

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO SISTEMA DE CONDICIONAMENTO DE AR COM DISTRIBUIÇÃO PELO PISO EM AMBIENTE DE ESCRITÓRIO, NA CIDADE DE SÃO PAULO, UTILIZANDO O MODELO COMPUTACIONAL *ENERGYPLUS*.

Thais Aya Hassan Inatomi; Brenda Chaves Coelho Leite

Departamento de Engenharia de Construção Civil - Escola Politécnica - Universidade de São
Paulo Avenida Professor Almeida Prado, travessa 2, nº 83 – CEP 05508-900 – Cidade
Universitária

São Paulo - SP - Tel/Fax +55 11 3091-5438

e-mail: thais.inatomi@poli.usp.br; brenda.leite@poli.usp.br

RESUMO

Este trabalho tem por finalidade avaliar o desempenho energético do sistema de condicionamento de ar com distribuição pelo piso (*Underfloor Air Distribution System* – UFAD) em ambientes de escritório, considerando diferentes possibilidades de arquitetura do sistema e seus modos de operação com ciclos economizadores. Por meio de simulação computacional no programa *EnergyPlus* 2.1.0.023, as avaliações foram realizadas para o clima da cidade de São Paulo ao longo de um ano meteorológico típico, mantendo as condições de conforto térmico no ambiente. Como referência para o desenvolvimento dos modelos de simulação foi utilizada uma câmara de testes representativa de um ambiente de escritórios desenvolvida por Leite (2003) para avaliação do conforto térmico propiciado pelo sistema UFAD. As curvas de distribuição de temperatura resultantes das simulações foram similares às curvas resultantes das medições executadas por esta autora. As simulações foram realizadas para duas arquiteturas diferentes do circuito de ar combinados com três diferentes modos de operação relacionados à vazão do ar exterior. Os resultados desta pesquisa indicam uma estreita relação entre arquitetura do sistema, controle dos ciclos economizadores, e dados climáticos, revelando que a combinação entre esses parâmetros pode reduzir em até 34,5% o consumo de energia elétrica do sistema UFAD na cidade de São Paulo.

ABSTRACT

The purpose of this research is to evaluate the energy performance of the Underfloor Air Distribution (UFAD) system at office buildings, considering different air loops design and economizer cycles while keeping thermal comfort for the weather data of São Paulo city, Brazil. Simulations were held using the *EnergyPlus* software version 2.1.0.023. One chamber representing an office room was used as reference for the simulation models. This chamber was developed by Leite (2003) to evaluate the thermal comfort conditions provided by the UFAD system. The curves of temperature distribution obtained from simulation were similar to the curves obtained from measurements done by Leite (2003). Simulations were done for two different air loops (with and without return air bypass) combined with three different outside air controls. The São Paulo weather data analysis demonstrates that the outside air flow can be increased with the use of economizer cycles, reducing electric energy consumption of the UFAD system. The results of this research indicate that there is a tight relationship between the system air loop design, economizer cycle control and weather data, which reveals that the combination between these parameters can reduce about 34,5% the electric energy consumption of UFAD system at São Paulo city.

1. INTRODUÇÃO

A conscientização mundial sobre os impactos ambientais provocados pelo homem iniciou-se na década de 70, e a partir de então, convenções internacionais foram organizadas para discutir possíveis soluções para desacelerar o consumo de recursos naturais e promover a sustentabilidade. Parte do aquecimento global e impactos ambientais irreversíveis podem ser atribuídos à obtenção de energia elétrica; entretanto, sua utilização é indispensável e extremamente necessária para o desenvolvimento mundial.

No Brasil, a conscientização da necessidade do uso racional de energia elétrica acentuou-se pela crise que afetou o fornecimento e distribuição de energia elétrica em 2001 e 2002. Nesta ocasião, a falta de planejamento e investimentos no setor energético foi agravada pela escassez de chuvas, o que obrigou o país a adotar uma política de racionamento de energia. Em consequência desta crise aumentaram as discussões sobre políticas governamentais para suprir as necessidades de expansão da produção de energia, assim como políticas governamentais para redução do consumo da mesma pelo usuário final.

Dados do Balanço Energético Nacional de 2007 demonstram o crescente consumo de energia elétrica nacional ao longo do tempo, e apontam que 44,6% do consumo total de energia elétrica do país são distribuídos entre os setores residencial (22%), comercial e público (22,6%) (BRASIL, 2007).

A cidade de São Paulo é um dos melhores exemplos brasileiros de conglomerados de edifícios do setor comercial e público. É nesta cidade que se localiza a maior quantidade de edifícios comerciais do país, sendo que o setor comercial consumia aproximadamente 28% da energia elétrica do município no período de 1997 e 1998.

Considerando que o consumo do setor comercial está diretamente relacionado à própria edificação onde atua (BULLA, 1995), pode-se afirmar que o consumo de energia do setor comercial está ligado às características arquitetônicas e de padrões de uso da edificação.

A eficiência energética das edificações é, portanto, primordial para um desenvolvimento sustentável, o que conduz engenheiros e arquitetos a repensar as técnicas de projeto e tecnologias, avaliando possibilidades de interação de métodos ativos e passivos que diminuam o consumo energético e atendam às necessidades dos usuários, como, por exemplo, naquilo que se aplica ao conforto térmico, acústico, lumínico e psicológico.

No quesito desempenho do edifício, podem-se definir como edifícios energeticamente eficientes os que, em se mantendo o conforto ambiental e a qualidade do ar, consomem menos energia elétrica, mitigando impactos ambientais e sócio-econômicos.

O consumo de energia elétrica de edifícios de escritórios é devido principalmente aos sistemas de iluminação, equipamentos de escritório e sistemas de condicionamento de ar. Eles são responsáveis, respectivamente, por 24%, 15% e 48% do consumo do edifício (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 1997). Nota-se que grande parte do consumo de energia dos edifícios de escritórios é consequência do sistema de condicionamento de ar, ou seja, para promover conforto térmico (LEITE, 2003).

Os sistemas de aquecimento, ventilação e condicionamento de ar (*Heating, Ventilation and Air Conditioning* – HVAC) são, portanto, responsáveis por grande parte do consumo de energia das edificações, sendo que muitos são os fatores que influenciam a operação e a eficiência energética de tais sistemas. Dentre eles pode-se citar: o próprio sistema, com suas características intrínsecas e seus modos de operação, clima local, arquitetura da edificação e seus materiais de construção, assim como parâmetros internos tais como densidade de ocupação e tipo de trabalho desenvolvido no ambiente condicionado (INATOMI; ABE; LEITE, 2006).

Neste contexto, pesquisas tais como de Loudermilk (1999, apud Lin e Linden, 2005), Leite (2003), Bauman (2003), Chang, Kato e Chikamoto (2004), Architectural Energy Corporation (2004), McCarry (1995), Matsunawa, Iizuka e Tanabe (1995), Heinemeier, Schiller e Benton (1990), Wang, Arens e Webster (2002) e Bauman e Webster (2001), Webster, Ring e Bauman (2000), indicam que o sistema de climatização com distribuição de ar pelo piso (*Underfloor Air Distribution System* – UFAD), além de proporcionar conforto térmico ao usuário, é promissor na redução do consumo de energia, podendo

sua eficiência ser majorada em função da possibilidade de utilização de ciclos economizadores, dependendo das condições climáticas locais.

Até o fim da década de 1990 o uso do sistema de climatização com distribuição de ar pelo piso era limitado a centros de processamento de dados (CPD) principalmente nos Estados Unidos, África do Sul, Japão, Alemanha, Suíça e Itália. Desde sua introdução, este sistema despertou o interesse de pesquisadores, principalmente nos Estados Unidos, Europa, Japão e, mais recentemente, no Brasil. Tais pesquisas estudam as situações de conforto térmico promovidas por tal sistema em ambientes de escritórios, que dependem das condições térmicas resultantes no ambiente e sua aceitação por parte dos usuários (LEITE, 2003).

A potencial eficiência energética do sistema de condicionamento de ar com distribuição pelo piso atualmente estimula o desenvolvimento de diversas pesquisas científicas. Tais pesquisas abordam o consumo de energia do sistema UFAD e suas relações com temperaturas e vazões de ar de insuflação e retorno, cargas térmicas, estratificação da temperatura do ar, pressões no *plenum*, equipamentos (ventiladores, serpentinas de esfriamento, unidades de resfriamento), influências climáticas, estratégias de controle de vazão e temperatura do ar, questões relacionadas ao projeto e possibilidades de combinações com outros sistemas.

No Brasil, pesquisas desenvolvidas na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo tratam de assuntos relativos ao sistema UFAD. A exemplo disto, Leite (2003), em sua pesquisa de doutorado, verificou que o sistema UFAD promove condições de conforto térmico adequadas e indicou a potencialidade de redução de consumo de energia pela possibilidade de não se usar a refrigeração para o condicionamento do ar insuflado no ambiente (*free-cooling*) durante períodos específicos do ano, tendo em vista as condições climáticas favoráveis de algumas regiões do Brasil. Pustelnik (2005) efetuou a avaliação numérica de ambientes com insuflação de ar pelo piso utilizando-se de análise computacional de dinâmica dos fluidos (*Computational Fluids Dynamics –CFD*). Pustelnik (2005) verificou o modelo de turbulência mais adequado a ser utilizado na avaliação de sistemas UFAD pelo programa *Fluent*, além das dificuldades de simulação em função da falta de implementação de dados referentes a difusores do sistema UFAD no programa. Abe (2007) apresentou uma estratégia para a determinação dos parâmetros de operação do sistema UFAD, baseando-se no estabelecimento de inter-relações entre os principais parâmetros que definem o escoamento do ar em ambientes com o sistema de distribuição de ar pelo piso: a vazão de ar insuflado, a temperatura do ar insuflado e a diferença de pressão entre o *plenum* pressurizado e o interior do ambiente.

A carência de informações detalhadas que garantam a eficiência do sistema UFAD faz com que a utilização de sistemas de condicionamento de ar com insuflação através de rede de dutos e distribuição pelo no teto seja mais frequente em edifícios comerciais. Entretanto, nota-se uma mudança de comportamento do mercado imobiliário corporativo brasileiro que, visando construções de baixo impacto ambiental, redução no consumo de energia durante a operação do edifício, flexibilidade de adequação de layouts e conforto dos usuários, começam a considerar o uso do sistema UFAD como uma opção.

Neste sentido, propõe-se o desenvolvimento de uma pesquisa para avaliar a eficiência de um sistema dessa natureza, cujos resultados sirvam para suprir a carência de informações referida acima.

2. OBJETIVOS

Esta pesquisa objetiva avaliar o desempenho energético do sistema de climatização com distribuição de ar pelo piso (Underfloor Air Distribution System – UFAD) considerando diferentes possibilidades de arquitetura do sistema e seus modos de operação com ciclos economizadores, mantendo as condições de conforto térmico humano em ambientes de escritórios, na cidade de São Paulo, com o auxílio de simulações computacionais executadas no programa *EnergyPlus*.

O objetivo específico é identificar, para o clima da cidade de São Paulo, qual é a influência da vazão de tomada de ar externo no consumo de energia do sistema de condicionamento de ar com distribuição pelo piso (Underfloor Air Distribution System – UFAD).

3. SISTEMAS UFAD

Pesquisas como de Leite (2003) e Bauman e Webster (2001), afirmam que o sistema UFAD promove: melhoria das condições de conforto térmico, possibilitando o controle individualizado de vazão do ar; melhoria na qualidade do ar em relação a sistemas com insuflação pelo teto, uma vez que a idade média do ar respirado pelos usuários é menor; flexibilidade para mudanças de layout sem prejuízo do conforto térmico, uma vez que existe a possibilidade de deslocamento dos difusores e controle individual de vazão de ar resfriado; redução da altura de novas edificações pois não necessita de espaço para passagem de dutos de ar no forro, o que pode reduzir o custo de construção da edificação e aumentar a área construída onde gabaritos de altura são impostos; possibilidade de redução no consumo de energia devido às temperaturas mais elevadas de insuflação do ar, e menor volume de ar a ser resfriado; melhoria da produtividade e saúde dos usuários de ambientes por ele condicionados.

Os sistemas de condicionamento de ar com distribuição pelo piso (Underfloor Air Distribution – UFAD) são compostos basicamente por uma câmara de ar frio (*plenum*), formada pelo vão entre um piso elevado e a laje de concreto do pavimento, suprida por uma unidade primária de tratamento do ar (geralmente serpentina de resfriamento e ventilador - *fan coil*) e unidades terminais (difusores) que distribuem o ar nos ambientes (LEITE, 2003).

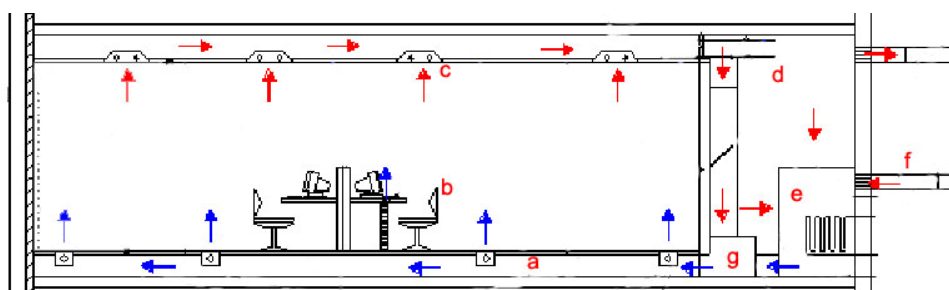


Figura 1 - Esquema de um sistema UFAD (LEITE,2003)

O ciclo do ar no sistema UFAD é ilustrado na figura 1 e pode ser resumido como segue:

- a) O ar resfriado, em geral por uma unidade de tratamento de ar, é insuflado no *plenum* inferior - compreendido entre o piso elevado e a laje de piso - e distribuído no ambiente por meio de difusores instalados nas placas piso elevado ou nas estações de trabalho;
- b) Esse ar entra em contato com os dissipadores de calor, tais como pessoas e computadores e, devido às trocas térmicas, é aquecido, formando as chamadas plumas térmicas;
- c) Pelo efeito da convecção natural, e, especificamente neste sistema, com o auxílio de sistema de exaustão mecânica, o ar aquecido sobe e entra no *plenum* (ou duto) superior de retorno, compreendido entre o forro e a laje do teto;
- d) Parte do ar de retorno é expurgado e parte reaproveitado;
- e) O ar de retorno mantido no sistema pode ser reaproveitado de duas maneiras:
 - i. seu volume total é resfriado pelo sistema até a temperatura ideal para ser insuflado novamente no *plenum* inferior;
 - ii. apenas parte deste volume é resfriado, para então ser misturado com o volume do ar de retorno não resfriado e assim atingir a temperatura ideal de insuflação;
- f) Ao ar de retorno a ser resfriado é adicionado determinado volume de ar exterior, volume este que deve ser no mínimo suficiente para garantir a taxa de renovação do ar de 27m³/h por pessoa (BRASIL, 2003).
- g) Depois de condicionado, o ar é novamente insuflado no *plenum* inferior, reiniciando o ciclo do ar.

Um corte esquemático de um ambiente de escritórios com sistema UFAD instalado demonstra que quatro zonas são geradas em função do fluxo de ar característico do sistema (Figura 2): a) Zona inferior (zona de ocupação) - é adjacente ao piso e sua altura varia de acordo com a vazão de ar insuflado. Nesta zona o ar é relativamente bem misturado devido à velocidade de insuflação do ar pelos difusores. b) Zona média (zona de estratificação) - é a área de transição entre as zonas superior e inferior do ambiente, onde a movimentação do ar é inteiramente por convecção em função das plumas

térmicas ascendentes. É a zona de estratificação do ar, e sua existência e altura dependem da vazão do ar insuflado no ambiente através dos difusores. c) Zona superior - é composta por ar aquecido e contaminado pelas plumas térmicas. Nesta zona, apesar das baixas velocidades médias, o ar é relativamente bem misturado, resultado do momento gerado pela penetração das plumas térmicas no seu limite inferior; d) Zona limpa (*clear zone*) - Devido às correntes de ar excessivas e temperaturas baixas resultantes da vazão nos difusores, a região compreendida no raio de 80 cm de distância do mesmo não são recomendadas para ocupação (BAUMAN, 2003).

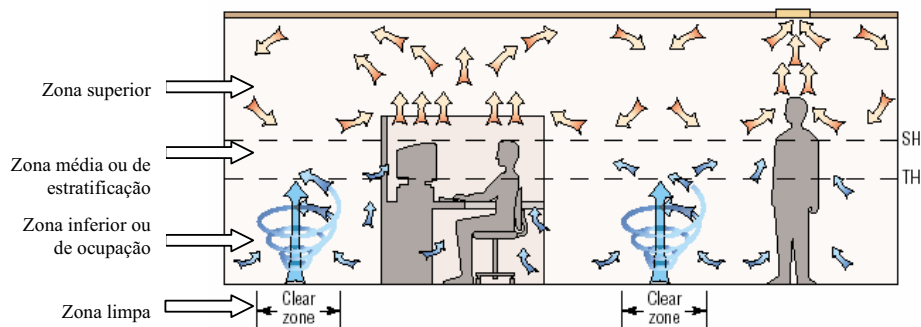


Figura 2 - Zonas definidas pelo sistema UFAD. Fonte: Bauman (2003).

3.1 Eficiência energética e ciclos economizadores

Segundo Loudermilk (1999), apud Lin e Linden (2005), Leite (2003), Bauman (2003), a eficiência energética do sistema UFAD está diretamente relacionada ao que segue: a) o ar é resfriado para condicionar apenas a área de ocupação. Os ganhos de calor por convecção que acontecem acima da zona de ocupação são isolados do cálculo da vazão de ar requerida para a manutenção do conforto térmico dos usuários; b) as temperaturas do ar de insuflação (de 16°C a 20°C) são mais altas do que as adotadas pelos sistemas com distribuição de ar pelo teto (13°). Logo, as solicitações dos equipamentos são minimizadas visto que as temperaturas de insuflação do ar são mais próximas das temperaturas para conforto (em torno de 24°C), e a possibilidade de utilização de ciclos economizadores é majorada quando da ocorrência de condições climáticas favoráveis.

Chang, Kato e Chikamoto (2004), Leite (2003), Architectural Energy Corporation (2004), McCarry (1995), Matsunawa, Iizuka e Tanabe (1995), e Heinemeier, Schiller e Benton (1990), indicam que em regiões de clima ameno, ou seja, sem variações abruptas de temperatura, o sistema UFAD pode atuar com ciclos economizadores, insuflando o ar exterior sem que este seja resfriado (*free-cooling*), por várias horas durante o ano, proporcionando economia de energia. Isto significa que, de acordo com as condições climáticas (temperatura e umidade do ar exterior), a vazão de tomada do ar exterior pode ser aumentada e, caso o ar exterior esteja em condições similares às estabelecidas para o ar de insuflação, este ar pode ser insuflado diretamente no ambiente, dispensando o uso das unidades e serpentinas de resfriamento.

Os ciclos economizadores de ar podem ser entendidos como operações de controle de tomada do ar exterior que proporcionam redução de consumo de energia e majoração da eficiência de ventilação dos sistemas de condicionamento de ar. Quando o ar exterior encontra-se em temperaturas moderadas, a abertura dos registros de controle de vazão (*dampers*) do ar exterior é modulada, permitindo uma tomada de ar maior que a mínima estabelecida em projeto.

Os ciclos economizadores são caracterizados pela modulação da tomada de ar exterior por meio de registros (*dampers*) que são acionados segundo limites relacionados às condições climáticas, controle do sistema e do ambiente. A vazão do ar exterior é controlada pela combinação dos parâmetros estabelecidos para o circuito de água e ar com os limites de atuação dos ciclos economizadores.

O controle da vazão da tomada do ar exterior pode ser realizado por meio da definição de: a) Temperaturas de bulbo seco do ar exterior máxima e mínima. Quando a temperatura de bulbo seco do ar exterior estiver entre a mínima e a máxima estabelecidas, a utilização de maior vazão de ar exterior

será permitida; b) Entalpia do ar exterior. Se a entalpia do ar exterior estiver superior à estabelecida, a vazão do ar exterior será limitada ao valor mínimo estabelecido; c) Entalpia do ar de retorno. Se a entalpia do ar de retorno estiver menor que a entalpia do ar exterior, a vazão do ar exterior será limitada ao valor mínimo estabelecido; d) Temperatura do ar de retorno. Se a temperatura do ar de retorno estiver menor que a temperatura do ar exterior, a vazão do ar exterior será limitada ao valor mínimo estabelecido.

As condições climáticas serão favoráveis aos ciclos economizadores quando as temperaturas exteriores forem amenas, estando próximas ou abaixo da temperatura do ar definida para o ambiente, e a umidade não for excessiva. A insuflação de ar com umidade excessiva pode causar desconforto aos usuários, condensação no *plenum*, e proliferação de microorganismos.

Portanto, não só a temperatura mas também a umidade do ar exterior devem estar apropriadas. Se a umidade do ar exterior tiver que ser controlada, mesmo se a temperatura do ar exterior estiver apropriada, os ciclos economizadores terão suas operações diminuídas ou até mesmo impedidas. A tolerância de umidade relativa do ar exterior para que este possa ser aproveitado no ciclo economizador dependerá do parâmetro da temperatura do ar estabelecido para a unidade de resfriamento, determinado em projeto, e de como será o ciclo do ar.

4. MÉTODO DO TRABALHO

A análise do potencial de redução do consumo de energia dos sistemas UFAD, na cidade de São Paulo, por meio da utilização de ciclos economizadores, baseou-se em avaliações de resultados obtidos por simulações computacionais efetuadas no programa *EnergyPlus*.

Para tais simulações foi desenvolvido um modelo baseado em uma câmara de testes representativa de um ambiente de escritórios: o Laboratório Representativo de Ambientes de Escritório da Escola Politécnica de Engenharia da Universidade de São Paulo, desenvolvido por Leite (2003). Esse laboratório representa “uma fração de um pavimento tipo de edifício de escritórios, cujas características - configuração de layout, tipo de ocupação por pessoas e equipamentos, localização e tipo de envoltória - além de serem as mais repetidas, traduzem as condições reais dos ambientes deste tipo de edificação” (LEITE, 2003).

Numa primeira etapa foi realizada uma pesquisa bibliográfica referente ao tema, contemplando as características do sistema UFAD e seu comportamento em relação à eficiência energética, conforto térmico e ciclos economizadores.

Numa segunda etapa realizaram-se atividades relacionadas ao programa computacional *EnergyPlus*, tais como revisão bibliográfica, averiguação da compatibilidade do programa computacional *EnergyPlus* com o objetivo desta pesquisa, e análise dos fundamentos e equações utilizados pelo programa.

Para o desenvolvimento do modelo de simulação foram especificados os dados climáticos, a geometria, materiais construtivos, cargas internas, padrões de ocupação, e vestimenta dos usuários. Para a elaboração do modelo do sistema de condicionamento de ar para simulação foram especificados os equipamentos e os circuitos de ar. Dois circuitos foram definidos decorrentes da utilização ou não utilização do duto de desvio (*bypass*) do ar de retorno. A utilização do desvio do ar de retorno é prática comum nos sistemas UFAD para atingir a temperatura de insuflação requerida pelo sistema, mantendo o controle de umidade.

Em função da utilização ou não do duto de desvio do ar de retorno foram estabelecidas as temperaturas de água e de ar necessárias para que o sistema garantisse a umidade e a temperatura do ambiente dentro das zonas de conforto térmico. Posteriormente foram analisados e definidos os dados de controle para a utilização do ciclo economizador e do reaproveitamento do ar de retorno.

De posse dos dados supracitados, foram definidos os casos para as simulações, dispostos na tabela a seguir.

Tabela 1 - Casos simulados.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	
Desvio do ar de retorno	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	
Temp. ar insuflação (°C)	19	19	19	19	19	19	
Temp. água na serpentina (°C)	8	8	8	11	11	11	
Temp. ar na saída da serpentina (°C)	13	13	13	17	17	17	
Vazão mínima de ar externo (m ³ /h por pessoa)	27	27	27	27	27	27	
Ciclos economizadores	Controle de temp. do ar exterior	Não	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
	Controle de temp. do ar de retorno	Não	Não	Sim	Não	Não	Sim
Temp. máxima do ar exterior para acionamento dos ciclos economizadores	-	13	26,5	-	17	26,5	
Controles de temperatura e umidade do ambiente estabelecidos segundo a zona de conforto térmico para verão e inverno da ASHRAE (2004)							

A análise de dados climáticos da cidade de São Paulo foi realizada como estimativa do potencial de aproveitamento do ar externo nos ciclos economizadores, visando à redução do consumo de energia do sistema UFAD. Foram utilizados os dados climáticos do ano meteorológico típico (*Typical Meteorological Year - TMY*) da cidade de São Paulo (Aeroporto de Congonhas), considerando os seis casos definidos para estudo.

A validação dos modelos simulados foi realizada verificando-se as capacidades e vazões dos equipamentos por meio de cálculos numéricos baseados em equações fundamentais de balanço de massa e energia. Além disso, curvas de temperatura do ambiente geradas pelas simulações foram comparadas com curvas obtidas por Leite (2003) durante ensaio experimental no Laboratório supracitado.

Após a verificação do comportamento dos modelos em relação às condições de conforto térmico, foram então realizadas as análises do consumo de energia dos modelos em função da utilização dos ciclos economizadores.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise dos dados climáticos

As análises dos dados climáticos foram focadas nos parâmetros especificados nos casos simulados.

Revelaram que as temperaturas de bulbo seco menores ou iguais a 13°C e umidades relativas menores ou iguais a 100%, ocorrem entre os meses de maio a setembro, em 100 horas, das 2871 horas de funcionamento do sistema de condicionamento de ar. Isto significa que, para a configuração do sistema com circuito de ar com desvio do ar de retorno, os ciclos economizadores, com controle realizado pela temperatura do ar exterior, podem atuar num período correspondente a 3,46% das horas ocupadas durante um ano.

As temperaturas de bulbo seco do ar exterior menores ou iguais a 17°C ocorrem em 540 horas, das 2871 horas de funcionamento do sistema de condicionamento de ar, propiciando o acionamento dos ciclos economizadores durante 18,8% das horas ocupadas durante um ano. Acrescentando o limite de

umidade relativa de 78%, esta ocorrência diminui para 126 horas, o que indica que o acionamento dos ciclos economizadores no modo de operação específico do *free-cooling* pode ocorrer em 4,38% das horas ocupadas durante um ano.

As temperaturas de bulbo seco menores ou iguais a 26,5°C ocorrem durante todo o ano, em 2414 horas, das 2871 horas de funcionamento do sistema de condicionamento de ar. Isto significa que, com o controle dos ciclos economizadores por meio da temperatura do ar de retorno, estes podem atuar em 84,07% das horas ocupadas durante um ano.

Nota-se, portanto, que a configuração do circuito de ar e o sistema de controle de acionamento dos ciclos economizadores podem ou não majorar a possibilidade de utilização do ar exterior como proposta para redução do consumo de energia do sistema UFAD.

5.2 Comparação com dados de medições

Para a verificação dos modelos de simulação foram comparadas as curvas de distribuição de temperatura resultantes dos casos simulados com as curvas resultantes de dados medidos no “Laboratório Representativo de Ambiente de Escritórios”. Os dados medidos foram extraídos da pesquisa de Leite (2003), onde, em seus anexos, disponibiliza os valores medidos das variáveis de conforto térmico para diferentes condições de ensaio realizadas.

A condição de ensaio especificada para esta análise foi realizada em função dos parâmetros de funcionamento da mesma e em Leite (2003) é denominada “Condição de Ensaio C5”. Os parâmetros deste ensaio são os que mais se aproximam dos aqui utilizados para as simulações.

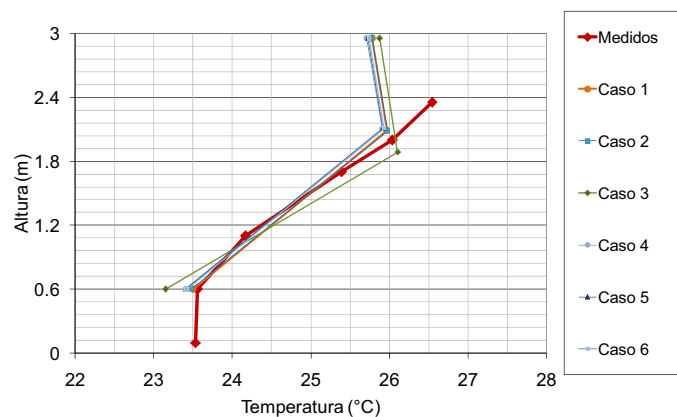


Figura 3 - Curvas representativas das distribuições de temperatura no ambiente resultantes dos seis casos simulados (Caso 1 a 6), e curva resultante dos dados medidos em ensaio experimental (Medidos).

Nota-se que os seis casos simulados apresentam desempenho semelhante, e que as curvas de temperatura estimadas por simulação possuem um comportamento muito próximo à curva obtida por Leite (2003) em ensaio de laboratório, podendo-se dizer que os dados medidos validam as simulações.

5.3 Análise das condições de conforto térmico

Dos resultados obtidos nas simulações tem-se que:

- A temperatura do ar insuflado foi controlada dentro da faixa de 16°C e 20°C, entendida como a faixa ideal de temperatura do ar insuflado, prevalecendo, na maioria dos casos, a temperatura aproximada de 19°C, estabelecida como temperatura de projeto.
- A temperatura na zona ocupada distribui-se entre 22°C e 24°C;
- A umidade relativa do ambiente manteve-se entre 40% e 61%;
- A temperatura na zona superior manteve-se entre 25,3°C e 26,2°;
- A transição entre a zona ocupada e a zona superior ocorreu na faixa de altura entre 1m e 1,6m.

Portanto, as condições de conforto térmico dos casos simulados enquadram-se nas zonas de conforto do ambiente propostas pela ASHRAE (2004), e as diferenças entre as temperaturas da zona ocupada e as temperaturas do ar da zona superior indicam a ocorrência efetiva da estratificação do ar no ambiente.

O conforto térmico dos usuários foi avaliado utilizando-se o método proposto por Fanger (1972), e os resultados indicaram que o conforto foi atingido nos modelos simulados, visto que o voto médio estimado (PMV) permaneceu entre +0,5 e -0,5 na escala de sensação térmica. De outubro a abril a sensação térmica no ambiente foi avaliada em aproximadamente 0,1, e de maio a setembro foi avaliada em aproximadamente 0,5. Este aumento da sensação térmica ocorre devido à vestimenta de inverno, indicando que o uso do paletó dentro do ambiente condicionado torna-se desconfortável, causando uma leve sensação de calor.

5.4 Ciclos economizadores e o consumo de energia

Estudos do comportamento dos casos simulados com relação às vazões de tomada do ar exterior foram realizados. Estas vazões foram analisadas conjuntamente com os resultados horários de temperaturas do ar de retorno, e temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar exterior. A carga térmica de refrigeração solicitada pelos modelos foi então analisada considerando-se a influência da variação da tomada de vazão do ar exterior.

A figura 4 indica as médias mensais anuais das cargas térmicas de refrigeração dos casos 1 a 6, em Wh/h. Demonstra também, em porcentagem, a redução de carga térmica de refrigeração dos casos 2 a 6 comparativamente ao caso 1.

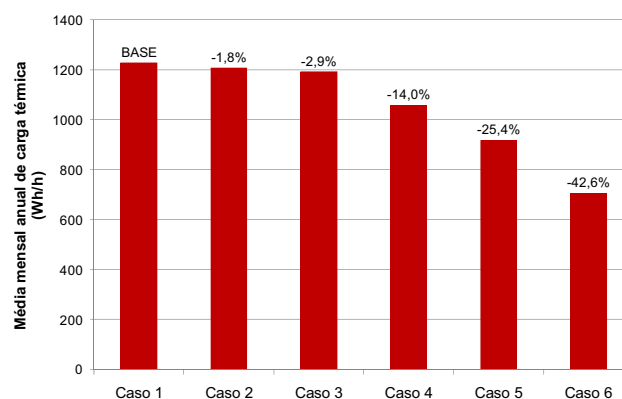


Figura 4 - Médias mensais anuais das cargas térmicas de refrigeração dos casos 1 a 6 (Wh/h). Redução da carga térmica de refrigeração dos casos 2 a 6 comparativamente ao caso 1 (%).

Comparando os Casos 1 e 4, nota-se que o sistema com o circuito de ar sem o desvio do retorno (Caso 4) possui carga térmica de refrigeração 14% menor que o Caso 1, sendo que ambos têm a tomada de ar externo constante para atender à taxa de renovação mínima de ar. Isso se deve ao fato de o Caso 4 trabalhar com a temperatura na saída do ar na serpentina a 17°C, ou seja, 4°C mais alta que no Caso 1. O circuito de ar também é responsável pela carga térmica dos casos 2 e 3 não serem reduzidas significativamente com o acionamento dos ciclos economizadores.

Tomando como base a carga térmica de refrigeração do Caso 1, nota-se que a utilização dos ciclos economizadores são mais eficientes nos casos 5 e 6, atingindo uma redução média de 42,6%.

O consumo dos equipamentos de um sistema de condicionamento de ar é resultado da carga térmica de refrigeração solicitada pelo sistema. Para a análise do consumo de energia dos equipamentos foram extraídos os resultados do consumo das unidades de resfriamento, dos ventiladores e das bombas, para o intervalo de funcionamento do sistema, durante o período de um ano típico.

A figura 5 apresenta os resultados do consumo anual de energia elétrica dos casos simulados.

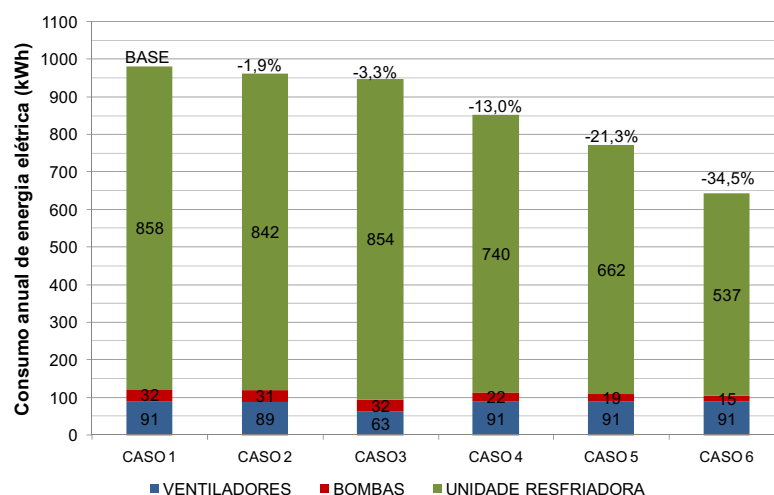


Figura 5 - Consumo anual de energia elétrica do sistema de condicionamento de ar dos casos simulados (kWh). Redução do consumo de energia elétrica dos casos 2 a 6 comparativamente ao caso 1 (%).

Analisando cada caso, e tomando como referência o consumo resultante do Caso 1, há indicações de que o consumo anual de energia elétrica do sistema UFAD, na cidade de São Paulo, pode ser reduzido em aproximadamente 34,5% por meio da utilização do controle de vazão da tomada do ar exterior.

Nota-se que, nos Casos 1 e 4, onde a taxa de renovação do ar é constante, a temperatura do ar na saída da serpentina de resfriamento é determinante no consumo a menor do Caso 4 (17°C) em relação ao Caso 1 (13°C). Tal temperatura influencia diretamente no consumo da unidade de resfriamento do ar e das bombas, proporcionando 13,0% de redução no consumo de energia do Caso 4.

As reduções do consumo de energia elétrica nos casos 2 e 3 são pouco significativas. No caso 3, é a redução do consumo por parte dos ventiladores que o torna mais eficiente que o caso 2.

No Caso 5, onde o ciclo economizador é controlado pela temperatura do ar exterior menor ou igual a 17°C, a redução no consumo atinge a média de 21,3 %.

No Caso 6, onde o controle da vazão do ar exterior é função da temperatura do ar exterior e da temperatura do ar de retorno, nota-se que a redução no consumo de energia é acentuada. Com a utilização destes controles, a utilização dos ciclos economizadores é majorada, atingindo redução do consumo de energia de 34,5%.

6. CONCLUSÃO

O consumo de energia do sistema UFAD está relacionado principalmente às características intrínsecas a ele, tais como: temperaturas de insuflação de ar superior às utilizadas nos sistemas com insuflação pelo teto, condicionamento do volume de ar apenas da zona ocupada, e aproveitamento da convecção natural e estratificação do ar.

O fato das temperaturas do ar insuflado no ambiente serem entre 16°C e 21°C aumenta a possibilidade de utilização dos ciclos economizadores na cidade de São Paulo.

As duas possibilidades de definição dos circuitos de ar permitidos pelo sistema UFAD - com ou sem desvio do ar de retorno - propiciam diferentes consumos de energia elétrica do sistema em função da carga térmica de refrigeração. O consumo de energia é diretamente influenciado pelas temperaturas especificadas para o ar na saída da serpentina de resfriamento (13°C ou 17°C), e pelas temperaturas da água nas unidades de resfriamento.

Quando o controle dos ciclos economizadores se dá pela temperatura de bulbo seco do ar exterior, a vazão do ar exterior fica vinculada principalmente ao circuito de ar projetado. Se o circuito de ar fizer uso do desvio de ar de retorno para atingir a temperatura de insuflação, as operações economizadoras ficam mais limitadas, pois a temperatura do ar na saída da serpentina condiciona a

vazão do ar exterior para quando este estiver com temperatura menor ou igual a 13°C. Já quando o circuito do ar não possui o duto de desvio do ar de retorno, a possibilidade de aumento da vazão de tomada do ar exterior variará quando este estiver com a temperatura menor ou igual a 17°C, majorando as horas de operação dos ciclos economizadores.

Considerando as condições climáticas da cidade de São Paulo, os ciclos economizadores se tornam mais eficientes quando a vazão do ar exterior é controlada pelas temperaturas do ar exterior e do ar de retorno. Os dados climáticos de um ano típico desta cidade indicam que as temperaturas do ar exterior encontram-se abaixo da temperatura do ar de retorno durante cerca de 84% das horas de ocupação de um ambiente de escritórios. Novamente, o circuito de ar especificado será decisivo para a majoração de utilização dos ciclos economizadores. Se o circuito possuir duto de desvio do ar de retorno, a temperatura definida na serpentina de resfriamento será de 13°C, sendo necessário o seu reaquecimento para que o ar insuflado atinja a faixa de 16°C a 20°C. Isto diminui o volume de ar de retorno que pode ser expurgado, pois parte dele será necessário para o reaquecimento do ar. Portanto, mesmo que a temperatura do ar exterior esteja mais baixa que a temperatura do ar de retorno, o volume do ar de retorno não poderá ser totalmente substituído pelo ar exterior.

Dos resultados desta pesquisa conclui-se que a eficiência energética do sistema UFAD, quando analisada em função dos dados climáticos do local de instalação, está vinculada principalmente: ao controle especificado para o ambiente, ao circuito de ar projetado, e ao tipo de controle utilizado nos ciclos economizadores. Estes três itens influenciam diretamente na vazão de tomada do ar exterior, na carga de refrigeração do sistema, e no consumo de energia elétrica. A correlação entre eles possibilita o desenvolvimento de um projeto com consumo de energia elétrica reduzido, garantindo o conforto térmico dos usuários.

Para o clima da cidade de São Paulo, os resultados indicam que os ciclos economizadores no sistema UFAD podem reduzir o consumo de energia elétrica do condicionamento de ar em até 34,5%. Esta redução é considerável, visto que o sistema de condicionamento de ar é responsável por grande parcela do consumo de energia elétrica de um edifício de escritórios.

A generalização de que a tomada de ar exterior aumenta o consumo de energia de sistemas de ar condicionado deve ser revista, pois, os resultados desta pesquisa indicam que, no sistema UFAD, as condições climáticas podem influenciar positivamente na redução do consumo de energia dos sistemas de condicionamento de ar.

A análise dos dados climáticos e simulação do comportamento dos sistemas de condicionamento de ar para o período de um ano típico são fundamentais para os cálculos de consumo de energia elétrica destes sistemas. Podem auxiliar no dimensionamento dos equipamentos, evitando o super dimensionamento, e esclarecer quais os sistemas de controle mais adequados para determinado clima.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABE, V. C.; **Determinação de parâmetros de operação de sistema de distribuição de ar frio pelo piso em ambientes de escritórios**. 2007. 130 p. (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

ARCHITECTURAL ENERGY CORPORATION, BOULDER, CO. Design Brief: Underfloor air distribution and access floors. **Energy Design Resources**. California: eNews for Designers, Issue 36, 2004.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING. **ANSI/ASHRAE Standard 55-2004. Thermal environmental conditions for human occupancy**. Atlanta: ASHRAE, Inc., 2004b.

BAUMAN, F. S. **Underfloor Air Distribution (UFAD) Design Guide**. Atlanta: American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning, 2003. 243 p

_____ ; WEBSTER T. Outlook for Underfloor Air Distribution. **ASHRAE Journal**, New

York, v. 43, n. 6, p.18-25, 2001.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (2003). Resolução RE ANVISA Nº9, 16 de janeiro de 2003. Diário Oficial da União, 20/01/2003.

BRASIL. Ministério de Minas E Energia, Empresa De Pesquisa Energética - EPE. **Balço Energético Nacional 2007: Ano Base 2006: Sumário Executivo / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética.** Rio de Janeiro: EPE, 2007.

BULLA, L. A. S. **Análise paramétrica do desempenho termo-energético de um edifício de escritórios.** Florianópolis, 1995. 81 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, USFC, 1995.

CHANG, H.; KATO, S. CHIKAMOTO, T. Effects of outdoor air conditions on hybrid air conditioning based on task/ambient strategy with natural and mechanical ventilation in office buildings. **Building and Environment.** Oxford : Pergamon Press, v. 39, p. 153-164, 2004.

FANGER, P. O. **Thermal Comfort Analysis and Applications in Environmental Engineering.** McGraw-Hill, New York, 1972.

HEINEMEIER, K.E.; SCHILLER, G., E.; BENTON, C.C. Task conditioning for the workplace: issues and challenges. **ASHRAE Transactions**, Atlanta, v. 96, pt.2, 678-689, 1990.

INATOMI, T. A. H.; ABE, V. C.; LEITE, B. C. C. Energy Consumption of Underfloor Air Distribution Systems: A Literature Overview. In: 23rd INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE, 2006, Geneva. **Proceedings...** Switzerland: University of Geneva, 2006. v. II, p. 685-690.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura.** São Paulo: PW, 1997. 192p.

LEITE, B. C. C. **Sistemas de ar condicionado com insuflação pelo piso em ambientes de escritórios: avaliação do conforto térmico e condições de operação.** São Paulo, 2003. 235 f. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, EP-USP, 2003.

LIN, Y.J.P.; LINDEN. P.F. A model for an under floor air distribution system. **Energy and Buildings**, Lausanne: Elsevier science, v. 37, p. 399-409, 2005.

LOUDERMILK, K.J. Under-floor air distribution solutions for open office applications. **ASHRAE Transactions**, v. 105 (1), p. 605-613, 1999.

MATSUNAWA, K.; H. IIZUKA; TANABE S. Development and application of an underfloor air conditioning system with improved outlets for a smart building in Tokyo. **ASHRAE Transactions**, Atlanta, v. 101, pt. 2, p. 887-901, 1995.

MCCARRY, B. T. Underfloor air distribution systems: benefits and when to use the system in building design. **ASHRAE Transactions**, Atlanta, v. 101, pt. 2, p. 902-911, 1995.

PUSTELNIK, M. **Avaliação numérica de ambientes com insuflação de ar pelo piso.** São Paulo, 2005. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, EP-USP, 2005.

WANG, D.; ARENS, E.; WEBSTER, T.; SHI, M. How the Number and Placement of Sensors Controlling Room Air Distribution Systems Affect Energy Use and Comfort. In: INTERNATIONAL CONFERENCE FOR ENHANCED BUILDING OPERATIONS, 2002, Richardson. **Proceedings...** Texas, 2002.

WEBSTER, T.; RING, E.; BAUMAN, F. **Supply fan energy use in pressurized underfloor plenum systems.** Center for the Build Environment, University of California, 2000.