



## **RELAÇÃO ENTRE O MODELO ADAPTATIVO DE CONFORTO TÉRMICO E A DEMANDA DE RESFRIAMENTO EM EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS**

**Luciana Oliveira Fernandes (1); Francisco Massucci Silveira (2) Lucila Chebel Labaki (3)**

(1) Arquiteta, Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Tecnologia e Cidade, luarq@fec.unicamp.br

(2) Arquiteto, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura, Tecnologia e Cidade, massucci@gmail.com

(3) Doutora, Professora do Departamento de Arquitetura e Construção, lucila@fec.unicamp.br  
Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo  
Av. Albert Einstein, 951 - Caixa Postal: 6021 - CEP: 13083-852 - Campinas - SP

### **RESUMO**

A inclusão do modelo adaptativo à ASHRAE 55 em 2004 promoveu a adoção de valores variáveis para temperaturas de conforto. Neste artigo analisa-se a contribuição do uso da ventilação natural como estratégia para reduzir a demanda de resfriamento do sistema de condicionamento de um ambiente em um edifício de escritório na cidade de São Paulo. Dois casos foram simulados: o primeiro utiliza-se da ventilação natural seletiva como estratégia de condicionamento passivo sem qualquer uso de equipamentos de climatização. O segundo caso utiliza-se apenas de climatização artificial. Foram verificadas as condições de conforto por métodos adequados a cada situação. Para o modelo climatizado artificialmente foi utilizada a abordagem analítica de conforto para determinação da situação térmica, proposto pela norma ASHRAE 55. O modelo com ventilação natural teve sua situação de conforto analisada através do modelo adaptativo também proposto pela norma ASHRAE 55. A ventilação natural permitiu que fossem retirados, anualmente, entre 35% e 72% do calor sensível do ambiente, quando comparado com o modelo condicionado artificialmente. O estudo aponta para a importância da aplicação do modelo adaptativo aliado ao uso da ventilação natural na redução do consumo de energia em sistemas de climatização, já que as temperaturas registradas no ambiente em estudo permaneceram dentro dos limites de conforto considerados quando da utilização da ventilação natural.

Palavras-chave: desempenho térmico, modelo adaptativo, simulação computacional.

### **ABSTRACT**

The inclusion of the ASHRAE 55 adaptive model in 2004 promoted the adoption of changeable values for comfort temperatures. In this paper the contribution of using natural ventilation is analyzed as a strategy to reduce the demand for cooling loads in an office building in the city of São Paulo. Two cases were simulated: the first uses natural ventilation as passive conditioning strategy without air conditioning equipment. The second case uses only artificial cooling. The comfort conditions were verified by methods appropriated to each situation. For the model with artificial cooling it was used an analytical comfort approach proposed by ASHRAE 55. The thermal comfort of the naturally ventilated model was analyzed through the adaptive model also proposed by ASHRAE 55. The natural ventilation allowed being withdrawn between 35% and 72% of sensible cooling from the room compared to the artificially conditioned model. The study points out the importance of applying adaptive model along with the use of natural ventilation to reduce energy consumption in HVAC systems, since the ambient temperatures recorded in the room remained within the limits of comfort considered when applying natural ventilation.

Keywords: thermal performance, adaptive model, computer simulation.

## 1. INTRODUÇÃO

O uso extensivo do ar condicionado é bastante difundido, principalmente em edificações não residenciais, negligenciando-se a aplicação de estratégias de condicionamento térmico passivo, capaz de atingir condições aceitáveis de temperatura interna, a um menor consumo energético. Usualmente, o dimensionamento dos sistemas de ar-condicionado é baseado em normativos que visam a qualidade do ar e o conforto térmico, por vezes, restringindo-se apenas a valores fixados de temperatura de bulbo seco e umidade relativa.

Os primeiros estudos resultantes das normas de conforto (ASHRAE, 1992 e ISO 1994), atualmente em uso e em constante atualização, foram conduzidos por um longo período de tempo em diferentes tipologias de edifícios e diversas condições climáticas, negligenciando características culturais ou aspectos fisiológicos das necessidades dos usuários. Além disso, estas normas não fazem distinção entre parâmetros a serem aplicados em ambientes climatizados ou ventilados naturalmente. Esta abordagem passou a ser questionada, e uma edição especial da publicação *Energy and Buildings* (KEMPTON & LUTZENHISER, 1992) publicou artigos visando a necessidade de distinção do condicionamento ambiente em diferentes culturas.

A teoria do modelo adaptativo de conforto teve início na década de 70 quando da ocorrência da crise do petróleo internacional, porém grande importância ao método tem sido dada recentemente devido à atual necessidade de redução do consumo energético na construção e manutenção dos edifícios (De DEAR, BRAGER, & COOPER, 1997). O método utiliza-se da temperatura operativa - que correlaciona efeitos da temperatura de bulbo seco, temperatura média radiante e velocidade do ar - como principal fator indicador de conforto. Além disso, a norma correlaciona a faixa de temperatura de conforto à ocorrência de temperaturas externas, possibilitando a comparação entre edificações situadas em climas distintos.

A temperatura interna em edifícios naturalmente ventilados encontra-se em constante variação em resposta às condições climáticas externas. Dessa maneira, normas que pressupõem temperaturas fixas de conforto, abdicam da possibilidade do uso da ventilação natural a favor de um ambiente termicamente homogêneo (NICOLS, 2002). A introdução de temperaturas de conforto variáveis possibilita incorporar o uso da ventilação natural visando a redução do desconforto e da demanda de resfriamento. Recentemente, importantes pesquisas têm sido realizadas com o intuito de investigar os efeitos do movimento de ar, no conforto térmico, em ambientes onde se realizam atividades sedentárias. Os resultados apontam para condições adequadas de conforto mesmo com a ocorrência de temperaturas superiores a 26°C quando combinados ao uso de ventilação natural. Até pouco tempo, esta faixa de temperatura representava um limite para temperatura interna aceitável (HEISELBERG *et al.*, 2002).

Portanto, o modelo adaptativo proporciona uma avaliação em que os usuários são mais permissíveis a flutuações de temperatura e condições térmicas não-uniformes, reduzindo assim as necessidades de condicionamento artificial para manter constante a temperatura do ambiente.

O papel dos usuários no controle das condições de temperatura interna é de extrema importância e deve ser considerado para as decisões de projeto (GRAÇA, LINDEN, McCONAHEY, & HAVES, 2003). Os autores destacam a importância de um usuário informado sobre o comportamento de construção e como agir em situações específicas, a fim de melhorar o conforto térmico e o desempenho do edifício.

Este artigo investiga a contribuição da aplicação do modelo adaptativo para reduzir as cargas de resfriamento através da utilização da ventilação como estratégia passiva de conforto. Para este estudo, dois modelos foram comparados: um artificialmente condicionado e o outro naturalmente ventilado, isto é, com o mesmo sistema de climatização instalado, porém com o uso de ventilação natural seletiva quando houver possibilidade para resfriamento do edifício.

## 2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é avaliar o uso de ventilação natural seletiva em edifícios de escritório e seu impacto na redução da demanda de resfriamento, a partir da comparação da remoção de calor sensível e da avaliação do conforto através de abordagem adaptativa quando da ocorrência da ventilação natural.

## 3. MÉTODO

O método deste trabalho consiste na simulação computacional de dois casos para o pavimento tipo de um edifício de escritórios, através do software *EnergyPlus*. O caso condicionado artificialmente, denominado "HVAC", utiliza-se de sistema de resfriamento artificial para manter a temperatura interior do edifício em 24°C durante as horas ocupadas. O caso ventilado naturalmente, denominado "VN", não se utiliza de sistema de climatização ativa, incorporando apenas o uso da ventilação natural seletiva como ferramenta de

resfriamento passivo. O uso da ventilação ocorre desde que certas condições de temperatura (interna e externa) se façam presentes.

O pavimento tipo foi dividido em quatro zonas térmicas, com a face externa voltada para cada ponto cardinal, e a análise foi realizada apenas para a zona norte. Para ambos os casos verificou-se a carga térmica retirada pelo ar condicionado e pela ventilação natural, analisando-se ainda as condições de conforto, conforme proposto pelas abordagens analítica e adaptativa da norma ASHRAE 55.

Os resultados obtidos para o caso VN foram analisados através do somatório graus-hora de desconforto e da distribuição do conforto. A temperatura de conforto é definida com base na equação proposta por De Dear e Brager (2002) (equação 1) e incorporada pela norma ASHRAE 55 no modelo adaptativo (ASHRAE, 2010). Os limites da faixa de conforto para 90% de pessoas satisfeitas é de  $\pm 2,5$  °C em relação a temperatura de conforto e  $\pm 3,5$  °C para 80% de pessoas satisfeitas. O Somatório de graus-hora de desconforto foi realizado de acordo com a equação 2, para as 8760 horas do ano.

$$T_n = 0,31.T_e + 17,8 \quad \text{eq.1}$$

Onde:

Tc = Temperatura operativa de conforto (°C)

Te = Média das temperaturas máximas e mínimas diárias do ar exterior, de 30 dias antecedentes (°C)

$$GH = \frac{\sum_{i=1}^n \left\{ (T_{c_{li\_i}} - T_{o_i}) + |T_{c_{li\_i}} - T_{o_i}| \right\} + \left\{ (T_{o_i} - T_{c_{ls\_i}}) + |T_{o_i} - T_{c_{ls\_i}}| \right\}}{2n} \quad \text{eq.2}$$

Onde:

n = número de horas no ano, 8760 horas;

GH = graus-hora de desconforto para zona z;

Tc<sub>li\_i</sub> = limite inferior do intervalo de conforto para a hora i (°C);

Tc<sub>ls\_i</sub> = limite superior do intervalo de conforto para a hora i (°C);

To<sub>i</sub> = Temperatura operativa de conforto calculada para a hora i (°C);

A parcela  $\left\{ (T_{c_{li\_i}} - T_{o_i}) + |T_{c_{li\_i}} - T_{o_i}| \right\}$  refere-se ao desconforto devido ao frio, portanto graus-hora de aquecimento

GHa, e a parcela  $\left\{ (T_{o_i} - T_{c_{ls\_i}}) + |T_{o_i} - T_{c_{ls\_i}}| \right\}$  refere-se ao desconforto devido ao calor, portanto graus-hora de resfriamento GHr.

### 3.1. Descrição do Modelo

Através do software *EnergyPlus* foi modelado o pavimento tipo de um edifício de escritórios com *core* (para o uso de elevadores e escadas), para representar um escritório do tipo *open-office*, localizado em São Paulo, Brasil (Figura 1), medindo 25m x 25m.

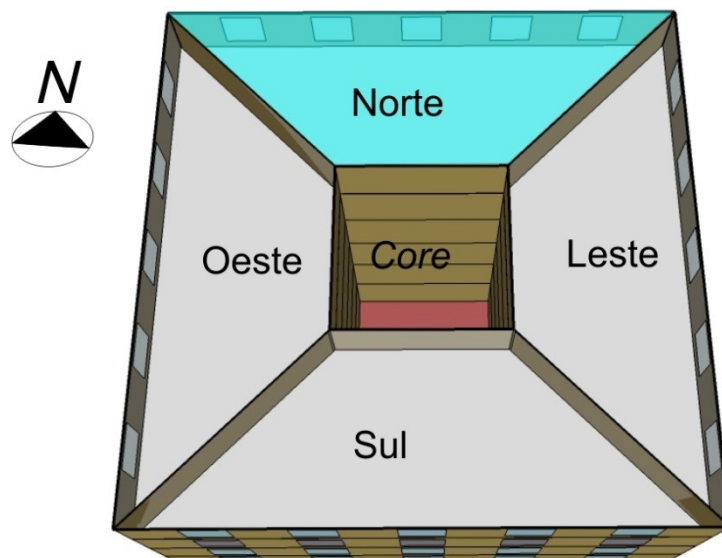


Figura 1 - Representação do modelo e da divisão das zonas térmicas.

O pavimento tipo apresenta aberturas envidraçadas voltadas para as quatro principais direções cardeais (Figura 2). A fim de analisar seu comportamento térmico sem a definição da quantidade de pavimentos, optou-se pela adoção de características adiabáticas nas superfícies de laje do piso e do teto, bem como nas paredes do *core* central. Assim, foram desconsideradas as trocas térmicas entre pavimentos, analisando-se exclusivamente as trocas térmicas com o exterior e entre as zonas.

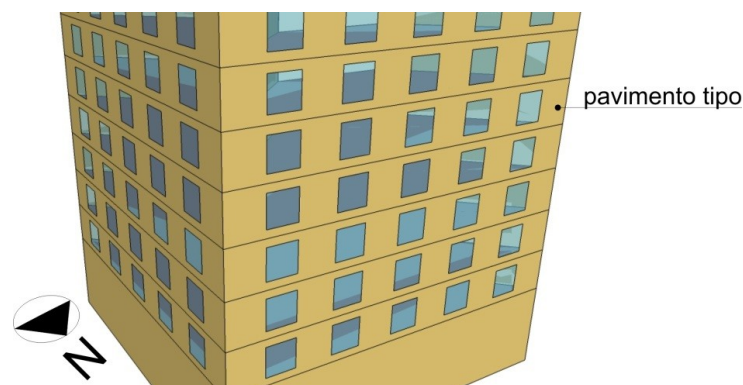


Figura 2 - Vista norte do edifício.

As zonas dos dois modelos apresentam aberturas envidraçadas com dispositivos de proteção solar que são ativados quando a incidência de radiação solar direta no piso ultrapassa  $50\text{W}/\text{m}^2$ . Para o caso HVAC a temperatura interna é mantida constante em  $24^\circ\text{C}$  através de um sistema de climatização ideal. O caso VN utiliza-se da ventilação seletiva como ferramenta de resfriamento passivo, modelada através do algoritmo *AirflowNetwork*, ocorrendo quando duas condições são satisfeitas: a primeira é a temperatura interna ser maior ou igual a temperatura externa; e a segunda é a temperatura interna ser maior ou igual a  $24^\circ\text{C}$ .

As principais propriedades termofísicas dos materiais e componentes construtivos do modelo estão apresentadas na Tabela 1. As janelas do caso VN permitem uma abertura de 50% para a infiltração de ar (Figura 3). O pé-direito da edificação é de 3m e ambos os modelos têm proporção janela/parede de 27% (proporção WWR<sup>1</sup>)

<sup>1</sup> WWR: *Window-to-Wall* ratio, indica a relação entre área de abertura e área de paredes opacas.

Tabela 1 – Propriedades termofísicas dos materiais e componentes.

Elemento	Descrição	Transmitância térmica (W/m <sup>2</sup> K)	Fator Solar
Paredes	Blocos de concreto e argamassa	3,08	-
Vidros	Simples, 4mm	-	0,85
Laje	Concreto de 12cm	2,45	-



Figura 3 - Representação das aberturas do edifício.

As paredes entre as zonas foram modeladas para serem transparentes ao infravermelho, uma representação simples do escritório aberto em único pavimento, permitindo a análise de uma zona, separadamente. Foram incorporadas aberturas nestas superfícies de modo a permitir o fluxo de ar entre as zonas, uma vez que o modelo teórico baseia-se em um escritório sem barreiras físicas para ventilação. Assim, foi definida uma porta correspondente a 95% da área da superfície, permitindo a ocorrência constante de ventilação entre as zonas, conforme demonstrado na Figura 4.

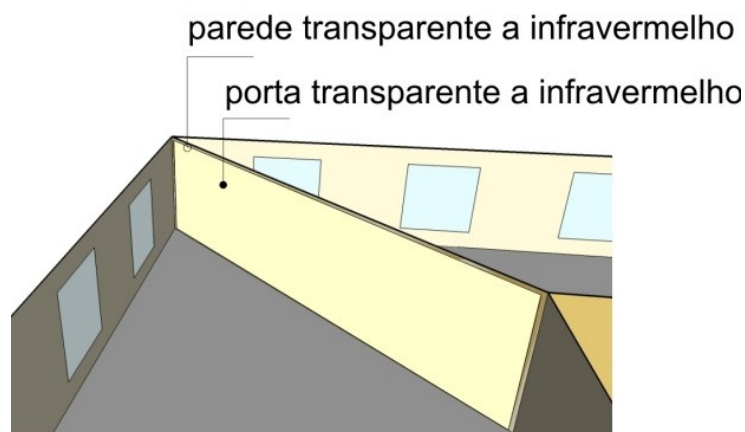


Figura 4 - Caracterização das paredes entre as zonas dos modelos simulados.

A ocupação foi definida em 10 pessoas por sala em cada zona, das 8:00h as 17:00h. Foi ainda definido o uso de um computador de mesa por pessoa (95W/pessoa) e a densidade de potência instalada para iluminação em 12,3W/m<sup>2</sup>. A potência dos equipamentos eletrônicos e de iluminação foi incorporada ao balanço térmico global da edificação.

#### 4. DISCUSSÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

Serão apresentados e discutidos os resultados de ambos os casos simulados quanto às perdas e ganhos de calor sensível, e aos níveis de conforto obtidos.

As perdas e ganhos de calor sensível pelos modelos são demonstradas na Figura 5, onde é possível notar a parcela elevada de ganho de calor sensível através da área de vidro (29GJ) no modelo HVAC (barras

pretas), e a retirada de calor ocorrendo em grande parte pelo sistema de climatização mecânica (-37GJ), já que não há ferramentas de resfriamento passivo em utilização.

## HVAC/VN

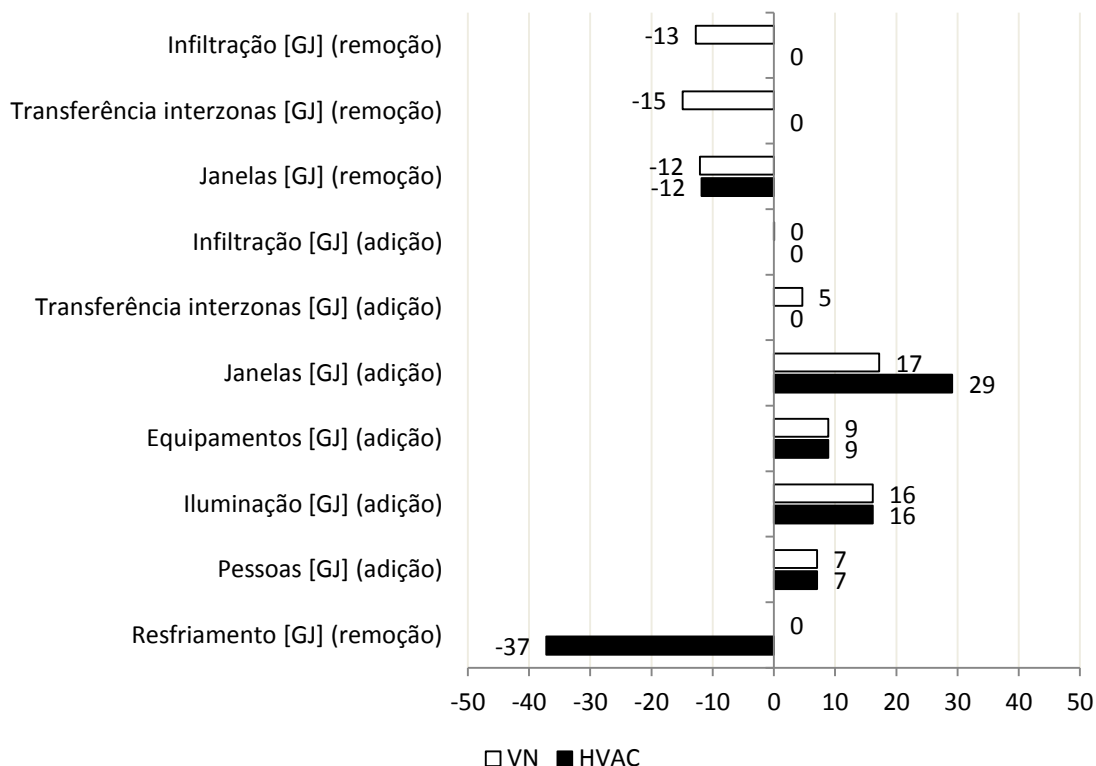


Figura 5 – Perdas e ganhos de calor sensível por componentes, sistemas e ocupação nos casos HVAC e VN.

No caso VN (barras brancas), a parcela de ganho de calor sensível através da área de vidro (17GJ) se aproxima da parcela de perda de calor sensível pela mesma (12GJ). Neste caso, a infiltração e a troca de calor entre as zonas são as principais responsáveis pela retirada de calor da zona (quase 70% da retirada de calor). São 12,8GJ de calor retirados por infiltração de ar e 14,9GJ devido à transferência entre zonas, já que o pavimento não conta com o resfriamento mecânico para manutenção constante da temperatura em todas as zonas. Fica evidente, portanto, a eficácia do uso da ventilação natural seletiva como ferramenta de resfriamento passivo.

A ocorrência de conforto para o caso HVAC, baseado na abordagem analítica proposta para edifícios condicionados é ilustrada na Figura 6, apresentando a zona de conforto para determinada resistência da vestimenta e relacionando temperatura operativa e taxa de umidade do ar na zona. Para os cálculos da temperatura operativa foi considerada uma velocidade do ar inferior a 0.2m/s nas simulações. É possível notar que grande parte da ocorrência dos pontos no gráfico encontra-se dentro dos limites da zona de conforto, excetuando-se casos em que a umidade extrapola os valores máximos permitidos, ou seja, não há desconforto por calor e apenas poucas horas de desconforto por frio em momentos específicos do ano. Conforme esperado, o uso do condicionamento ativo é capaz de manter condições de conforto adequadas em grande parte das ocorrências.

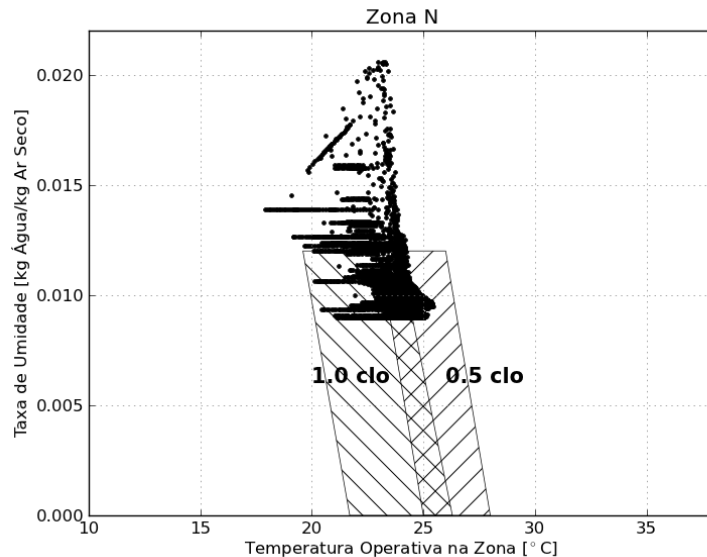


Figura 6 - Zona de conforto, correlacionado temperatura operativa, umidade relativa e resistência térmica da vestimenta. – Caso HVAC.

Na Figura 7 são apresentadas a ocorrência da temperatura operativa ( $T_o$ ) em relação à temperatura externa ( $T_e$ ) para cada hora de análise, realizado sobre o gráfico de intervalo das temperaturas aceitáveis, constante da ANSI/ASHRAE 55. São informados ainda a função de regressão linear para os pontos do gráfico e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) dos mesmos. Esta representação permite a verificação do comportamento térmico da edificação, facilitando a compreensão do mesmo, já que apresentam-se diretamente sobre o gráfico presente na norma. Nota-se a concentração das temperaturas em grande parte entre os 90% de aceitabilidade térmica.

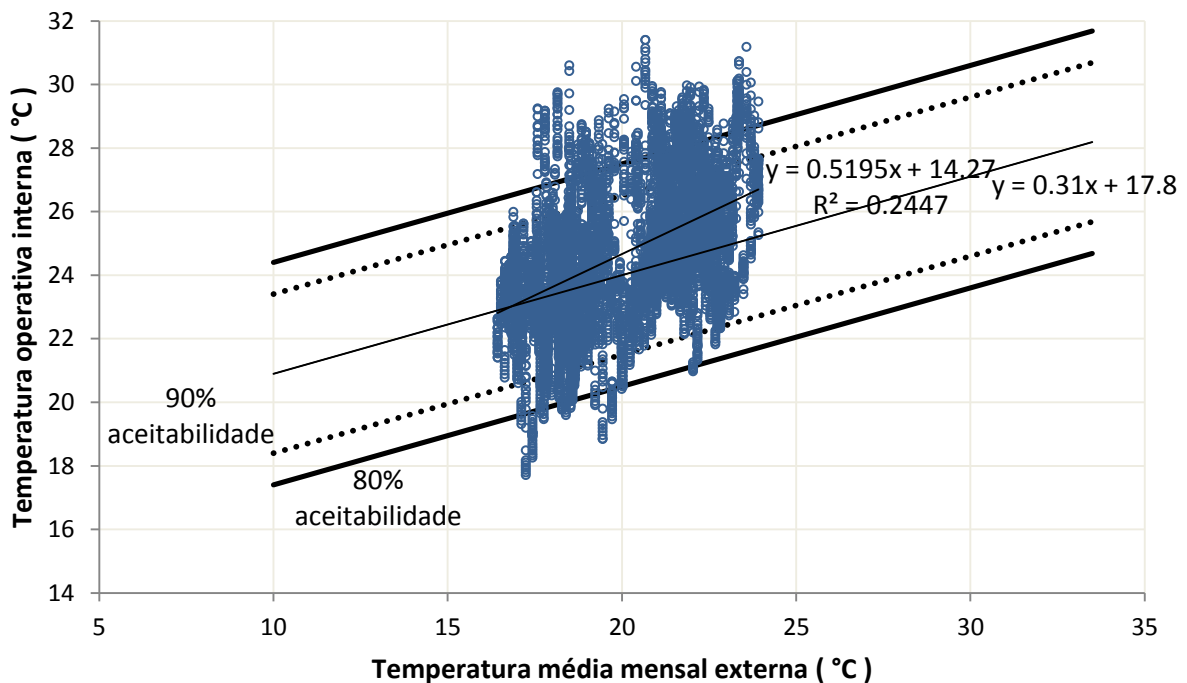


Figura 7 - Gráfico de análise de regressão e coeficiente de determinação – Caso VN.

Na Figura 8 e na Figura 9 é apresentada a variação horária da temperatura operativa da zona norte de cada modelo para um dia de verão e um dia de inverno, respectivamente. Nota-se a temperatura constante mantida pelo condicionamento artificial do modelo HVAC e a sutil variação da temperatura do caso VN nos horários de maior temperatura em contraposição à amplitude diária da temperatura externa de, aproximadamente, 15°C no verão e 10°C no inverno.

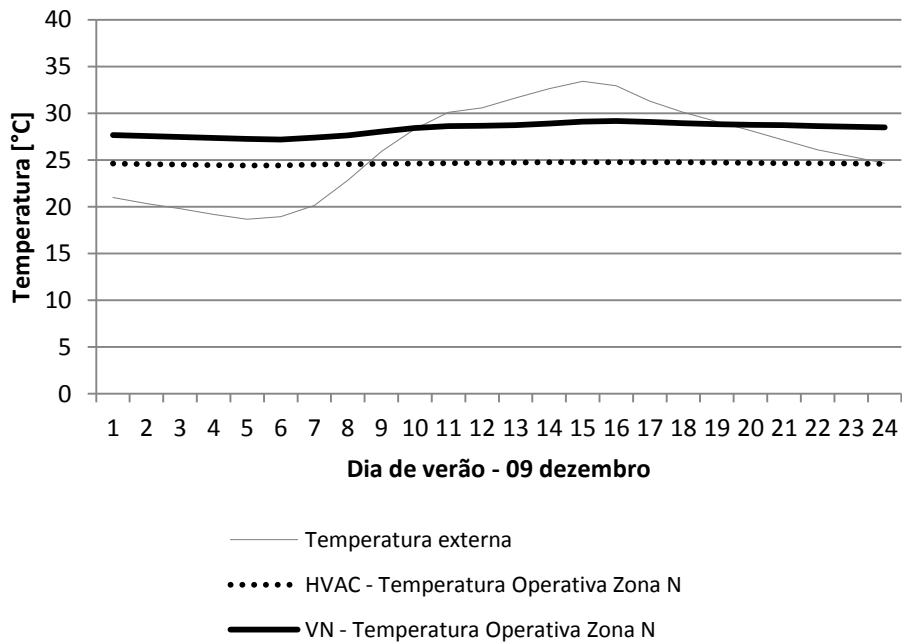


Figura 8 – Temperaturas operativas da zona analisada de cada caso para um dia de verão (09 de dezembro).

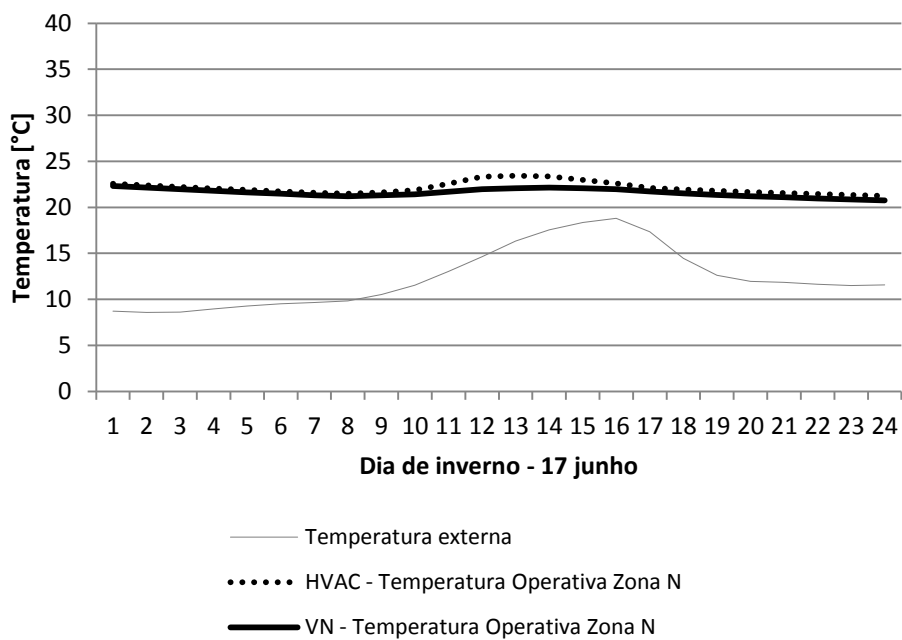


Figura 9 – Temperaturas operativas da zona analisada de cada caso para um dia de inverno (17 de junho).

A ocorrência de conforto para o caso VN é ilustrada na Figura 10Figura 7, apresentando a distribuição do conforto em relação aos meses do ano para 80% e 90% da população, baseado na abordagem adaptativa proposta para edifícios ventilados. É possível notar que grande parte das ocorrências encontra-se dentro do intervalo de conforto (81,51% para 90% da população), ou seja, neste caso, apenas com o uso da ventilação natural, dada as condições de conforto apresentadas pelo modelo adaptativo, seria possível obter condições satisfatórias para grande parte do ano na edificação. Entretanto, observando o gráfico pontualmente, os meses de Fevereiro e Outubro apresentam grande grau de desconforto por calor, o que poderia ser minimizado pelo resfriamento artificial.



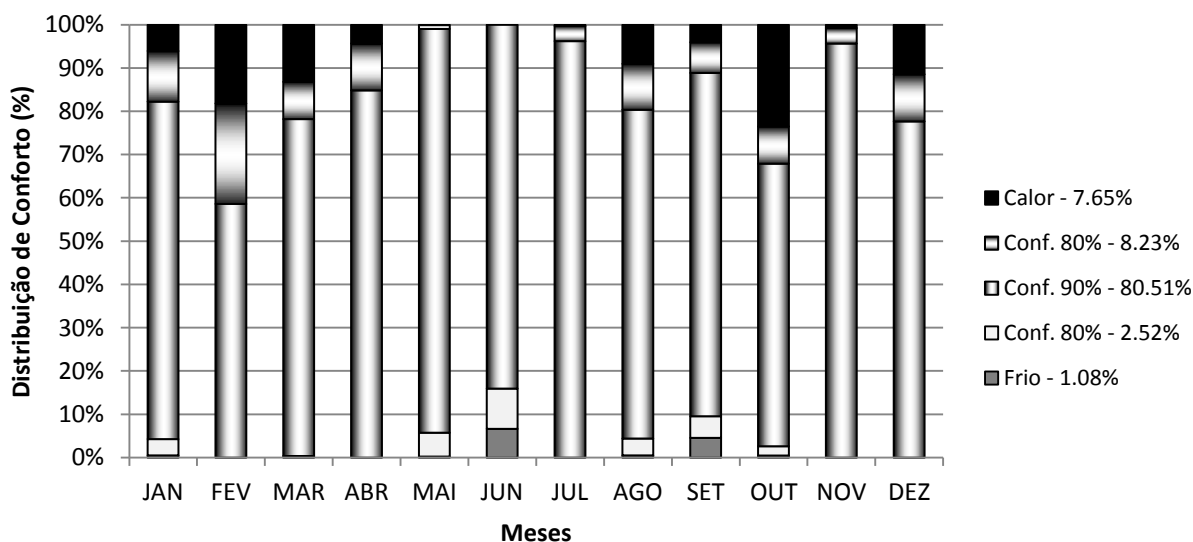


Figura 10 – Distribuição do conforto térmico nos meses do ano – Caso VN.

Por fim, a Figura 11 apresenta a comparação da remoção de calor sensível retirada do ambiente de cada modelo. O modelo com ventilação natural retira, mensalmente, entre 35% e 72% do calor removido pelo modelo com ar condicionado. A partir dos gráficos já apresentados de desempenho térmico pode-se afirmar que apesar da disparidade nos períodos de maior temperatura (meses de verão), a quantidade de calor sensível retirado é suficiente para a obtenção de índices elevados de conforto térmico segundo o modelo adaptativo de conforto, demonstrando a importância do uso de ferramentas de resfriamento passivo na redução do consumo energético.

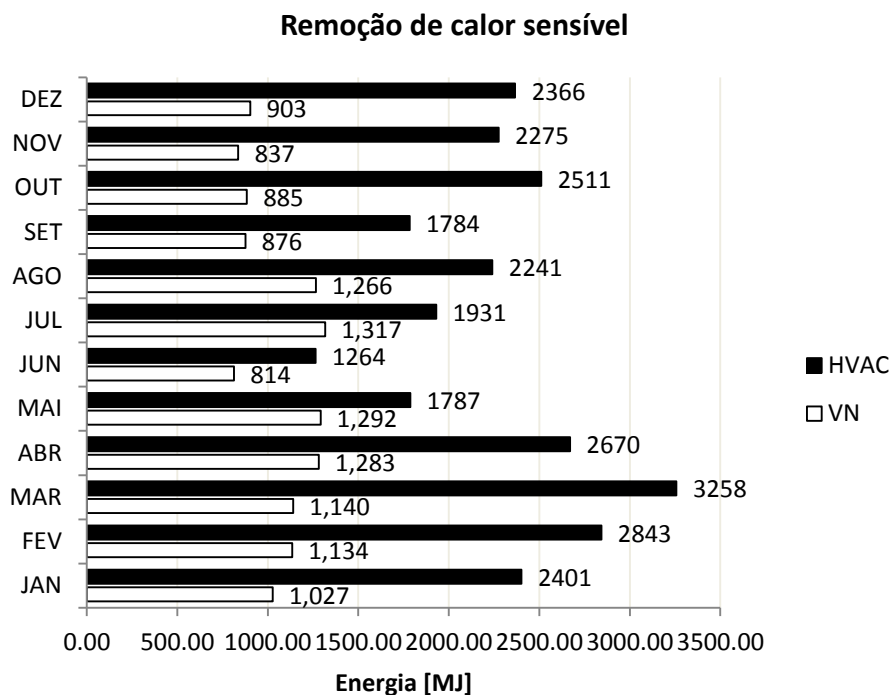


Figura 11 - Comparação entre retirada de calor sensível pelo sistema de ar condicionado e por ventilação natural.

## 5. CONCLUSÕES

O estudo demonstrou a eficiência da ventilação natural como estratégia passiva de resfriamento para edifícios comerciais. No caso HVAC (condicionado artificialmente), o ambiente apresenta temperaturas

dentro dos limites de conforto na maior parte do ano. As perdas de calor ocorrem principalmente pelo funcionamento do sistema de condicionamento de ar e pequena parte pelas aberturas envidraçadas.

Já no caso VN (ventilado naturalmente), as perdas de calor ocorrem principalmente devido à infiltração e transferência entre zonas, além de pelas aberturas. Os ganhos de calor, assim como no caso HVAC, ocorrem pelas aberturas envidraçadas e pelo seu uso e ocupação, com o adicional da transferência de calor entre zonas.

Através do gráfico comparativo entre a perda de calor sensível por ventilação e pelo sistema de ar condicionado, é possível notar a eficiência da estratégia passiva do caso VN, capaz de remover entre 35% (Outubro) e 72% (Maio) do calor sensível que o sistema de ar condicionado remove no caso HVAC.

Analisando o desempenho térmico através de métodos adequados a cada caso, comprovou-se também que além de apresentar significativo potencial de economia de energia com refrigeração, a ventilação natural proporciona conforto aos seus usuários em mais de 80% das horas do ano. Entretanto os resultados apontam também a necessidade de integração das estratégias passivas e ativas para que possam minimizar o desconforto gerado pela ineficiência da ventilação natural somente e a demanda de resfriamento solicitada pelo modelo completamente condicionado artificialmente.

Estudos posteriores visam analisar o impacto de edificações vizinhas no desempenho desta estratégia combinada (ventilação natural e resfriamento artificial), já que o adensamento das áreas urbanas afeta diretamente a disponibilidade de aproveitamento dos ventos e de radiação solar direta.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. 1992. ANSI/ASHRAE Standard 55 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta: ASHRAE.

\_\_\_\_\_. 2004. ANSI/ASHRAE Standard 55 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta: ASHRAE.

De DEAR, R. J.; BRAGER, G. & COOPER, D. (1997). Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference (p. 312).

GRAÇA, G. C. da; LINDEN, P.; McCONAHEY, E. & HAVES, P. Design and testing of a control strategy for a large, naturally ventilated office building. In: International IBPSA Conference, 8, 2003, Eindhoven. **Proceedings...** Eindhoven: IBPSA, 2003. p. 399–406.

HEISELBERG, P.; Bjørn, E; NIELSEN, P, V. Impact of Open Windows on Room Air Flow and Thermal Comfort. **International Journal of Ventilation**: October 2002, Vol. 1, No. 2, pp. 91-100.

INTERNATIONAL STANDARD. 1994. **ISO 7730 Ergonomics of the thermal environment**. Geneva: ISO.

KEMPTON, W., & LUTZENHISER, L. (1992). Introduction. **Energy and Buildings**, 18, 171–176.

NICOL, J. F.; HUMPHREYS, M. A. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. **Energy and Buildings** [S.l.], v. 34, n. 6, p. 563-572, jul 2002.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP e à CAPES pelo financiamento da pesquisa.