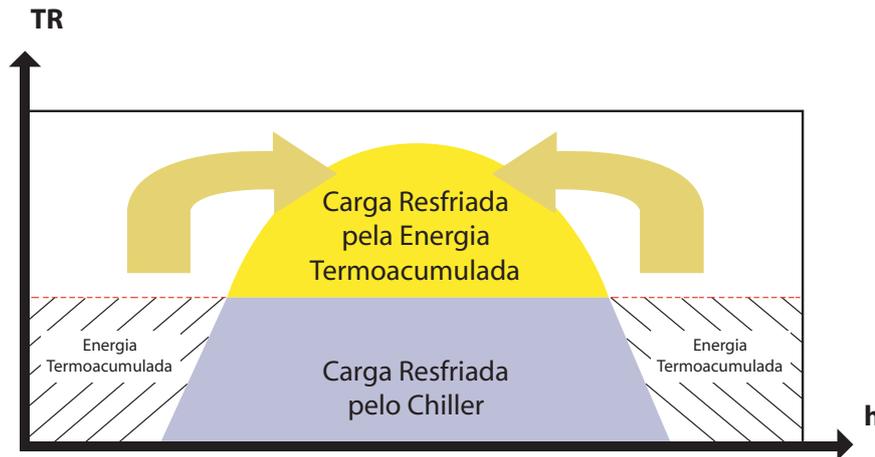


Figura 2.7: Operação com carga nivelada

Com este método é possível reduzir a potência instalada mantendo-se constante o funcionamento dos equipamentos.

A figura 2.8 elucida o uso da termoacumulação em situações de carga limitada, na situação em que o equipamento opera com uma carga reduzida no período de pico. Em alguns casos, os equipamentos de refrigeração podem ser controlados para que não se ultrapasse o limite permitido pelo contrato de energia. A linha cheia (curva) da figura representa o diagrama na ausência do uso da termoacumulação e a linha tracejada (descontínua) representa o diagrama após a aplicação da termoacumulação Dorgan [42].

Caso exista a tarifa horo-sazonal, pode-se utilizar a acumulação térmica parcial com parada da central de água gelada no horário de ponta, o que aumenta a capacidade do “chiller” e dos tanques de acumulação, o que reduz, substancialmente, o custo da energia elétrica da instalação.

2.2.1.3

Armazenamento com carga básica

Em sistemas que operam 24 horas por dia (e.g.: centros de processamento de dados, centrais de comunicação, hospitais etc.) o uso de “chillers” apresenta-se atraente. Dentre as alternativas, pode-se utilizar uma pequena

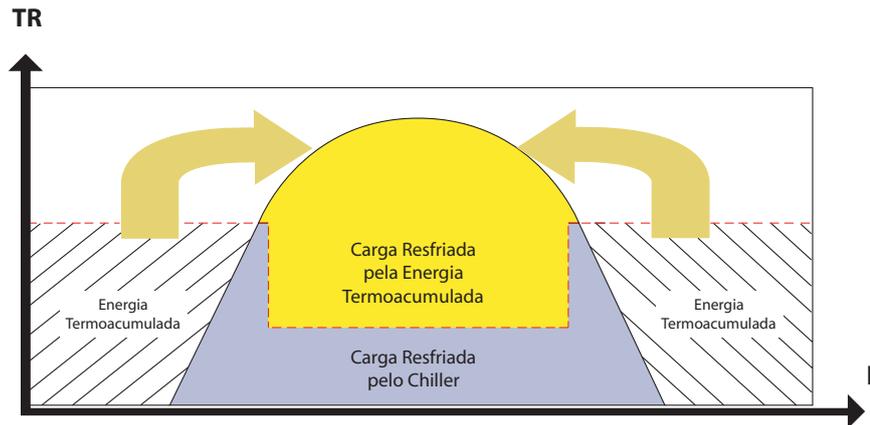


Figura 2.8: Operação com carga limitada

unidade resfriadora de água que forneça uma potência de base constante (que atenda tipicamente a carga noturna), enquanto outro, dimensionado para atender o restante da carga, supre a demanda durante o dia e armazena energia térmica (interna) durante o período noturno.

Tipicamente um “*chiller*” de eficiência elevada é usado para suprir o perfil de carga fora do pico. Um segundo, de menor capacidade, é responsável pelo armazenamento fora da ponta. Quando os dois juntos não são suficientes para suprir a demanda, faz-se, então, o uso da energia armazenada. Nessas situações, podem ser aplicados o armazenamento parcial ou o armazenamento total. No caso em que o armazenamento parcial é preterido, a energia no horário de pico é parcialmente provida pelo segundo “*chiller*”. E, nas situações de armazenamento total, no horário de pico, o segundo não funciona Dorgan [42].

2.2.1.4

Armazenamento operando com vários “*chillers*”

Existem ainda as situações em que vários “*chillers*” são utilizados para suprir a carga térmica, o que propicia um sistema modulado de carga. O uso de vários desses equipamentos incrementa a flexibilidade de refrigeração do sistema para diferentes condições de carga e do horário de pico.

Os diferentes tipos de termoacumulação acima descritos encontram aplicação comercial.

2.3

Pesquisa bibliográfica

O uso da termoacumulação em instalações de climatização encontra-se bem documentado na literatura especializada. Parte desses trabalhos versa so-

bre a análise do desempenho do sistema em escala laboratorial documentando características dos processos termodinâmico, elétrico, mecânico ou químico.

Pesquisa bibliográfica sobre o tema não revelou, entretanto, trabalhos realizados sobre o impacto da termoacumulação em sistemas de climatização para a redução dos investimentos pelas concessionárias de energia elétrica em suas respectivas áreas de concessão. E, tampouco, sobre sistemas de distribuição do tipo subterrâneo, que requerem expressivos investimentos associados à sua construção e ampliação. Igualmente não foram identificados trabalhos acadêmicos e de pesquisa ou estudos comparativos que permitam a aplicação de novas tarifas horo-sazonais capazes de justificar o uso da termoacumulação. Os trabalhos de pesquisa identificados relacionam-se aos impactos da aplicação de termoacumulação em conjunto com a aplicação de tarifas horo-sazonais existentes. Essas pesquisas (a seguir referenciadas) confirmam a redução dos custos operacionais com a aplicação de sistemas que reduzem a “produção de frio” durante o período de ponta do sistema elétrico.

Em artigo de autoria de Procell [44] em 1987 no *Ashrae Journal* é mostrado que o uso da estocagem de gelo resulta numa redução de 43% no custo de energia elétrica, benefício creditado ao uso da termoacumulação.

Em sua pesquisa de mestrado na UNICAMP, Sampaio [45] mostrou que a termoacumulação reduz os custos variáveis (demanda e consumo energético) em 33%.

Sobre o tema relacionado ao armazenamento da energia térmica existem diversos artigos e trabalhos de pesquisas publicados em periódico especializado (*Thermal Energy Storage, TES*) e outros sobre termoacumulação⁸, com aplicações inclusive de tarifas especiais para este fim. No estado da Califórnia, considerado referência em tecnologias e serviços aplicados à conservação e racionalização de energia, existem programas que incentivam o uso da termoacumulação Wilson [46].

Elleson [47] afirma que os sistemas de termoacumulação, se bem projetados e devidamente instalados, são capazes de reduzir os custos⁹ de operação, implantação e a capacidade das subestações de energia elétrica. E mais, ampliam a capacidade do sistema existente e flexibilizam a operação da instalação como um todo. O uso desses sistemas equivalem à uma reserva de energia térmica em casos de pane das unidades resfriadoras de água.

⁸Várias referências bibliográficas consultadas para assuntos correlatos à refrigeração e/ou termoacumulação estão listadas ao final dessa dissertação em bibliografia.

⁹Os custos de operação podem ser reduzidos em percentuais de até 50% dos projetos sem termoacumulação. Para os custos com a infra-estrutura elétrica (subestações) os percentuais podem se situar em torno de 30 a 40% de redução em relação à um projeto sem termoacumulação.

Em seu estudo comparativo, Dorgan [48] descreve a aplicação da termoacumulação e os ganhos que dela advêm. Segundo este autor, a ação desses sistemas equivale ao ganho equivalente ao de um andar no projeto de um grande edifício, sem acréscimo na altura, devido à redução dos equipamentos que compõem o sistema de climatização.

Vantagens sobre a utilização da termoacumulação são explicitadas no Energy Management Handbook [49], no capítulo *Thermal Energy Storage*.

Estes trabalhos corroboram para a utilização da termoacumulação em instalações de climatização. Mostram ainda as vantagens de sua utilização, sua flexibilidade para atender incremento de carga térmica na edificação.

Na PUC-Rio, Guzmán & Braga [41, 50] realizaram dois trabalhos de pesquisa sobre o processo de solidificação da água em esferas e cápsulas cilíndricas. O intuito destas pesquisas foi o estudo do super-resfriamento e nucleação da água. Do ponto de vista termodinâmico, durante o super-resfriamento a água está em estado líquido metaestável abaixo da temperatura de mudança de fase. Este estado é modificado quando acontece a nucleação, isto é, a aparição e crescimento de cristais de gelo. A pesquisa está dividida em: (i) o estudo estatístico da ocorrência da nucleação em cápsulas de diferentes materiais, (ii) a influência da taxa de resfriamento, (iii) a rugosidade do material das capsulas e (iv) registro, visualização e análise do processo de nucleação. Uma continuação deste trabalho é devida a Pacheco [51], cuja pesquisa foi realizada basicamente com novas cápsulas de diferentes diâmetros e rugosidades.

Chumioque [43] fez um trabalho de simulação de um sistema de refrigeração com termoacumulação operando em regime transiente, utilizando água gelada como fluido do sistema de termoacumulação. Esta pesquisa visa a otimização do sistema e redução do consumo de energia.

Ticona et al [52] entre 2003 e 2007 pesquisaram a geração e características de transferência de calor de pastas de gelo em dois geradores diferentes construídos na PUC-Rio. Inaba et al [53]. caracterizam a pasta de gelo como um fluido funcional, isto é: “*which is composed of thermal fluid as continuous phase and other additives with or without phase change (liquid-solid) as dispersion phase*”. A pasta de gelo, formada por finos cristais de gelo em uma suspensão aquosa, é um fluido que pode ser bombeado e armazenado, com a vantagem de possuir alta densidade de armazenamento de energia devido à mudança de fase. Pacheco [51], e posteriormente Martinez [54], pesquisaram a transferência de calor e a perda de carga da pasta de gelo em trocadores de calor de placas fazendo uso da aplicação da pasta de gelo.

Não se pretende com esta pesquisa de mestrado exaurir o assunto sobre as

aplicações da termoacumulação mas elucidar a sua aplicação como estratégia de racionalização do uso de energia elétrica pelo deslocamento de carga permitindo a proposição de tarifas diferenciadas e mais atrativas.

2.3.1

Termoacumulação: a experiência dos Estados Unidos

O uso da termoacumulação possui tradição nos EUA, em particular no estado da Califórnia que dispõe de políticas públicas que introduzem incentivos que beneficiam o setor [42, 55–57].

O armazenamento da energia térmica reduz os custos de refrigeração associados à energia elétrica, com deslocamento dessas atividades para as horas de baixa utilização do sistema elétrico (Chvala, 2002)[55]. A tarifa utilizada em período de baixa demanda e consumo produz economia significativa do custo operacional de energia. A aplicação de termoacumulação exige estruturas de tarifas de energia elétrica mais favoráveis, espaço disponível para abrigar o equipamento associado e variação de cargas ou de arrefecimento em edifícios com condições climáticas favoráveis.

Segundo Chvala [55], os projetos de termoacumulação são, de forma geral, implementados em conjunto com os sistemas por expansão já existentes. Ou seja, reformam equipamentos mais antigos de refrigeração visando reduzir os custos de energia (consumo e demanda). Para exemplificar, relata um modelo desenvolvido para estimar o potencial de aplicação da termoacumulação no setor federal. Assim, baseou seu estudo em dados meteorológicos, perfis de refrigeração para a construção de edifícios de várias dimensões e localizações geográficas, tarifas de energia elétrica projetadas, e edifícios do setor federal com demografia. O modelo desenvolvido mostrou que a termoacumulação promove economias que podem variar de US\$ 29 a 42 milhões por ano, dependendo de circunstâncias dos projetos desenvolvidos. Outros autores, Sohn e Cler [56], ao exaltarem os benefícios da termoacumulação, lembram que esta alternativa é comumente ignorada. A incerteza sobre o futuro da desregulamentação do setor elétrico constitui-se, certamente, numa ameaça ao uso da termoacumulação já que esta depende de tarifas favoráveis de energia. Várias opções estão disponíveis para financiar projetos federais em infra-estruturas de termoacumulação, incluindo o financiamento direto por agências, o acesso a fontes de financiamento de utilidade e o financiamento de alternativas. As instalações federais deverão, na prática usual, avaliar opções termoacumulação sempre que um dispositivo de refrigeração de água sofrer reforma (“*retrofit*”) ou alguma substituição do sistema elétrico for realizada.

Na visão de Dorgan et al [58]), o uso dos sistemas de termoacumulação

no mercado pode ser incentivado de diversas formas, dentre as quais:

- A realização de seminários e workshops para debater e divulgar a tecnologia da termoacumulação, mostrando seus benefícios aos usuários; o seu impacto na tarifa de estruturas com utilidades; a flexibilidade na utilização de energia elétrica; as preocupações ambientais; o aperfeiçoamento na utilização da refrigeração nos aspectos de capacidades e utilização; e o avanço da refrigeração nos EUA.
- O desenvolvimento de ferramentas de software para avaliar tanto o desenho do armazenamento térmico para a melhoria econômica como os benefícios em estruturas tarifárias para evoluir para a desregulamentação.

2.3.2

Termoacumulação no Brasil

No Brasil, diferentemente dos EUA, não existe ainda uma política de incentivo ao uso da termoacumulação. Por essa razão a termoacumulação não foi explorada de forma significativa no país. Precários são os registros sobre projetos de termoacumulação instalados no país resultando em desinformação sobre a potência térmica total instalada em tonelagem de refrigeração (TR). Reduzida é a literatura especializada sobre o tema no Brasil, que carece de estímulos e incentivos fiscais à utilização dessa tecnologia. Por parte dos fabricantes, ainda é tímida a promoção de eventos técnicos, o que limita a participação do público formador de opinião, participantes do setor elétrico e potenciais clientes.

As concessionárias de energia elétrica praticamente não participam do debate do assunto. Como evidência dessa afirmação, basta observar que o Procel, no contexto do seu Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações, ainda não promoveu o uso da termoacumulação como oportunidade de estimular o uso dessa técnica no Brasil.

Em particular na cidade do Rio de Janeiro, algumas experiências bem sucedida encontram-se documentadas. A Tabela 2.2 resume os principais projetos de termoacumulação implantados na cidade do Rio de Janeiro, projetos esses de conhecimento público.

De um modo geral, as implantações de projetos de termoacumulação ocorrem de formas segmentadas, tendo como principais usuários: shopping centers, condomínios comerciais, centrais administrativas, hospitais, hotéis, universidades, centros de convenção etc. Para essas aplicações, a termoacumulação apresenta-se como alternativa segura e econômica já que contribui para o aumento do fator de carga do sistema elétrico. E mais, pode postergar investimentos previstos pelas concessionárias. No caso da cidade do Rio de

Tabela 2.2: Projetos de termoacumulação na cidade do Rio de Janeiro

Empreendimento	Setor	Local	Sistema
Norte Shopping	Shopping center	Pilares	Aéreo
Madureira Shopping	Shopping center	Madureira	Aéreo
Bolsa de Valores do Rio de Janeiro	Edifício comercial	Centro	Subterrâneo
Centro Empresarial Cidade Nova	Edifício comercial	Centro	Subterrâneo
Shopping Nova América	Shopping center	Pilares	Aéreo
Shopping Mourisco	Edifício comercial	Botafogo	Subterrâneo
Shopping H.Stern	Edifício comercial	Centro	Subterrâneo
Citibank	Edifício comercial	Centro	Subterrâneo
Condomínio Mario Henrique Simonsen	Edifício comercial	B. Tijuca	Aéreo

Janeiro, há um grande potencial para a aplicação de projetos de termoacumulação. Esses projetos podem contribuir para a modicidade tarifária.

A aplicação da termoacumulação em refrigeração se justifica pela: (i) substituição iminente dos refrigerantes atuais por outros não agressivos à camada de ozônio e (ii) pela necessidade de desenvolvimento de sistemas de refrigeração de maior eficiência energética [42, 48, 57, 59]. Nesta linha de pensamento, as aplicações de refrigeração através da termoacumulação podem, perfeitamente, fazer parte de uma estratégia de desenvolvimento para a região do centro do município do Rio de Janeiro. Local onde existem diversos edifícios equipados com sistemas de condicionamento central que estão com sua vida útil ultrapassada. Existe um potencial muito grande neste sentido que pode ser explorado com base em acordo a ser estabelecido entre as concessionárias de energia elétrica e seus respectivos clientes (consumidores) com vistas à substituição de sistemas convencionais por sistemas eficientes que fazem uso da termoacumulação. Adicionalmente à essa oportunidade que merece ser exploradas em benefício da racionalização no uso da energia elétrica, novos empreendimentos também poderão ser planejados para se beneficiarem do uso da tecnologia da termoacumulação. O centro da cidade do Rio de Janeiro tem vivido, atualmente, um processo de grandes incorporações em que diversos novos edifícios têm sido construídos e outros encontram-se em construção.

No próximo capítulo será apresentado um panorama do setor elétrico nacional, mostrando suas intrínsecas relações, a legislação aplicável, os agentes do setor elétrico, bem como suas atribuições e o papel do governo como poder concedente.