

AValiação de Estratégias para a Racionalização do Consumo de Energia em Edifícios com Ar Condicionado

Flávio Augusto Sanzovo Fiorelli; Alberto Hernandez Neto; Arlindo Tribess

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Depto. Engenharia Mecânica
Grupo de Pesquisa em Refrigeração, Ar Condicionado e Conforto Térmico
Av. Prof. Mello Moraes, 2231 - CEP 05508-900 - São Paulo (SP) - Brasil
Telefone: (+55 11) 3818-5510 - Fax: (+55 11) 3813-1886
e-mails: fiorelli@usp.br, ahneto@usp.br, atribess@usp.br

RESUMO

A energia elétrica é considerada um fator chave para o desenvolvimento econômico de um país. A implementação de medidas que levem a um projeto de ar condicionado energeticamente otimizado ou à otimização das instalações existentes é importante para reduzir custos operacionais, atender às demandas ecológicas e ajudar a evitar os prejuízos econômicos e sociais advindos de um possível colapso no fornecimento de energia. Este artigo apresenta um estudo sobre o impacto da utilização de duas estratégias para racionalização do consumo de energia em edifícios com ar condicionado: o pré-resfriamento e a pré-ventilação da edificação. Os resultados mostram a importância de se proceder a um estudo pormenorizado para cada caso antes de se implementar estas estratégias. Sua utilização não criteriosa pode, inclusive, prejudicar o desempenho do sistema. Além disto deve-se ressaltar que estas estratégias propiciam uma melhoria da qualidade e/ou das condições de conforto no início da ocupação diária da edificação.

ABSTRACT

Electricity is considered a key factor for economical development of a country. Implementation of measures that lead to a energetically optimized air-conditioning project or to the optimization of actual plants is important to reduce operational costs, to meet ecological demands, and to help avoiding economical and social damages due to a possible collapse on electricity supply system. This paper presents a study on the impact of adopting two control strategies for operational optimization of a building' air conditioning system, namely the precooling and the preventilation of the building. Results show the importance of proceeding to a detailed analysis to each case before the implementation of these strategies. The use without criterion can also compromise the air-conditioning system performance. Besides, it should be pointed out that such strategies could improve indoor air quality and thermal comfort conditions in the beginning of the daily building occupation.

1. INTRODUÇÃO

A energia elétrica é considerada um fator chave para o desenvolvimento econômico de um país. Esta forma de energia é responsável por cerca de 40% da matriz energética brasileira e o seu consumo vem crescendo cerca de 6,5% ao ano (DNPE, 1999).

A principal fonte de energia elétrica no Brasil é a geração hidrelétrica, porém a diminuição dos investimentos na geração e distribuição de eletricidade nos últimos anos, aliada à desregulamentação e privatização do setor, está levando o país a uma situação próxima do colapso no fornecimento.

Paralelamente, a conscientização ecológica tem crescido muito nas últimas décadas, o que por sua vez está criando uma demanda social pela redução e otimização do uso dos diversos recursos energéticos. Além de seu apelo ecológico, possíveis medidas neste sentido quase sempre representam uma redução significativa de custos.

Entre os diversos usuários finais da energia elétrica tem-se os edifícios comerciais e shopping centers, que são normalmente grandes consumidores de eletricidade devido à necessidade do uso de sistemas de ar condicionado central para produzir condições satisfatórias de conforto térmico aos seus ocupantes e/ou temperaturas adequadas para o funcionamento de equipamentos e processos. O consumo de energia elétrica dos equipamentos de ar condicionado representa de 40 a 50% do consumo total de um edifício comercial ou shopping center.

Desta forma, a tomada de decisões que levem a um projeto otimizado do ponto de vista energético e à otimização das instalações existentes através do retrofit ou da adoção de estratégias operacionais e de controle que reduzam o consumo de energia são medidas importantes para reduzir custos, atender às demandas ecológicas e colaborar com o país para evitar os prejuízos econômicos e sociais advindos de um possível colapso no fornecimento de energia elétrica.

Neste sentido, Tribess et al. (1997), analisaram o efeito das condições de conforto térmico dos ocupantes da edificação no consumo de energia do sistema de ar condicionado. Hernandez Neto et al. (1999a; 1999b) por sua vez abordaram a questão do projeto da edificação através da análise do impacto do tipo de envoltória e do envidraçamento no consumo de energia do sistema de ar condicionado.

Posteriormente, Tribess et al. (2000) fizeram uma análise técnico-econômica de algumas estratégias para retrofit de um sistema de ar condicionado de um edifício comercial de ocupação mista, comparando o desempenho das soluções propostas com o sistema antigo e verificando o efeito do retrofit na redução do consumo de energia e sua viabilidade econômica.

Neste artigo são analisadas duas estratégias de controle que podem ser adotadas em edifícios comerciais e shopping centers existentes visando à racionalização do consumo de energia: o efeito do pré-resfriamento da edificação e a utilização de pré-ventilação. A análise, realizada com o auxílio do software BLAST, verifica o impacto destas medidas no consumo de energia e, conseqüentemente, na redução dos custos operacionais do sistema de ar condicionado para um edifício típico com dois tipos de envoltória: convencional e pele de vidro.

2. ESTRATÉGIAS DE CONTROLE E OPERAÇÃO

As estratégias para racionalização do consumo de energia abordadas neste trabalho utilizam ou a inércia térmica da edificação (pré-resfriamento) ou condições climáticas adequadas (pré-ventilação) para tentar reduzir os custos operacionais do sistema de ar condicionado.

O pré-resfriamento da edificação consiste em manter o sistema de ar condicionado operando em carga total ou parcial durante os períodos em que a edificação não se encontra ocupada com o intuito de aproveitar a inércia da edificação para “suavizar” a curva de carga térmica e eventualmente reduzir o pico de demanda.

Já a estratégia de pré-ventilação consiste na utilização, nos períodos não ocupados, de ar externo sem condicionamento para resfriamento da edificação, desde que a temperatura externa esteja abaixo da temperatura interna.

3. ESTUDOS DE CASO

Para se avaliar o efeito do pré-resfriamento da edificação e da pré-ventilação foram determinados os perfis de cargas térmicas utilizando programa computacional BLAST (Pedersen et. al., 1993), que realiza simulações detalhadas do comportamento térmico de ambientes condicionados (Hernandez Neto et al., 1999c).

Nas simulações foi considerado um edifício comercial com as seguintes características: pavimentos tipo de 35,6 x 35,6 m², pé direito de 3m com forro rebaixado, lajes de piso e forro em concreto maciço de 10 cm com carpete, ocupação de 50 pessoas por andar, iluminação e equipamentos liberando uma energia térmica total de 19 W/m². Foram considerados dois tipos de fachadas: em pele de vidro (totalmente envidraçada) e com 15% de área envidraçada (valor previsto no Código de Obras do Município de São Paulo). Os materiais das fachadas são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Materiais da envoltória.

Materiais	Espessura [cm]	Massa Específica [kg/m ³]	Calor Específico [kJ/kg.°C]	Condutividade Térmica [W/m.°C]
Granito	2,0	2850	0,84	3,50
Concreto	12	2250	0,84	1,50
Gesso	1,5	800	1,09	0,52
Vidro (*)	0,6	2500	0,79	0,81

(*) transmissividade total de 65%

Adotou-se uma temperatura interna de 24°C por ser uma temperatura que proporciona boa relação consumo de energia/conforto térmico (Tribess et al., 1997) e por ser uma prática corrente de projeto. As análises foram realizadas para condições climáticas, de um dia típico, das seguintes cidades: São Paulo e Recife, apresentadas na Tabela 2 (IPT, 1992). A escolha das condições climáticas destas duas cidades deve-se ao fato de que as edificações da maioria das grandes cidades brasileiras podem ser analisadas considerando-se estas condições climáticas.

Tabela 2 - Condições Climáticas (IPT,1992).

Cidade	Temperatura de bulbo seco máxima (°C)		Temperatura de Bulbo seco mínima (°C)		Temperatura de Bulbo úmido máxima (°C)		Radiação solar (Wh/m ²)	
	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
São Paulo	31,4	18,8	20,2	9,1	26,7	13,8	5180	4480
Recife	31,4	26,5	24,0	18,8	27,9	23,8	5105	4562

4. ANÁLISE DAS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

A análise apresentada a seguir está baseada nos perfis de carga térmica do ambiente. Para o cálculo do consumo de energia foi considerado um sistema de ar condicionado com coeficiente de eficácia (COP) igual a 3,5, ao invés do valor mais usual para um sistema de ar condicionado com água gelada, que é de 4,5. Isto foi feito para considerar desvios da condição de idealidade, isto é, da condição ótima de operação (Stoecker, 1989).

Foi considerada uma vazão de ar nos fan-coils de 8,0 m³/s, necessários para retirar a carga térmica do ambiente e para renovação de ar. Destes 8m³/s, 7,5 m³/s referem-se à vazão de recirculação no ambiente e 0,5 m³/s é a vazão de ar de renovação, resultante da taxa de renovação de ar de 10 l/s por pessoa, conforme recomendação da ASHRAE (1989). Foi considerado um consumo de energia do ventilador de 7,2 kWh (admitindo um rendimento do ventilador de 70%).

Para esta vazão, tem-se aproximadamente 8 renovações de ar por hora, quando da utilização da pré-ventilação, com os dampers de expurgo e de renovação do ar totalmente abertos.

As simulações foram realizadas considerando-se a utilização do sistema de ar condicionado das 8:00 às 18:00 (10 horas de funcionamento), utilizando-se as seguintes estratégias:

- acionamento do sistema de ar condicionado uma hora e duas horas antes do início do período de ocupação do edifício (estratégia de pré-resfriamento);
- acionamento do sistema de ventilação com 100% de ar externo antes do início do período de ocupação do edifício, considerando a vazão total de $8,0 \text{ m}^3/\text{s}$ (estratégia de pré-ventilação). Foram analisadas as possibilidades de acionamento do sistema com uma antecedência de 14 horas, 9 horas, 6 horas, 3 horas e 1 hora. Foi ainda avaliada a estratégia de utilização de pré-ventilação com antecedência de 01 hora e vazão de $4,0 \text{ m}^3/\text{s}$.

As Figuras 1 a 4 mostram as cargas térmicas do ambiente para a condição normal de operação e com a introdução das estratégias de pré-resfriamento e de pré-ventilação com a vazão de $8,0 \text{ m}^3/\text{s}$ e antecedência de 1 hora citadas anteriormente. A Tabela 3 por sua vez apresenta as variações do consumo de energia elétrica resultantes da adoção de cada uma das estratégias para os diferentes tipos de fachada e clima analisados, incluindo também a estratégia de pré-ventilação com a vazão de $4 \text{ m}^3/\text{s}$ com antecedência de 1 hora.

Com relação aos períodos maiores de antecedência da pré-ventilação com a vazão de ar de $8,0 \text{ m}^3/\text{s}$, o aumento do consumo de energia no sistema de ventilação supera a redução no consumo de energia do sistema de ar condicionado. Para a estratégia de pré-resfriamento de duas horas, também houve aumento no consumo de energia com relação aos resultados obtidos com pré-resfriamento de uma hora. Desta forma, estes resultados não foram aqui apresentados.

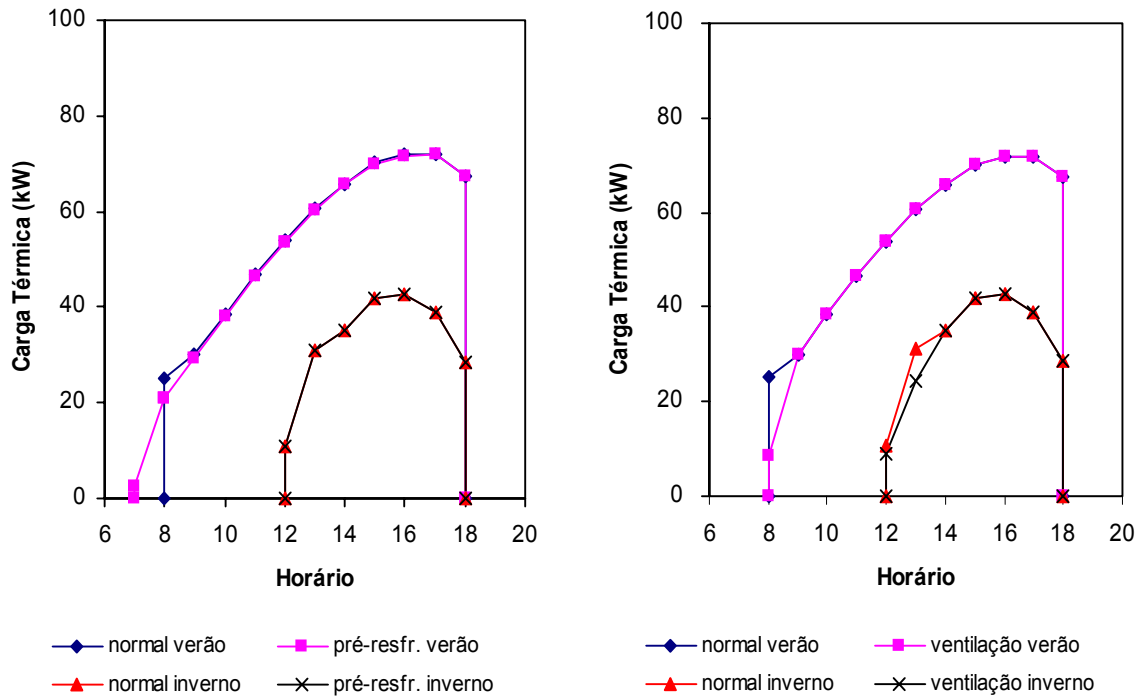
Um aspecto geral a se destacar nas Figuras 1 a 4 é que a utilização das estratégias de controle analisadas não reduzem a carga térmica máxima da edificação. Desta forma, estas estratégias não permitem a redução da capacidade do chiller a ser instalado, fato este também constatado por Ruud et al. (1990).

4.1 Análise dos Resultados para a Cidade de São Paulo

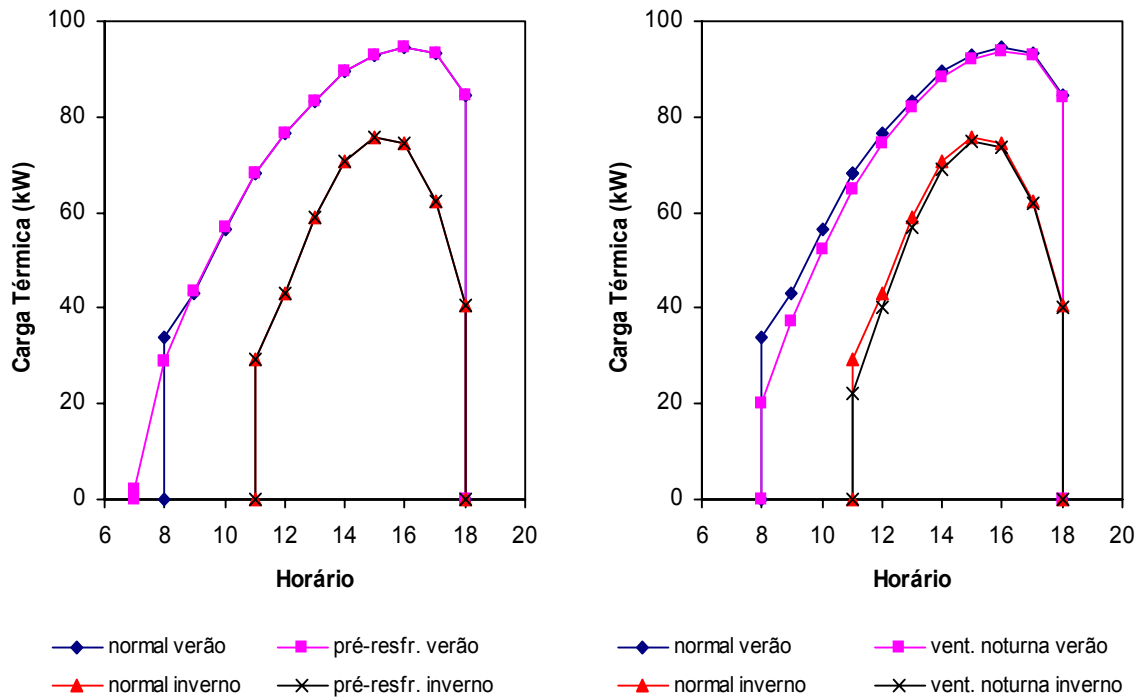
Os resultados para a cidade de São Paulo, apresentados nas Figuras 1 e 2 e na Tabela 3, mostram que, independentemente do tipo de fachada, a estratégia de pré-resfriamento apresentou pouca vantagem em termos de carga térmica. Houve uma pequena redução e uma redistribuição da carga por um período maior de operação. Conseqüentemente, a redução no consumo de energia no período do verão, foi de 0,6% para a edificação com fachada convencional (15% de área envidraçada) e de 0,2% para a edificação com fachada em pele de vidro. No período de inverno não houve redução de carga térmica e, conseqüentemente, também não houve redução no consumo de energia.

A pré-ventilação por sua vez mostrou-se interessante, em termos de consumo de energia, apenas para a edificação com fachada convencional no caso do acionamento dos ventiladores uma hora antes do início da ocupação e com a vazão de $4,0 \text{ m}^3/\text{s}$, permitindo nesta situação uma redução da carga térmica da ordem de $16,5 \text{ kW}/\text{dia}$ no verão (2,7% da carga diária) e $9,53 \text{ kW}/\text{dia}$ no inverno (4,2% da carga diária). Estas reduções de carga térmica, por sua vez, permitem uma redução do consumo de energia de 0,48% no verão e 0,38% no inverno. A edificação com fachada em pele de vidro, devido à menor inércia da edificação, apresenta reduções de carga térmica menores, que levam a uma menor redução do consumo no verão (0,12%), e a um aumento no consumo de energia no inverno. Isto mostra que, para uma utilização mais eficiente desta estratégia de controle, seria interessante se trabalhar com vazões menores, o que poderia ser obtido através da utilização de variadores de velocidade e/ou sistemas de controle de abertura dos dampers de expurgo e renovação de ar.

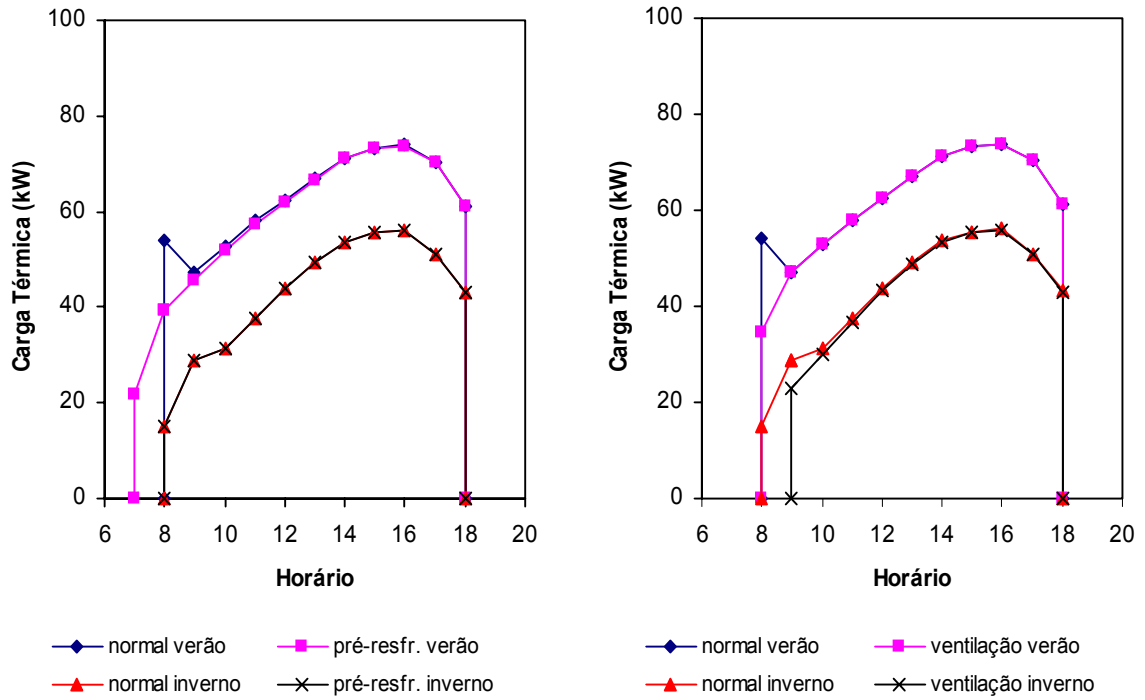
As duas estratégias apresentam ainda um outro ganho que está relacionado com a melhoria das condições de conforto e da qualidade do ar no ambiente condicionado, principalmente no início do período diário de ocupação. Este ganho tem um impacto econômico relacionado com o aumento da produtividade dos ocupantes da edificação, que é de difícil quantificação.



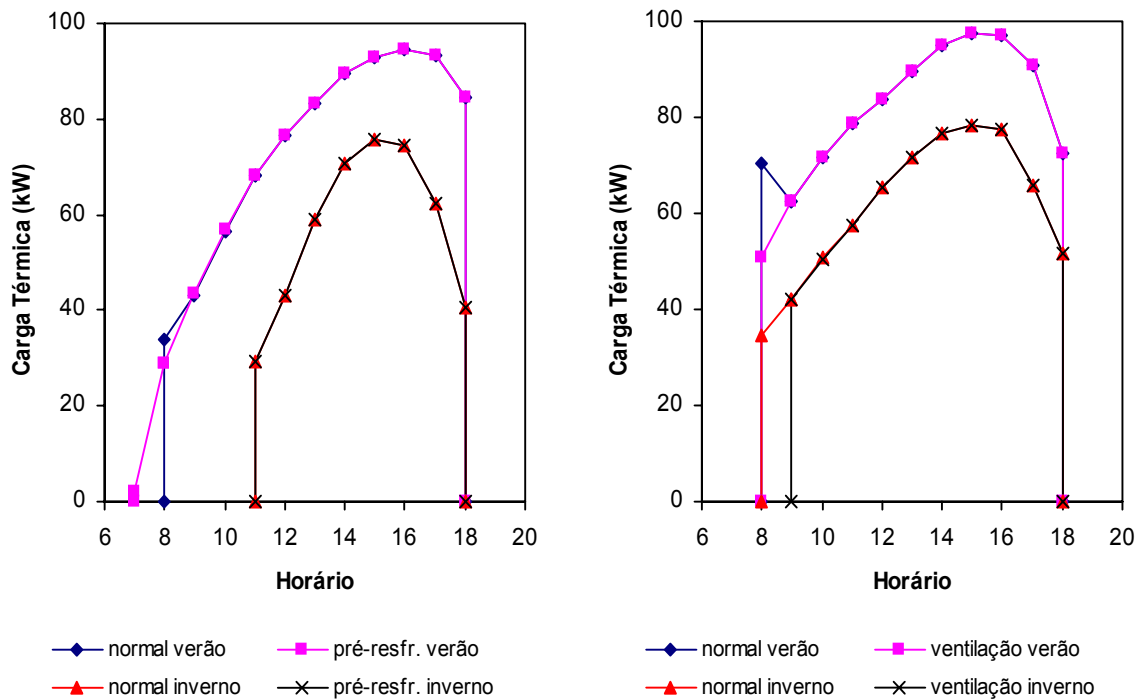
**Figura 1 - Perfis de Carga Térmica Para a Cidade de São Paulo
Edificação com 15% de Área Envidraçada**



**Figura 2 - Perfis de Carga Térmica Para a Cidade de São Paulo
Edificação com Fachada em Pele de Vidro**



**Figura 3 - Perfis de Carga Térmica Para a Cidade de Recife
Edificação com 15% de Área Envidraçada**



**Figura 4 - Perfis de Carga Térmica Para a Cidade de Recife
Edificação com Fachada em Pele de Vidro**

Tabela 3 - Variação do Consumo de Energia Devido às Estratégias de Controle Analisadas

Cidade		São Paulo				Recife			
Tipo de fachada		15% envidraçam.		Pele de vidro		15% envidraçam.		Pele de vidro	
Época do ano		Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno	Verão	Inverno
Carga térmica total diária (kW)		601,94	229,28	817,62	454,23	691,20	465,33	909,82	672,89
Variação do consumo de energia	Pré-resfriamento	-0,6%	0,0%	-0,2%	0,0%	+0,2%	0,0%	+0,8%	+0,5%
	Pré-Ventilação 8,0 m ³ /s	0,44%	2,04%	0,33%	1,12%	0,23%	-0,02%	0,18%	-0,44%
	Pré-Ventilação 4,0 m ³ /s	-0,48%	-0,38%	-0,12%	0,31%	-0,29%	-0,80%	-0,22%	-0,97%

4.2 Análise dos Resultados para a Cidade de Recife

Os resultados para a cidade de Recife encontram-se nas Figuras 3 e 4 e na Tabela 3. Verifica-se que, para esta cidade, a utilização do pré-resfriamento não propicia redução da carga térmica e, conseqüentemente, do consumo de energia. Na verdade ocorre o efeito contrário, principalmente no verão, pois já existe demanda de carga térmica às 7 horas da manhã.

Com relação à pré-ventilação, tem-se uma situação parecida com a da cidade de São Paulo: só existe redução no consumo de energia para a situação de acionamento do sistema de ventilação com uma hora de antecedência e com a vazão de 4,0 m³/s. As reduções de carga térmica e de consumo de energia para a edificação com fachada convencional são de 19,6 kW/dia (2,8% da carga diária) e 0,29% do consumo de energia no verão e de 25,6 kW/dia (5,5% da carga diária) e 0,80% no inverno.

Já para a edificação com fachada pele de vidro, as reduções são de 19,5 kW/dia (2,1% da carga diária) e 0,22% do consumo no verão e 35,5 kW/dia (5,3% da carga diária) e 0,97% no inverno.

Ainda com relação à pré-ventilação, para condições de inverno é possível utilizar-se uma vazão de ar de 8,0 m³/s conseguir-se uma redução no consumo de energia. No verão, contudo, isto não é possível devido às condições externas.

5. CONCLUSÕES

A utilização das estratégias de controle de pré-resfriamento e pré-ventilação para as condições analisadas resultou em um ganho muito pequeno no consumo de energia (com aumento de consumo em algumas situações). Isto mostra a necessidade de um estudo pormenorizado para cada projeto. Uma aplicação não criteriosa destas estratégias, sem um estudo prévio, pode acabar causando um aumento do custo operacional do sistema de ar condicionado

No caso da pré-ventilação há a necessidade de um estudo da viabilidade de utilização de variadores de frequência e de sistemas de controle da abertura de dampers como forma de se poder trabalhar com vazões de ar menores, que podem resultar em uma redução maior do consumo de energia. A menor vazão do ventilador e conseqüente consumo menor de energia neste sistema permitiria um maior tempo de operação do sistema de ventilação, garantindo desta forma uma adequada renovação de ar e conseqüente aumento na melhoria na qualidade do ar interior. Neste sentido, Gates (1993) mostra a importância de se integrar ao estudo para retrofit do sistema de ar condicionado a introdução de controles no sistema de ventilação que permitam a manutenção de uma qualidade de ar interior adequada, discutindo diversas estratégias de controle, particularmente para sistemas de distribuição de ar do tipo VAV.

A estratégia do pré-resfriamento, por sua vez, pode implicar em ganhos mais significativos quando utilizada no dia seguinte aos finais de semana e feriados e em dias em que as temperaturas externas

ultrapassam a temperatura de projeto (dia típico). Além disto, os ganhos deverão ser maiores para edificações com menor área envidraçada, que apresentam normalmente uma estrutura com maior inércia térmica.

Há de se ressaltar que estas estratégias propiciam uma melhoria da qualidade do ar e/ou das condições de conforto no início da ocupação diária da edificação. Este aspecto pode, inclusive, ser mais importante do que o próprio ganho financeiro advindo da redução no consumo de energia. Melhores condições de conforto e de qualidade do ar poderão permitir um significativo ganho de produtividade.

Outro aspecto a ser ressaltado é que a presente análise considera que o sistema de ar condicionado está sempre trabalhando na condição ótima de operação. Condições de operação em cargas parciais podem afetar significativamente os resultados, o que só enfatiza a necessidade de um estudo pormenorizado para cada projeto antes de se aplicar as estratégias de controle aqui analisadas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHRAE (1989) Ventilation for acceptable indoor air quality. *ANSI/ASHRAE Standard 62-1989*, American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers, Atlanta. 26 p. 1989.
- DNPE - Departamento Nacional de Política Energética, 1999, *Balanço Energético Nacional*.
- GATES, S.D. (1993) Integrating Indoor Air Quality With an HVAC Upgrade, *Energy Engineering*, vol. 90 n° 3, p.55-74.
- HERNANDEZ NETO, A.; TRIBESS, A.; FIORELLI, F.A.S. (1999a) Influência da Envoltória no Consumo de Energia em Edifício Comercial com Ocupação Mista. In: V ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Fortaleza. *Anais*. UFCE – ANTAC. CD-ROM.
- HERNANDEZ NETO, A.; ET AL. (1999b) Avaliação da Viabilidade Econômica de Soluções de Envidraçamento. In: V ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Fortaleza. *Anais*. UFCE – ANTAC. CD-ROM.
- HERNANDEZ NETO, A. et al. (1999c) The effects of Indoor Conditions on the Reduction of Energy Consumption in Commercial Buildings in Rio de Janeiro,. In: Building Simulation'99, Kyoto. *Anais*. CD-ROM.
- IPT. (1992): Elaboração de Critérios para Classificação de Edificações Segundo seu Desempenho Térmico – *Relatório IPT 30.923*, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo.
- PEDERSEN, C.O. ET AL. (1993) *BLAST – Building Load Analysis and System Thermodynamics*, University of Illinois, Champaign-Urbana, EUA.
- RUUD, M.D. ET AL. (1990) Use of Building Thermal Mass to Offset Cooling Loads, *Ashrae Transactions*, Atlanta, v. 96 part 2, p. 820-829.
- STOECKER, W. F. (1989). *Design of Thermal Systems*, McGraw-Hill, 3a. ed., New York.
- TRIBESS, A. ; HERNANDEZ NETO, H.; PEÇANHA, M. (1997) Aspectos de Conservação de Energia em Ambientes Condicionados. In: IV ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, Salvador. *Anais*. FAUUFBA/LACAM – ANTAC. p. 413-417.
- TRIBESS, A.; HERNANDEZ NETO, A.; FIORELLI, F.A.S. (2000) Thermoconomical Evaluation of Retroffiting Strategies in Air Conditioning Systems. In: VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS TÉRMICAS, Porto Alegre, *Anais*. UFRGS – ABCM. CD-ROM.