

Desenvolvimento de Sistema Eficiente de Climatização com Termoacumulação para produção abaixo de 10 TR.

Marcony Esmeraldo de Melo, Fábio Beneduce, Carlos Almir M. de Holanda

Resumo – A utilização de eletricidade é uma preocupação mundial. A refrigeração destaca-se como sendo grande consumidora de energia, devido principalmente aos compressores. Para promover o conforto térmico em um ambiente, um sistema de refrigeração por expansão indireta com termoacumulação está sendo desenvolvido tendo como objetivos: Redução no consumo de eletricidade; diminuição da carga instalada; redução de demanda no horário de ponta; baixo custo; e robustez. Inicialmente foi feito o cálculo da carga térmica dos edifícios a serem condicionados, através do método RTS recomendado pela NBR 16401, em seguida foram dimensionados o tanque de termoacumulação e os equipamentos utilizados como: compressor, condensador, válvula de expansão e bomba de água. Foi desenvolvido um *fancoil* utilizando como trocador de calor um radiador de carro e aplicado no sistema. Esse sistema visa ser instalado em mercadinhos, escritórios, restaurantes, hotéis, e estabelecimentos que requeiram menos de 10 TR.

Palavras-chave – Condicionamento de ar, eficiência energética, refrigeração, termoacumulação.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente o custo da energia elétrica é um dos fatores importantes na definição de equipamentos em um projeto de condicionamento de ar. O consumo de energia elétrica destes equipamentos em prédios públicos é de 48% (figura 1) e em prédios comerciais é de 47% (figura 2). Assim, a economia de energia está recebendo maior atenção dos engenheiros que projetam estes sistemas.

Para melhorar, um dos caminhos é utilizar a técnica de termoacumulação. O interesse na termoacumulação surgiu com o aumento do consumo de energia a partir dos anos 70, quando as geradoras viram a necessidade de reduzir demanda no horário de pico (entre 17 e 21 horas).

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VII CITENEL), realizado na cidade do Rio de Janeiro/RJ, no período de 05 a 07 de agosto de 2013.

M. E. de Melo trabalha na Companhia Energética do Ceará (e-mail: mmelo@coelce.com.br).

F. C. A. Beneduce, é coordenador geral do Instituto Tecnológico e Vocacional Avançado – ITEVA (fabio@iteva.org.br).

C. A. M. de Holanda, é professor associado do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFC (almir@ufc.br).

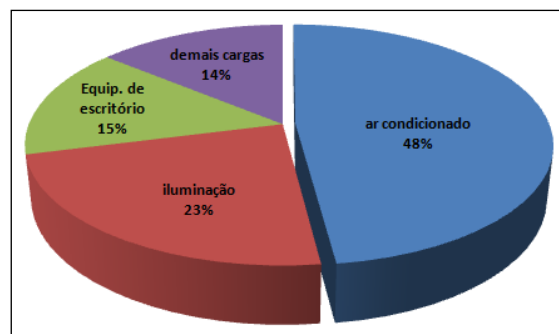


Figura 1. Consumo de energia elétrica em prédios públicos. Fonte Procel/2007.

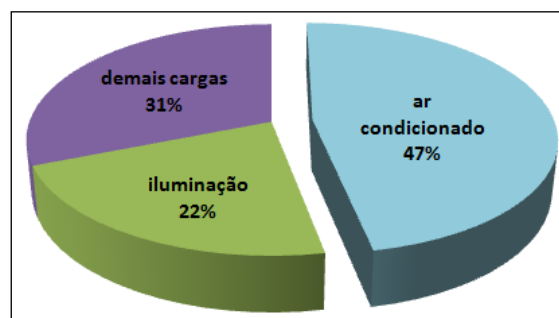


Figura 2. Consumo de energia elétrica no comércio. Fonte Procel/2007.

O sistema de refrigeração em estudo foi montado para que se possam tirar as vantagens da termocumulação no que se refere à eficiência energética, ao baixo custo dos equipamentos em relação aos disponíveis no mercado e a robustez dos elementos empregados.

Destaca-se que o projeto está em execução e encontra-se registrado no Sistema de Gestão de P&D da ANEEL sob o código PD-0039-0011/2010 e título “Desenvolvimento de Sistema de Climatização Robusto de Expansão Indireta com Termoacumulação para Produção abaixo de 10 TR, com Alta Eficiência”. Financiado pela Companhia Energética do Ceará, o projeto está sendo executado pelo Instituto Tecnológico e Vocacional Avançado (ITEVA) e Universidade Federal do Ceará (UFC).

II. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A. 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-coils* que resfriam o ambiente a ser climatizado (sistema de refrigeração secundário).

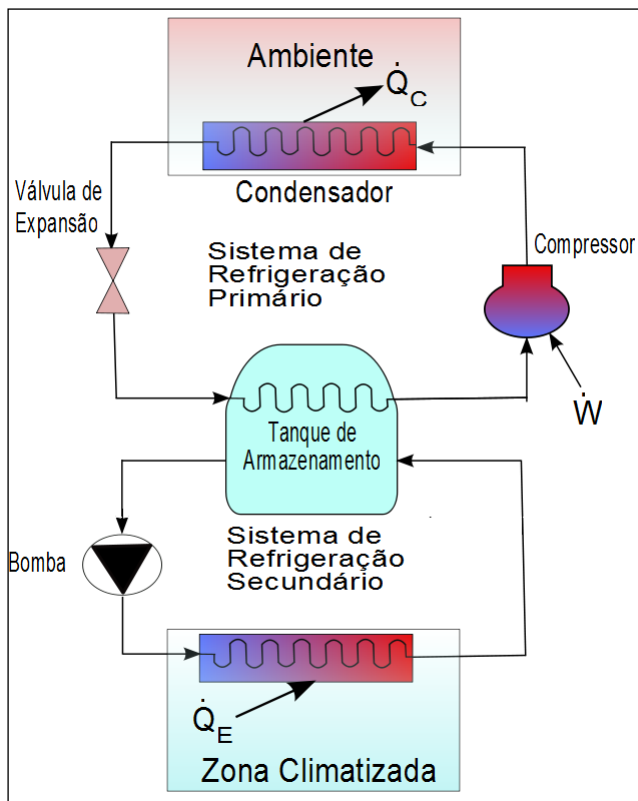


Figura 3. Representação de um sistema de refrigeração com termoacumulação.

B. 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 janeliros, 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 reduz o consumo anual de energia para ar condicionado em até 12%.

C. 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 opere 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.

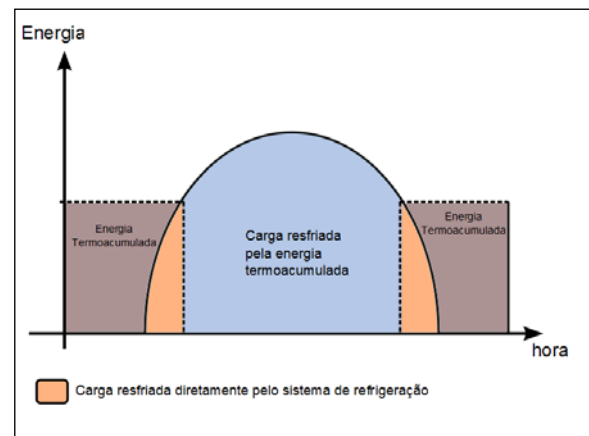


Figura 4. Armazenamento da carga total.

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.

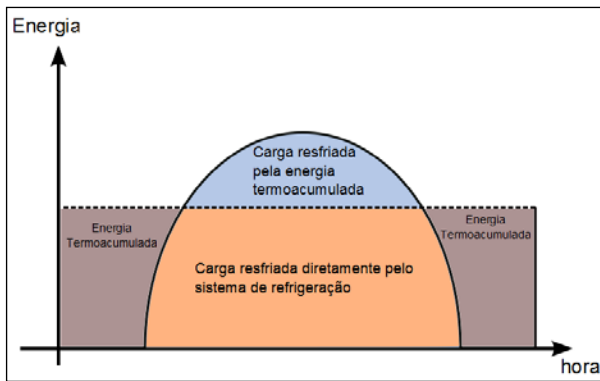


Figura 5. Armazenamento com carga parcial.

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.

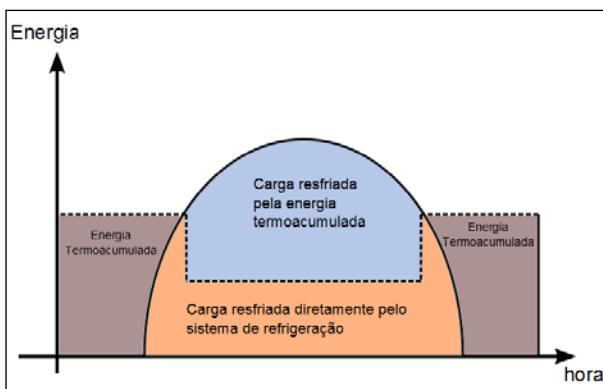


Figura 6. Armazenamento com carga limitada.

III. 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 utilizando os benefícios da termoacumulação para atender os ambientes onde o mercado não oferece esse tipo de equipamento.

A. 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).

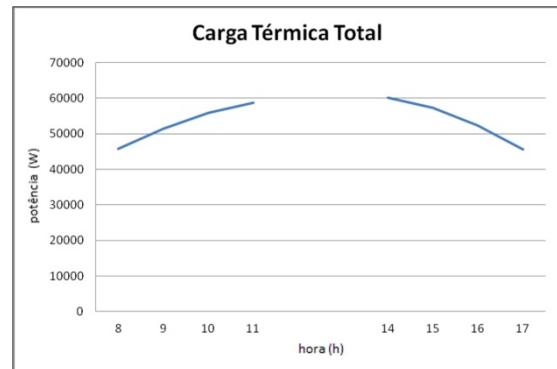


Figura 7. Perfil de carga térmica do ITEVA.

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 (termoacumulação) foi dimensionado um tanque com capacidade de 19000 litros, e foi embutido na terra por questões de melhoria no isolamento térmico, haja vista que o solo possui baixo coeficiente de dissipação térmica. 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 radiadores automotivos e ventiladores 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 automotivo foi utilizado por possuir robustez (é um dispositivo projetado para condições mais severas, em relação à sua aplicação aqui) e baixo custo (é produzido em grande escala), 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, 10 e 11 são mostradas uma representação esquemática do sistema e algumas imagens do sistema instalado.

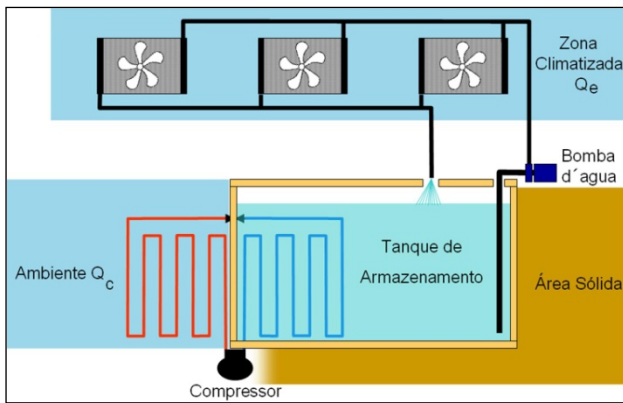


Figura 8. Representação esquemática do sistema.



Figura 9. Sistema de refrigeração primário.



Figura 10. Tanque para termoacumulação.

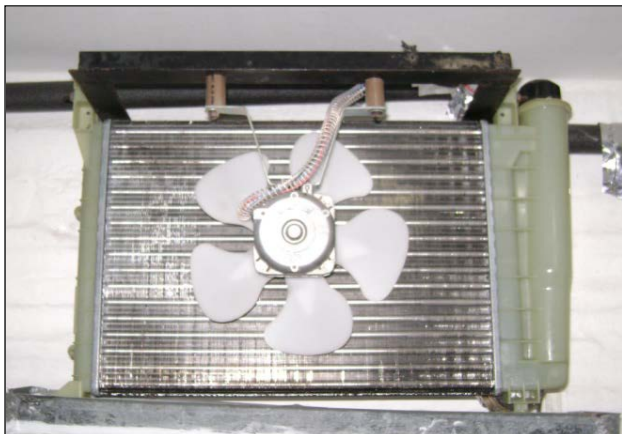


Figura 11. Trocadores de calor com o ar (*fan-coil*).

B. Descrição dos espaços

São dois espaços onde os protótipos estão instalados, conforme figuras 12 e 13:

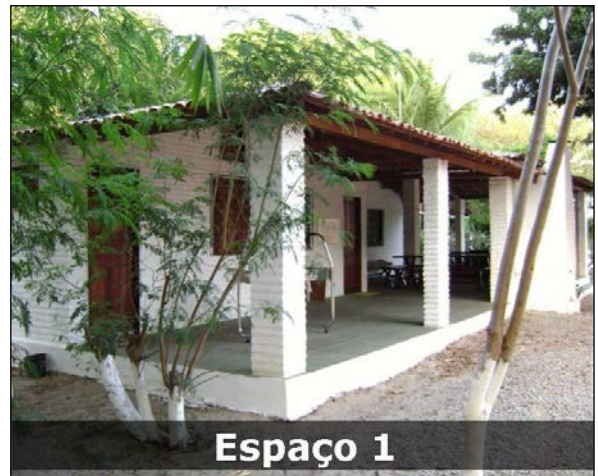


Figura 12. Espaço 1.



Figura 13. Espaço 2.

O espaço 1 possui área de 81 m², onde foram instalados 10 *fancoils* ligados em série, e construídos a partir de radiadores do Fiat Uno Mile.

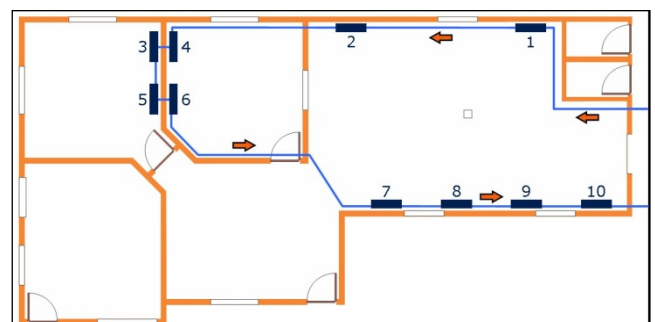


Figura 14. Representação esquemática do Espaço 1.

No espaço 2, com área de 160 m² foram instalados 17 *fancoils* idênticos aos do espaço 1, ligados aqui em quatro conjuntos em série e os conjuntos em paralelo, como mostra a figura 15.

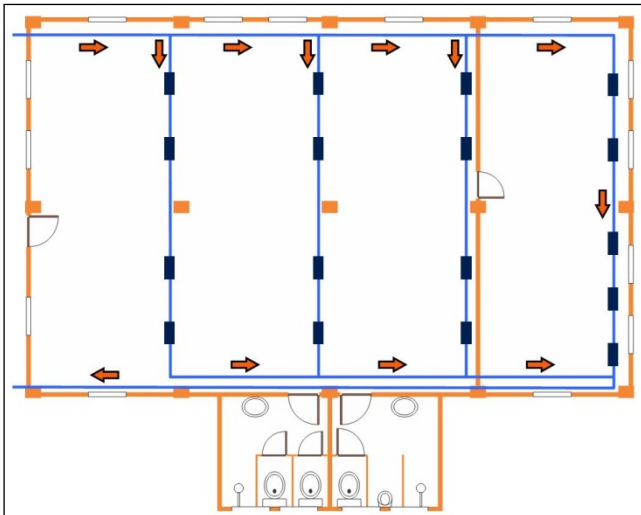


Figura 15. Representação esquemática do Espaço 2.

IV. OBJETIVOS ESPECÍFICOS E FASES DA PESQUISA

A. Menor carga instalada

A termoacumulação nos permite reduzir significativamente a carga instalada. Ao invés de “produzir frio” para a demanda instantânea, o sistema dilui a “produção de frio” nas 24 horas do dia. Com isso a unidade condensadora, conforme o caso, poderá ser dimensionada com potência variando entre 30% e 50% em relação aos sistemas convencionais.

Além do custo do sistema ficar menor, o consumidor que opere com tarifa por demanda contratada seria beneficiado, pois esta é calculada baseada no momento de maior demanda energética.

Podemos observar claramente nas figuras 16 e 17, a vantagem do sistema em P&D comparativamente ao sistema convencional.

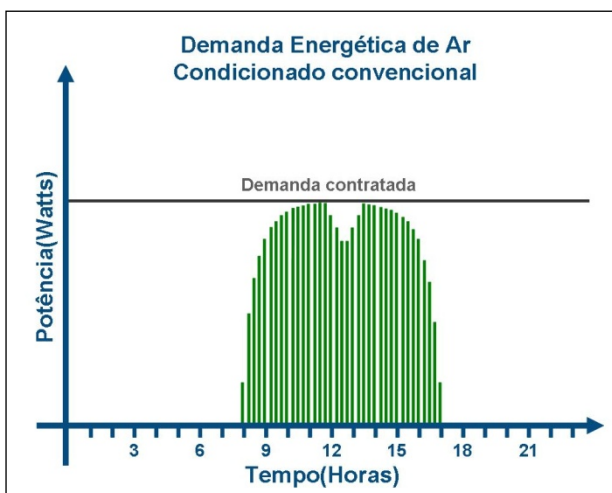


Figura 16. Demanda energética de ar condicionado convencional.

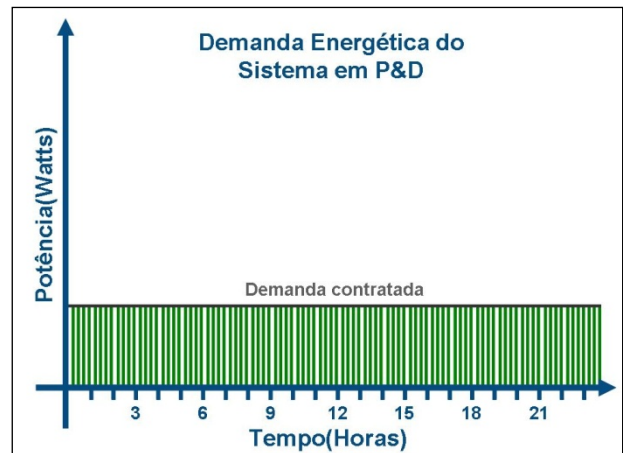


Figura 17. Demanda energética do sistema em P&D.

Este estágio da pesquisa encontra-se 100% concluída, com total comprovação de seus resultados.

B. Redução de demanda no horário de ponta

O sistema proposto permite, através da termoacumulação, desligar no horário de pico o(s) compressor(es) (que são os equipamentos responsáveis por aproximadamente 90% da demanda energética do sistema), mantendo-se ligados os ventiladores dos *fancoils* e as bombas d’água.

Este estágio da pesquisa encontra-se 100% concluída, com total comprovação de seus resultados.

C. Economia de energia

A eficiência na retirada de calor do sistema está diretamente proporcional à diferença de temperatura entre a unidade condensadora e o ambiente externo.

A maioria dos sistemas convencionais opera no período diurno, portanto abrangendo os horários mais quentes do dia. O sistema em P&D opera 24 horas por dia na “produção e acumulação de frio” abrangendo 2/3 dos horários com temperaturas mais baixas do dia. Com isso, fica evidente que o sistema em questão possui maior eficiência de troca, comparando-se com sistemas convencionais.

Este estágio da pesquisa está 90% concluído, onde foi observada a economia média de energia da ordem de 17,8%.

D. Baixo custo

O fato de o sistema ser dimensionado para operar com menor carga instalada reduz proporcionalmente o custo da unidade condensadora e do evaporador (peças chave do sistema). Alia-se ainda o emprego de materiais de larga produção seriada, como os radiadores automotivos e a construção subterrânea do tanque de acumulação em alvenaria, reduzindo a necessidade de isolamento térmico.

As tubulações e conexões em PVC são de baixo valor, e impactam pouco no custo final do sistema.

Este estágio da pesquisa está 70% concluída, onde foi acusada economia no custo de implantação de 45% em relação aos sistemas convencionais de expansão direta (*Splits*).

Observa-se, no entanto que, até o presente momento os trabalhos foram realizados com equipamentos desprovidos de qualquer roupage e/ou acabamento, fator este que já deixa antever que haverá acréscimo ao custo inicial do

sistema. Mas, mesmo assim, ainda serão abaixo dos aparelhos convencionais.

E. Robustez

À exceção da unidade condensadora e evaporadora (comum aos processos frigorígenos) os materiais empregados são de grande robustez. Como exemplo temos o radiador automotivo que é concebido para operar vibrando, com diferenciais de temperatura e com águas impregnadas. Esses fenômenos são percebidos no sistema em questão em proporções muito mais amenas. Ou seja, pelo aspecto da robustez os *fancoils* (radiadores) estão superdimensionados.

Em relação ao tanque de acumulação, a sua construção em alvenaria e/ou pré-moldados lhe assegura grande durabilidade com pouca manutenção.

O isolamento térmico do tanque de acumulação é feito com placas de isopor, material de grande durabilidade (desde que não exposto ao sol). O isolamento é complementado pela terra que envolve o tanque, dispensando qualquer comentário.

Esse estágio da pesquisa está 100% concluído. E, apenas como comentário complementar, informamos que os protótipos em questão estão funcionando a quase dois anos sem apresentar qualquer necessidade de manutenção e/ou reparo.

F. Roupagem

É natural, e até interessante, que na fase de desenvolvimento do produto este esteja desprovido de acabamento. Entretanto, para almejar o mercado consumidor é preciso que os *fancoils* (que estarão compondo o ambiente) tenham boa aparência. Para tanto se faz necessário uma roupagem.

Esta roupagem, além da aparência, tem por função melhorar a eficiência na troca de calor do *fancoil* com o ambiente a ser climatizado. A figura 18 mostra que o ventilador só atua na sua área de rotação, ficando parte do radiador sem passagem de ar (área em vermelho). E, ainda ocorre o fenômeno de sucção de ar pós radiador (setas brancas).

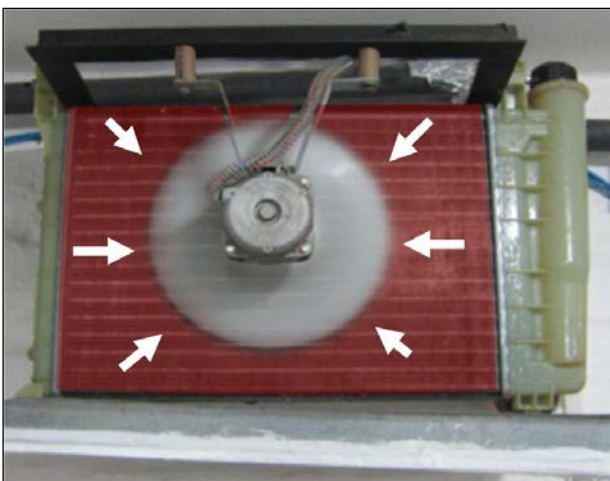


Figura 18. Antigo *fancoil* com sucção de ar pós radiador.

Foi projetado um novo *fancoil*, figura 19, com características mais comerciais, tanto pelo aspecto visual

como da eficiência.

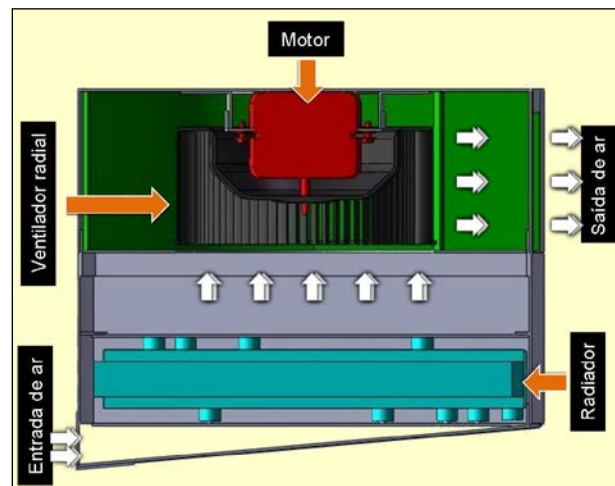


Figura 19. Projeto do novo *fancoil*.

As principais diferenças em relação aos primeiros *fancoils* é que, além da carenagem, no novo modelo o radiador está na posição horizontal e o ventilador axial é substituído por um ventilador radial.

Nota-se que a parte inferior é inclinada para receber o condensado de água (normal em ar condicionado). Esta roupagem permite que o fluxo de ar seja mais homogêneo em todo o radiador, proporcionando maior eficiência na troca de calor entre a água e o ar circulante.

Atualmente está em fase de desenvolvimento um *fancoil* com carcaça em fibra de vidro (figura 20).

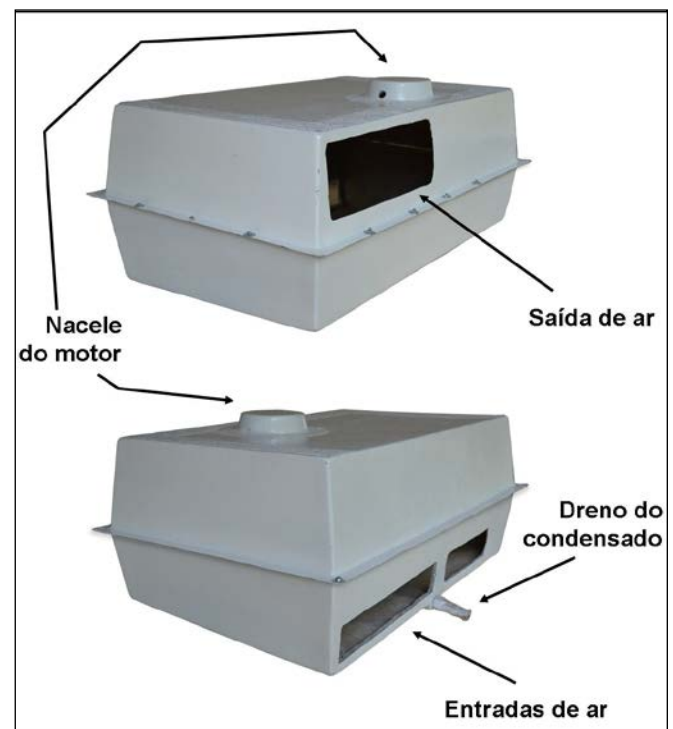


Figura 20. *Fancoil* com carcaça em fibra de vidro.

Atualmente estão sendo produzidos 40 *fancoils* do novo modelo, para substituírem os primeiros aparelhos e também para mais dois prédios, onde será concluída a atual fase do P&D.

V. CONCLUSÕES

A grande vantagem da instalação do sistema com termoaacumulação foi de reduzir os custos relacionados à compra de um equipamento de menor potência, o sistema trabalha em períodos do dia onde a demanda energética é menor, isso é uma vantagem para empresas que contratam tarifas horossazonais, e o sistema funcionará 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 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 precisa 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 termoaacumulação 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 termoaacumulação. 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 21) em que o sistema primário não consegue suprir.

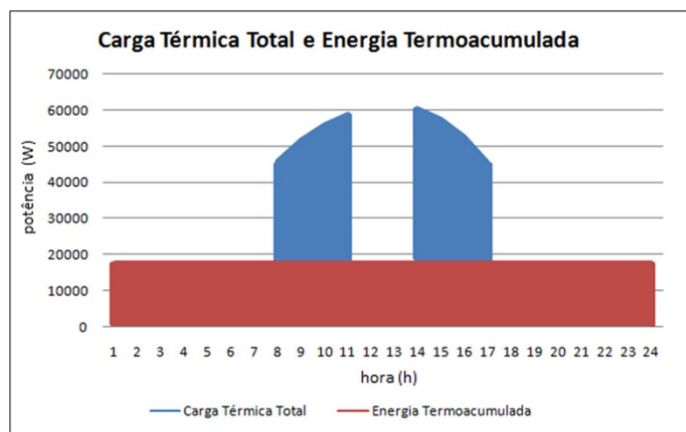


Figura 21. Perfil de carga térmica do ITEVA com termoaacumulação.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ASHRAE HANDBOOK APPLICATIONS (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.). Atlanta-USA, 2003.
- [2] ASHRAE. HANDBOOK: FUNDAMENTALS (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.), Atlanta-1997.
- [3] CHUMIOQUE, J. J. RAVELO. Simulação de um Sistema de Refrigeração com Termoaacumulação operando em Regime Transiente, PUC-Rio de Janeiro, 2004.
- [4] DA SILVA, MARCELINO NASCIMENTO. Eficiência Energética em Sistemas de Refrigeração Industrial e comercial, PROCEL, Rio de Janeiro, 2005.
- [5] NBR 16401-1: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 1: Projetos das instalações, Rio de Janeiro, 2008.
- [6] NBR 16401-2: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 2: Parâmetros de conforto térmico, Rio de Janeiro, 2008.
- [7] NBR 16401-3: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 3: Qualidade do ar interior, Rio de Janeiro, 2008.
- [8] PIRANI, M. J. Refrigeração e Ar Condicionado, DEM, UFBA.
- [9] STOECKER, W.F. e JONES, J.W.. Refrigeração e Ar Condicionado, trad. Jose M. Saiz Jabardo, ed. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1985.