XX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica
SENDI 2012 - 22 a 26 de outubro
Rio de Janeiro - RJ - Brasil

Fábio Cezar Aidar Beneduce	Carlos Almir Monteiro de Holanda
Instituto Tecnológico e Vocacional Avançado	**Universidade Federal do Ceará**
fabio@iteva.org.br	almir@ufc.br

Desenvolvimento de sistema de climatização robusto de expansão indireta com termoacumulação para produção abaixo de 10 TR, com alta eficiência.

Palavras-chave

ar condicionado
baixo custo
eficiência
refrigeração
robusto
termoacumulação

Resumo

A utilização da energia elétrica é, atualmente, uma preocupação mundial. A refrigeração destaca-se como sendo grande consumidora de energia elétrica, devido principalmente aos compressores. É crescente o uso de climatizadores nos mais diversos setores, não existindo no mercado um sistema de pequeno e médio porte, que opere por processo de expansão indireta com termoacumulação.

Visando maior eficiência em climatização, está sendo pesquisado e desenvolvido um sistema por expansão indireta, através do resfriamento de líquidos, tendo acoplamento direto de reservatório termoacumulador subterrâneo, para pequenos e médios comerciantes (abaixo de 10 TR), com materiais de valor reduzido/eficiente.

A termoacumulação permite reduzir em até 70% a carga energética para esta função, e nos horários de pico propicia a condição do desligamento de grande parte dos equipamentos elétricos desse sistema. Como o sistema opera também no período noturno, há maior eficiência na troca de calor e o resultado é economia de energia que pode chegar a 20%.

Este trabalho está sendo financiado pelo programa de Pesquisa e Desenvolvimento da ANNEL (Lei 9991/2000), junto a Companhia Energética do Ceará - Coelce.

1. Introdução

Atualmente o custo da energia elétrica é um dos fatores importantes na definição dos equipamentos em um projeto de condicionamento de ar. Segundo dados do PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica), o consumo de energia elétrica dos condicionadores de ar em prédios públicos é de 48% e em prédios comerciais é de 47%. Assim, a economia de energia elétrica está recebendo maior atenção por parte dos engenheiros que projetam sistemas de condicionamento de ar.

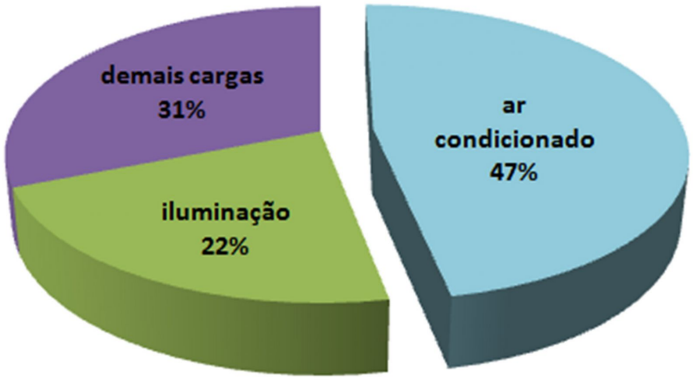

FIGURA 1: Consumo de energia elétrica no comércio. Fonte: PROCEL/2007.

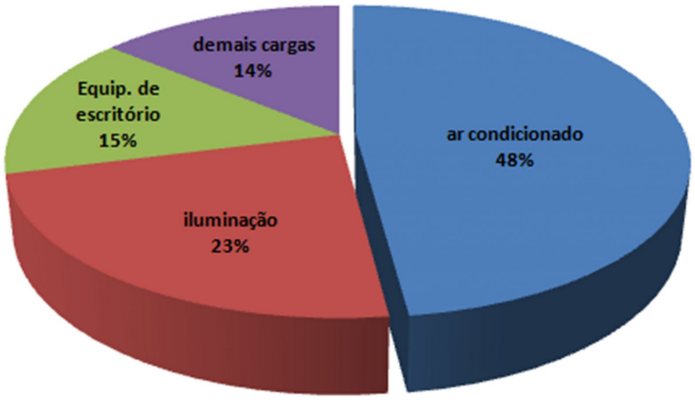

FIGURA 2: Consumo de energia elétrica em prédios públicos. Fonte: PROCEL/2007.

Estudos mostram que grande parte da energia é desperdiçada pelos sistemas de condicionamento de ar, por apresentarem uma série de ineficiências. Para melhorar essas deficiências um dos caminhos é utilizar a técnica de termoacumulação.

O interesse na termoacumulação surgiu com o aumento do consumo de energia elétrica, a partir dos anos setenta, quando as companhias de geração reconheceram a necessidade de reduzir demanda no horário de pico (entre 17 e 21 horas). A termoacumulação surge como consequência da necessidade de reduzir o consumo de energia nas horas de pico, cujo custo é relativamente elevado.

Além disso, a redução dos custos com equipamentos, o baixo custo de manutenção e a economia de energia elétrica nos horários de pico, no qual a energia tem um custo mais elevado, são algumas das vantagens do uso da termoacumulação.

O sistema de refrigeração em estudo foi montado para que se possam tirar as vantagens da termocumulação

no que se refere à eficiência energética, à carga instalada, ao baixo custo dos equipamentos em relação aos equipamentos disponíveis no mercado e a robustez dos elementos empregados para atender a nichos de mercados com uma menor potência do equipamento instalado do que estes.

Na apresentação serão expostos os princípios básicos de sistemas de refrigeração por termoacumulação, as suas vantagens e estratégias, os custos, e o estudo de caso prático que ocorre no trabalho de pesquisa e desenvolvimento em curso.

2. Desenvolvimento

2.1 Sistema de Refrigeração com termoacumulação

O sistema de refrigeração com termoacumulação é composto por compressor, condensador, válvula de expansão, tanque de armazenamento, bomba e *fan-coil*. Esse sistema tem seu funcionamento como um sistema de refrigeração indireta, ou seja, um sistema de expansão direta (sistema de refrigeração primário) resfria o fluido secundário que está dentro do tanque de armazenamento, em que o fluido gelado é circulado através da bomba que passa nos *fan-coil* que resfria o ambiente a ser climatizado (sistema de refrigeração secundário).

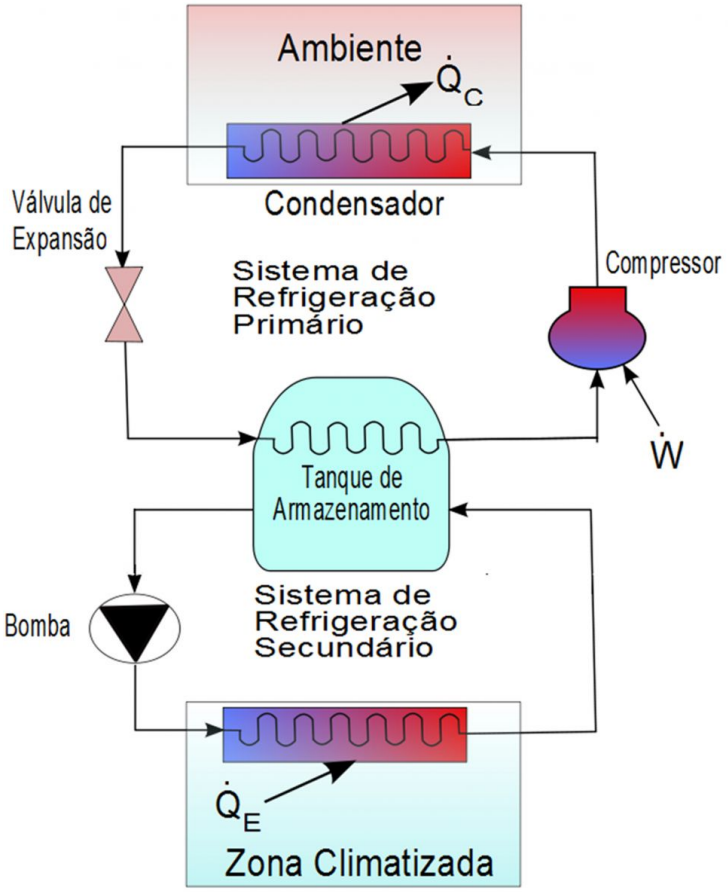

FIGURA 3: Representação de um sistema de refrigeração com termoacumulação.

2.1.1 Vantagens da termoacumulação

As principais vantagens da termoacumulação são mostradas a seguir:

- **Tamanho reduzido do sistema de refrigeração.** Os sistemas de refrigeração e condicionamento de ar com expansão direta (splits e janeleiros, por exemplo) são dimensionados para atender a carga

térmica de pico enquanto, que na termoacumulação o sistema tem um tamanho reduzido, pois é dimensionado para ser utilizado durante todo (ou grande parte) do dia, diminuindo o equipamento de refrigeração e aumentando a eficiência.

- **Menor custo operacional.** Dependendo do contrato entre distribuidora e consumidor a energia elétrica sofre variação no horário de pico (período de maior demanda elétrica). As taxas de energia elétrica são normalmente divididas em uma carga de demanda e uma taxa de consumo. Com o uso da termoacumulação, é possível o deslocamento do consumo para fora do horário de maior demanda, reduzindo tanto o valor pago pelo consumo, bem como a capacidade de fornecimento por parte da operadora de energia elétrica.
- **Economia do consumo de energia elétrica.** Apesar de a termoacumulação ser geralmente projetada para se adequar ao uso de energia em vez de economizar energia, o armazenamento muitas vezes reduz o consumo de energia. Sistemas de armazenamento de frio permitem que os chillers operem mais à noite quando a temperatura ambiente está mais baixa, melhorando assim a condensação, e com isso aumentando a eficiência do equipamento. O armazenamento permite a operação de equipamentos com carga completa, evitando o desempenho de carga parcial ineficiente. Exemplos documentados incluem instalações de armazenamento de água gelada que reduzem o consumo anual de energia para ar condicionado em até 12%.

2.1.2 Estratégias de termoacumulação

Existem algumas estratégias para o armazenamento do frio: armazenamento total, armazenamento parcial, armazenamento com carga limitada.

- Armazenamento da carga total

Essa estratégia consiste que o sistema de refrigeração opera com a capacidade total, e que seja desligado na hora de pico, quando a refrigeração é provida pela energia termoacumulada. Esses sistemas normalmente são usados em locais onde a demanda no horário de pico é alta.

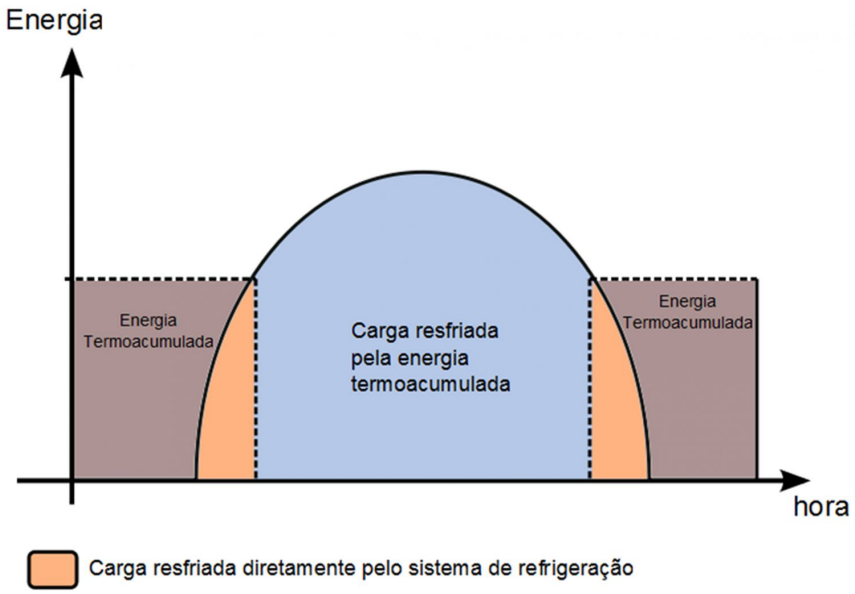

FIGURA 4: Armazenamento da carga total.

- Armazenamento com carga parcial

No armazenamento parcial, parte da carga no horário de pico é suprida pelo sistema de refrigeração e a outra, pela termoacumulação. Num sistema com carga parcial, o equipamento de refrigeração opera em

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

A figura 5 mostra um sistema de termoacumulação com carga parcial. A linha da carga térmica resfriada diretamente pelo sistema de refrigeração sem termoacumulação é um consumo constante, reduzindo a potência dos equipamentos instalados e funcionando com a eficiência máxima.

Este tipo de método de termoacumulação é utilizado geralmente para reduzir a potência dos equipamentos instalados, mantendo constante o funcionamento dos mesmos.

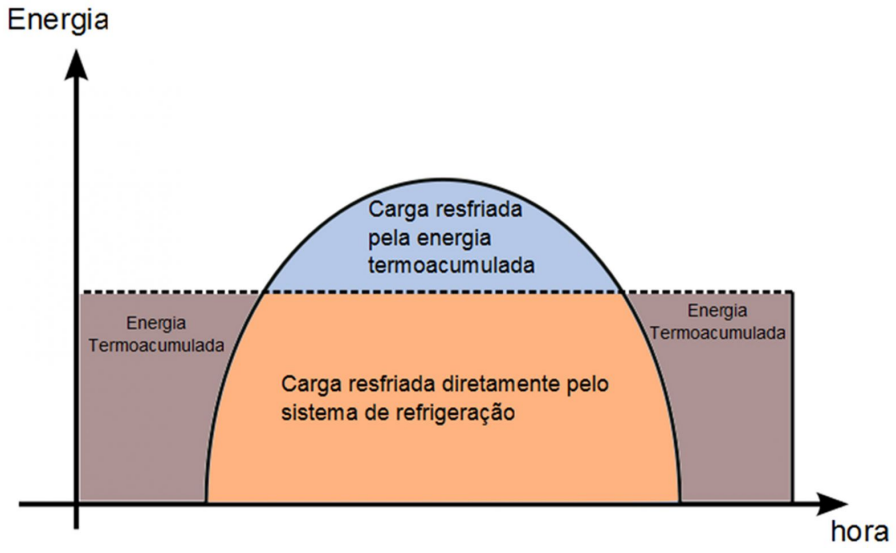

FIGURA 5: Armazenamento com carga parcial.

- Armazenamento com carga limitada

Neste tipo de termoacumulação o equipamento opera com uma carga reduzida no horário de pico. Em alguns casos, o sistema de refrigeração é controlado para que não se ultrapasse o limite permitido pela tarifa sazonal.

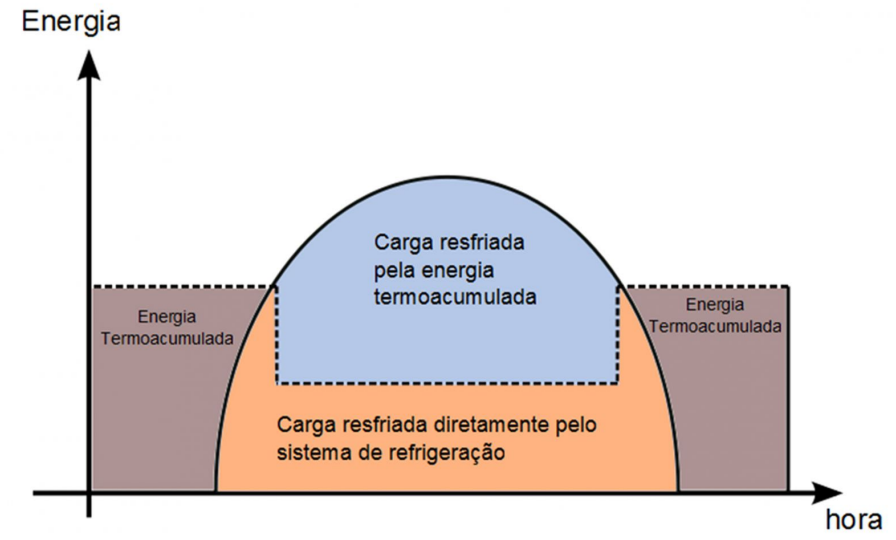

FIGURA 6: Armazenamento com carga limitada.

2.2 Estudo de Caso

O local em que está instalado o sistema de refrigeração é o Instituto Tecnológico Vocacional Avançado – ITEVA, localizado em Aquiraz, um município da região metropolitana de Fortaleza-CE. A ideia inicial é produzir um sistema de refrigeração com baixo custo dos equipamentos e que funcione de forma eficiente; para isso foi pensado em um sistema robusto e que trabalhe utilizado os benefícios da termoacumulação para atender os ambientes onde o mercado não oferece esse tipo de equipamento.

2.2.1 Seleção e dimensionamento do sistema

Como já foi mencionado anteriormente, a seleção dos equipamentos foi realizado pelo critério de menor custo e maior eficiência. Inicialmente foi feito o cálculo da carga térmica do local, que conta com dois locais que basicamente são utilizados para serviços de escritório; foi utilizado o método Série Radiante Temporal (RTS) para o cálculo da carga térmica dos ambientes a serem climatizados, conforme indicação da norma NBR 16401. O gráfico da figura 7 mostra o perfil de carga térmica estimado para os ambientes; a região compreendida ente 12:00 e 14:00 horas foi desconsiderada devido à ausência das pessoas no local por conta do horário de almoço. A carga possui um pico de aproximadamente 60 kW (17 TR).

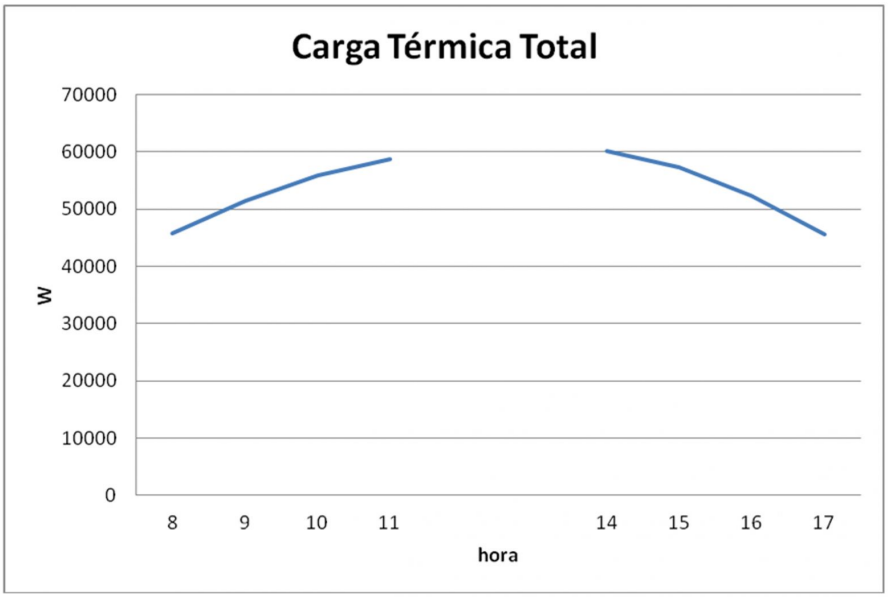

FIGURA 7: Perfil de carga térmica do ITEVA.

Para o sistema primário foi selecionado um compressor do tipo scroll e dois condensadores. Geralmente, no mercado, esses dois equipamentos são vendidos juntos, e são chamados de unidade condensadora; entretanto esses equipamentos foram comprados separados, pois assim tem menor custo. O compressor *scroll* é conhecido pela sua alta eficiência, baixo nível de ruído, e baixo custo operacional. O evaporador, feito com tubos de cobre, teve seu comprimento calculado em 150 metros para suprir a capacidade de refrigeração do sistema. Para regulagem da vazão do sistema foram utilizadas duas válvulas de expansão termostática. O fluido refrigerante utilizado foi o R-22 devido às características do sistema. Para o sistema secundário (termoacumulção) foi dimensionado um tanque com capacidade de 19000 litros, e foi embutido na terra por questões de melhoria no isolamento térmico. A água foi utilizada como fluido secundário devido ao seu baixo preço e disponibilidade. Duas bombas d'água levam essa água gelada aos trocadores de calor localizados nos ambiente do instituto. Os trocadores de calor *(fan-coils*) foram feitos com radiador automotivo e um ventilador de ar, porém, ainda estão em uma forma muito primitiva e estão sendo realizados estudos com o objetivo de melhorar a troca térmica destes com o ar. O radiador foi utilizado por possuir robustez e baixo custo, além de uma ótima troca térmica. Os equipamentos foram dimensionados para funcionarem juntos com cerca de 17,6 kW (5 TR) de capacidade. Nas figuras 8, 9 e 10 são mostradas uma representação esquemática do sistema e algumas imagens do sistema instalado.

FIGURA 8: Sistema de refrigeração primário.

FIGURA 9: Tanque para termoacumulação.

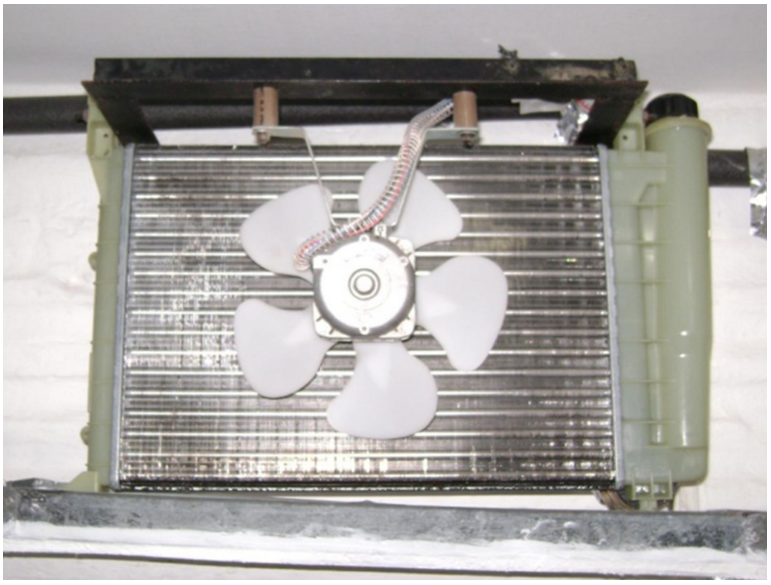

FIGURA 10: Trocadores de calor com o ar (fan-coil).

2.3 Custos da termoacumulação

Atualmente, um projeto para ser competitivo no mercado tem como um ponto fundamental, seus custos porque os clientes estão cada vez mais exigentes e as tecnologias para elaboração de produtos para que a empresa ganhe vantagem competitiva e se mantenha é preciso focar nos custos, garantindo um diferencial no mercado.

Uma comparação dos custos do sistema de refrigeração com termoacumulação com sistemas de expansão direta (*Splits)*, foi feita e nessa comparação foi calculado que o sistema de refrigeração com termocumulação tem o custo 45% mais baixo.

Esse custo mais baixo se deve ao fato de que equipamentos que não são dimensionados pelo pico, mas distribuídos ao longo de todo o dia e também pelo baixo custo do *fan-coil* e da tubulação.

3. Conclusões

A grande vantagem da instalação do sistema com termoacumulação foi de reduzir os custos relacionados à compra de um equipamento de menor potência, o sistema trabalhar em períodos do dia onde a demanda energética é menor, isso é uma vantagem para empresas que contratam tarifas horossazonais, e ao sistema funcionar em períodos do dia de maior rendimento. Em relação ao sistema trabalhar em períodos do dia de menor demanda energética, significa dizer que ele pode trabalhar a noite, por exemplo, resfriando a água dentro do tanque para que essa água possa ser utilizada, dando suporte ao sistema de refrigeração, durante o dia para resfriar os ambientes. Esse suporte faz com que o sistema não precise trabalhar em plena carga durante o dia e economize energia. Outra vantagem é que esse sistema pode não sobrecarregar a rede de energia durante os horários de pico, isso é importante para que a concessionária de energia consiga suprir a demanda energética nessas horas do dia. Pode-se dizer que esse sistema tem um bom rendimento, pois ele trabalhando à noite, onde a temperatura ambiente é menor. Isso pode ser exemplificado com o ciclo de Carnot. Apesar de esse ciclo ser ideal, ou seja, não possui perdas energéticas, ele pode ser utilizado qualitativamente para a analisar o sistema. Essa eficiência, chamada de coeficiente de desempenho, é uma relação entre a quantidade de calor que o sistema está retirando e a quantidade de energia que o compressor precisar para provocar essa retirada. A eficiência de um ciclo de Carnot é dada por:

$$COP = \frac{T_F}{T_Q - T_F} \quad (1)$$

Onde,

COP – Coeficiente de desempenho.

T_F – Temperatura do ambiente frio.

T_Q – Temperatura do ambiente quente (ar atmosférico).

Pela equação pode-se observar que quanto menor a temperatura do ambiente quente, ou seja, o ar atmosférico, maior é o coeficiente de desempenho. As menores temperaturas durante um dia são à noite e por isso o sistema opera com alto rendimento.

Como foi visto anteriormente a capacidade do equipamento de ar-condicionado para atender ao ITEVA era de 60 kW (17 TR) e o sistema instalado possui uma capacidade de 17,6 kW (5 TR), uma redução de 70% em potência instalada. Isso é possível graças à termoacumulação que dá o suporte necessário ao sistema primário para suprir a carga térmica nas horas em que ela for maior que a capacidade deste. A figura abaixo mostra o gráfico de carga térmica junto com a termoacumulação. Nos horários entre 01h às 08h, 12h às 14h e 18h às 24h o sistema opera resfriando a água, enquanto nos horários entre 08h às 12h e 14h às 18h o sistema de refrigeração opera junto com a água gelada para suprir a região em azul (figura 11) em que o sistema primário não consegue suprir.

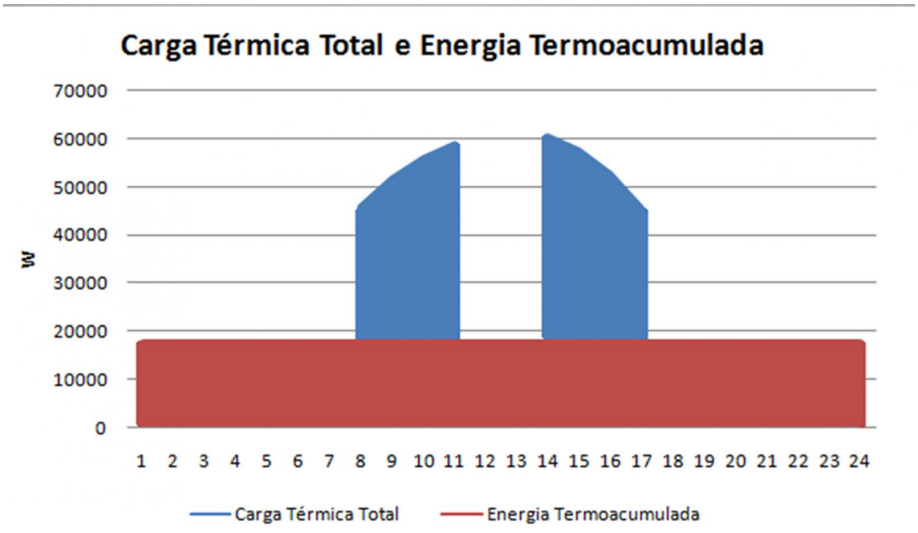

FIGURA 11: Perfil de carga térmica do ITEVA com termoacumulação.

4. Referências bibliográficas

ASHRAE HANDBOOK APPLICATIONS (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditionig Engineers, Inc.). Atlanta - USA, 2003.

ASHRAE. HANDBOOK: FUNDAMENTALS (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditionig Engineers, Inc.), Atlanta - 1997.

CHUMIOQUE, J. J. Ravelo. Simulação de um Sistema de Refrigeração com Termoacumulação operando em Regime Transiente, PUC-Rio de Janeiro, 2004.

DA SILVA, Marcelino Nascimento. Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial e comercial, PROCEL, Rio de Janeiro, 2005.

NBR 16401-1: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 1: Projetos das instalações, Rio de Janeiro, 2008.

NBR 16401-2: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 2: Parâmetros de conforto térmico, Rio de Janeiro, 2008.

NBR 16401-3: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 3: Qualidade do ar interior, Rio de Janeiro, 2008.

PIRANI, M. J.. Refrigeração e Ar Condicionado, DEM, UFBA.

STOECKER, W.F. e JONES, J.W.. Refrigeração e Ar Condicionado, trad. Jose M. Saiz Jabardo, ed. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1985.