



ANÁLISE NUMÉRICA DA INFLUÊNCIA DE CARGAS TÉRMICAS DE ILUMINAÇÃO E DE EQUIPAMENTOS NO CONFORTO TÉRMICO EM AMBIENTES DE ESCRITÓRIOS NATURALMENTE VENTILADOS

Flávio Bomfim Mariana (1); Arlindo Tribess (2)

(1) Engenheiro, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica,
flavio.mariana@gmail.com

(2) Professor Associado do Departamento de Engenharia Mecânica, atribess@usp.br
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica, Laboratório de Conforto Térmico e Qualidade do Ar, São Paulo - SP, 05508-970

RESUMO

Com a disseminação do conceito de sustentabilidade, tem sido verificado um aumento no interesse por sistemas que demandam baixo ou nenhum consumo de energia, assim como uma maior preocupação com a qualidade do ar interior. Sistemas de ventilação natural podem atender a estes requisitos, porém faz-se necessária uma análise pormenorizada das condições ambientais para se prover o conforto térmico. No presente trabalho foi avaliada a influência das cargas térmicas de iluminação e de computadores e monitores, no conforto térmico em ambientes de escritórios naturalmente ventilados utilizando dinâmica dos fluidos computacional (CFD). Na análise foram utilizadas janelas maxim-ar e mobiliário com divisórias de 1,10 m de altura. Verificou-se que a diferença entre a temperatura do ar no interior do ambiente e a temperatura externa, função das cargas térmicas de iluminação e de equipamentos, sofre pouca influência da temperatura do ar exterior. Verificou-se também que a utilização de estratégias de diminuição da iluminação e dos equipamentos no interior do ambiente propiciou uma diminuição na temperatura do ar no ambiente de até 0,8°C. Por fim, analisando-se o conforto térmico dos ocupantes para a situação com temperatura externa de 27,4°C, foram verificadas diferenças significativas no percentual de ocupantes em condições de conforto térmico, com um aumento de 14% para 81% utilizando-se as estratégias de redução das cargas térmicas.

Palavras-chave: ventilação natural, CFD, conforto térmico, ambientes de escritórios.

ABSTRACT

Among the spread of sustainability concept, it has been found an increase interest on systems that have low or zero energy consumption. Similarly, there is a growing concern with indoor environmental quality. Natural ventilation systems can match these expectations, but detailed analysis on the environmental conditions is necessary to obtain an environment which provides good comfort conditions. The present report studied the influence of lighting, computers and monitors heat gains on thermal comfort of naturally ventilated offices using computational fluid dynamics (CFD). In this analysis maxim-air windows and furniture with 1.10m height partitions were used. It was verified that the difference between air temperature inside and outside the environment, due to lighting and equipment heat gains, is weakly influenced by external air temperature. Furthermore, it was verified that the usage of strategies to reduce lighting and equipments inside the office environment led to an air temperature reduction of up to 0.8°C. At last, analysing the occupants' thermal comfort for the situation with external temperature of 27.4°C, significant differences of the occupants' percentage within thermal comfort conditions were verified, with an increase of 14% to 81% using the heat gains reduction strategies.

Keywords: natural ventilation, CFD, thermal comfort, office environments.

1. INTRODUÇÃO

A ventilação de ambientes com renovação de ar externo deve prover nível apropriado de qualidade do ar interior, removendo e diluindo os contaminantes destes ambientes (ASHRAE, 2007a e ABNT, 2008c), e propiciando condições de conforto térmico (ASHRAE, 2010; ISO, 2005 e ABNT, 2008b).

Em edificações de uso comercial tem sido cada vez mais frequente a ventilação dos ambientes interiores por meio do uso de sistemas de ar condicionado. Estes sistemas, contudo, são responsáveis por parcela significativa do consumo de energia das edificações. Segundo dados do Procel Edifica (LEDUC, 2008), estes sistemas respondem por 34% deste consumo. O Balanço Energético Nacional de 2010 (BRASIL, 2010) indica que 23,7% de toda a eletricidade consumida no Brasil tenha fins comerciais e públicos.

Por outro lado, no caso da ventilação natural, não ocorre consumo de energia, pois o sistema de ventilação consiste em sistemas de fachada que permitem a utilização dos recursos eólicos para ventilar os ambientes interiores, auxiliando na dispersão dos poluentes presentes, assim como na obtenção de condições de conforto térmico dos ocupantes. Todos os processos de tomada de ar externo, insuflamento e exaustão são realizados sem o auxílio de equipamentos mecânicos, como ventiladores por exemplo.

Contudo, em muitas situações, em função das cargas térmicas internas e das condições climáticas, o uso da ventilação natural não é apropriado (CIBSE, 2005). Para a correta utilização deste sistema é necessário que seja realizado, inicialmente, estudo pormenorizado de viabilidade de utilização dos recursos naturais, suas potencialidades e limites. É nesta linha de estudos que se insere o presente trabalho. Ademais, com a disseminação do conceito de desenvolvimento sustentável tem sido verificado um aumento significativo no interesse por sistemas de baixo ou nenhum consumo de energia. Função disto, estudos de viabilidade de utilização da ventilação natural tem crescido em importância.

2. OBJETIVO

Este artigo tem como objetivo analisar a influência de elementos geradores de carga térmica de iluminação e de equipamentos, nas condições de conforto térmico, em um ambiente de escritório naturalmente ventilado, utilizando programa de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) comercial, o ANSYS Fluent.

3. MÉTODO

Nas subseções 3.1 a 3.4 encontra-se uma descrição sobre os aspectos relevantes da edificação e do escritório analisado nas simulações numéricas, bem como o processo de modelagem e a física envolvida no programa numérico, as condições de contorno empregadas e os parâmetros utilizados para se avaliar o conforto térmico dos ocupantes no ambiente descrito.

3.1. Detalhes da edificação e do escritório

Na cidade de São Paulo, as edificações comerciais apresentam mais frequentemente plantas com formato quadrado ou retangular. A área total média é de aproximadamente 1.000m², sendo 70% deste valor destinado à área privativa dos escritórios e os 30% restantes para a área comum da edificação (MARCONDES, 2010). Em geral, as plantas retangulares são mais propícias para o emprego da ventilação natural (CIBSE, 2005), de forma que se optou por utilizar esta geometria com as características descritas anteriormente, como pode ser visto na Figura 1.

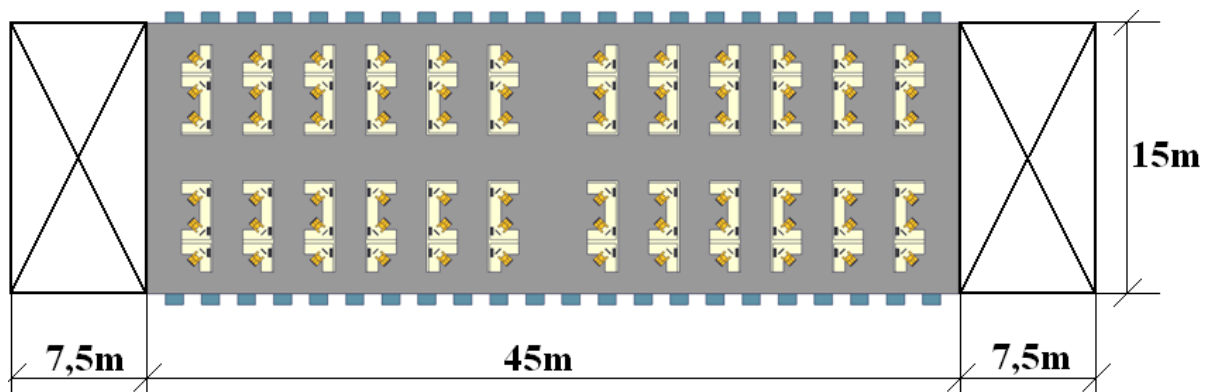


Figura 1 – Planta retangular utilizada nas simulações numéricas.

Verificou-se na literatura que para ambientes de escritórios naturalmente ventilados, usualmente, são feitas análises com dois tipos de janelas, a maxim-ar e a de correr vertical (MARIANA, 2013). Em estudo realizado por Mariana e Tribess (2012b) foi verificado que a janela maxim-ar provê condições ambientais mais favoráveis para um escritório naturalmente ventilado, sendo utilizada no presente trabalho (Fig. 2).

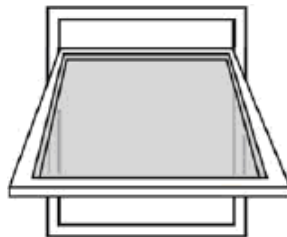


Figura 2 – Representação da janela maxim-ar (Adaptado de CIBSE, 2005).

Com relação ao mobiliário, foram utilizadas estações de trabalho em “L”, mais comumente utilizadas no Brasil (ANDRADE, 2005). Neste tipo de estação de trabalho, além da superfície de trabalho, existe um armário, as partições, um computador, um monitor e a cadeira, além do ocupante, como ilustra a Figura 3.

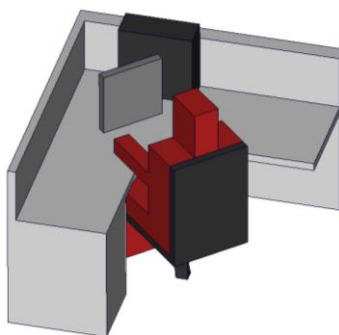


Figura 3 – Estação de trabalho utilizada.

A altura das partições entre estações de trabalho utilizada nas simulações foi de 1,10m. Esta altura permite que o fluxo de ar no escritório desenvolva-se melhor do que com partições de 1,50m e apresenta resultados similares aos de alturas de 0,90 m, porém provendo maior privacidade (MARIANA; TRIBESS, 2012a). A disposição destas estações de trabalho deu-se em um formato em linha, como ilustrado na Figura 1. Uma tendência de se obter condições ambientais mais favoráveis foi obtida utilizando-se este *layout* no lugar de uma disposição quadrada (MARIANA, 2013).

3.2. Características do modelo numérico

Na simulação numérica de CFD, inicialmente deve ser adotado um domínio de cálculo, no qual será estudado o escoamento do ar e outras variáveis pertinentes, como a transferência de calor. Neste trabalho, o domínio analisado compreende toda uma região ao redor da edificação onde está localizado o escritório, além dos outros pavimentos da construção, conforme ilustrado na Figura 4.

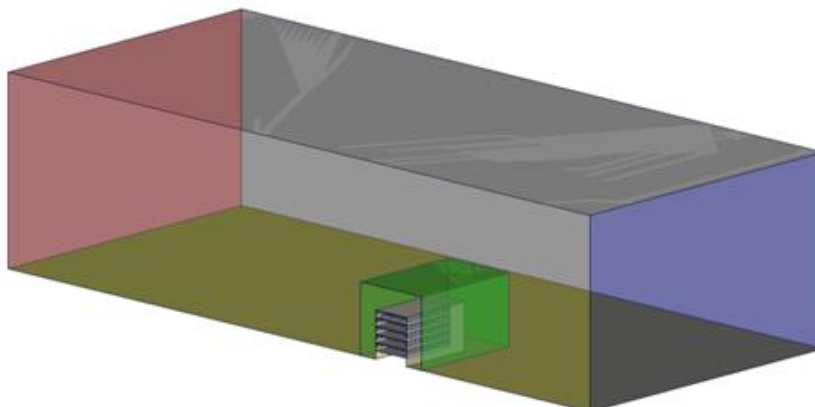


Figura 4 – Domínio utilizado.

Neste domínio é criada então uma malha volumétrica, que consiste na divisão do volume total analisado em pequenos volumes com formatos geométricos básicos, como por exemplo tetraedros. Para cada um destes elementos, o programa computacional resolve as equações que descrevem o movimento do fluido, assim como a transferência de calor. Desta forma, quanto mais elementos houver, maior será a quantidade de equações a ser resolvida e conseqüentemente maior o tempo necessário para o computador efetuar os cálculos.

As equações básicas que descrevem o escoamento estão relacionadas com a conservação da massa e a velocidade do fluido. Entretanto, como a ventilação natural é um fenômeno complexo, são necessárias equações adicionais para descrevê-la adequadamente. Por exemplo, a ventilação natural é classificada como um escoamento turbulento, de forma que faz-se necessário escolher um modelo de turbulência com equações específicas para descrever o fenômeno. Neste trabalho, optou-se pela utilização de um modelo de turbulência chamado k-ε realizável.

Como também há a transferência de calor por convecção e radiação, necessita-se resolver uma equação relacionada à temperatura dos elementos do domínio. Além disso, um modelo para a transferência de calor por radiação é necessário, sendo adotado neste trabalho o modelo DO (*Discrete Ordinates*).

No domínio são definidas então condições de contorno, que são condições básicas de referência, como por exemplo a existência de paredes ou uma velocidade do vento longe do objeto de estudo. Além disso, efetua-se uma estimativa inicial das propriedades importantes do escoamento, como velocidade, pressão e temperatura, para cada um dos elementos que compõe o domínio.

A partir destas condições de contorno e da estimativa inicial, o programa computacional ANSYS Fluent (2010) recalcula o valor das propriedades do escoamento diversas vezes, sendo que em cada etapa de cálculo há um erro associado a cada equação. Quando estes erros se tornam menores do que um determinado valor, diz-se que houve convergência do problema e que a solução do problema foi obtida. Além destes, foram utilizados mais dois critérios de convergência: o monitoramento da vazão mássica de ar através das janelas e a temperatura do ar em um ponto arbitrário no ambiente naturalmente ventilado, por serem fundamentais para garantir a qualidade dos resultados (Mariana, 2013).

3.3. Condições de contorno

Na Figura 4, é possível verificar as condições de contorno utilizadas no modelo numérico. Uma delas é a presença de um subdomínio de refinamento, indicado pela região verde próxima da edificação. Esta abordagem permite que se obtenha com maior precisão a interação do vento ao longe com a edificação, fundamental para obter uma boa representação de como o ar entra nos escritórios através das janelas.

Outra condição é a existência de um plano vertical de simetria, localizado na metade da edificação e do domínio ao redor dela. Uma vez que a geometria analisada é efetivamente simétrica em relação a este plano, as características do escoamento também devem ser simétricas. Desta forma, obtém-se um mesmo resultado utilizando-se apenas metade dos recursos computacionais que seriam necessários, reduzindo pela metade também o tempo de simulação.

Esta região de simetria geométrica, assim como a parede lateral e o topo do domínio, foi modelada impondo-se a condição de simetria numérica (*symmetry*) no modelo computacional. Estas paredes encontram-se suficientemente distantes da edificação, de forma que o escoamento não é afetado pela presença da construção e é possível utilizar esta condição de contorno. Na parede vermelha foi utilizada a condição de saída do escoamento (*outlet*), impondo-se uma pressão estática igual a 0Pa. Na entrada, indicada em azul na Figura 4, utilizou-se a condição de entrada (*inlet*), com imposição de um perfil de velocidade.

Existem duas maneiras principais de representar o perfil médio do vento: o modelo logarítmico e o das potências. Na bibliografia constatou-se que, quando empregado um modelo para representar o perfil de velocidades do vento, optou-se pelo logarítmico (EVOLA; POPOV, 2006; CÓSTOLA, 2006), pois o modelo de potências é mais simplificado (MANWELL; MCGOWAN; ROGERS, 2009). Por fim, utilizou-se como condição de contorno uma taxa de geração de calor para os elementos que causam aquecimento do ar do escritório. Inicialmente, foram utilizados como elementos geradores de carga térmica computadores, monitores, ocupantes e iluminação do ambiente. Para os três primeiros, os valores de liberação de calor foram obtidos da norma NBR 16401-1 (ABNT, 2008a), enquanto que o valor de densidade de potência de iluminação foi obtido da norma ASHRAE 90.1 (ASHRAE, 2007b), onde se considera eficiente o uso de 12W/m² para ambientes de escritórios,

Posteriormente, foram feitas análises reduzindo-se a iluminação dos ambientes ou trocando os computadores e monitores por computadores portáteis e a combinação destas duas estratégias. Na Tabela 1 encontram-se os valores de taxa de geração de calor de cada um dos elementos descritos.

Tabela 1 - Elementos geradores de carga térmica utilizados.

Elemento	Taxa de Liberação de Calor
Computadores comuns	55W
Monitor médio	70W
Ocupante com atividade moderada em trabalhos escritório	130W
Iluminação	12W/m ²
Computadores portáteis	15W
Iluminação reduzida	4,5W/m ²

Por fim, a temperatura externa também sofreu modificações para se verificar as mudanças nas condições de conforto térmico. Com as condições descritas anteriormente, as simulações utilizaram temperaturas externas de 25,9°C e 27,4°C (299,0K e 300,5K, respectivamente).

3.4. Análise do conforto térmico

A norma ASHRAE 55 (ASHRAE, 2010) utiliza o conceito de conforto adaptativo para avaliar ambientes naturalmente ventilados, onde os ocupantes têm possibilidade de atuar sobre as aberturas e a sua vestimenta. A temperatura operativa ideal (T_{id}) pode ser obtida por meio da Equação 1.

$$T_{id} = 0,31 \cdot \bar{T}_o + 17,8 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

T_{id} é a temperatura operativa ideal [°C];

\bar{T}_o é a temperatura média mensal do ar externo [°C].

Para a Eq. 1 ser válida, é necessário que a temperatura média mensal externa esteja em uma faixa de 10°C a 33,5°C (ASHRAE, 2010). Existe ainda um intervalo de tolerância para a temperatura operativa ideal de conforto, considerando condições de conforto para 90% ou 80% dos ocupantes do ambiente, conforme indica a Figura 5.

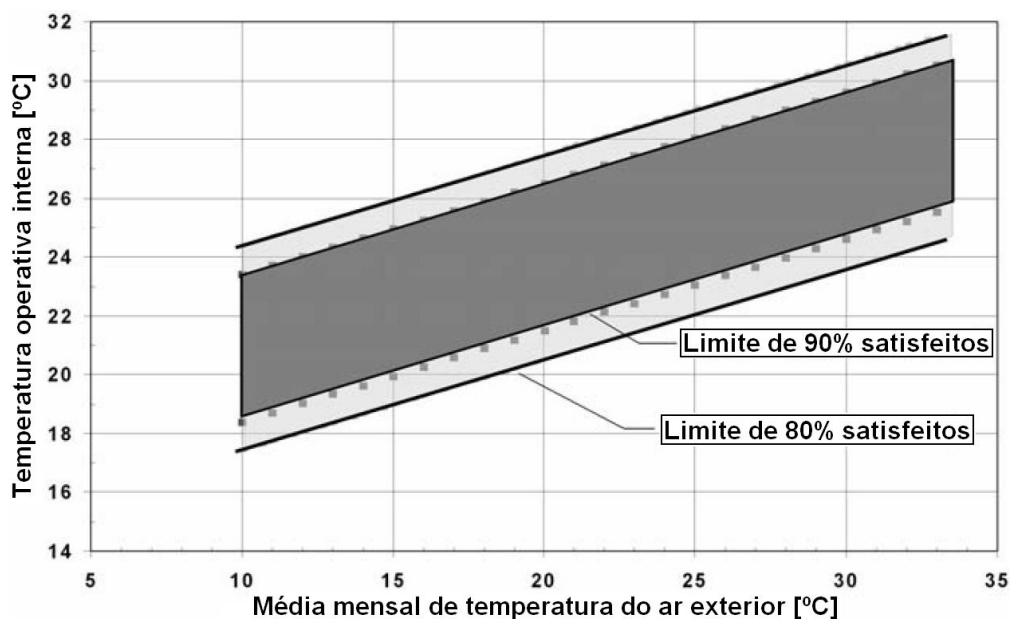


Figura 5 – Faixas de temperaturas operativas aceitáveis para conforto em ambientes ventilados naturalmente (adaptado de ASHRAE, 2010).

Para verificar a ocorrência de condições de conforto térmico deve-se comparar a temperatura operativa do limite de 90% ou 80% satisfeitos, indicada na Figura 5, com a temperatura operativa nas estações de trabalho, Top, dada pela Equação 2.

$$T_{op} = A \cdot T_{ar} + (1 - A)T_{r-med} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

T_{op} é a temperatura operativa no ambiente [°C];

A é um coeficiente de ajuste de acordo com a velocidade do ar, dado pela Tabela 2;

T_{ar} é a temperatura do ar [°C];

T_{r-med} é a temperatura radiante média [°C].

Tabela 2–Valores do coeficiente “A” da equação de cálculo da temperatura operativa (Adaptado de ASHRAE, 2010).

Velocidade do ar	< 0,20m/s	0,20 a 0,60m/s	0,6 a 1,0m/s
Coeficiente “A”	0,5	0,6	0,7

Considerando que no presente trabalho pretende-se analisar somente os efeitos da ventilação natural e, portanto, da temperatura do ar, T_{ar} , na avaliação de condições de conforto térmico não serão considerados efeitos da transferência de calor por radiação e, portanto, será considerado $T_{ar} = T_{r-med}$. Assim, a equação 4.3.2 pode ser reescrita na forma da Equação 3.

$$T_{op} = T_{ar} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

T_{op} é a temperatura operativa no ambiente [°C];

T_{ar} é a temperatura do ar [°C].

É importante ressaltar que os efeitos da troca de calor por radiação foram considerados nas simulações numéricas (ver item 3.2) para determinação das temperaturas do ar, T_{ar} . O que está se desconsiderando é tão somente o efeito de uma temperatura radiante média, T_{r-med} diferente da temperatura do ar, T_{ar} , na análise do conforto térmico, como forma de melhor se verificar os efeitos da ventilação natural nas condições de conforto térmico.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Nas próximas seções estão apresentados os resultados obtidos nas simulações numéricas com as geometrias e condições apresentadas anteriormente. Analisou-se a variação de elementos geradores de carga térmica, como iluminação e equipamentos elétricos, e da temperatura do ar externo, respectivamente nas seções 4.1 e 4.2. Por fim, na seção 4.3 são apresentados os resultados de análise de conforto térmico nos ambientes avaliados, utilizando os resultados de temperatura do ar, T_{ar} , obtidos nas simulações numéricas e o procedimento descrito na seção 3.4.

4.1. Variação dos elementos geradores de carga térmica

A redução das cargas térmicas do ambiente de 39,3W/m² para 31,7, 27,5 e 20,0W/m² (com redução da iluminação, equipamentos e ambas as reduções, respectivamente) proporcionou uma redução na temperatura do ar em todas as situações analisadas, como pode ser visto na Tabela 3. Nesta tabela verifica-se, por exemplo, que o ambiente com redução da densidade de iluminação apresentou redução de 0,3°C na temperatura do ar.

Tabela 3 - Temperatura média do ar para a variação dos elementos geradores de carga térmica com temperatura externa de 25,9°C.

Temperatura Média do Ar [°C]			
Carga Normal	Iluminação Reduzida	Computadores Reduzidos	Iluminação + Computadores Reduzidos
28,0	27,7	27,5	27,2

Já no ambiente com a troca de computadores e monitores por computadores portáteis houve redução de 0,5°C na temperatura do ar. É interessante verificar da Tabela 3 também que, para as condições analisadas, existiu linearidade na redução da temperatura com a redução da carga térmica do ambiente, com redução total de 0,8°C quando as duas reduções foram avaliadas simultaneamente.

Em especial, para o caso de maior redução na carga térmica, a diminuição da temperatura do ar foi de aproximadamente 1,0°C nas fileiras mais próximas da saída do ar. Nas fileiras mais próximas da entrada do ar, a redução média foi de 0,5°C, indicando que houve diferença significativa entre os grupos de fileiras. A Figura 6 apresenta planos horizontais onde é possível verificar qualitativamente a redução mais significativa da temperatura nas estações de trabalho à jusante.

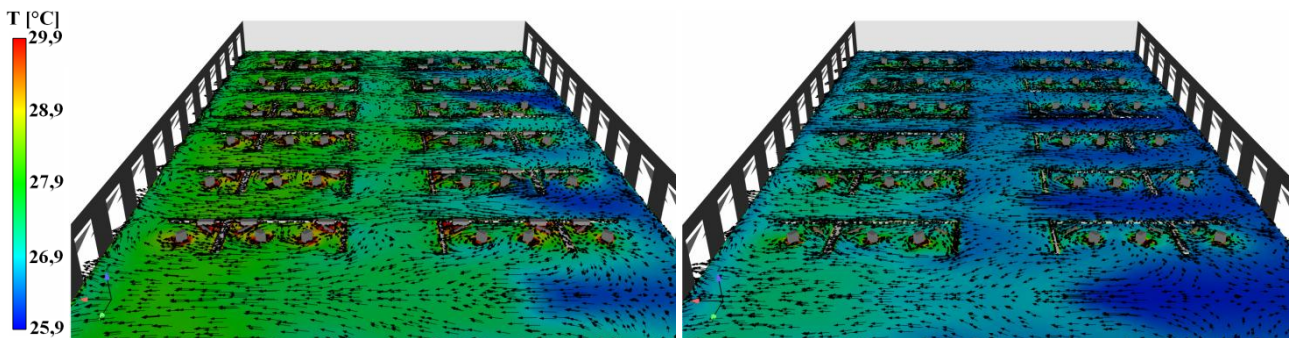


Figura 6 - Plano horizontal $z = 1,10\text{m}$ colorido por temperatura com vetores de velocidade a figuração com carga térmica completa (esq.) e com a maior redução (dir.).

Analisando planos verticais, como o da Figura 7, é possível verificar que com a redução da carga térmica houve também um aumento dos vetores de velocidade na parte superior do escritório. Este fluxo maior acabou aumentando o alcance do ar exterior dentro do escritório, o que melhora principalmente as condições nas estações de trabalho localizadas à jusante.

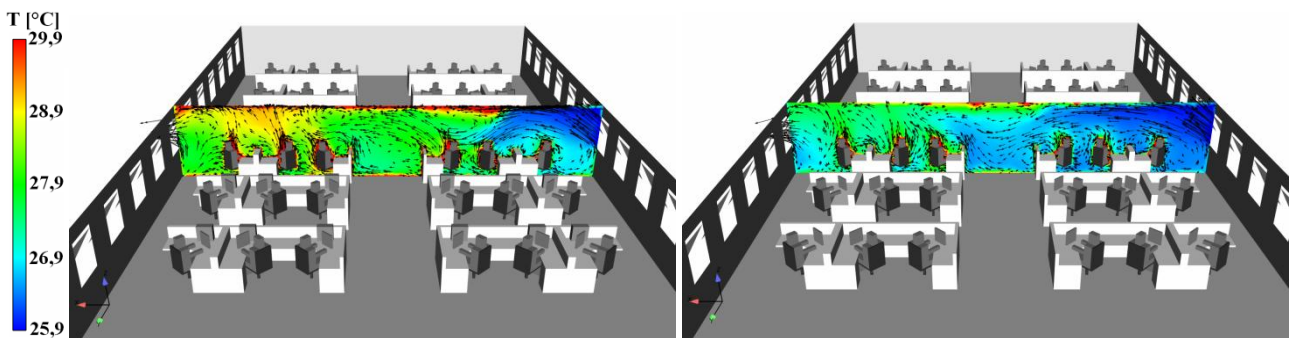


Figura 7 - Plano vertical $y = -9,30\text{m}$ colorido por temperatura com vetores de velocidade para a configuração com carga térmica completa (esq.) e com a maior redução (dir.).

4.2. Variação da temperatura do ar exterior

No mesmo ambiente, o aumento da temperatura externa de 25,9°C para 27,4°C teve como consequência natural um aumento na temperatura do ar de todas as combinações de elementos geradores de carga térmica, como pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 4 - Temperatura média do ar para a variação dos elementos geradores de carga térmica com temperatura externa de 27,4°C.

Temperatura Média do Ar [°C]			
Carga Normal	Iluminação Reduzida	Computadores Reduzidos	Iluminação + Computadores Reduzidos
29,5	29,2	29,0	28,7

Comparando os resultados da Tabela 3 com os da Tabela 4, verifica-se que o aumento de 1,5°C da temperatura externa causou exatamente o mesmo aumento de temperatura do ar em todos os casos. Desta forma, a mesma redução de temperatura verificada na seção 4.1 com a redução dos elementos geradores de carga térmica foi obtida nestes casos.

É interessante verificar na Figura 8 que o aumento da temperatura do ar externo não causou mudanças significativas no perfil do escoamento no interior do escritório, apenas no campo de temperaturas. Esse

mesmo comportamento foi repetido em todos os casos de redução dos elementos geradores de carga térmica, como exemplificado na Figura 9.

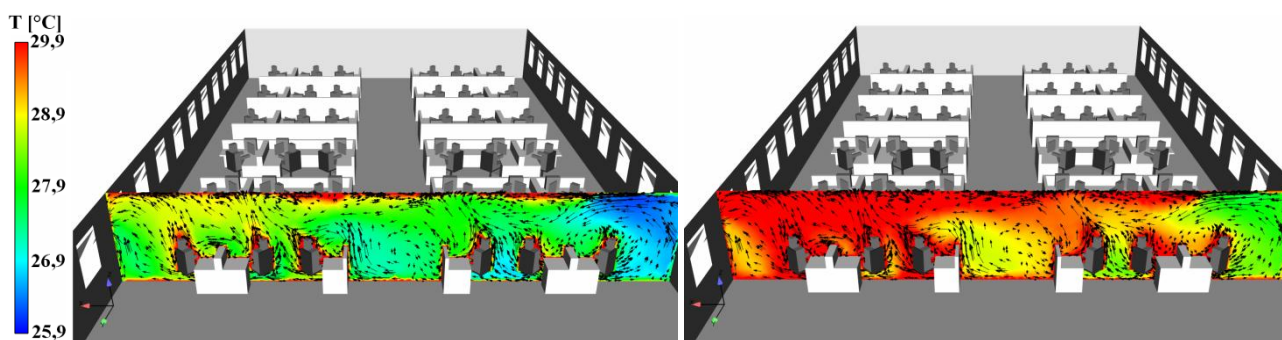


Figura 8 - Plano vertical $y = -2,50\text{m}$ colorido por temperatura com vetores de velocidade para a configuração com carga térmica completa e temperatura do ar exterior de $25,9^{\circ}\text{C}$ (esq.) e $27,4^{\circ}\text{C}$ (dir.).

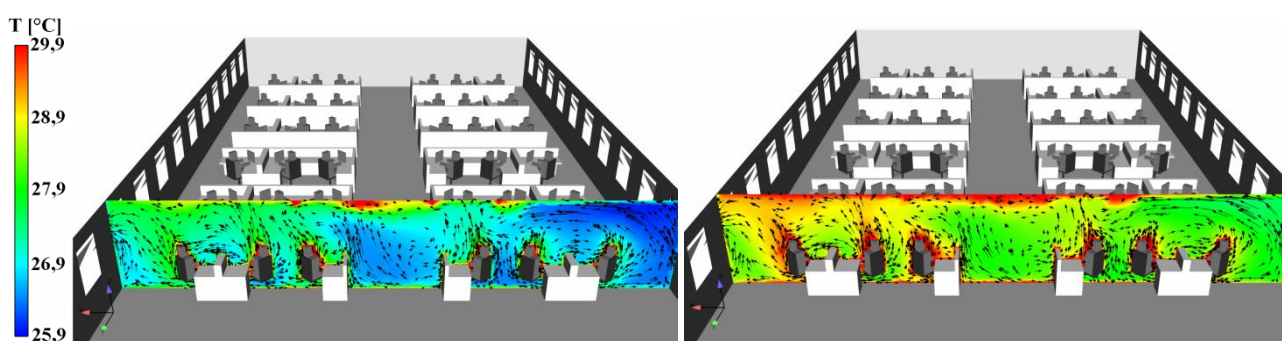


Figura 9 - Plano vertical $y = -2,50\text{m}$ colorido por temperatura com vetores de velocidade para a configuração com carga térmica com maior redução e temperatura do ar exterior de $25,9^{\circ}\text{C}$ (esq.) e $27,4^{\circ}\text{C}$ (dir.).

4.3. Análise de Conforto Térmico

Na análise dos elementos geradores de carga térmica com temperatura externa de $25,9^{\circ}\text{C}$, todos os ocupantes já se encontram dentro da região de conforto do limite de 80% satisfeitos, de forma que a redução da carga térmica no ambiente não altera estes resultados. Utilizando, no entanto, o critério do limite de 90% satisfeitos, já é possível verificar a existência de diferenças, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 - Estações de trabalho dentro das condições de conforto para 90% dos ocupantes para a variação dos elementos geradores de carga térmica com temperatura externa de $25,9^{\circ}\text{C}$.

Quantidade de Estações com Condições de Conforto Térmico			
Carga Normal	Iluminação Reduzida	Computadores Reduzidos	Iluminação + Computadores Reduzidos
44%	58%	89%	100%

Com o aumento de $1,5^{\circ}\text{C}$ na temperatura do ar exterior, já foi possível verificar diferenças com o critério do limite de 80% satisfeitos entre os ambientes com diversas cargas térmicas, como mostra a Tabela 6. Verifica-se que com a maior carga térmica quase não há ocupantes em situação de conforto, enquanto que na situação de menor carga térmica quase todos se encontram em conforto.

Tabela 6 - Estações de trabalho dentro das condições de conforto para 80% dos ocupantes para a variação dos elementos geradores de carga térmica com temperatura externa de $27,4^{\circ}\text{C}$.

Quantidade de Estações com Condições de Conforto Térmico			
Carga Normal	Iluminação Reduzida	Computadores Reduzidos	Iluminação + Computadores Reduzidos
14%	36%	53%	81%

Na Figura 10 é possível ver as estações de trabalho do escritório, onde os ocupantes foram coloridos de acordo com a condição de conforto encontrada: amarelos, os que se encontram entre os limites de 90% e 80% satisfeitos, e vermelhos, os que se encontram fora do limite de 80% satisfeitos. Na parte esquerda da Figura 10 é possível verificar que os ocupantes com condições de conforto estão nos grupos de estações de trabalho mais próximos da janela de entrada do ar. Para o caso de menor carga térmica, verifica-se da parte direita da Figura 10 que a maioria os ocupantes fora das condições de conforto estão nos grupos das estações de mais longe da janela de entrada de ar e mais perto do centro do escritório.

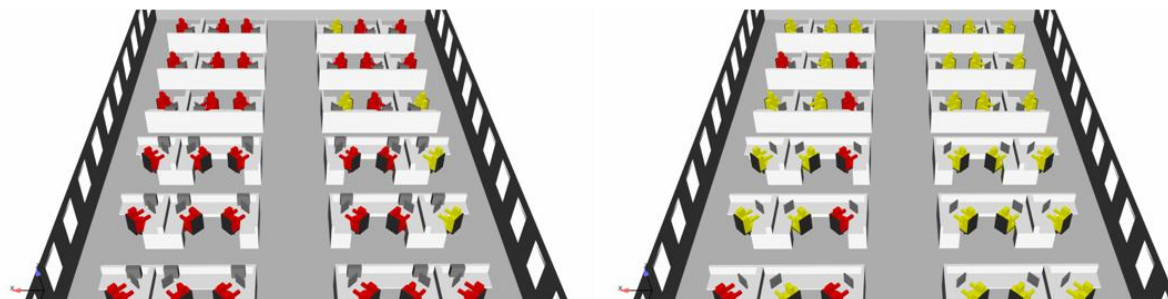


Figura 10 - Ocupantes coloridos identificando condições de conforto térmico para a temperatura externa de 27,4°C com carga térmica máxima (esq.) e carga térmica mínima (dir.).

5. CONCLUSÕES

A redução dos elementos que geram carga térmica no ambiente causou um decréscimo da temperatura do ar, o que já era esperado. Diminuir a potência instalada de iluminação e substituir os equipamentos convencionais por outros mais econômicos são medidas conhecidas e eficientes na melhoria das condições térmicas ambientais, além de reduzir o consumo de energia de uma edificação.

A diminuição na potência de iluminação significou uma redução absoluta de 3.072W instalados no escritório, enquanto que a substituição dos computadores e monitores por computadores portáteis representou uma redução absoluta de 7.920W. A princípio, a redução nos equipamentos é mais fácil de ser efetuada, já que a iluminação deve sempre prover uma iluminância mínima no plano de trabalho, de acordo com a atividade exercida no ambiente e com os valores previstos na norma NBR 5413 (ABNT, 1992).

Por meio de uma comparação simples, verifica-se que para a redução de 0,1°C na temperatura dos ambientes seria necessário reduzir em aproximadamente 500W a potência de iluminação instalada e em 800W os equipamentos. Desta forma, ressalta-se a importância de um bom projeto de iluminação quando se tem como intenção de projeto utilizar ventilação natural no ambiente, ou mesmo apenas reduzir o consumo de energia de um sistema mecânico de climatização.

Considerando a carga térmica total dos ambientes, o pior cenário possuía 39,3W/m², enquanto que no caso com menor carga térmica havia 20,0W/m². CIBSE (2005) recomenda como regra geral que a carga térmica total do ambiente não ultrapasse 40W/m², ou seja, com o acréscimo de uma carga térmica solar o pior cenário certamente ultrapassaria este limite, enquanto que outro poderia se encaixar neste perfil.

De início já se sabia que o aumento da temperatura externa causaria também um aumento da temperatura do ar no ambiente de escritório. Contudo, foi interessante verificar que, para os quatro casos de diferentes cargas térmicas internas, o aumento da temperatura exterior foi o mesmo para os ambientes. Desta forma, é possível supor a existência de certa linearidade na relação entre a temperatura exterior e interior. Como consequência, seria possível então estimar qual a temperatura externa máxima que ainda proveria condições de conforto térmico para os ocupantes.

Ventos de menor intensidade, contudo, aumentam a parcela de importância da convecção natural na troca de calor entre o ar e os elementos geradores de carga térmica. É possível que em situações de velocidade do vento muita baixa ou ausente esta relação direta entre temperatura externa e interna não seja verificada.

Destaca-se que nas duas temperaturas externas simuladas a redução da liberação de calor dos elementos geradores de carga térmica reduziu na mesma proporção da temperatura do ar no ambiente. Verifica-se, então, que esta estratégia se mantém importante mesmo em situações de temperatura exterior mais elevada.

O primeiro resultado interessante da análise do conforto térmico é a verificação de que com a escolha adequada da temperatura externa foi possível verificar o quanto as cargas internas podem influenciar as condições de conforto térmico. Como mostrado na Tabela 4, a redução da carga térmica do ambiente foi

capaz de mudar um cenário bem desfavorável, com apenas 14% das estações com condições de conforto, para outro bem mais promissor, com 81% dos locais com condições adequadas. Desta forma, muito cuidado deve ser dado às cargas térmicas internas de ambientes naturalmente ventilados.

Supondo novamente a relação de linearidade entre a temperatura do ar exterior e a interior, seria possível então utilizá-la para estimar inicialmente a temperatura limite de conforto térmico. Esta abordagem foi utilizada para se determinar a temperatura externa de 27,4°C, a fim de que fossem realçadas as diferenças entre os ambientes com cargas térmicas diferentes.

Outro aspecto que deve ser destacado é que foi possível verificar diferenças significativas no percentual de ocupantes em conforto, embora as temperaturas do ar não tenham sido tão diferentes. A causa deste fato é que pequenas oscilações de temperatura podem mudar significativamente os resultados de conforto, que são basicamente uma condição binária de “atende” ou “não atende”. Esta é uma razão pela qual a análise do conforto térmico deve ser acompanhada pela análise de outras variáveis preferencialmente contínuas, como a temperatura e a velocidade do ar.

É interessante ressaltar que em diversos casos simulados foi possível prover boas condições de conforto térmico aos ocupantes. Consequentemente, com os devidos cuidados na implantação da edificação, escolha das aberturas, configuração dos mobiliários e das cargas térmicas internas é possível utilizar sistemas de ventilação natural em ambientes de escritórios com bons resultados.

Por fim, necessita-se de cautela no emprego de simulação numérica para análise de ambientes naturalmente ventilados. Com os programas de CFD atuais é fácil obter resultados, porém a questão de se garantir boa convergência dos resíduos é fundamental para se obter boa qualidade nos resultados da simulação numérica. Informações sobre as equações utilizadas e construção dos modelos também devem sempre ser buscadas em diversas fontes na literatura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16401-1**: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários: Parte 1: Projetos das instalações. Rio de Janeiro, 2008a.
- _____. **NBR 16401-2**: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários: Parte 2: Parâmetros de conforto térmico. Rio de Janeiro, 2008b.
- _____. **NBR 16401-3**: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários: Parte 3: Qualidade do ar interior. Rio de Janeiro, 2008c.
- _____. **NBR 5413**: Iluminância de interiores. Rio de Janeiro, 1992.
- ANDRADE, C. M. **Avaliação de Desempenho em Edifícios de Escritórios: o ambiente de trabalho como meio para o bem-estar produtivo**. Tese de Doutorado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- ANSYS FLUENT. **Ansys Fluent Theory Guide**: Version 13.0. Canonsburg: Ansys Inc. 2010.
- ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS Inc. **ASHRAE Standard 55-2010**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, 2010.
- _____. **ASHRAE Standard 62.1-2007**: Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Atlanta, 2007a.
- _____. **ASHRAE Standard 90.1-2007**: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. Atlanta, 2007b.
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional**. Brasília, 2010.
- CIBSE – Chartered Institution of Building Services Engineers. **Natural ventilation in non-domestic buildings**: CIBSE Applications Manual AM10. Londres, 2005.
- CÓSTOLA, D. **Ventilação por Ação do Vento no Edifício: Procedimentos para Quantificação**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- EVOLA, G.; POPOV, V. Computational analysis of wind driven natural ventilation in buildings. **Energy and Buildings**, Oxford, v.38, p.491-501, 2006.
- ISO – INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7730**: Ergonomics of the Thermal Environment – Analytical Determination and Interpretation of Thermal Comfort using Calculation of the PMV and PPD Indices and Local Thermal Criteria. Genebra, 2005
- LEDUC, J. L. G. M. Procel Edifica: Eficiência energética em edificações – Ações desenvolvidas. In: V CONGRESSO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, São Paulo, 2008, **Anais Eletrônicos...** São Paulo, ABESCO 2008. Disponível em: <http://www.metodoeventos.com.br/5eficienciaenergetica/downloads/12-06-08/manha/jose_luis_leduc.pdf>. Acesso em: 18 mai 2009.
- MANWELL, J. F.; MCGOWAN, J. G.; ROGERS, A. L. **Wind Energy Explained: Theory, Design and Application**. 2nd ed. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2009.
- MARCONDES, M. P. **Soluções Projetuais de Fachadas para Edifícios de Escritórios com Ventilação Natural em São Paulo**. Tese de Doutorado, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- MARIANA, F. B. **Análise numérica da influência de configurações de aberturas da fachada e do mobiliário na ventilação natural em ambientes de escritórios**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- MARIANA, F. B.; TRIBESS, A. Influência do mobiliário nas condições de conforto térmico em ambientes de escritórios naturalmente ventilados. In: VII CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, São Luís, 2012. **Anais...** São Luís, UEMA 2012a.
- _____. Numerical analysis of windows and furniture influence on the airflow in naturally ventilated office. In: XIV BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING, Rio de Janeiro, 2012, **Anais...** Rio de Janeiro, UFF 2012b.