

UNESP

Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

FÁBIO AKIO KOBAYAKAWA

**Eficiência energética em ar condicionado e refrigeração através da aplicação da
termoacumulação**

Guaratinguetá

2011

FÁBIO AKIO KOBAYAKAWA

Eficiência energética em ar condicionado e refrigeração através da aplicação da termoacumulação

Trabalho de Graduação
apresentado como requisito para
obtenção do diploma de
Graduação no curso de
Engenharia Mecânica na
Faculdade de Engenharia do
Campus de Guaratinguetá

Orientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna

Guaratinguetá

2011

Kobayakawa, Fábio Akio

K755e Eficiência energética em ar condicionado e refrigeração através da aplicação da termodinâmica / Fábio Akio Kobayakawa – Guaratinguetá : [s.n], 2011.

59 f : il.

Bibliografia: f. 51

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011.

Orientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna

1. Energia – conservação 2. Ar condicionado 3. Refrigeração
I. Título

CDU 620.9



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM AR CONDICIONADO E REFRIGERAÇÃO
ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DA TERMOACUMULAÇÃO

FÁBIO AKIO KOBAYAKAWA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO PARA A OBTENÇÃO
DO DIPLOMA DE
GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna
Orientador/UNESP-FEG

Prof. Dr. Pedro Magalhães Sobrinho
UNESP-FEG

Prof. Dr. José Nédilo Carrinho de Castro
UNESP-FEG

Dezembro de 2011

A meus pais, Hélio e Maisa, que foram e são a base do meu eu e que me incentivaram sempre, à minha namorada, Aline, que me inspirou e me inspira a cada dia e aos meus amigos, aos quais considero como irmãos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, que mesmo nos momentos difíceis, me deu todo o suporte e apoio para que eu pudesse focar em meus estudos,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna*, que desde o princípio se manteve sempre disposto e colaborativo para a confecção deste trabalho,

a *todos* os moradores da *República Vamointão*, em especial ao *Bruno*, que estiveram presentes em uma das fases mais importantes de minha vida,

aos melhores amigos da faculdade, em especial ao *Hugo Takahashi*, *Henrique Sampaio* e *Fernando Li*, que compartilharam desde o primeiro ano as vitórias e derrotas conquistadas neste árduo caminho,

aos amigos de infância, *Felipe “Ikeda”*, *Airton “Jack”*, *Rodrigo “Chokito”* e *Rafael “Batista”* que cresceram ao meu lado e me ensinaram o verdadeiro significado de amizade,

a todos os professores e funcionários do campus da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, que estiveram presentes ao longo destes anos e que ajudaram a tornar meus sonhos em realidade.

RESUMO

A utilização de sistemas de ar condicionado e de refrigeração é de fundamental importância no que se diz respeito à climatização de ambientes. Importante também é o uso de energia elétrica para o funcionamento dos equipamentos relacionados a esses sistemas. Devido ao alto custo de tarifação deste tipo de energia, os fatores “economia” e “eficiência” ocupam papéis fundamentais entre os parâmetros de projeto de um sistema. Uma das formas de se obter essa economia é a utilização da técnica denominada **termoacumulação**, ou armazenagem de frio, que consiste em deslocar as cargas requisitadas dos horários de ponta e também no nivelamento das mesmas, de forma que o consumo de energia é transferido do horário de ponta para um horário fora de ponta reduzindo, assim, o custo da energia consumida. O frio pode ser armazenado na forma de gelo ou água gelada.

Este trabalho tem por objetivo realizar uma análise técnico-econômica de um shopping no Vale do Paraíba checando a viabilidade da implantação de um sistema de termoacumulação para se obter uma economia no custo da energia utilizada pelo estabelecimento em questão.

Através dos parâmetros medidos pela concessionária de energia podemos obter os valores da demanda de energia e da potência consumida, que servirão como base de cálculo para o estudo. Os resultados obtidos permitem a elaboração de duas propostas alternativas à configuração atual, sendo uma escolhida através dos critérios e resultados expostos pelas análises técnico-econômica e energética.

PALAVRAS-CHAVE: termoacumulação, análise técnico-econômica, economia, eficiência

ABSTRACT

The use of refrigeration and air conditioning systems is of fundamental importance when it comes to air-conditioning of environments. Also important is the use of electricity for equipments' operation related to these systems. Due to high cost of charging for this type of energy, factors "economy" and "efficiency" occupy key roles among design parameters of a system. One of the ways to get this economy is the use of a technique called **thermal storage**, or cold storage, which intends to move the required loads during peak time and also their equalizing, so that the energy is transferred from the peak time to non-peak time, thereby reducing the cost of energy consumed. Cold can be stored in the form of ice or ice water.

This work aims to perform a technical-economic analysis of a mall located in Vale do Paraíba checking the feasibility of deploying a thermal storage system to achieve an economy in the cost of the energy used by the establishment.

Through the parameters measured by the concessionaire of energy we can get the values of energy demand and power consumed, which will serve as basis for calculation for the study. The results obtained allow the development of two alternative proposals to the current configuration, one chosen by the criteria and results presented by technical-economic and energy analysis.

KEYWORDS: thermal storage, techno-economic analysis, economy, efficiency

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	12
1.2 CONTEÚDO DO TRABALHO	13
2. APLICAÇÃO DA REFRIGERAÇÃO E DO AR CONDICIONADO.....	15
2.1 AR CONDICIONADO EM EDIFÍCIO DE MÉDIO E GRANDE PORTE.....	16
2.2 AR CONDICIONADO E REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAL.....	17
2.3 CHILLER DE COMPRESSÃO E DE ABSORÇÃO	18
3. CONCEITOS TERMODÂMICOS APLICADOS À REFRIGERAÇÃO E AR CONDICIONADO	20
3.1 DEFINIÇÕES	20
4. CICLOS DE REFRIGERAÇÃO.....	21
4.1 CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR	21
4.1.1 CICLOS IDEAL E REAL DE COMPRESSÃO DE VAPOR	25
4.2 REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO DE VAPOR	26
5. TERMOACUMULAÇÃO.....	27
5.1 FORMAS DE ARMAZENAGEM	27
5.1.1 ARMAZENAGEM TOTAL.....	30
5.1.2 ARMAZENAGEM PARCIAL.....	30
5.1.3 TERMOACUMULAÇÃO FORA DA PONTA.....	31
5.2 SISTEMAS DE TERMOACUMULAÇÃO	32
5.2.1 SISTEMAS DE ACUMULAÇÃO DE ÁGUA GELADA.....	32

5.2.2 SISTEMAS DE ACUMULAÇÃO DE GELO	33
5.3 TANQUES PARA TERMOACUMULAÇÃO.....	37
6. ESTUDO DE CASO	39
6.1 TARIFAÇÃO E DEFINIÇÕES	39
6.1.1 TARIFAÇÃO	39
6.1.2 DEFINIÇÕES	40
6.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO ATUAL	41
6.3 ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA E ENERGÉTICA	42
6.3.1 ANÁLISE DE CUSTOS.....	46
6.3.2 ANÁLISE ENERGÉTICA	46
7. CONCLUSÕES	50
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
9. APÊNDICE	54

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Relação entre as áreas de refrigeração e de condicionamento	15
FIGURA 2.2 – Sistema de refrigeração de grande porte	16
FIGURA 2.3 – Exemplo de sala limpa	17
FIGURA 2.4 – Equipamento de refrigeração industrial.....	18
FIGURA 4.1 – Esquema básico do sistema de refrigeração	21
FIGURA 4.2 – Diagrama P – h de um esquema básico de compressão de vapor.....	22
FIGURA 4.3 – Volume de controle aplicado ao evaporador	23
FIGURA 4.4 – Volume de controle aplicado ao compressor.....	23
FIGURA 4.5 – Volume de controle aplicado ao condensador.....	24
FIGURA 4.6 – Volume de controle aplicado à válvula de expansão.....	24
FIGURA 4.7 – Diagrama pressão-entalpia das diferenças entre o ciclo ideal e o ciclo real....	25
FIGURA 4.8 – Comparação entre os ciclos por compressão e por absorção.....	26
FIGURA 5.1 – Carga de refrigeração de 100 TR mantida por 12 horas.....	28
FIGURA 5.2 – Perfil de carga de um edifício comercial genérico durante o dia	29
FIGURA 5.3 – Sistema de armazenagem total.....	30
FIGURA 5.4 – Sistema de armazenagem parcial.....	31
FIGURA 5.5 – Sistema de acumulação de água gelada.....	32
FIGURA 5.6 – Sistema de acumulação de gelo (ICE CHILLER).....	34
FIGURA 5.7 – Sistema de acumulação de gelo (ICE BANK).....	35
FIGURA 5.8 – Circuito de água etileno-glicol no sistema ICE IN CONTAINERS.....	36
FIGURA 5.9 – Sistema de acumulação de gelo (ICE IN CONTAINERS)	36

FIGURA 5.10 – Critérios para a escolha do tanque	37
FIGURA 5.11 – Exemplo de tanque de aço	38
FIGURA 6.1 – Demanda energética do shopping	42
FIGURA 6.2 – Gráfico da demanda energética do sistema de refrigeração atual	43
FIGURA 6.3 – Gráfico da carga de refrigeração atual	44
FIGURA 6.4 – Gráfico relativo à demanda da proposta 1	44
FIGURA 6.5 – Gráfico relativo à carga da proposta 1	44
FIGURA 6.6 – Gráfico relativo à demanda da proposta 2	45
FIGURA 6.7 – Gráfico relativo à carga da proposta 2	45
FIGURA 6.8 – Gráfico referente ao pay-back	49

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Desde o início do século XX o mundo tem acompanhado um constante crescimento nos campos da economia e da tecnologia, que tem alavancado o nível de vida da população em geral. Em paralelo, outros campos tem se desenvolvido para dar suporte a este crescimento, que pode ser caracterizado pelo desenvolvimento constante dos meios de transporte e comunicação, variedade nos equipamentos domésticos que facilitam a vida da população ou ainda a otimização e automação dos processos produtivos, que acarretam em um aumento dos bens produzidos com um menor tempo desperdiçado. Um fator fundamental para esses itens citados é a utilização da energia elétrica, que é imprescindível para o acontecimento e implementação destes, além de ser de suma importância na vida do homem moderno, devido à facilidade para a realização de tarefas antes tidas como impossíveis ou para a realização de tarefas corriqueiras do dia-a-dia.

Porém, todo este desenvolvimento tem gerado aspectos negativos no que se diz respeito ao meio ambiente, pois há um uso desenfreado de recursos naturais que resultam em uma grande quantidade de dejetos despejados no ambiente.

É de fundamental importância nos dias de hoje aliar o desenvolvimento com práticas que visem a manutenção e conservação do espaço físico em que vivemos. Outro aspecto relevante a ser considerado é a utilização racional da energia elétrica, que também auxilia na conservação ambiental, além de ter uma importância no quesito economia financeira.

Um item que surgiu através da premissa de melhora da qualidade de vida das pessoas junto ao desenvolvimento tecnológico foi a utilização de sistemas de ar condicionado e refrigeração, que tem como principal foco gerar um ambiente confortável para o usufruto da população, tanto em locais públicos como privados. Em contrapartida, o funcionamento desses aparelhos gera um elevado custo devido à utilização intensa de energia elétrica. Esse fator tem se tornado um “vilão”, já que as tarifas relacionadas à energia elétrica são elevadas.

A proposta deste trabalho, tendo em vista os fatores citados acima, é realizar um estudo de eficiência energética no sistema de ar condicionado de um shopping center na região do

Vale do Paraíba, no estado de São Paulo, através da proposição de um sistema de termoacumulação, tendo as análises energética e econômica como base para esta proposta, fazendo um comparativo do sistema atual com o sistema a ser implantado.

1.2 CONTEÚDO DO TRABALHO

Esta monografia é composta por 7 capítulos:

O capítulo 1, “INTRODUÇÃO”, descreve a proposta e a justificativa acerca do tema principal do trabalho, que diz respeito à instalação de um sistema de termoacumulação e contextualiza o tema para se obter uma idéia geral da esquematização do trabalho.

O capítulo 2, “APLICAÇÃO DA REFRIGERAÇÃO E DO AR CONDICIONADO”, faz uma breve passagem a respeito das mais diversas aplicações dos sistemas de refrigeração e ar condicionado.

O capítulo 3, “CONCEITOS TERMODINÂMICOS APLICADOS À REFRIGERAÇÃO E AR CONDICIONADO”, realiza uma breve abordagem sobre os principais conceitos e propriedades termodinâmicas relacionadas à refrigeração.

O capítulo 4, “CICLOS DE REFRIGERAÇÃO”, discorre sobre os tipos de ciclos existentes e faz uma análise termodinâmica sobre eles, apresentando suas peculiaridades e características principais.

O capítulo 5, “TERMOACUMULAÇÃO”, apresenta os conceitos pertinentes ao tema e a metodologia e configurações utilizadas, apresentando suas características e descrevendo a respeito das principais utilidades.

O capítulo 6, “ESTUDO DE CASO”, trata-se da análise técnico-econômica e energética do conjunto estudado, bem como das duas propostas realizadas, tendo em vista o objetivo da implantação de um sistema de termoacumulação. Também, mostra todos os parâmetros considerados para a escolha da melhor solução.

O capítulo 7, “CONCLUSÕES”, apresenta as conclusões acerca dos resultados obtidos bem como traz as considerações finais deste trabalho de graduação.

2. APLICAÇÃO DA REFRIGERAÇÃO E DO AR CONDICIONADO

As áreas de refrigeração e ar condicionado são correlatas, embora cada uma tenha seu campo específico de atuação, como se mostra na figura 2.1 (STOECKER, 1985).

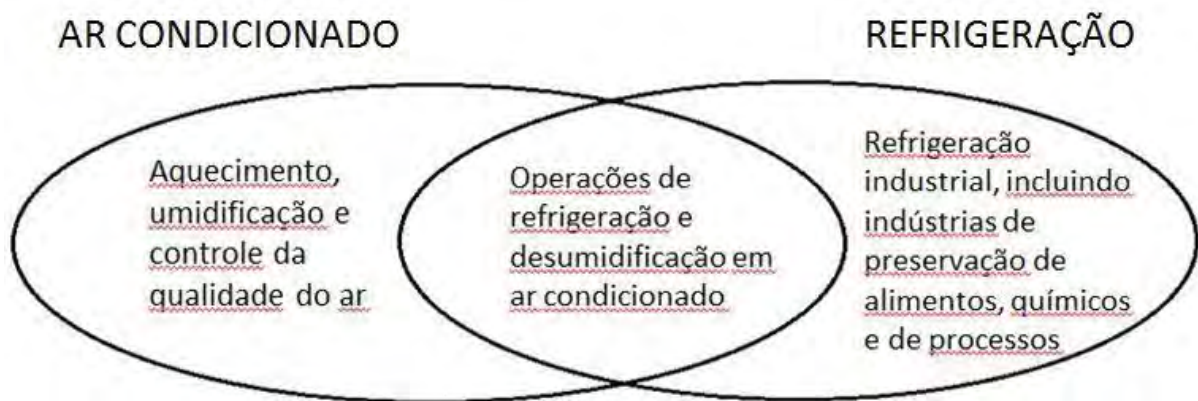


Fig. 2.1 – Relação entre as áreas de refrigeração e de condicionamento (STOECKER, 1985, p.2)

Ambas as áreas tem como objetivo principal controlar a temperatura de um meio ou substância, sendo que a aplicação mais disseminada é o ar condicionado. Outro campo de destaque é a refrigeração industrial, que engloba, por exemplo, aplicações em indústrias de manufatura e química e processamento de alimentos. Nestes casos, as temperaturas de operação se encontram em patamares diversos, podendo atingir a casa dos $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Sistemas de ar condicionado tem funções além do simples resfriamento de ambientes. É de fundamental importância sua utilização na climatização de recintos, que inclui a purificação, distribuição e controle da temperatura, cujo principal objetivo é promover conforto aos usuários deste ambiente. Também, pode-se utilizar estes sistemas para geração de calor, sendo aplicados na condição de bombas de calor.

A seguir, são apresentadas algumas das diversas aplicações dos sistemas de refrigeração e ar condicionado.

2.1 AR CONDICIONADO EM EDIFÍCIOS DE MÉDIO E GRANDE PORTE

Nestes tipos de edificações, o ar condicionado tem função principal de promover conforto. Em algumas situações, os sistemas possuem condições específicas. Um exemplo são os hospitais, onde há a necessidade da manutenção da umidade do ar em ambientes cirúrgicos. Além de fundamental nos períodos de calor, o ar condicionado também é utilizado para equilibrar a temperatura devido ao calor liberado pelas pessoas e aparelhos elétricos, por exemplo. Geralmente, são utilizados sistemas centrais de refrigeração. Em alguns casos, unidades de instalação no telhado podem ser utilizadas (nos sistemas centrais, pode-se instalar trocadores de calor para o fornecimento de água quente ou fria). Um exemplo de equipamento de grande porte pode ser visto na figura 2.2.



Fig. 2.2 – Sistema de refrigeração de grande porte (KBR, 2011).

2.2 AR CONDICIONADO E REFRIGERAÇÃO INDUSTRIAL

O ar condicionado industrial tem como função tanto o conforto das pessoas que estão trabalhando nos estabelecimentos quanto a manutenção da qualidade do ar que é exigido nos processos industriais. Podem ser citados como ambientes onde há a necessidade do controle da qualidade do ar: laboratórios ambientais (como na figura 2.3), salas limpas (onde são produzidos componentes eletrônicos) e salas de computadores.



Fig. 2.3 – Exemplo de sala limpa (BIONNOVATION, 2011)

A refrigeração industrial não pode ser considerada como um subproduto do condicionamento de ar (STOECKER, 2002, p. 1) Esta categoria tem características próprias, desde a faixa de temperatura atuante (-70 °C no limite inferior a 15 °C no limite superior) até os locais de aplicação (indústrias químicas, de alimentos e de processos). Pode-se visualizar um exemplo na figura 2.4.



Fig. 2.4 – Equipamento de refrigeração industrial (POLISERVICE, 2011).

2.3 CHILLER DE COMPRESSÃO E DE ABSORÇÃO

Chillers são equipamentos que tem como principal finalidade arrefecer água ou outro tipo de substância utilizada para refrigeração de algum sistema ou ambiente. Os principais modelos de chiller são

- Chiller de compressão mecânica: o princípio de funcionamento é baseado no efeito Joule-Thompson. É acionado por energia elétrica, que é uma fonte mais nobre de energia, possuindo um coeficiente de eficácia elevado, se comparado ao chiller de absorção, que chega à ordem de 6,0. Os componentes são: compressor mecânico, evaporador, condensador e válvula de expansão.
- Chiller de absorção: este tipo de chiller é acionado por alguma fonte de calor, que pode ser tanto a queima direta proveniente de alguma fonte combustível ou o calor rejeitado em algum outro processo, este sendo o motivo da utilização deste tipo de chiller em plantas de cogeração. Chillers que utilizam água como fluido refrigerante possuem a vantagem de não possuir substâncias nocivas ao meio ambiente. Também, possui a vantagem de consumir cerca de 10% do consumo de energia

elétrica de um chiller mecânico, além de apresentar um custo de manutenção mais reduzido, já que não possui muitas partes móveis.

3. CONCEITOS TERMODINÂMICOS APLICADOS À REFRIGERAÇÃO E AR CONDICIONADO

Para se realizar uma análise do sistema térmico estudado, é fundamental o domínio e a compreensão de alguns conceitos e definições básicas que são bases para o entendimento do funcionamento dos mecanismos. Neste capítulo, estão apresentadas tais definições a fim de se ter uma base para o prosseguimento do estudo.

3.1 DEFINIÇÕES

Propriedades termodinâmicas são características macroscópicas de um sistema, como: volume, massa, temperatura, pressão, etc. (SANTOS et al., 2006, p. 294)

Estado termodinâmico é a condição em que se encontra uma substância.

Volume de controle é um volume definido no espaço, especificado por uma fronteira dita *superfície de controle*, através da qual pode fluir matéria. (LEE, 1969, p. 46)

Ciclo é um processo, ou mais especificamente, uma série de processos onde o estado inicial e final do sistema (substância) são indênticos. (SANTOS et al., 2006, p. 294)

Processo é uma mudança de estado, que pode ser definido como qualquer mudança nas propriedades da substância. (SANTOS et al., 2006, p. 294)

Temperatura de saturação é a temperatura em que se dá a vaporização de um fluido (líquido) a uma determinada pressão, chamada *pressão de saturação*.

Título é a razão entre a massa de vapor e a massa total, ou seja, a massa de líquido mais a massa de vapor. m_v , m_l e m_t , e pode ser calculado pela fórmula (1).

$$x = \frac{m_v}{m_l + m_v} \quad (1)$$

4. CICLOS DE REFRIGERAÇÃO

Os principais ciclos de refrigeração com tecnologias estabelecidas (e algumas delas comercialmente disponíveis) são (PERRELLA, 2009, p. 4):

- Ciclo por compressão mecânica;
- Ciclo por absorção;

A seguir, serão explicados e demonstrados os principais ciclos utilizados para refrigeração.

4.1 CICLO DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR

Um esquema do sistema de refrigeração básico está representado na figura 4.1 a seguir.

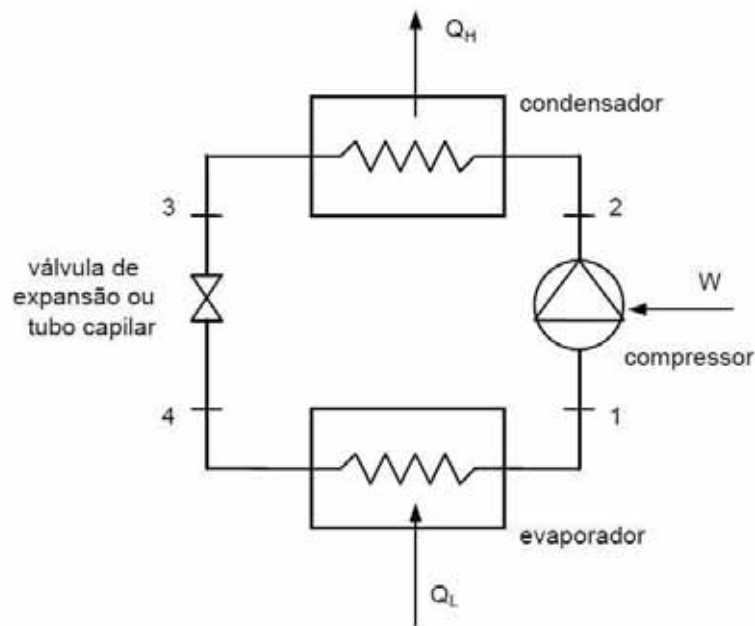


Fig. 4.1 – Esquema básico do sistema de refrigeração (PERRELLA, 2009, p. 4)

Este esquema serve perfeitamente para explicar a essência de um ciclo de refrigeração por compressão de vapor. A figura 4.2 complementa a idéia apresentada pelo esquema básico.

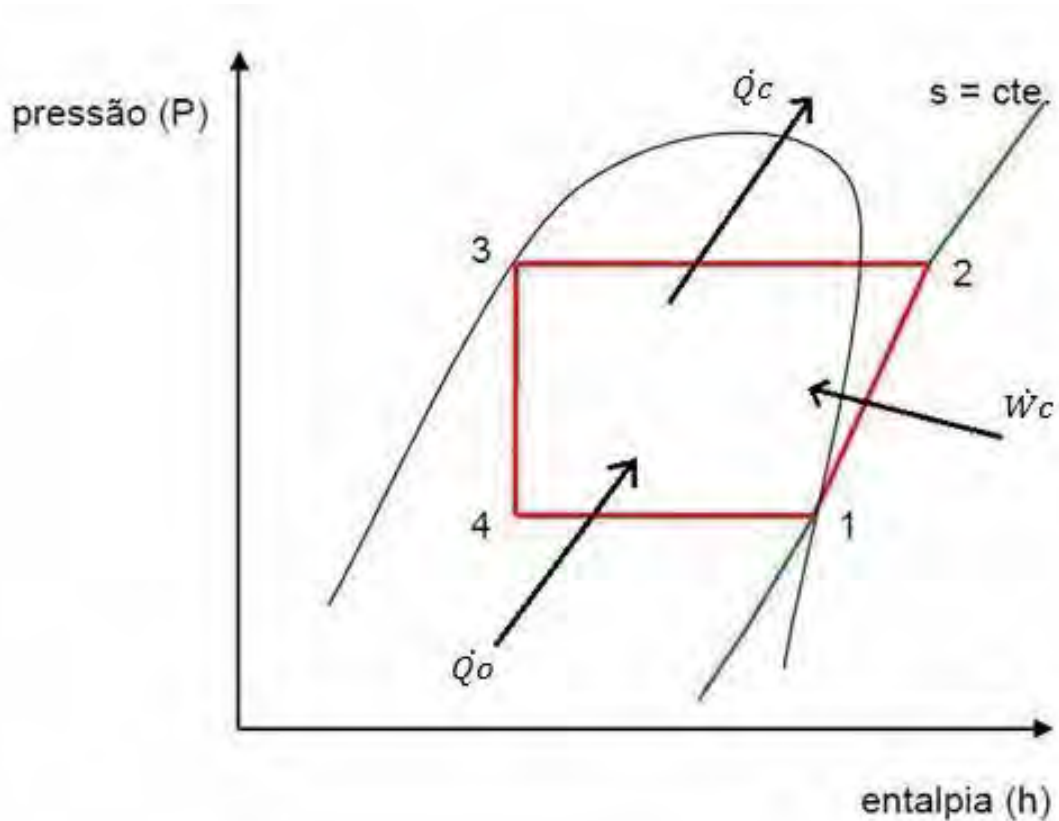


Fig.4.2 – Diagrama P – h de um esquema básico de compressão de vapor (PERRELLA, 2009, p. 4)

O efeito de resfriamento é dado através da evaporação do fluido refrigerante. Ao entrar em um ambiente de baixa pressão o fluido se evapora, processo que se dá ao passo que a pressão aumente até a pressão de saturação para temperatura em questão. Para que a evaporação ocorra de forma contínua, a pressão deve cair novamente, fato que é alcançado ao de retirar dentro do local o fluido, através de uma bomba de sucção. Neste caso, a bomba é denominada compressor (1 – 2) e o vaso onde ocorre a evaporação é chamado de evaporador (4 – 1).

Para que o ciclo seja constituído, o vapor deve ser condensado para que, posteriormente, seja novamente evaporado. Esta etapa se dá no condensador (2 – 3). Como o fluido possui uma alta pressão, é necessário um mecanismo que regule a sua vazão e pressão na entrada do evaporador. A esse dispositivo se dá o nome de válvula de expansão (3 – 4).

As figuras 4.3, 4.4, 4.5 e 4.6 demonstram o balanço energético aplicado aos componentes do ciclo em seus volumes de controle. Todos os processos estão demonstrados na figura 4.2.

- Evaporador: $Q_o = m_f \cdot (h_1 - h_4)$ (3)

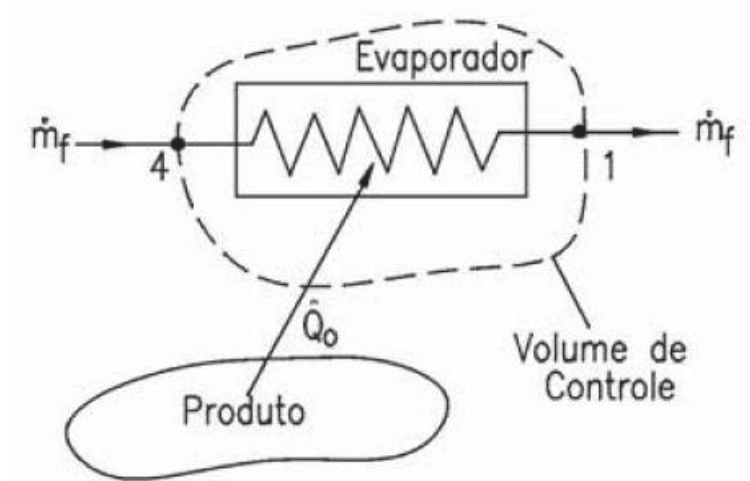


Fig. 4.3 – Volume de controle aplicado ao evaporador (VENTURINI, 2005, p. 41).

- Compressor: $W_c = m_f \cdot (h_2 - h_1)$ (4)

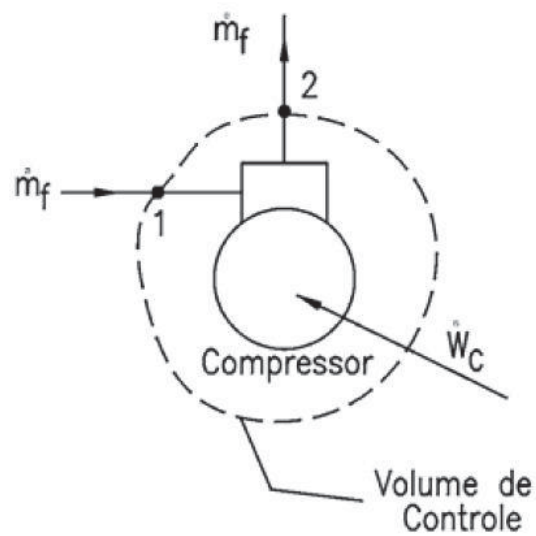


Fig. 4.4 – Volume de controle aplicado ao compressor (VENTURINI, 2005, p. 42).

- Condensador: $Q_c = m_f \cdot (h_2 - h_3)$ (5)

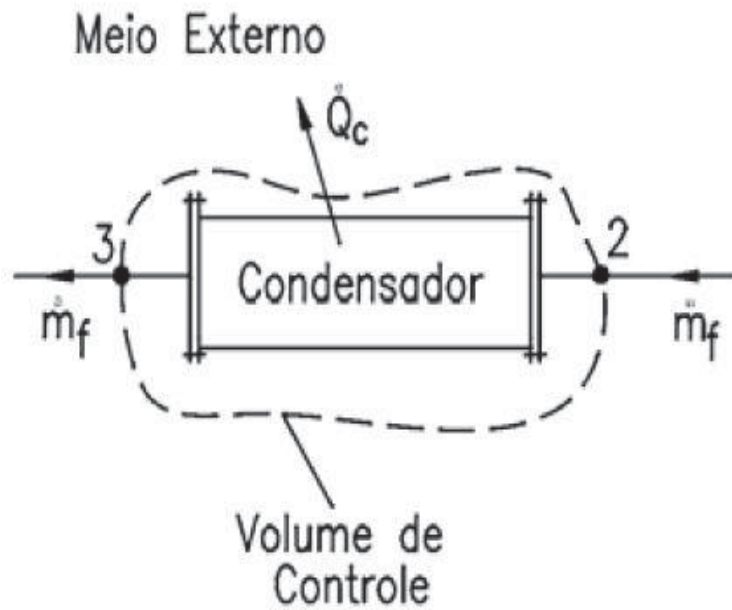


Fig. 4.5 – Volume de controle aplicado ao condensador (VENTURINI, 2005, p. 43).

- Válvula de expansão: $h_4 = h_3$ (6)

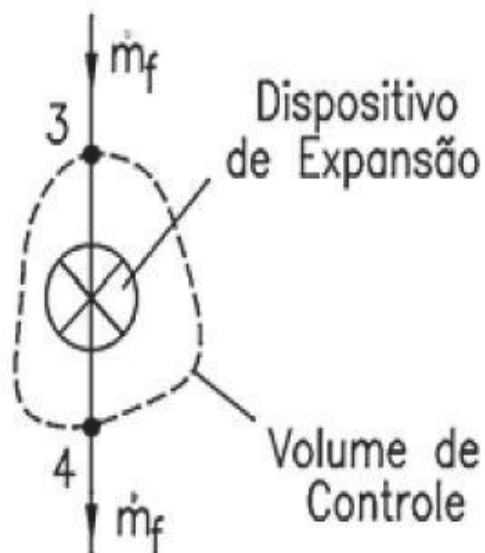


Fig. 4.6 – Volume de controle aplicado à válvula de expansão (VENTURINI, 2005, p. 43).

4.1.1 CICLOS IDEAL E REAL DE COMPRESSÃO DE VAPOR

A figura 4.7 demonstra de forma sucinta as principais diferenças entre o ciclo ideal e o ciclo real.

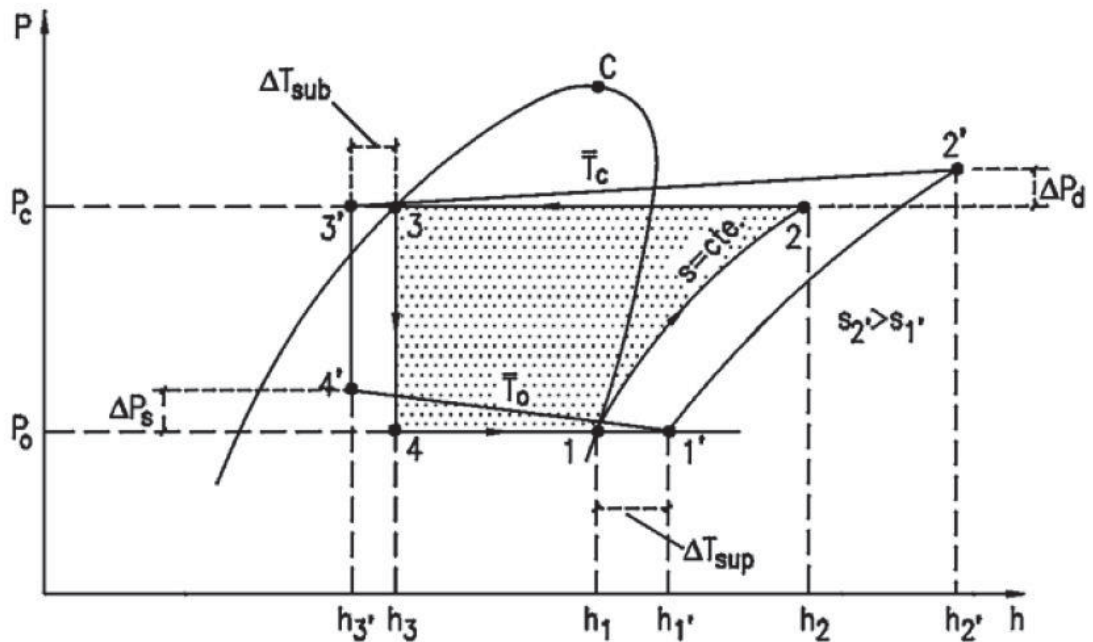


Fig. 4.7 – Diagrama pressão - entalpia das diferenças entre o ciclo ideal e o ciclo real (VENTURINI, 2005, p. 40)

Num ciclo ideal, também chamado de ciclo teórico, o compressor é uma máquina adiabática reversível (isoentrópica) (1 – 2) que eleva a pressão do fluido, que se encontra como vapor seco, de P_0 até P_c , ou pressão de condensação, onde se encontra no estado superaquecido, à temperatura T_2 . No ciclo real, o fluido se encontra na condição de vapor superaquecido que é comprimido num processo politrópico até o ponto 2'.

O processo que ocorre no condensador num ciclo ideal (2 – 3) é isobárico, onde o fluido é condensado à temperatura constante até atingir a condição de líquido saturado. Já no processo real, há uma queda de pressão e um subresfriamento do refrigerante no caminho 2' – 3'.

A expansão na válvula ocorre de maneira isoentálpica tanto no caso ideal como no caso real. A evaporação ideal se dá de tal forma que a pressão se mantém constante até a saturação do fluido. No caso real, ocorre uma queda de pressão junto ao superaquecimento da substância.

4.2 REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO DE VAPOR

A característica que torna este sistema diferente, se comparado ao ciclo de compressão de vapor, é a forma com que o vapor do fluido refrigerante é retirado do evaporador. Neste caso, conecta-se ao evaporador outro mecanismo, chamado de absorvedor. Nele, há uma substância que tem a capacidade de absorver o vapor em questão; a ela, se dá o nome de substância portadora. É nesta absorção que ocorre a troca de calor, necessário para o efeito refrigerante do ciclo.

A condensação do refrigerante deve ocorrer numa determinada pressão. Para que isso aconteça, é necessário que se forneça calor à mistura portador – refrigerante, para que haja a separação de ambas. Esta etapa ocorre no gerador. O conjunto absorvedor – gerador é o equivalente neste ciclo ao compressor no ciclo de compressão enquanto o restante do ciclo é similar a ambos. A figura 4.8 demonstra um comparativo entre um ciclo de compressão de vapor e um ciclo básico de refrigeração por absorção. É importante salientar o fato de, em relação a outros sistemas de refrigeração, este pode operar com energia de baixa qualidade termodinâmica como, por exemplo, calor residual de algum processo.

Atualmente, as principais substâncias portadoras encontradas no mercado são os pares água e brometo de lítio ($\text{H}_2\text{O} - \text{LiBr}$) e amônia e água ($\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$). Também, há a disponibilidade de ciclos de simples e duplo efeito.

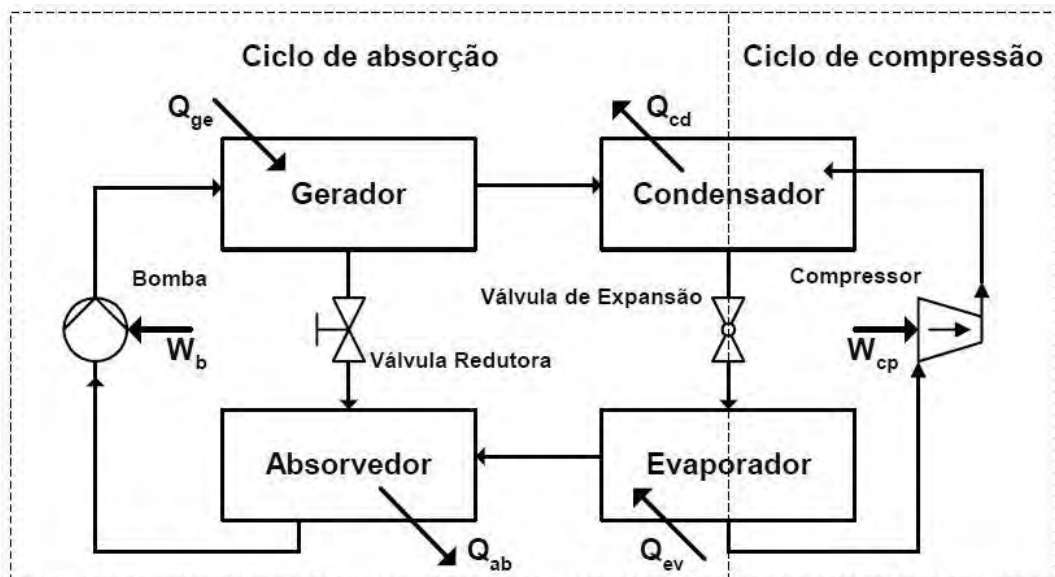


Fig. 4.8 – Comparação entre os ciclos por compressão e por absorção (JÚNIOR et al., 2011, p. 8).

5. TERMOACUMULAÇÃO

A alta demanda de energia nos dias atuais faz com que haja uma busca por meios que promovam a economia de energia e no que se diz respeito à tarifação. Os aparelhos de ar condicionado representam uma grande parcela desta demanda e, conseqüentemente, representam a maior parcela dos gastos em edifícios comerciais e residenciais. Tendo em vista este cenário, tem-se buscado meios de armanezar energia térmica em horários fora de pico.

A termoacumulação tem como objetivo promover esta economia financeira de modo a transformar a energia elétrica da rede em energia térmica, a qual será acumulada e utilizada de acordo com a necessidade do ambiente em questão, ou seja, o horário de ponta de carga é deslocado ou nivelado, transferindo o consumo de um horário de pico para um horário fora de pico e reduzindo os custos de energia.

Esta técnica de armazenagem de energia térmica tem sido utilizada por muitos anos em locais onde o pico de demanda tem curta duração, como igrejas e teatros por exemplo. Ao longo dos anos, houve um maior interesse tanto por parte dos usuários como por parte das empresas geradoras de eletricidade, pois o método se mostrou eficaz no que se diz respeito à redução de custos operacionais. Também, a utilização desta tecnologia aplicada ao condicionamento de ar se mostra mais conveniente, pois seu princípio de funcionamento e o investimento total são mais econômicos que a utilização de tecnologias de acumulação de energia elétrica para, por exemplo, o suprimento de cargas associadas a eventos não transferíveis com o tempo (iluminação, elevadores, etc.) (SANTOS et al., 2006, p.43). Um aspecto diretamente ligado à redução do investimento total é a possibilidade de se projetar aparelhos que operem com uma capacidade intermediária ao longo do dia todo ao invés de aparelhos destinados a operar com carga total apenas durante o horário de pico.

5.1 FORMAS DE ARMAZENAGEM

Em projetos convencionais de sistemas de ar condicionado, as cargas térmicas de refrigeração são medidas em termos de “Toneladas de Refrigeração” ou “TR” necessárias.

Sistemas de termoacumulação, entretanto, têm suas capacidades indicadas em “Toneladas Hora” ou “TR-HORA” (SANTOS et al., 2006, p.). Um exemplo demonstrando a carga teórica de um sistema genérico com carga de refrigeração de 1200 TR-HORA (carga de 100 TR mantida durante 12 horas) é apresentado na figura 5.1.

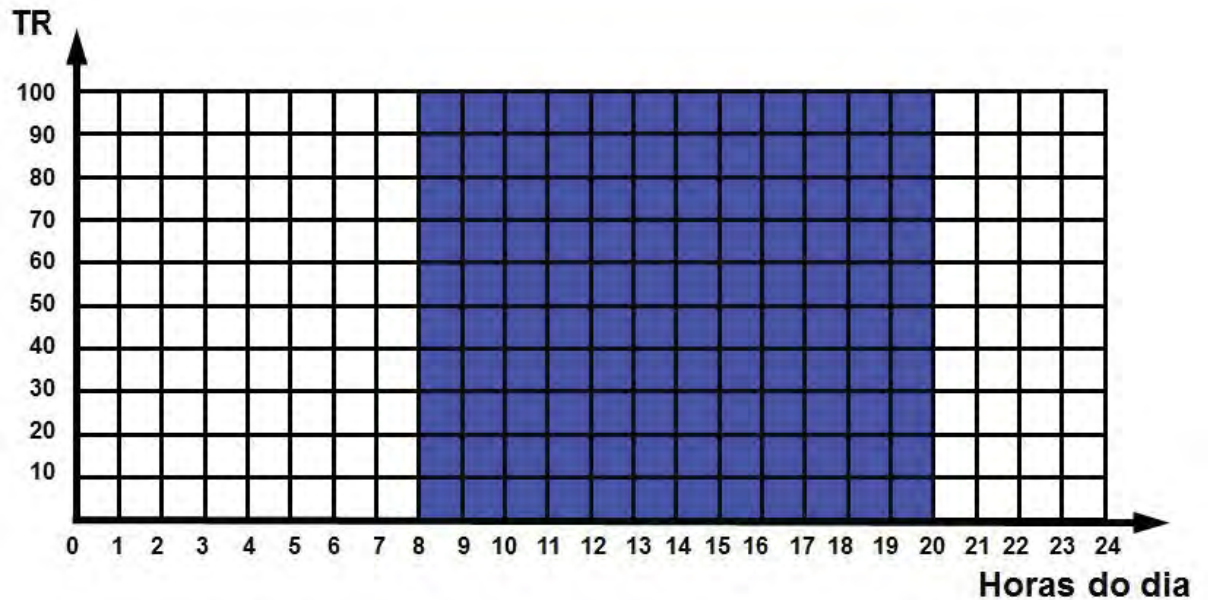


Fig. 5.1 – Carga de refrigeração de 100 TR mantida por 12 horas

Ao contrário da teoria, nenhum sistema de refrigeração opera com 100% da sua carga nominal. A especificação de um projeto deve ser feita de modo a atender a carga máxima de refrigeração, alcançada no horário de ponta. A figura 5.2. representa um perfil de carga de um edifício comercial genérico durante o dia.

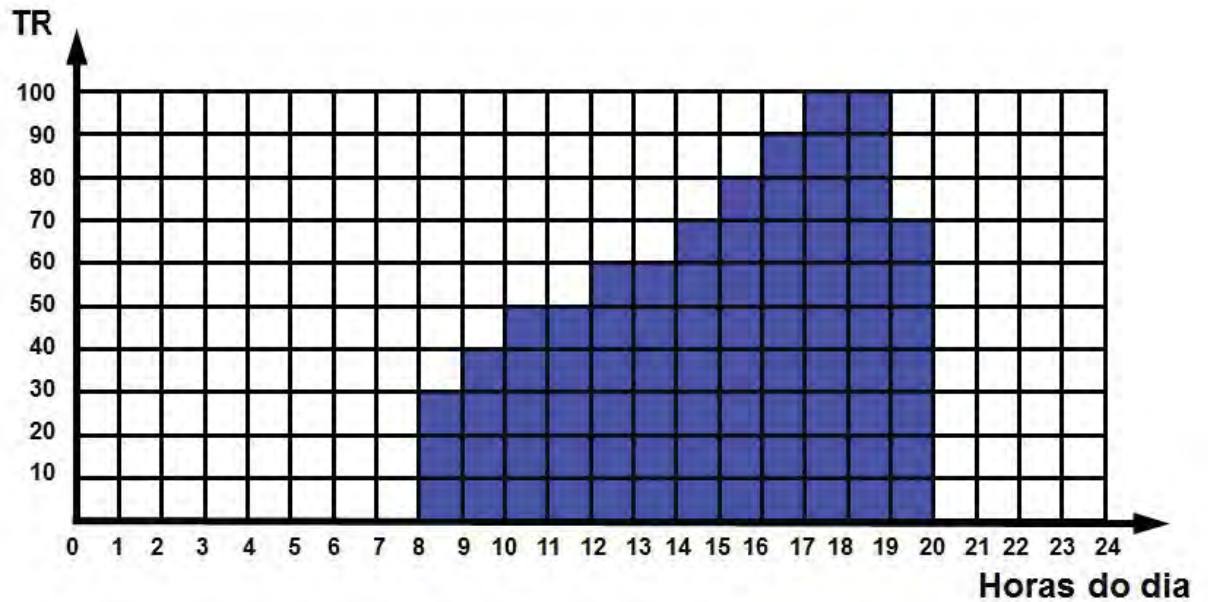


Fig. 5.2 – Perfil de carga de um edifício comercial genérico durante o dia

Nota-se que, durante as doze horas de funcionamento, a capacidade total do chiller só é atingida durante um período de duas horas. Contabilizando os quadrados que representam a carga utilizada, presencia-se um total de 80 destes, ou seja, uma carga de 800 TR-HORA. É necessário especificar um chiller de 100 TR para que a demanda máxima seja atendida.

A partir desses valores obtidos, é possível calcular o fator de carga, que é a relação entre a carga real de refrigeração e a capacidade potencial total do chiller, ou seja:

$$\text{Fator de carga (\%)} = \frac{TR-HORA (carga\ real)}{TR-HORA (carga\ potencial\ total)} \cdot 100 = \quad (8)$$

$$= \frac{800}{1200} \cdot 100 = 66,67\%$$

O chiller especificado tem um fator de carga de 66,67%, ou seja, são solicitadas 800 TR-HORA de 1200 TR-HORA em potencial. Pode-se, então, substituí-lo por um chiller de menor capacidade, com fator de carga de 100%, que opere durante o horário fora de ponta,

constituindo um investimento menor. A partir deste cenário, pode-se optar por uma das formas de armazenagem: total ou parcial.

5.1.1 ARMAZENAGEM TOTAL

A figura 5.3 ilustra o sistema apresentado anteriormente, porém com a carga de refrigeração completamente deslocada de maneira uniforme para os horários fora do horário de funcionamento do sistema de refrigeração. A acumulação de energia térmica em forma de água gelada ou gelo ocorre durante o período da noite e início da manhã. Nesta nova configuração, a carga média é de 66,67 TR, evidenciando a redução (do pico de demanda e nas horas de tarifas mais elevadas) nos custos de energia.

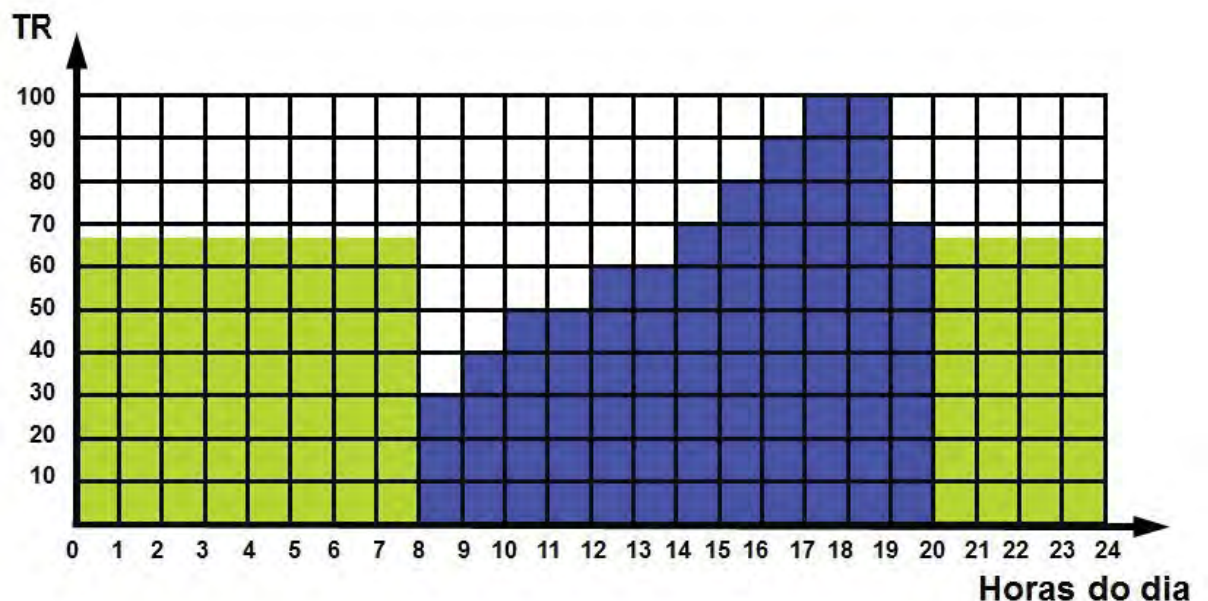


Fig.5.3 – Sistema de armazenagem total

5.1.2 ARMAZENAGEM PARCIAL

O sistema de armazenagem parcial tem se mostrado uma solução mais prática e eficiente. Nesta configuração, o chiller trabalha de forma contínua (dia e noite), nivelando as

cargas. Energia térmica é acumulada durante as 24 horas ao dia, ao invés de 14 horas, como no sistema de armazenagem total. Isso faz com que a carga média caia para 33,4%, como ilustrado na figura 5.4. Os custos são mais baixos que no sistema anterior e o chiller pode ter sua capacidade diminuída em aproximadamente 60%.

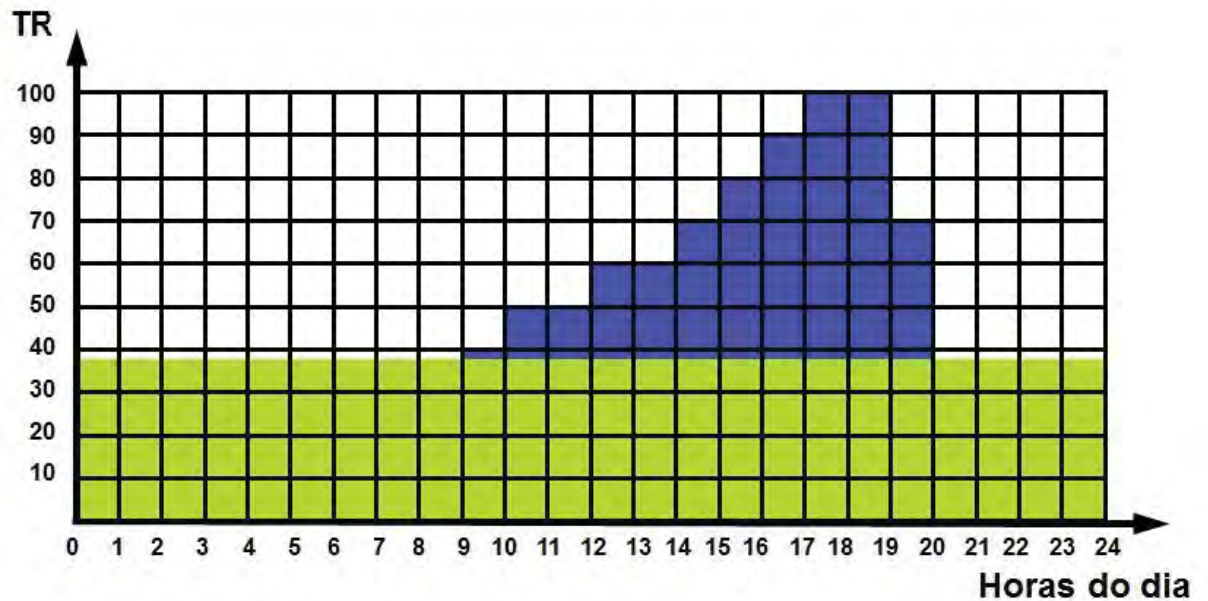


Fig. 5.4 – Sistema de armazenagem parcial

5.1.3 TERMOACUMULAÇÃO FORA DA PONTA

Outra possibilidade é a termoacumulação sem a ocorrência de carga no intervalo do dia correspondente ao horário de ponta. Neste caso, pode-se escolher deslocar as cargas relacionadas ao total utilizado realizando a acumulação durante o período fora de ponta; também, há a possibilidade de realocação das cargas da ponta sem a alteração do restante da configuração.

5.2 SISTEMAS DE TERMOACUMULAÇÃO

A seguir, serão explanados os dois tipos básicos de sistemas de termoacumulação.

5.2.1 SISTEMAS DE ACUMULAÇÃO DE ÁGUA GELADA

Esta classe tem como função acumular água gelada para refrigeração. Este tipo de sistema é constituído por um compressor, um evaporador (o qual resfria a água) e um condensador que, normalmente, é do tipo “Casco-e-Tubo” e exige uma torre de resfriamento, como na figura 5.5. Dessa maneira, bombeia-se água gelada do tanque para o sistema quando necessário, retornando ao tanque posteriormente.

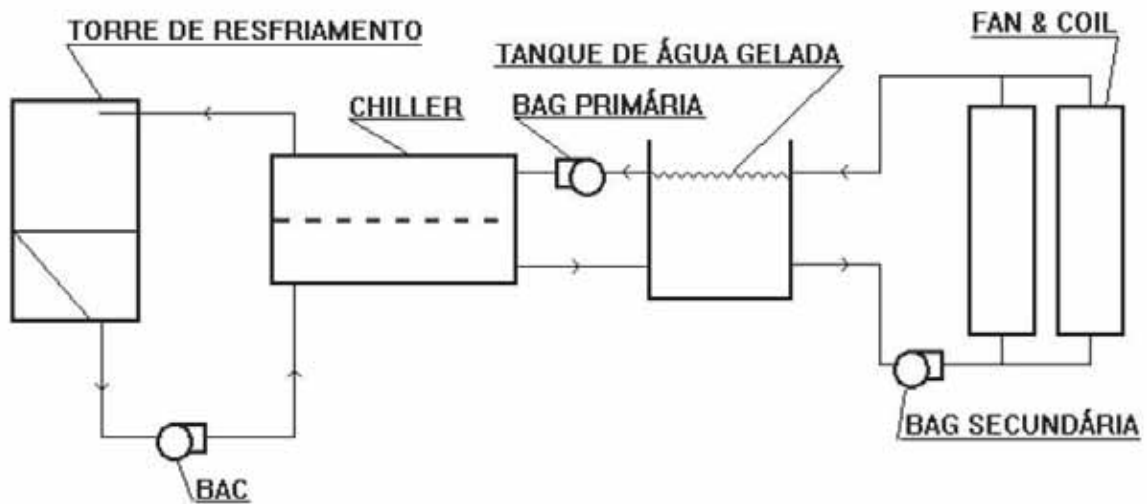


Fig. 5.5 – Sistema de acumulação de água gelada (SANTOS et al., 2006)

Embora o sistema se baseie em um conceito simples, sua execução se torna mais complexa, pois o mesmo é limitado pela sua capacidade de armazenamento de energia da água gelada.

Além disso, deve ser considerada a mistura de água quente do retorno do sistema com a água fria do tanque, a qual não se dá de forma homogênea nem instantânea, ou seja, deve-se

desenvolver tanques com formas especiais para que seu desempenho seja otimizado. Por outro lado, tais projetos possuem custos muito altos e tornam os sistemas ainda mais complexos.

Este sistema possui várias vantagens, como:

- Necessidade de um chiller de menor capacidade se comparado com o sistema de acumulação de gelo, além de um consumo elétrico menor, na ordem de 10% de economia do custo global (MATOS, 2011);
- Evaporador com temperatura de operação mais alta, que elimina a necessidade de um chiller de duplo “set point”;
- Possível utilização do tanque de água no combate a um eventual incêndio.

5.2.2 SISTEMAS DE ACUMULAÇÃO DE GELO

O sistema de acumulação de gelo pode ser encontrado em três configurações diferentes:

a. ICE CHILLER

O princípio básico deste setup é a utilização de um sistema convencional de refrigeração (compressor, condensador, válvula de expansão e evaporador). A única adaptação é feita justamente no evaporador, onde é instalado um tanque isolado termicamente ao seu redor, pois o gelo se forma ao redor de sua serpentina multi-tubular, como mostra a figura 5.6. O gelo acumulado durante o funcionamento no chiller é derretido pela água quente que retorna do sistema e, posteriormente, volta a ser resfriada.

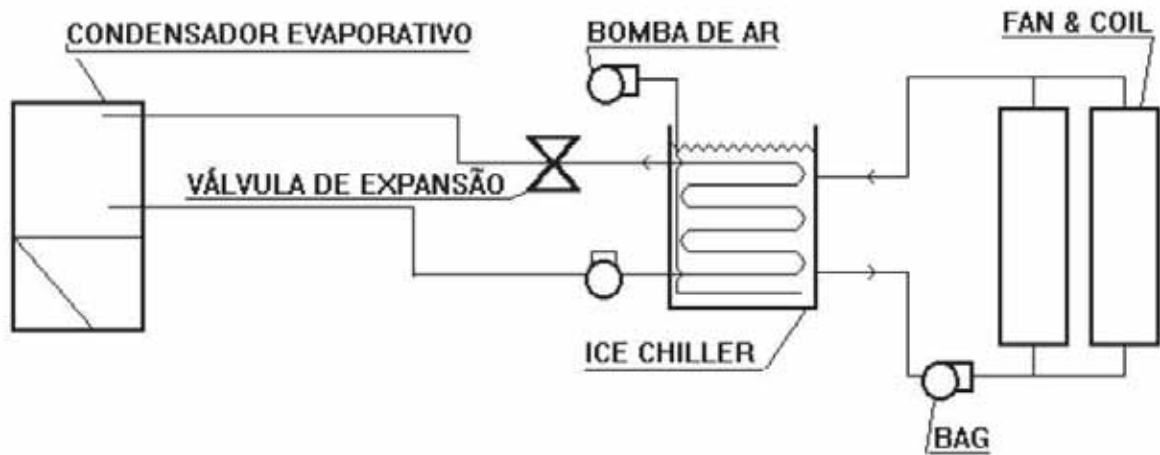


Fig. 5.6 – Sistema de acumulação de gelo (ICE CHILLER) (SANTOS et al., 2006)

Além de ter a vantagem, se comparado com o sistema de armazenado de água gelada, de necessitar de um espaço físico menor, este método se beneficia por utilizar como base de acumulação de energia o calor latente de fusão da água que é de 80 kcal/kg (SANTOS et al., 2006). A água no estado líquido fornece, para 1 kg, apenas 8 kcal. Logo, a razão volumétrica teórica alcançada é de 8:1. A razão prática gira em torno de 5:1, devido às perdas e ao fato da serpentina do evaporador estar imersa no tanque.

b. ICE BANK

Neste sistema, é utilizado um fluido refrigerante composto por uma solução de água e etileno-glicol que circula pelas serpentinas. O gelo é formado e armazenado em um tanque de polietileno. O chiller utilizado possui duplo “set point” e uma válvula regula a mistura entre a vazão do fluido refrigerado e a vazão da parcela que retorna do fan-coil com maior temperatura. Outro ponto característico é a necessidade de maior vazão nos fan-coils ou maior área de troca de calor, já que a substância utilizada possui um menor calor específico, se comparado com a água; logo, a transferência de calor é menor. Um esquema é apresentado na figura 5.7.

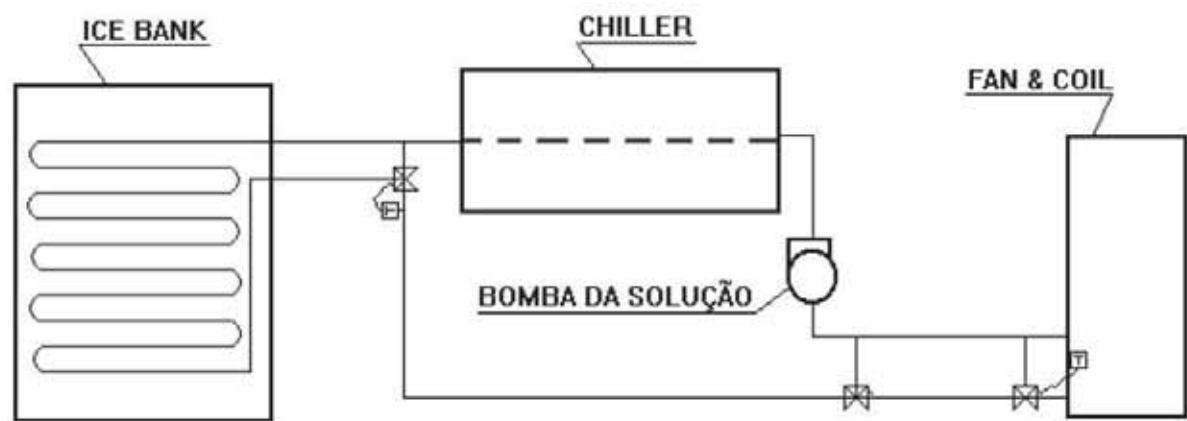


Fig. 5.7 – Sistema de acumulação de gelo (ICE BANK) (SANTOS et al., 2006)

c. ICE IN CONTAINERS

Diferentemente dos sistemas anteriores, o sistema vem pronto de fábrica, sem a necessidade de instalações de partes móveis no local onde será utilizado. Recipientes contendo uma solução de água deionizada e um agente catalisador são aprisionados dentro de um tanque, que pode ser posicionado tanto ao ar livre quanto enterrado no chão. De maneira análoga ao sistema de ICE BANK, a troca de calor é realizada por uma solução de etileno-glicol, porém desta vez este agente escoar por toda volta dos recipientes. Uma característica deste sistema é que os containers são fabricados com um plástico flexível, que se expande com a formação de gelo. Um módulo, chamado inventário, é utilizado de modo que a quantidade de gelo presente no sistema pode ser monitorada.

O sistema de ICE IN CONTAINERS possui uma vantagem em relação ao ICE BANK, pois pode atender a demanda necessária utilizando menos aparelhagem e espaço físico, além de apresentar melhor eficiência tanto na carga como na descarga. Um exemplo de configuração é apresentado nas figuras 5.8 e 5.9.

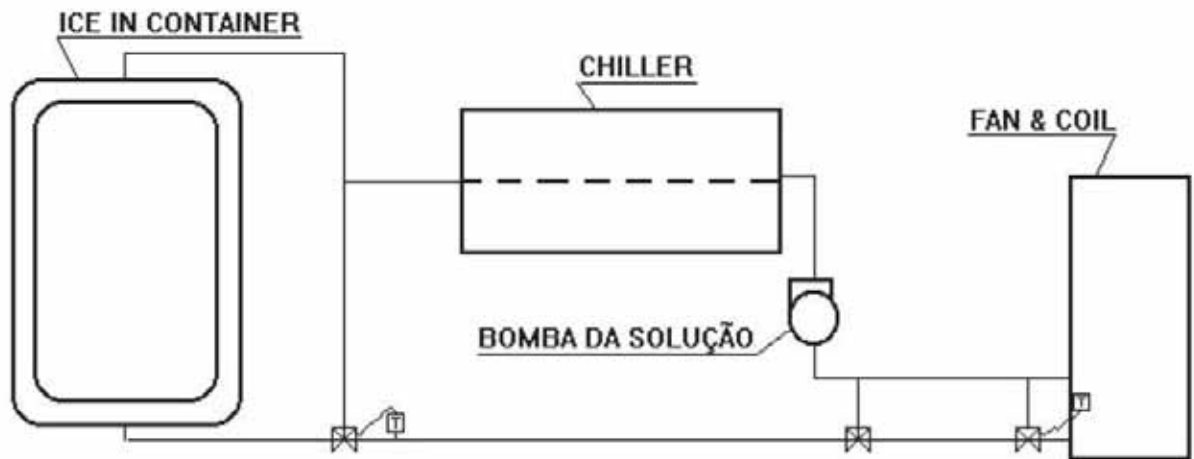


Fig. 5.8 – Circuito de água etileno-glicol no sistema ICE IN CONTAINERS (SANTOS et al., 2006)

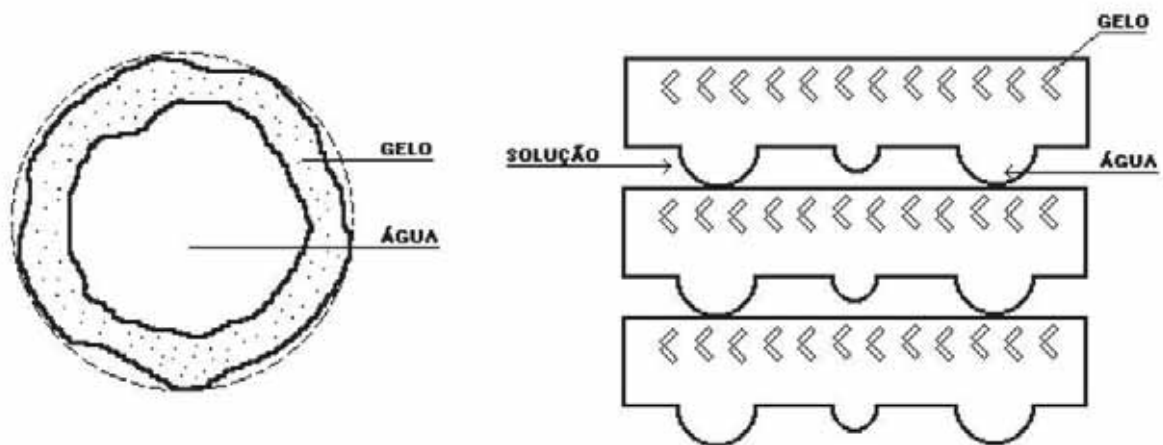


Fig. 5.9 – Sistema de acumulação de gelo (ICE IN CONTAINERS) (SANTOS et al., 2006)

5.3 TANQUES PARA TERMOACUMULAÇÃO

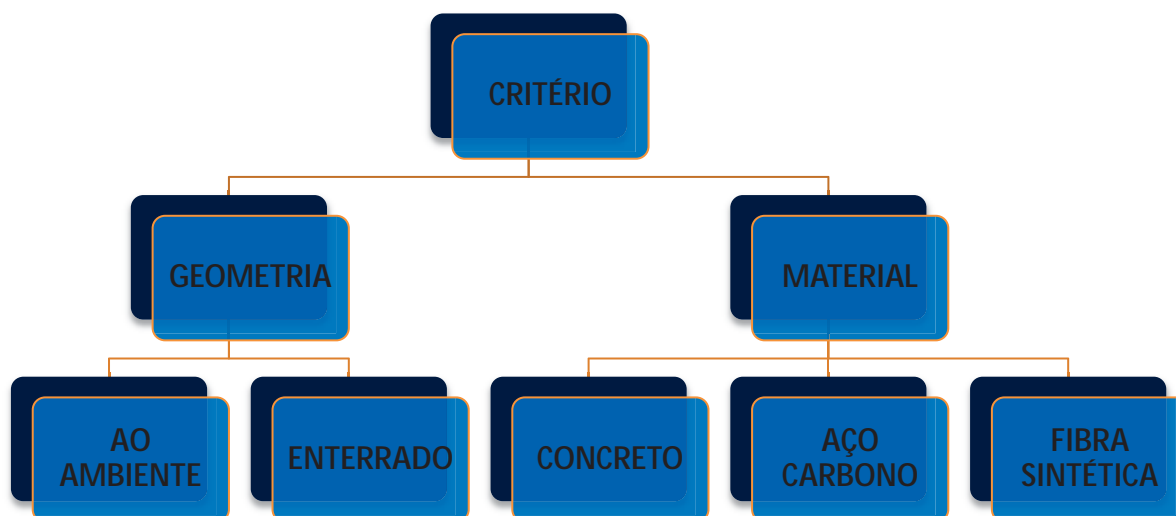


Fig. 5.10 – Critérios para a escolha do tanque

A seleção de tanques para sistemas de termoacumulação deve atender, como mostra a figura 5.10, principalmente, a dois aspectos importantes: geometria e material. Pode-se encontrar tanques construídos ao ambiente e parcialmente ou totalmente enterrados no solo. Esta última opção proporciona uma forma natural de isolamento térmico, já que o solo isola o ambiente, evitando perdas. Também, esta configuração oferece maior reforço estrutural, podendo então utilizar um material menos resistente para a construção do tanque, já que o substrato serve de contenção física. Quanto à geometria, tanques verticais são mais utilizados pois há um menor contato entre as águas frias e quentes, diminuindo a troca de calor no próprio fluido devido à recirculação do mesmo.

A escolha do material deve ser feita de acordo com a necessidade de cada projeto. Tanques feitos de concreto possuem um custo reduzido, sendo de fácil aquisição, além de proporcionar um isolamento térmico satisfatório. Aço carbono também representa uma solução barata, porém há a necessidade de reforço na isolação térmica, já que esse material é um bom condutor térmico, facilitando perdas de energia. Tanques feitos de fibra sintética também podem ser utilizados, já que o material possui uma boa estrutura e resistência mecânica e à corrosão; porém, há o empecilho deste produto ser vendido pré-dimensionado,

dificultando sua utilização em projetos onde a necessidade de acumulação seja alta. Um exemplo de tanque é mostrado na figura 5.11.



Fig. 5.11 – Exemplo de tanque de aço (DSI TANQUES, 2011)

6. ESTUDO DE CASO

Para exemplificar as definições e sistemas expostos até o momento, será realizado um estudo de caso que visa definir um sistema de termoacumulação para suprir as necessidades de refrigeração em um shopping da região do Vale do Paraíba com o objetivo de reduzir os custos de energia elétrica. Será feita uma análise do consumo e da demanda do atual sistema e do sistema proposto, demonstrando a economia alcançada.

6.1 TARIFAÇÃO E DEFINIÇÕES

6.1.1 TARIFAÇÃO

Para o estudo de caso a ser realizado, primeiramente se deve analisar o sistema de tarifação aplicado pela companhia de energia atuante na região aonde se localiza o shopping – a EDP Bandeirante.

A estrutura tarifária da empresa fornecedora de energia se divide em duas estruturas basicamente: a convencional e a horo-sazonal. A primeira estrutura é aquela em que se aplica uma única tarifa de demanda e de energia consumida, independentemente do horário do dia ou da época do ano. Já a tarifação horo-sazonal é caracterizada pela aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica (kWh) e de demanda de potência (kW) de acordo com as horas de utilização do dia e dos períodos do ano (EDP BANDEIRANTE, 2011). Sendo assim, analisando-se as características de demanda e de energia consumida de cada cliente, é realizada uma determinada tarifação.

A tarifação horo-sazonal, por sua vez, subdivide-se em VERDE e AZUL. A tarifação verde constitui um único valor de tarifa, tanto para o horário de ponta quanto para o fora de ponta. A azul, por outro lado, aplica tarifas diferenciadas para ambos os horários. Além disto, há aplicação de multa caso seja registrada demanda superior à contratada, sendo aplicada da seguinte forma: 5 % para consumidores dos grupos “A1”, “A2” e “A3” e 10 % para os demais.

Ainda há a classificação do tipo de consumidor de acordo com as seguintes definições:

- Grupo “A” – consumidores com tensão fornecida igual ou superior a 2300 V ou abaixo deste valor quando atendido a partir de sistema subterrâneo.
- Grupo “B” – consumidores com tensão fornecida inferior a 2300 V. São subdivididos em três diferentes tarifações: residencial, rural e comercial.

O grupo “A”, por sua vez, subdivide-se em cinco subgrupos:

- Grupo “A1” – cuja tensão de fornecimento é igual ou superior a 230 kV;
- Grupo “A2” – cuja tensão de fornecimento está entre 88 kV e 138 kV;
- Grupo “A3” – cuja tensão de fornecimento é de 69 kV*;
- Grupo “A3a” – cuja tensão de fornecimento está entre 30 kV e 44 kV;
- Grupo “A4” – cuja tensão de fornecimento está entre 2,5 kV e 25 kV.

* Observação: os clientes com demanda inferior a 300 kW poderão se enquadrar nas modalidades de tarifação convencional ou horo-sazonal (azul ou verde), já aqueles que possuem demanda superior a 300 kW só poderão ser enquadrados na modalidade de tarifação horo-sazonal (azul ou verde).

No caso analisado, a modalidade adotada é a chamada tarifa azul e se pode concluir que o estabelecimento se enquadra no grupo “A”, subgrupo “A4”, a partir dos dados fornecidos do estabelecimento e das classificações aplicadas pela empresa fornecedora de energia da região.

6.1.2 DEFINIÇÕES

Para melhor se compreender os dados que serão apresentados no estudo de caso, serão apresentadas a seguir algumas definições importantes.

Horário de Ponta (P): é estabelecido das 17h30 às 20h30, sendo que, dentro deste período, cada concessionária determina o período de três horas consecutivas que será o horário de ponta.

Horário Fora de Ponta (FP): constituído pelas demais horas que não estão inclusas no horário de ponta, bem como sábados e domingos.

Período Úmido (U): período de dezembro a abril do ano que o segue.

Período Seco (S): período de maio a novembro.

Período de Medição de Energia Reativa Indutiva (I): intervalo compreendido entre 6h00 e 24h00.

Período de Medição de Energia Reativa Capacitiva (C): intervalo compreendido entre 24h00 e 6h00.

6.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO ATUAL

Os valores médios mensais de demanda e consumo do sistema de distribuição elétrica do local analisado são apresentados no quadro a seguir:

Consumo na Ponta (kWh)	73.643
Consumo Fora de Ponta (kWh)	397.027
Demanda na Ponta (kW)	1.250
Demanda Fora de Ponta (kW)	1.250

Quadro 1 – Valores médios mensais de consumo e da demanda

Com base nos dados do quadro 1, são obtidos os valores relativos ao sistema de refrigeração, que é alimentado por 2 chillers de 325 TR, sendo o valor da eficácia global deste de 0,77 kW/TR. O consumo e a demanda deste sistema atual correspondem a 40% dos valores totais (valor adotado); considera-se o horário de funcionamento das 10h00 às 23h00. Os cálculos são apresentados abaixo.

- Consumo Ponta = 73.643 kWh x 40% = 29.458 kWh
- Consumo Fora de Ponta = 397.027 kWh x 40% = 158.811 kWh
- Demanda Ponta = 1.250 kW x 40% = 500 kW
- Demanda Fora de Ponta = 1.250 kW x 40% = 500 kW

6.3 ANÁLISE TÉCNICO-ECONÔMICA E ENERGÉTICA

O gráfico apresentado na figura 6.1 representa um esboço da demanda energética do shopping durante o horário de funcionamento.

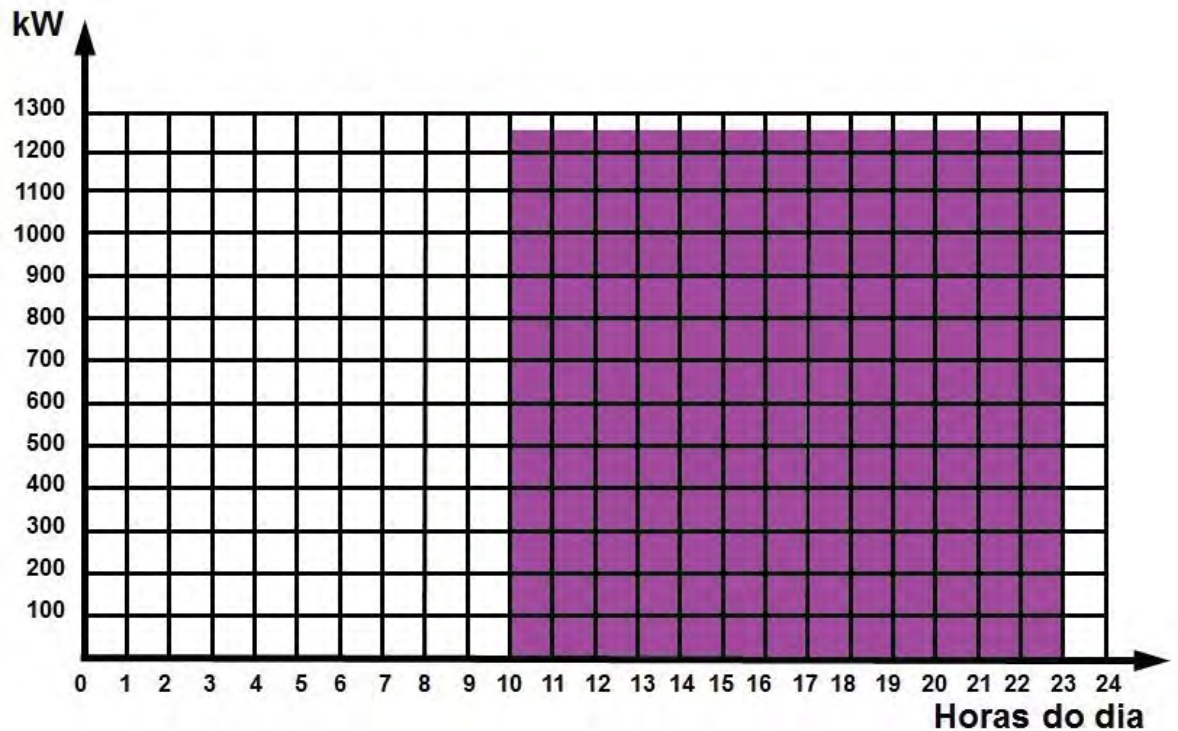


Fig. 6.1 – Demanda energética do shopping

As figuras 6.2 e 6.3 representam, respectivamente, o perfil da demanda e da carga térmica do sistema de refrigeração existente de acordo com os cálculos apresentados no capítulo 6.2. Através da análise de tais dados, pode-se propor duas soluções de termoacumulação para economia de energia:

1. Termoacumulação relacionada ao horário de ponta. Ou seja, durante tal período o chiller é mantido desligado e utilizado para acumular água gelada durante o horário de não-funcionamento do estabelecimento.

2. Termoacumulação parcial relacionada a todo o horário de funcionamento do estabelecimento. Neste caso, o chiller é mantido fora de operação no horário de ponta e opera durante as 21 horas restantes do dia para a acumulação de água gelada.

O quadro 2 ilustra as novas demandas alcançadas através dos cálculos presentes no apêndice A e os novos horários de funcionamento do sistema proposto.

SISTEMA	DEMANDA (kW)	CARGA (TR)	HORÁRIO DE FUNCIONAMENTO
Atual	500	650	10h00 às 23h00
Proposta 1	136,36	177,25	0h00 às 10h00; 23h00 às 0h00
	500	650	10h00 às 17h30; 20h30 às 23h00
Proposta 2	309,52	402,4	0h00 às 17h30; 20h30 às 0h00

Quadro 2 – Comparativo entre o sistema atual e os sistemas propostos.

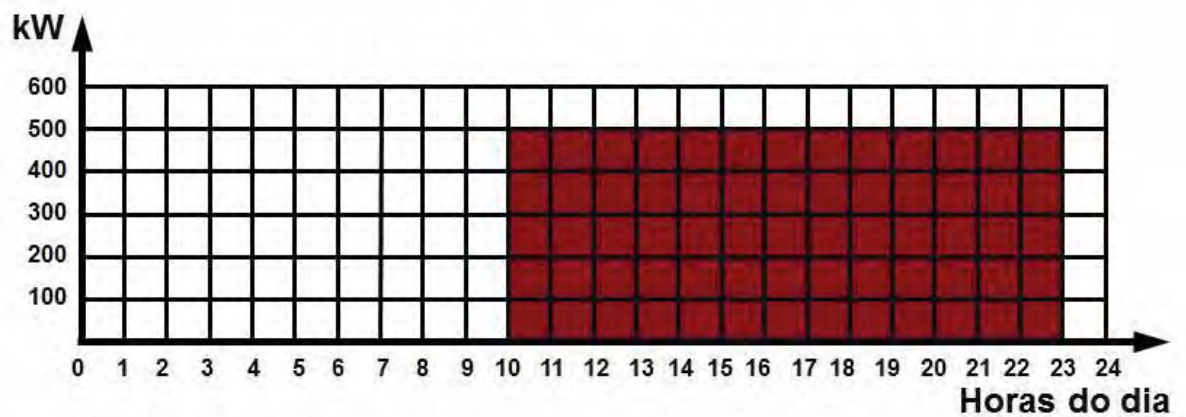


Fig. 6.2 – Gráfico da demanda energética do sistema de refrigeração atual

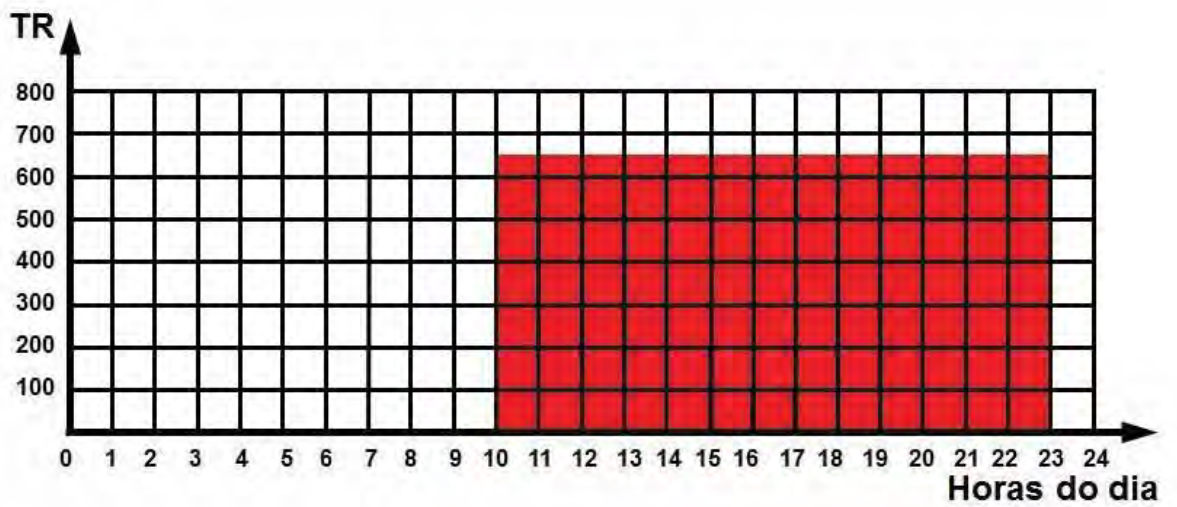


Fig. 6.3 – Gráfico da carga de refrigeração atual

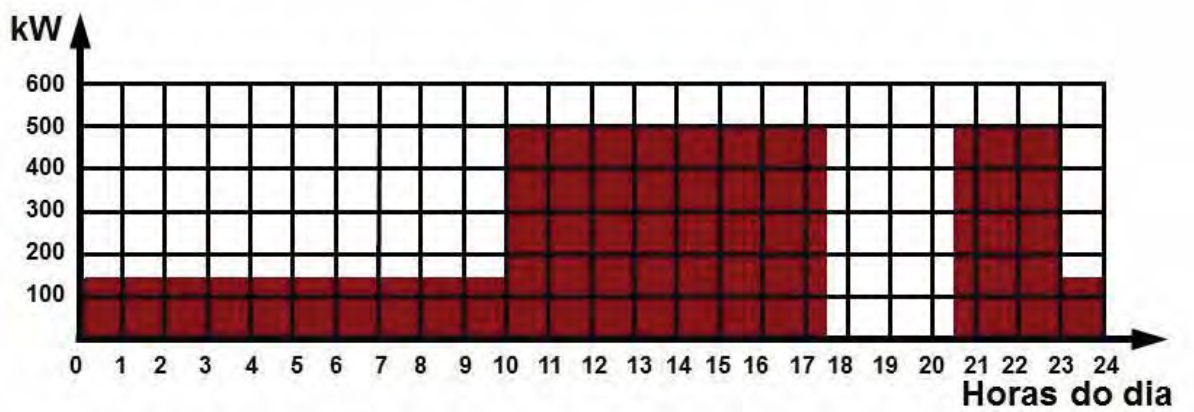


Fig. 6.4 – Gráfico relativo à demanda da proposta 1

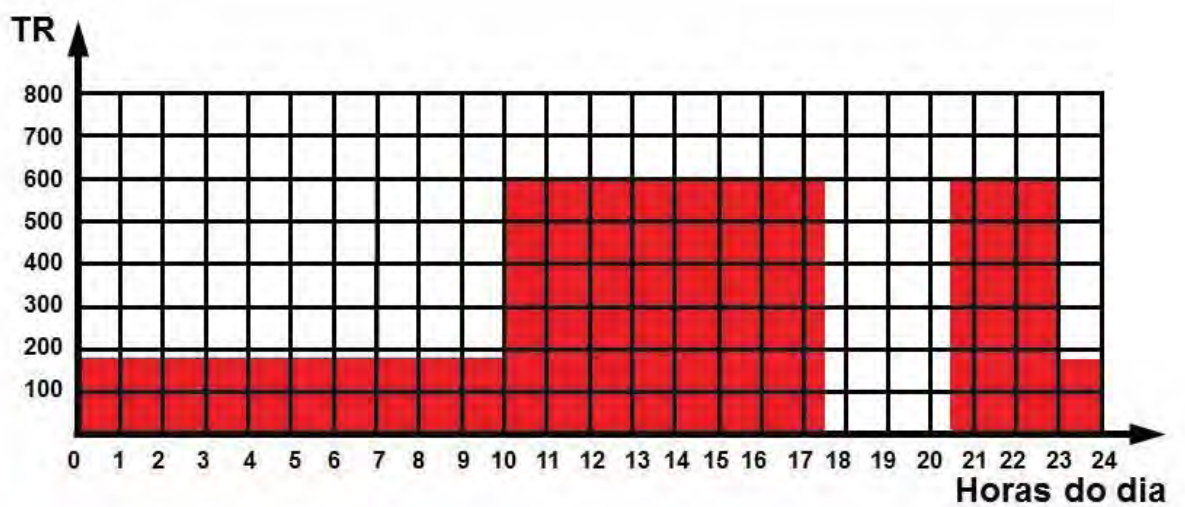


Fig. 6.5 – Gráfico relativo à carga da proposta 1

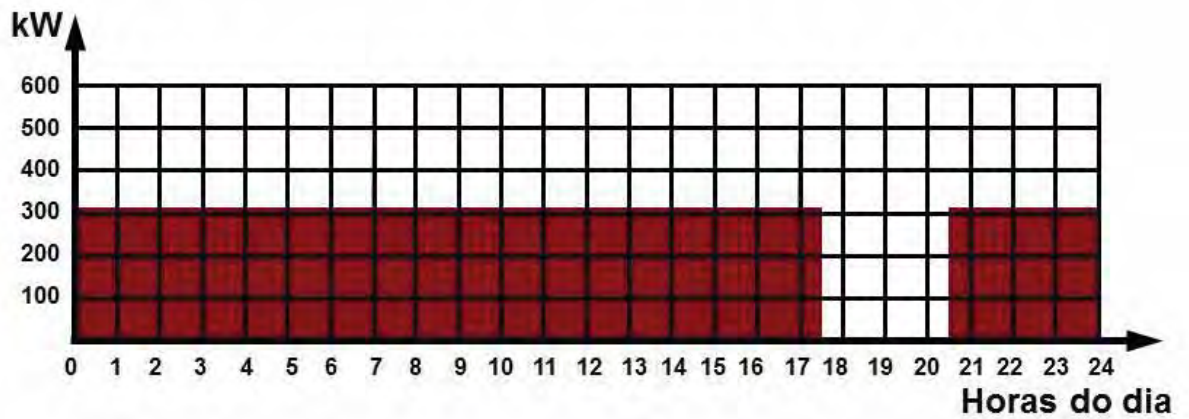


Fig. 6.6 – Gráfico relativo à demanda da proposta 2

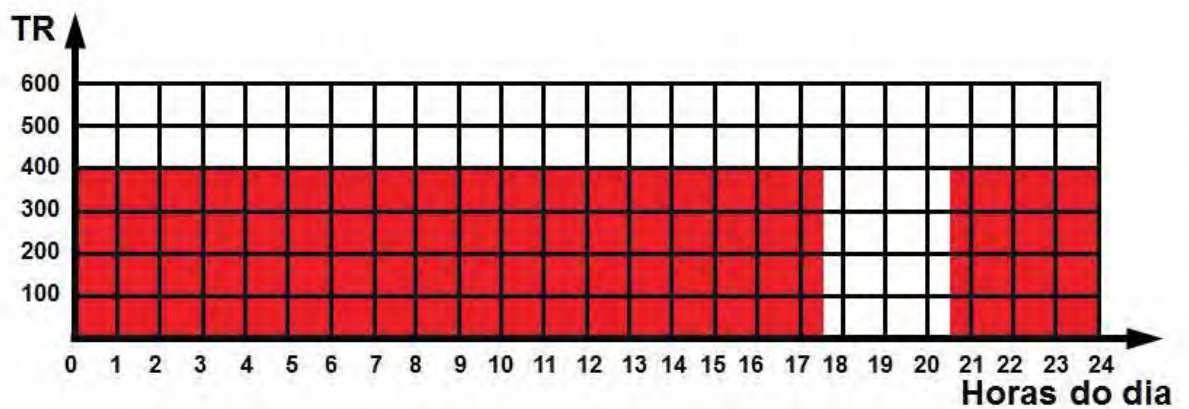


Fig. 6.7 – Gráfico relativo à carga da proposta 2

A proposta da implantação de um sistema de termoacumulação é promover uma otimização no gerenciamento energético distribuindo as cargas de forma que se obtenha uma economia de energia. Através dos valores oriundos à tarifação apresentados no quadro 3, de acordo com a concessionária, é possível mensurar a economia mensal obtida (os valores de tarifação considerados são relativos à média ponderada entre as tarifas do período seco e período úmido). Os cálculos pertinentes estão apresentados no apêndice C.

TARIFAÇÃO (Subgrupo A4)	Consumo Ponta (R\$/kWh)	0,24101
	Consumo Fora de Ponta (R\$/kWh)	0,15320
	Demanda Ponta (R\$/kW)	30,56
	Demanda Fora de Ponta (R\$/kW)	7,35
	ICMS	18 %

Quadro 3 – Tarifação (Subgrupo A4 Azul).

6.3.1 ANÁLISE DE CUSTOS

Com os valores dos quadros 2 e 3 pode-se obter o custo mensal de cada um dos sistemas, como mostra o quadro 4, e realizar uma análise de viabilidade econômica acerca dos resultados (para todos os casos, foi considerado o valor da eficiência global da central igual ao do sistema atual; também, o consumo permanece inalterado, considerando que não haja perdas na acumulação de água gelada). Os cálculos são apresentados também no apêndice C.

Custo mensal total (R\$/mês)	
Sistema atual	61.444,54
Proposta 1	39.655,87
Proposta 2	37.948,51

Quadro 4 – Custos do sistema atual e das propostas apresentadas

6.3.2 ANÁLISE ENERGÉTICA

Para o cálculo do volume de água líquida armazenada, considera-se uma queda de temperatura na ordem de 8 °C no aparelho de refrigeração. O c_p da água líquida é 4,186 kJ/kg.K; Para compensar as perdas de carga devido à recirculação da água pelo sistema,

adota-se um volume acumulado adicional. Neste caso, assumiu-se uma acumulação 15% maior que o volume nominal calculado.

Deve-se considerar como volume de controle somente a água que é resfriada pelo sistema de refrigeração para se realizar o balanço de energia, dado pela equação 9.

$$\dot{Q}_{acu} = 1,15 \cdot \dot{Q} = 1,15 \cdot \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (9)$$

Para o cálculo do tempo de carga no tanque deve-se obter, primeiramente, a vazão mássica de água líquida de cada chiller. Traçando um volume de controle na água deste aparelho, pode-se utilizar a equação 10 para o chiller.

$$\dot{m}_{chiller} = \dot{Q}_{chiller} / (c_p \cdot \Delta T) \quad (10)$$

O tempo de carga do tanque é obtido através da razão do volume de água a ser acumulado e a capacidade de armazenagem volumétrica dos chillers combinados.

$$t = \dot{m} / \dot{m}_{chiller} \quad (11)$$

O quadro 5 ilustra os resultados obtidos para as duas propostas (cálculos – vide apêndice C).

PROPOSTA 1		PROPOSTA 2	
Carga acumulada (kJ)	24.706.044	Carga acumulada (kJ)	106.992.204
Volume acumulado (m ³)	868,395	Volume acumulado (m ³)	3.760,68
Volume do chiller (m ³)	123,351	Volume do chiller (m ³)	123,351
Tempo de carga (horas)	3,52	Tempo de carga (horas)	15,24

Quadro 5 – Resultados termodinâmicos

Através dos resultados obtidos nas análises técnico-econômica e energética, a proposta 1 se mostra mais viável. O custo mensal das duas propostas apresentam valores próximos, não tendo grande influência na escolha. A análise termodinâmica é um fator determinante para a decisão; de acordo com os números apresentados, o volume necessário de água acumulada na proposta 2 é cerca de 433% maior que o volume requerido na primeira proposta. Este fator está diretamente ligado aos custos de aquisição dos equipamentos necessários para o sistema implantado. Logo, um maior volume significa um maior custo de equipamento, tornando esta opção economicamente desfavorável num comparativo direto entre ambas as situações; também, o espaço físico a ser disponibilizado para a instalação dos componentes deve ser levada em consideração.

Através dos valores estimados por uma empresa especializada na fabricação de tanques para aquisição, instalação e manutenção de um sistema de termoacumulação, pode-se realizar uma análise de viabilidade econômica e determinar o pay-back para tal operação, presente no quadro 6 e na figura 6.8. Nota-se que o tempo de retorno do investimento realizado torna atrativa a instalação do sistema proposta, em uma configuração similar ao da figura 5.5.

Custo mensal total atual (R\$/mês)	61.444,54
Custo mensal total proposta 1 (R\$/mês)	39.655,87
Economia (R\$/mês)	21.788,67
Custo do sistema implantado (aquisição, instalação e manutenção) (R\$)	406.549,54
Taxa de juros (%/ano)	20,0
Payback (anos)	2,1

Quadro 6 – Análise econômica da proposta realizada

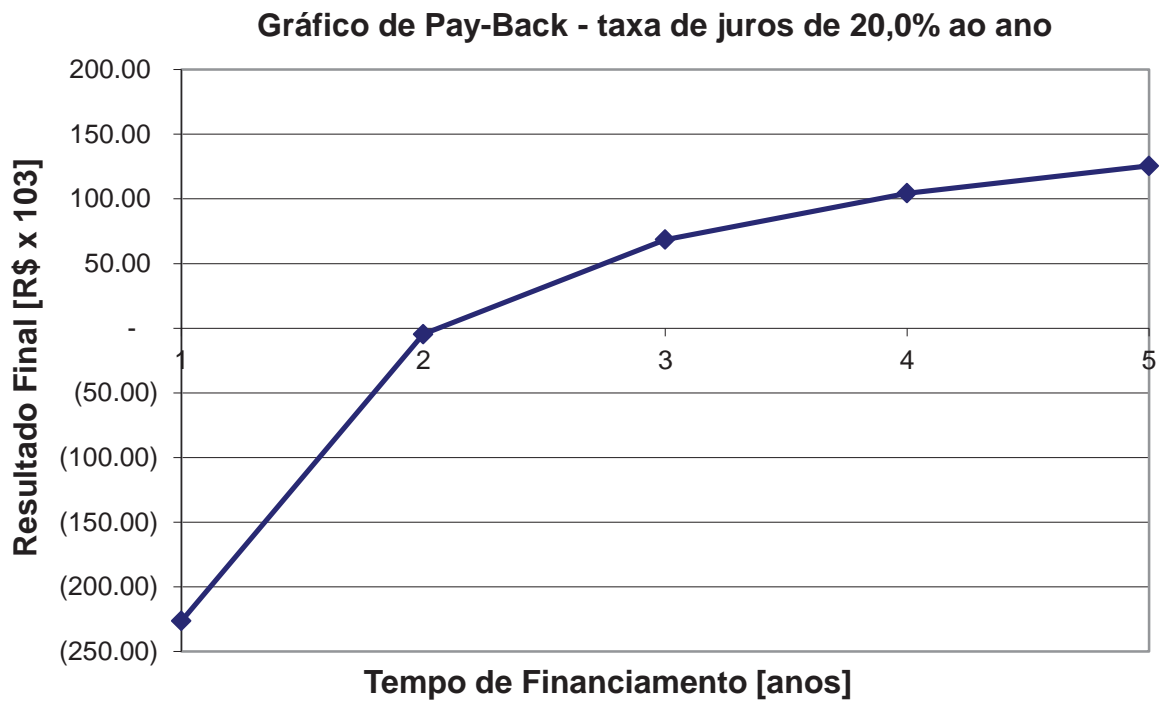


Fig. 6.8 – Gráfico referente ao pay-back

7. CONCLUSÕES

O estudo deste trabalho possibilita um entendimento geral dos sistemas de termoacumulação e suas aplicações. Esta tecnologia utiliza-se de mecanismos relativamente simples que propiciam à economia financeira e energética, dependendo de sua aplicação.

A partir dos valores de consumo e demanda do estabelecimento estudado e a configuração dos equipamentos existentes, pode-se traçar um comparativo entre as propostas de termoacumulação e a atual situação. É possível notar, através da análise técnico-econômica que as duas propostas tem um custo total praticamente iguais. Isto se deve aos diferentes escalonamentos das cargas nas duas configurações.

A escolha da melhor configuração se baseou principalmente na análise termodinâmica. A primeira proposta necessita de um volume menor de água gelada acumulada, reduzindo assim os custos com equipamentos a serem adquiridos. Considerando o custo de equipamento diretamente proporcional ao volume acumulado, há uma redução de 433% de investimento da proposta escolhida para a preterida.

O cálculo de payback elucida a vantagem da substituição do sistema de ar condicionado e refrigeração vigente pelo sistema de termoacumulação, dado que apresenta um valor considerado satisfatório.

A aplicação e disseminação desta tecnologia vem ganhado cada vez mais destaque e importância, visto que nos dias atuais é de suma importância a busca por soluções que promovam sistemas mais eficientes que, conseqüentemente, contribuem para uma economia e consumo racional e eficiente dos recursos hoje disponíveis na natureza para usufruto do homem.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALESTIERI, José Antônio Perrella. **Aula 12 - Capítulo 6 - Ciclos de refrigeração.** Disponível em: <http://intranet.feg.unesp.br/aa/material/Perrella/Aulas/Aula_12.pdf>. Acesso em: 07 set. 2011.

BALESTIERI, José Antônio Perrella. **Aula 13 - Capítulo 7 - Ar condicionado.** Disponível em: <http://intranet.feg.unesp.br/aa/material/Perrella/Aulas/Aula_13.pdf>. Acesso em: 07 set. 2011.

BIONNOVATION. **Bionnovation - implantes e biomateriais.** Disponível em: <<http://www.bionnovation.com.br/empresa.html>>. Acesso em: 07 set. 2011.

CHUMIOQUE, José Jaime Ravelo. **Simulação de um Sistema de Refrigeração com Termoacumulação operando em Regime Transiente.** 2004. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <<http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/>>. Acesso em: 03 set. 2011.

CREDER, Hélio. **Instalações de Ar Condicionado.** Rio de Janeiro: LTC, 1996.

DSI TANQUES. **Tanques.** Disponível em: <<http://www.tanques.com.br/tanques.html>>. Acesso em: 01 dez. 2011.

EDP BANDEIRANTE. **Tarifa para o Fornecimento de energia elétrica.** Disponível em: <http://www.bandeirante.com.br/energia/utilidades/informacoes_comerciais/pdf/Tarifas_%20para_o_Fornecimento_de_EnergiaEl%C3%A9trica_%20outubrode%202010completagrupoAeB.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2011.

ELETROBRÁS. **Termoacumulação.** Disponível em: <<http://www.eletronbras.gov.br/elb/procel/main.asp?TeamID={6781720A-214C-471B-96F1-389CEFE46615}>>. Acesso em: 27 ago. 2011.

EMEREL. **Condicionadores de ar.** Disponível em: <<http://www.emerel.com.br/condicionadores-ar.htm>>. Acesso em: 20 nov. 2011.

GASCO. **Diagram R-410A**. Disponível em: <<http://www.gasco.nl/documents/logp-h/Log%28p%29-h%20diagram%20R410A.pdf>>. Acesso em: 16 nov. 2011.

KBR. **Unitized Chiller**. Disponível em: <<http://www.kbr.com/Technologies/Proprietary-Equipment/Unitized-Chiller/>>. Acesso em: 20 set. 2011.

LEE, Alexandre. **Otimização dos sistemas de climatização e refrigeração industrial em supermercados**. 2007. 57 f. Monografia (Graduação) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

LEE, John F.; SEARS, Francis Weston. **Termodinâmica**. Massachusetts: Ao Livro Técnico S. A., 1969.

MATOS, Rudmar Serafim. **8 - Termoacumulação**. Disponível em: <ftp://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM182/CLIMATIZACAO/apostila/8_TERMOACUMULACAO.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2011.

OLIVEIRA JÚNIOR, Sílvio de et al. **Sistemas de Refrigeração por Absorção**. Disponível em: <<http://143.107.98.150/PME2517/sistRefrigeracaoAbsorcao.pdf>>. Acesso em: 28 out. 2011.

PENA, Sérgio Meirelles. **Sistemas de Ar Condicionado E Refrigeração**. Disponível em: <<http://www.eletronbras.com/elb/procel/services/DocumentManagement/FileDownload.EZTSvc.asp?DocumentID={3E2EBDF8-1506-48A8-89AC-4E2B96B6754D}&ServiceInstUID={AEBE43DA-69AD-4278-B9FC-41031DD07B52}>>>. Acesso em: 25 jul. 2011.

POLISERVICE. **Refrigeração para indústrias**. Disponível em: <<http://www.poliservice.com.br/aplicacoes/refrigeracao-para-industrias/>>. Acesso em: 20 set. 2011.

PROCEL. **Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial e Comercial: Manual Prático**. Disponível em: <http://www.alltech.ind.br/pdf/Manual_PROCEL.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2011.

PROJECTOS, Saema. **Máquinas de refrigeração de absorção**. Disponível em: <<http://www.saemaprojectos.com/index.php>>. Acesso em: 20 set. 2011.

SANTOS, Afonso Henrique Moreira et al. **Conservação de Energia: Eficiência e Energética de Equipamentos e Instalações**. Itajubá: Fupai, 2006.

SONNTAG, Richard E.; BORGNACK, Claus; WYLEN, Gordon J. Van. **Fundamentos da Termodinâmica**. São Paulo: Edgard Blucher, 2003.

STOECKER, W. F.; JABARDO, J. M. Saiz. **Refrigeração Industrial**. São Paulo: Edgard Blücher LTDA., 2002.

STOECKER, W. F.; JONES, J. W.. **Refrigeração e Ar Condicionado**. São Paulo: Mcgraw-hill do Brasil, 1985.

VENTURINI, O. J., Pirani, M. J., 2005. **Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial e Comercial**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

WEG. **Guia de aplicação: Inversores de frequência**. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/52526235/35/Ciclo-de-Chiller-tipo-Compressao-de-Vapor>>. Acesso em: 05 dez. 2011.

9. APÊNDICE

APÊNDICE A – Cálculo das novas demandas propostas

- Proposta 1:
 - Demanda a ser acumulada = $500 \text{ kW} \times 3 \text{ horas} = 1.500 \text{ kWh}$
 - Tempo de distribuição = 11 horas
 - Nova demanda = $1.500 \text{ kWh} / 11 \text{ horas} = 136,36 \text{ kW}$
 - Carga a ser acumulada = $650 \text{ TR} \times 3 \text{ horas} = 1.950 \text{ TR. hora}$
 - Tempo de distribuição = 11 horas
 - Nova carga = $1.950 \text{ TR. hora} / 11 \text{ horas} = 177,25 \text{ TR}$

- Proposta 2:
 - Demanda a ser acumulada = $500 \text{ kW} \times 13 \text{ horas} = 6.500 \text{ kWh}$
 - Tempo de distribuição = 21 horas
 - Nova demanda = $6.500 \text{ kWh} / 21 \text{ horas} = 309,52 \text{ kW}$
 - Carga a ser acumulada = $650 \text{ TR} \times 13 \text{ horas} = 8.450 \text{ TR.hora}$
 - Tempo de distribuição = 21 horas
 - Nova carga = $8.450 \text{ TR. hora} / 21 \text{ horas} = 402,4 \text{ TR}$

APÊNDICE B – Tarifação da energia elétrica

- Cálculo do custo do consumo:

$$\begin{aligned} \text{PONTA} &= \frac{\left(0,25073 \frac{\text{R\$}}{\text{kWh}}\right) \cdot 7 \text{ meses} + \left(0,22739 \frac{\text{R\$}}{\text{kWh}}\right) \cdot 5 \text{ meses}}{12 \text{ meses}} \\ &= 0,24101 \text{ R\$/kWh} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{FORA DE PONTA} &= \frac{\left(0,15884 \frac{\text{R\$}}{\text{kWh}}\right) \cdot 7 \text{ meses} + \left(0,14530 \frac{\text{R\$}}{\text{kWh}}\right) \cdot 5 \text{ meses}}{12 \text{ meses}} \\ &= 0,15320 \text{ R\$/kWh} \end{aligned}$$

- Cálculo do custo da demanda:

$$\text{PONTA} = \frac{\left(30,56 \frac{\text{R\$}}{\text{kW}}\right) \cdot 7 \text{ meses} + \left(30,56 \frac{\text{R\$}}{\text{kW}}\right) \cdot 5 \text{ meses}}{12 \text{ meses}} = 30,56 \text{ R\$/kW}$$

$$\text{FORA DE PONTA} = \frac{\left(7,35 \frac{\text{R\$}}{\text{kW}}\right) \cdot 7 \text{ meses} + \left(7,35 \frac{\text{R\$}}{\text{kW}}\right) \cdot 5 \text{ meses}}{12 \text{ meses}} = 7,35 \text{ R\$/kW}$$

APÊNDICE C – Cálculos das análises de custos das propostas apresentadas

- Sistema atual:

- Custo na ponta mensal (consumo) = $29.458 \frac{\text{kWh}}{\text{mês}} \times \frac{0,24101\text{R\$}}{\text{kWh}} =$
 $\text{R\$ } 7.099,67 \times \frac{1}{1-0,18} = \text{R\$ } 8.658,14/\text{mês}$
- Custo fora de ponta mensal (consumo) = $158.811 \frac{\text{kWh}}{\text{mês}} \times \frac{0,15320\text{R\$}}{\text{kWh}} =$
 $\text{R\$ } 24.329,85 \times \frac{1}{1-0,18} = \text{R\$ } 29.670,54/\text{mês}$
- Custo na ponta mensal (demanda) = $500 \frac{\text{kW}}{\text{mês}} \times 30,56 \frac{\text{R\$}}{\text{kW}} =$
 $\text{R\$ } 15.280,00 \times \frac{1}{1-0,18} = \text{R\$ } 18.634,15/\text{mês}$
- Custo fora de ponta mensal (demanda) = $500 \frac{\text{kW}}{\text{mês}} \times 7,35 \frac{\text{R\$}}{\text{kW}} =$
 $\text{R\$ } 3.675,00 \times \frac{1}{1-0,18} = \text{R\$ } 4.481,71/\text{mês}$
- **Custo mensal total = R\$ 61.444,54/mês**

- Proposta 1:

- Custo na ponta mensal (consumo) = R\$ 0,00/mês.
- Custo fora de ponta mensal (consumo) =
 $(29.458 + 158.811) \frac{\text{kWh}}{\text{mês}} \times \frac{0,15320\text{R\$}}{\text{kWh}} = \text{R\$ } 28.842,81 \times \frac{1}{1-0,18} =$
 $\text{R\$ } 35.174,16/\text{mês}$
- Custo na ponta mensal (demanda) = R\$ 0,00/mês
- Custo fora de ponta mensal (demanda) = $500 \frac{\text{kW}}{\text{mês}} \times 7,35 \frac{\text{R\$}}{\text{kW}} =$
 $\text{R\$ } 3.675,00 \times \frac{1}{1-0,18} = \text{R\$ } 4.481,71/\text{mês}$
- **Custo mensal total = R\$ 39.655,87/mês**

- Proposta 2:

- Custo na ponta mensal (consumo) = R\$ 0,00/mês.
- Custo fora de ponta mensal (consumo) =
 $(29.458 + 158.811) \frac{\text{kWh}}{\text{mês}} \times \frac{0,15320\text{R\$}}{\text{kWh}} = \text{R\$ } 28.842,81 \times \frac{1}{1-0,18} =$
 $\text{R\$ } 35.174,16/\text{mês}$
- Custo na ponta mensal (demanda) = R\$ 0,00/mês

- Custo fora de ponta mensal (demanda) = $309,52 \text{ kW} \times 7,35 \frac{\text{R\$}}{\text{kW}} =$
 $\text{R\$ } 2.274,97 \times \frac{1}{1-0,18} = \text{R\$ } 2.774,35/\text{mês}$
- **Custo mensal total = R\$ 37.948,51/mês**

APÊNDICE D – Cálculos referentes às análises energéticas das propostas ofertadas

Dados: $\rho_{\text{água}} = 997 \text{ kg/m}^3$; $c_{p,\text{água}} = 4,186 \text{ kJ/kg.K}$; $\Delta T = 8 \text{ }^\circ\text{C}$

- Proposta 1:

- Cálculo do volume de água acumulado:

- $Q_{\text{acu}} = 177,25 \text{ TR} \times 3,517 \frac{\text{kW}}{\text{TR}} \times 11 \text{ h} \times 3.600 \frac{\text{s}}{\text{h}} =$
24.706.044 kJ
 - $m_{\text{acu}} = 24.706.044 \text{ kJ} / (4,186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}} \cdot 8 \text{ K}) = 737.758,12 \text{ kg}$
 - $V_{\text{acu}} = 1,15 \times (737.758,12 \text{ kg} / (977 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})) = 868,395 \text{ m}^3$
 - $\dot{Q}_{\text{chiller}} = 325 \text{ TR} = 1.144 \text{ kW} \times 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} = 4.118.400 \text{ kJ/h}$
 - $m_{\text{chiller}} = 4.118.400 \text{ kJ} / (4,186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}} \cdot 8 \text{ K}) = 122.981,37 \text{ kg/h}$
 - $V_{\text{chiller}} = (122.981,37 \text{ kg/h}) / (977 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) = 123,351 \text{ m}^3/\text{h}$
 - Número de chillers = 2
 - $t = 868,395 \text{ m}^3 / (2 \text{ chillers} \times 123,351 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}) = 3,52 \text{ horas}$

- Proposta 2:

- Cálculo do volume de água acumulado:

- $Q_{\text{acu}} = 402,4 \text{ TR} \times 3,517 \frac{\text{kW}}{\text{TR}} \times 21 \text{ h} \times 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} =$
106.992.204 kJ
 - $m_{\text{acu}} = 106.992.204 \text{ kJ} / (4,186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}} \cdot 8 \text{ K}) = 3.194.941,61 \text{ kg}$
 - $V_{\text{acu}} = 1,15 \times (3.194.941,61 \text{ kg} / (977 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3})) = 3.760,68 \text{ m}^3$
 - $\dot{Q}_{\text{chiller}} = 325 \text{ TR} = 1.144 \text{ kW} \times 3600 \frac{\text{s}}{\text{h}} = 4.118.400 \text{ kJ/h}$
 - $m_{\text{chiller}} = 4.118.400 \text{ kJ} / (4,186 \frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}} \cdot 8 \text{ K}) = 122.981,37 \text{ kg/h}$
 - $V_{\text{chiller}} = (122.981,37 \text{ kg/h}) / (977 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}) = 123,351 \text{ m}^3/\text{h}$
 - Número de chillers = 2
 - $t = 3.760,68 \text{ m}^3 / (2 \text{ chillers} \times 123,351 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}) = 15,24 \text{ horas}$

APÊNDICE E – Dimensionamento do tanque para acumulação de água gelada

Dados: razão altura/diâmetro para tanque cilíndrico = 0,5; custo do metro cúbico = \$ 260,09/m³; cotação do dólar: \$ 1,00 = R\$ 1,80

- Proposta 1:
 - Volume de água acumulado = 868,395 m³
 - Diâmetro = 13 metros
 - Altura = 6,5 metros
 - Custo do tanque = R\$ 406.549,54

- Proposta 2:
 - Volume de água acumulado = 3.760,68 m³
 - Diâmetro = 21,25 m
 - Altura = 10,63 m
 - Custo do tanque = R\$ 1.760.607,47