

# 1 Introdução

Atualmente o custo da energia é um dos fatores mais importantes no projeto, administração e manutenção de sistemas energéticos. Sendo assim, a economia de energia está recebendo maior atenção por parte dos projetistas destes sistemas.

Por outro lado, alguns estudos técnicos e econômicos mostram que grande parte da energia é desperdiçada pelos sistemas de condicionamento de ar, por apresentarem uma série de ineficiências. Isto se deve a várias causas, mas as principais são as falhas na manutenção e o projeto inadequado de seus componentes. No último caso, o consumo de energia é maior quando o sistema trabalha a cargas parciais.

Para melhorar as deficiências acima mencionadas duas técnicas, entre outras, podem ser empregadas: a otimização do projeto, via simulação numérica, e a termoacumulação.

A **simulação numérica** é uma ferramenta para o desenvolvimento e otimização de sistemas de refrigeração.

A **termoacumulação** consiste na produção e acumulação de gelo ou água gelada em tanques, capaz de eliminar a dependência entre a produção e consumo, ou entre a oferta e a demanda, o que permite operar os sistemas de condicionamento de ar de forma mais eficiente.

A termoacumulação é uma técnica bastante antiga e bem conhecida. No passado, quando não havia crise de energia elétrica, sua aplicação destinava-se apenas a casos de cargas relativamente grandes, de pequena duração e muito espaçadas no tempo. Hoje, os candidatos a um sistema de termoacumulação são os sistemas que têm cargas altas nas horas de ponta, ou seja, os que têm um incentivo econômico grande para deslocar estas cargas para as horas fora de ponta, onde as tarifas são menores.

O armazenamento em água em relação ao gelo tem como principal vantagem a temperatura de evaporação no ciclo de refrigeração mais elevada do que a observada quando da utilização de gelo. O processo global é mais eficiente,

consumindo, assim, menos energia. Uma outra vantagem é que esta utiliza um sistema de refrigeração convencional (“chillers”) ao qual se incorpora facilmente um tanque de armazenamento cujo funcionamento pode ser simultâneo ao do “chiller”.

Em todo projeto de condicionador de ar de grande porte o chiller sempre figura, entre seus componentes, como o que mais contribui para o custo de investimento de operação. Porém, o tanque de armazenamento e a torre de resfriamento precisam também de muita atenção na otimização econômica do sistema de refrigeração.

Neste contexto se faz necessário desenvolver modelos de simulação em apoio à análise e seleção dos equipamentos de sistemas de refrigeração com termoacumulação.

### **1.1. Objetivo e relevância**

O presente trabalho modela e analisa um sistema de refrigeração para sistemas de condicionamento de ar em de edifícios, composto por um sistema de compressão de vapor de grande porte, chamado comumente de chiller, um tanque de armazenamento de água gelada e uma torre de resfriamento.

Consideram-se as vantagens dos sistemas de termoacumulação no armazenamento de energia térmica durante os períodos de baixa demanda de carga, a qual é armazenada e utilizada posteriormente em períodos de alta demanda, ou elevada tarifa.

Para o desenvolvimento do modelo utilizam-se as equações constitutivas e as equações de conservação da massa e energia em todos seus componentes.

O modelo permite obter as condições de funcionamento ótimo do sistema de refrigeração, reduzindo o volume de seus componentes (menor custo de investimento) e o consumo da energia (custo de operação) em concordância com o diagrama de carga térmica da instalação.

O modelo considera as variações da temperatura do meio ambiente ao longo do dia (transiente horário) para estudar sua influência no desempenho global do sistema de refrigeração.

Uma vez desenvolvido, o modelo pode ser aplicado para obter as características de funcionamento dos componentes do sistema de refrigeração para

instalações diversas, permitindo otimizar investimentos, reduzir custos e impactos ambientais.

## 1.2. Definição do sistema a ser estudado

Este trabalho teve por ponto de partida o prédio Cardeal Leme da PUC-Rio cuja demanda máxima de cada bloco, em um dia típico, fica entre 200 e 360 toneladas de refrigeração (ver apêndice 7.2). Trata-se, portanto, de um sistema de refrigeração de grande porte, usando um ou vários chillers, os quais podem ter condensação a água ou a ar. No caso de condensação a água, pode-se usar também uma ou várias torres de resfriamento. Mesmo assim, para melhorar ainda mais o desempenho do sistema, é avaliado aqui o uso de um tanque para o armazenamento da água gelada. A inclusão da termoacumulação adiciona o custo do tanque ao sistema, ao mesmo tempo em que reduz capacidade de produção instantânea de frio (inércia térmica). Uma análise de diferentes sistemas ou de capacidades de termoacumulação pode levar a menores custos iniciais e, principalmente, de operação (e, conseqüentemente, ao custo total ótimo).

Neste sentido, o sistema básico deste estudo estará composto por um sistema típico de água gelada, o qual é mostrado a seguir na Figura 1 (Dorgan, 1993).

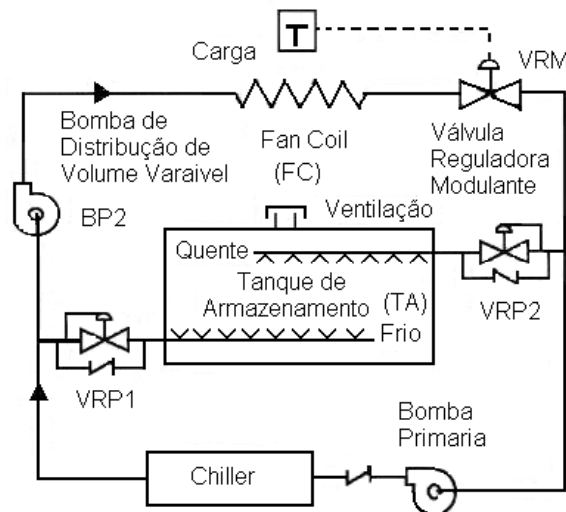


Figura 1- Sistema típico de água gelada.

### 1.3. Descrição do sistema global

O sistema completo é organizado em blocos, ou subsistemas, apresentados a seguir:

#### 1.3.1. Subsistema primário

O subsistema primário, mostrado na Figura 2, é uma central de água gelada, ou chiller, baseado num ciclo de refrigeração por compressão de vapor com o refrigerante R-22, de grande uso comercial para sistemas de ar condicionado.

Seus componentes principais são: motor-compressor, condensador, válvula de expansão e evaporador.

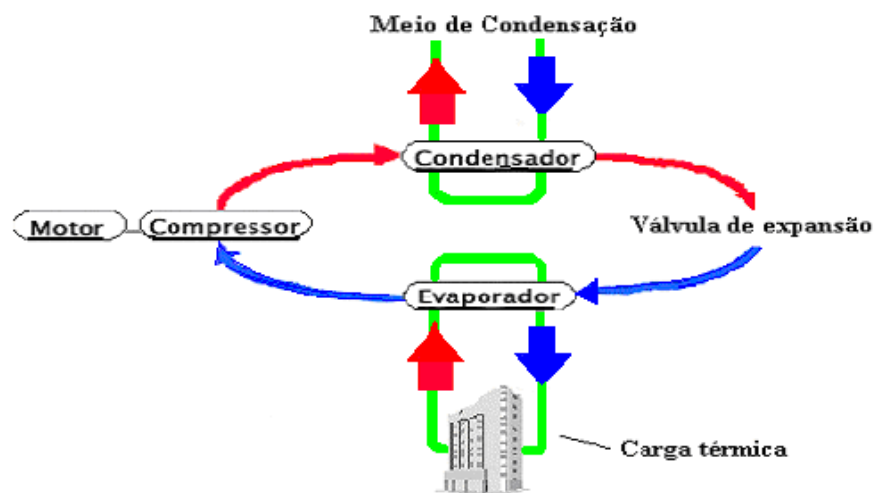


Figura 2- Subsistema primário

#### 1.3.2. Subsistema secundário ou de distribuição

É um sistema hidráulico que tem como fluido de trabalho água (figura 1) e seus componentes principais são: um tanque de armazenamento (TA), uma bomba de água primária (BP1), uma bomba de distribuição de volume variável (BP2), uma válvula reguladora de alta pressão (VRP1), uma válvula reguladora de baixa

pressão (VRP2), um conjunto de unidades de condicionamento de ar (fan-coils) e uma válvula de reguladora modular.

### 1.3.3. Subsistema auxiliar

O subsistema auxiliar é usado para o resfriamento da água do condensador e está composto, basicamente, por uma torre de resfriamento e uma bomba de água de recirculação.

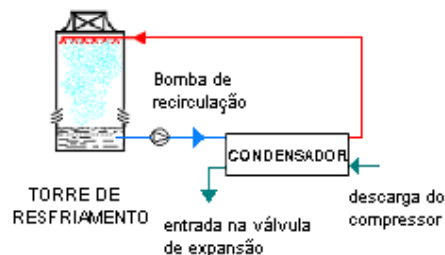


Figura 3- Subsistema auxiliar

## 1.4. Características e alternativas de uso dos componentes do sistema global

O sistema a ser estudado, na realidade, consta de vários outros componentes e controles de comando, mas para este estudo só são considerados os equipamentos seguintes: o chiller, o tanque de armazenamento, e a torre de resfriamento. Mais detalhes são apresentados no capítulo 2.

No caso de componentes como o compressor, a torre de resfriamento e o tanque de armazenamento, o estudo fica restrito ao desenvolvimento de um modelo que permita fazer a análise da influência dos tipos mais adequados ao diagrama de carga, ou à variação de carga térmica. Procura-se que esses componentes sejam os mais adequados, empregando-se equipamentos de bom desempenho seguindo-se as recomendações dos respectivos fabricantes. Assim, para as alternativas para o compressor, são analisados os tipos parafuso ou

centrífugo. As torres de resfriamento são “de contato direto” e, no caso do tanque, este será aberto para atmosfera e localizado ao nível do solo.

O sistema poderá, então operar segundo os casos apresentados na seguinte tabela.

Tabela 1: Configurações avaliadas

Caso	Tipo de Chiller	Tipo de Condensador	Armazenamento de Água Gelada	Tipo de Torre
I	Parafuso	A água	Não	Contato direto
II	Centrífugo	A água	Não	Contato direto
III	Parafuso	A água	Tanque Aberto	Contato direto
IV	Centrífugo	A água	Tanque Aberto	Contato direto

O estudo considera os casos I e III como bases, como fins para estabelecer as vantagens da termoacumulação.

### 1.5. Funcionamento do sistema global

Neste sistema utiliza-se como refrigerante primário R-22, o qual circula através do chiller para trocar calor com a água que pode retornar dos fan-coils, do tanque de armazenamento ou de ambos, resultando em quatro diferentes modos de operação, apresentados no capítulo 2.

No chiller, o refrigerante R-22 realiza um ciclo de compressão de vapor simples, composto por os seguintes processos:

- 1-2 Compressão de vapor politrópica,
- 2-3 Condensação isobárica,
- 3-4 Expansão isoentalpica,
- 4-1 Evaporação isobárica.

Para melhorar o funcionamento do chiller utiliza-se um ciclo de compressão de vapor modificado, como mostrado na figura 4, com os estados 1 e 3, respectivamente deslocados à direita (superaquecimento) e à esquerda (sub-resfriamento), controlando, deste modo, a temperatura de entrada no compressor e no dispositivo de expansão.

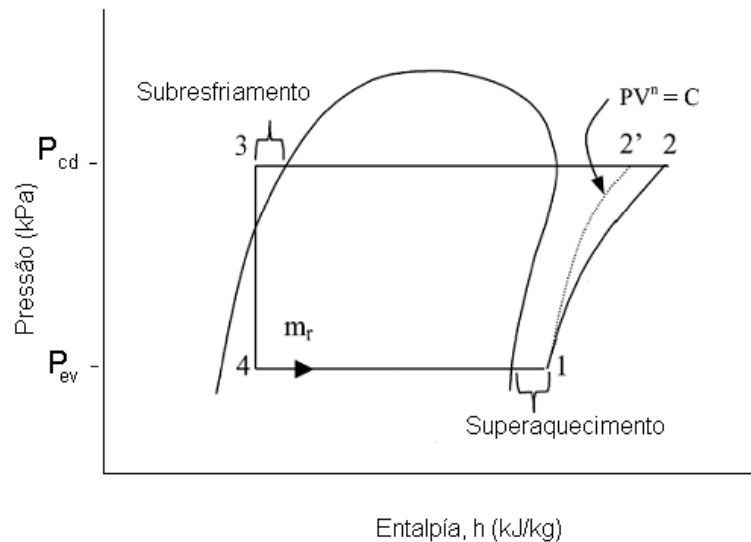


Figura 4 - Ciclo de refrigeração modificado

O funcionamento geral do sistema resulta por uma ação conjunta do sistema de refrigeração por compressão de vapor junto com o tanque de armazenamento. As condições de operação vão se alterando para atender à carga térmica a cada hora; ou seja, o tanque será carregado e descarregado ao longo do dia.

### 1.6. Termoacumulação

A termoacumulação atingiu nos últimos tempos um papel importante nos processos de ar condicionado de ambientes. É por isso, que seu estudo e conhecimento tornaram-se indispensáveis aos processos de condicionamento de ar ou de refrigeração.

O meio de termoacumulação pode ser água gelada, gelo, ou uma solução salina de comportamento eutético (para temperaturas muito baixas).

### 1.6.1. Objetivos da termoacumulação

A termoacumulação surge como conseqüência da necessidade de reduzir o consumo de energia nas horas de ponta, cujo custo é relativamente elevado. Além disso, obtém-se uma redução na demanda contratada.

O interesse na termoacumulação para as aplicações comerciais surgiu com o aumento, nos anos setenta e oitenta, do consumo elétrico, quando as companhias de geração reconheceram a necessidade de reduzir a máxima demanda (entre 17 e 22 horas).

### 1.6.2. Estratégias de operação

O desempenho dos sistemas de termoacumulação depende do modo como se desliga o resfriador (chiller) nas horas de ponta. Normalmente a economia propiciada pelo desligamento, compensa a diferença do custo inicial entre sistemas com e sem termoacumulação.

O custo da termoacumulação permite, também, operar o sistema a uma carga constante, o que aumenta a eficiência do “chiller” devido à operação com carga constante nas horas noturnas, onde a temperatura de condensação é mais baixa.

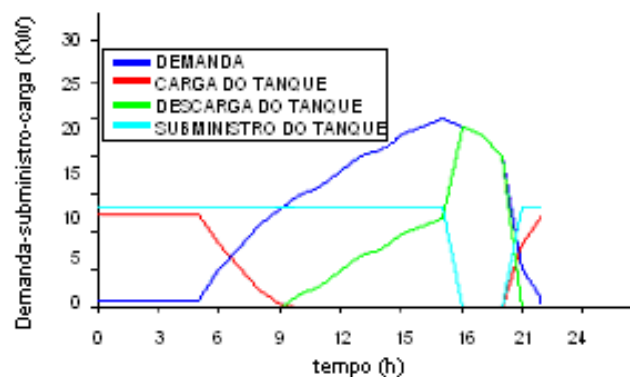


Figura 5- Diagrama de carga atendida com termoacumulação

Na Figura 5 observa-se a carga horária atendida com um “chiller” e um armazenador. A potência máxima demandada pelo chiller é reduzida pelo



processo de termoacumulação. A seguir são apresentadas as estratégias de armazenamento existentes.

### 1.6.2.1. Armazenamento total

Esta estratégia consiste em transferir a carga de frio na 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. Estes sistemas normalmente requerem equipamentos e tanques de armazenamento grandes. Tem muita aceitação onde a demanda na ponta é alta e o período de ponta é de curta duração. O sistema de refrigeração é relativamente simples.

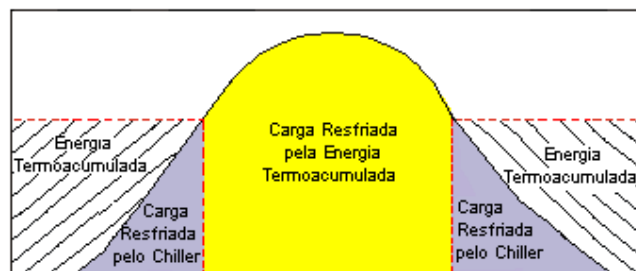


Figura 6- Armazenamento a carga total

Na figura 6 observa-se que o chiller deixa de funcionar no período de máxima demanda onde a energia acumulada é utilizada. Esta técnica aplica-se quando a máxima demanda coincide com o período de pico e o custo de energia neste é mais alto (Dorgan, 1993).

### 1.6.2.2. Armazenamento parcial com nivelamento de carga

No armazenamento parcial, uma parte da carga na ponta é suprida pelo “chiller” e a outra, pelo termoacumulador. É subdividido em carga nivelada e demanda limitada.

Num sistema de carga nivelada, o equipamento de refrigeração opera em regime constante 24 horas por dia. No caso de demanda limitada, o “chiller” opera a capacidade reduzida e só em alguns casos chega a 100% da capacidade.

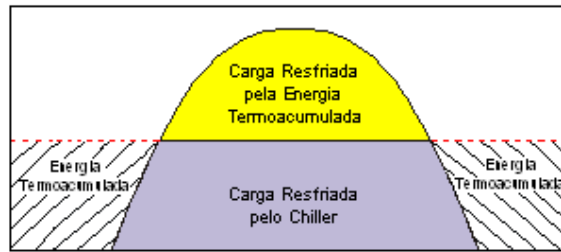


Figura 7- Operação a carga nivelada

Na Figura 7 observam-se o caso de uma demanda atendida com um sistema de termoacumulação com carga nivelada. A linha de potência sem termoacumulação (curva) é nivelada a um consumo constante (linha horizontal), reduzindo a potência instalada dos equipamentos e funcionando ao máximo da eficiência.

Este método é usado geralmente para reduzir a potência instalada, mantendo constante o funcionamento dos equipamentos.

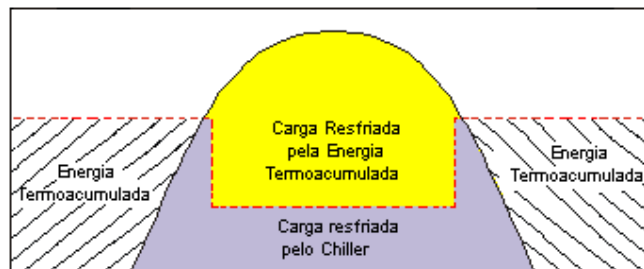


Figura 8- Operação com carga limitada

Na figura 8 tem-se o caso de termoacumulação com carga nivelada. 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 pela tarifa. A linha cheia (curva) da figura representa o diagrama de carga sem termoacumulação, a linha tracejada (descontínua) representa o diagrama após de aplicar a técnica (Dorgan, 1993).

### **1.6.2.3. Armazenamento com carga básica**

Tipicamente um “chiller” de eficiência elevada é usado para suprir o perfil de carga fora do pico. Um segundo, e menor, é responsável pelo armazenamento fora da ponta. Quando os dois juntos não dão conta da demanda, entra a energia armazenada. Neste método, podem ser aplicados o armazenamento parcial e o armazenamento total. No caso do armazenamento parcial, a energia no horário de pico é parcialmente assumida pelo segundo “chiller”. No caso de armazenamento total, no horário de pico, o segundo “chiller” não funciona (Dorgan, 1993).

### **1.6.2.4. Armazenamento operando com vários chillers**

Neste método usa-se um número variado de “chillers” para suprir a carga térmica, o que propicia um sistema modulado de carga. O uso de vários “chillers” incrementa a flexibilidade de refrigeração do sistema para diferentes condições de carga, e do horário de pico. Os diferentes tipos de termoacumulação são aplicados. Um fator importante é se, o sistema é novo, isto é, a ser adquirido, ou se já existe.

### **1.6.3. Acumuladores de calor sensível**

Nestes, o processo de acumulação se realiza através de uma diferença de temperatura entre duas regiões do mesmo fluido, uma quente e outra fria. Os acumuladores mais comuns utilizam a água ou as soluções salinas. No caso da água, os acumuladores podem ser de vários tipos, que são apresentados a seguir.

#### **1.6.3.1. Acumuladores por estratificação**

São utilizados quando se aproveita a tendência da água a formar camadas horizontais de massa específica e temperatura.

#### **1.6.3.2. Acumuladores de tanques múltiplos**

Quando se armazena o fluido de retorno num tanque diferente, a recuperação da energia se realiza em condições mais estáveis. Como utiliza pelo menos dois tanques, esta técnica demanda mais volume se comparado com o

método anterior. Os sistemas de controle e sistemas de bombeamento são diferentes.

### **1.6.3.3. Acumuladores de diafragma flexível**

Neste sistema um diafragma promove a separação entre a zona quente e a zona fria (Dorgan, 1993).

### **1.6.3.4. Acumuladores de labirintos**

O fluido refrigerante circula pelas tubulações, o material termoacumulador fica no labirinto. Este sistema é muito usado nos processos de refrigeração e conservação de alimentos (Dorgan, 1993).

## **1.7. Organização da dissertação**

O presente trabalho é desenvolvido em 5 capítulos. No segundo capítulo é descrito o modelo matemático de simulação dos componentes do sistema e do sistema global, com base na revisão bibliográfica feita, considerando as equações de balanço de massa, e energia além das equações de troca e as equações constitutivas necessárias para cada componente e também para o sistema global.

No capítulo 3 é apresentado o método de solução para o sistema completo, resultante dos modelos revisados e estudados para o chiller, a torre de resfriamento e o tanque de armazenamento de água gelada. Assim também a análise econômico comparativo de três estratégias de operação do sistema.

No capítulo 4 apresenta-se o resultado da simulação, assim como a análise de sensibilidade dos parâmetros do sistema e de seus componentes.

Finalmente, no capítulo 5 apresentam-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros que poderão ser desenvolvidos sobre este mesmo tema.