

## AVALIAÇÃO ENERGÉTICA DE UM SISTEMA HÍBRIDO RADIANTE-CONVECTIVO A DOIS-TUBOS, VENTILOCONVECTORES E PAREDES RADIANTES

**L. Roriz**

Instituto Superior Técnico  
DEM/ICIST—Av. Rovisco Pais, 1  
1096 LISBOA CODEX  
PORTUGAL

**R. Duarte**

Instituto Superior Técnico  
DEM/ICIST—Av. Rovisco Pais, 1  
1096 LISBOA CODEX  
PORTUGAL

**M. Gamboa**

Instituto Superior Técnico  
DEC/ICIST—Av. Rovisco Pais, 1  
1096 LISBOA CODEX  
PORTUGAL

### SUMÁRIO

A comparação dos sistemas radiantes com os sistemas convectivos tradicionais pode ser efectuada através da análise comparativa dos efeitos resultantes da elevação da temperatura radiante média de 1 K com os efeitos resultantes da elevação da temperatura do ar interior de 1 K. No presente artigo, introduz-se um sistema híbrido radiante-convectivo baseado no sistema a dois-tubos, ventilo-convectores e paredes radiantes para um edifício de escritórios. Com base no programa de simulação DOE2, obtém-se a poupança energética anual devida à alteração da temperatura do ar no interior da sala de 1 K nas estações de aquecimento e arrefecimento e apresentam-se resultados que demonstram que o consumo energético para a alteração de 1 K da temperatura radiante média é inferior a esta poupança energética. Discutem-se questões técnicas e relativas ao investimento necessário para implementar o sistema híbrido radiante-convectivo. Os resultados permitem concluir o interesse deste sistema híbrido radiante-convectivo.

### 1. INTRODUÇÃO

Desde os anos 1980 que se assiste, em especial na Europa, a um renovado interesse por sistemas de arrefecimento radiante para climatização [1]. Nos edifícios que se encontravam equipados com sistemas de aquecimento radiante, uma solução óbvia para arrefecer consistiu na reconversão desses sistemas, de forma a incluir igualmente a possibilidade de arrefecimento: o recurso a sistemas radiantes, em particular de tectos radiantes, tornou-se assim comum sempre que o espaço disponível tornava difícil o uso de sistemas tudo-ar.

Apesar de surgirem inicialmente como solução de recurso, diferentes estudos demonstraram que os sistemas de arrefecimento radiante podiam possuir vantagens, face aos sistemas tudo-ar, na remoção das cargas térmicas sensíveis. No que diz respeito à implementação em edifício e ao equipamento usado, a opção do sistema radiante permite:

- em edifícios novos, a redução dos custos de construção do edifício ou maior área útil disponível, devido a menores exigências de espaço;
- possibilidade de redução das pontas de consumo de energia eléctrica quando o sistema radiante é projectado para aproveitar a inércia térmica do edifício.
- a redução dos custos de operação, face ao uso de menos equipamento e/ou equipamento menos complexo;

- a possibilidade de redução da diferença entre a temperatura do fluido térmico que serve as superfícies radiantes e a temperatura do espaço a climatizar permite aumentar o COP de bombas de calor/*chillers*, podendo, inclusivamente, eliminar a necessidade destes quando disponíveis fontes de energia alternativas (por exemplo, energia solar, energia geotérmica).

Por não necessitarem de um meio intercalar (o ar) para estabelecer condições de conforto térmico, é ainda possível:

- eliminar as eventuais deficiências da insuflação (criação de correntes de ar, não homogeneização do ar insuflado com o ar na zona ocupada);
- eliminar o risco de ocorrência de problemas de qualidade do ar interior resultantes da incorrecta manutenção das condutas de ventilação;
- reduzir o consumo energético para movimentação de ar;
- reduzir a diferença entre a temperatura do ar no interior e exterior dos espaços, logo, reduzir as perdas/ganhos de calor por infiltração e por condução/convecção através da estrutura, logo, reduzir o consumo energético.

Relativamente a este último ponto, estudos fisiológicos permitem concluir que o corpo humano praticamente não distingue ganhos de calor convectivos e radiantes. Para um mesmo conforto térmico, de acordo com [2], existe uma relação de proporcionalidade inversa entre a variação de temperatura radiante média (TRM) [3] e a variação da temperatura do ar. Ou seja, a variação de 1 K da TRM equivale a uma variação de 1 K da temperatura do ar. Assim, aumentando a transferência de calor entre superfícies radiantes aquecidas ou arrefecidas e os indivíduos, é possível manter o mesmo conforto térmico com menor intervenção ao nível da temperatura do ar interior que, por isso, permanecerá a uma temperatura mais próxima do ar exterior. Se o custo de aumentar a TRM de 1 K for inferior àquele de aumentar a temperatura do ar interior de 1 K, justifica-se a adopção do sistema radiante.

Um sistema híbrido radiante-convectivo, baseado no sistema convectivo convencional a dois-tubos e ventiloconectores é o apresentado na Figura 1, para uma sala localizada na periferia do edifício.

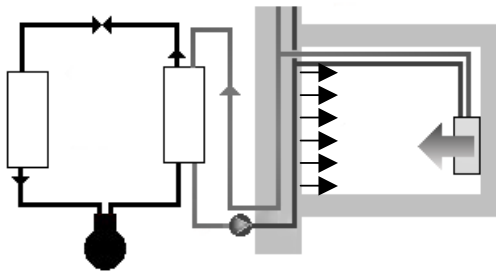


Figura 1 — Esquema de sistema híbrido radiante-convectivo baseado num sistema a dois-tubos, ventiloconectores e paredes radiantes.

Neste sistema inclui-se o efeito radiante através do aproveitamento da tubagem que serve os ventiloconectores — onde circula o fluido térmico quente ou frio — que, inserida no interior de paredes interiores sem isolante, aquece ou arrefece a superfície da parede e contribui para um efeito

de parede radiante. Este efeito complementa o aquecimento do ar interior através de ventiloconectores convencionais.

Um sistema deste tipo foi objecto de um estudo para avaliar a influência da parede aquecida no conforto térmico numa sala tipo num edifício de escritórios [4]. Esse estudo demonstra que é possível usar o efeito da parede radiante para aproximar a temperatura no interior da sala da temperatura exterior em 1 K, em condições de Inverno e de Verão.

## 2. O ESTUDO DE CASO

Para avaliar o potencial de poupança energética do sistema híbrido radiante-convectivo a dois-tubos, ventiloconectores e parede radiante, estuda-se um piso de um edifício de escritórios com planta rectangular de 25,0×17,5 m e 3 m de pé-direito. A envolvente exterior é composta por paredes de alvenaria revestidas e por vãos envidraçados de desenvolvimento horizontal na totalidade da periferia de cada piso. Estes vãos ocupam 30% da envolvente exterior. A implantação do edifício segue uma orientação Norte-Sul e localização na região de Lisboa, a cota do solo é a do nível médio do mar e que o edifício não é sombreado por edifícios vizinhos.

Neste piso identificam-se duas zonas distintas separadas por paredes interiores de alvenaria: a zona periférica, onde se localizam os escritórios; e a zona central de circulação. As dimensões relativas destas duas zonas são apresentadas na Figura 2.

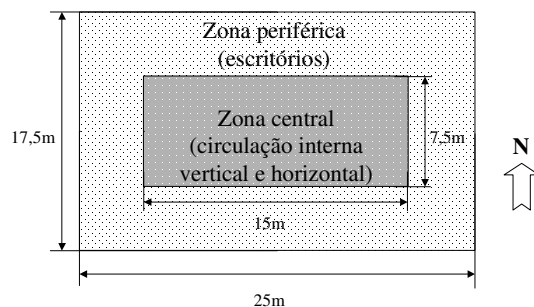


Figura 2 — Zonas central e periférica de um piso.

Admite-se que as salas de escritórios possuem uma dimensão (comprimento) muito superior à largura (5 m) e ao pé-direito (3 m).

Relativamente à selecção dos elementos construtivos, uma vez que se pretende estudar o mérito de sistemas de climatização, as soluções adoptadas foram escolhidas para que as necessidades de aquecimento e arrefecimento não fossem desprezáveis. Contudo, assegurou-se a satisfação das exigências do regulamento das características de comportamento térmico dos edifícios (RCCTE) [5]. Na Tabela 1 apresenta-se a descrição dos elementos construtivos considerados e respectivas características térmicas.

Tabela 1 — Características térmicas dos elementos construtivos considerados.

Elemento Construtivo	Características
Parede exterior simples com 0,25 m Envidraçado	$K=1,6 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
vidro simples com 10 mm com caixilho em metal	$K=5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ $FS=0,46$
Parede interior com 0,15 m	$K=2,3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
Cobertura	Adiabática *
Pavimento	Adiabático *

\* corresponde a considerar que os pisos adjacentes são igualmente climatizados

Relativamente aos ganhos internos, infiltrações e climatização, nas zonas periféricas foram considerados os perfis horários de funcionamento e valores máximos apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 — Perfis horários de ganhos internos, infiltrações e climatização.

Ganho interno	Perfil horário	Valor máximo/Temp.
Ocupação	das 8 h às 20 h	$9 \text{ m}^2/\text{indivíduo}$
Iluminação	das 8 h às 20 h	$12 \text{ W}/\text{m}^2$
Equipamentos eléctricos	das 8 h às 20 h	$15 \text{ W}/\text{m}^2$
Infiltração	das 1 h às 7 h	$0,25 \text{ renov. h}^{-1}$
	das 8 h às 20 h	$0,0 \text{ renov. h}^{-1}$
	das 21 h às 24 h	$0,25 \text{ renov. h}^{-1}$
Climatização		(set-points)
	aquecimento	$18^\circ\text{C} (*) \ 19^\circ\text{C} (**)$
	arrefecimento	$26^\circ\text{C} (*) \text{ ou } 25^\circ\text{C} (**)$ (*)

utilizando o sistema híbrido

(\*\*) utilizando o sistema convencional

Os valores de infiltração reduzem-se entre as 8 h e as 20 h, pois neste período considera-se a ventilação dos espaços com um caudal de ar novo igual a  $1 \text{ renov. h}^{-1}$ .

A climatização é limitada às zonas periféricas, distinguindo-se o período de aquecimento (de 15 de Novembro a 15 de Março) no qual o equipamento primário produz água quente e o período de arrefecimento (de 15 de Maio a 15 de Setembro) no qual o equipamento primário produz água refrigerada.

### 3. ESTUDO DO CONSUMO ENERGÉTICO

Para avaliar o potencial de poupança energética do sistema híbrido radiante-convectivo usa-se o programa DOE2 [6], e tomam-se como referência os consumos energéticos anuais obtidos para o caso da climatização do piso definido na secção anterior por um sistema convencional dois-tubos.

Na Figura 3 apresenta-se a repartição do consumo energético anual do sistema AVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar Condicionado) para o caso do sistema a dois-tubos e ventilo-

convectores convencional (com os *set-points* a 19°C e 25°C), sendo a produção de frio e calor assegurados respectivamente por uma Unidade de Produção de Água Refrigerada (UPAR/*chiller*) com compressor hermético e uma caldeira de produção de água quente a gás natural.

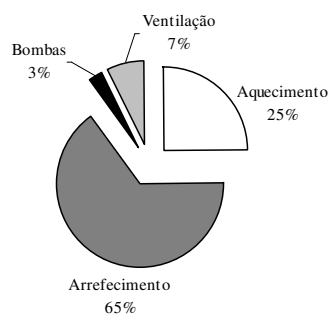


Figura 3 — Consumo energético anual do sistema AVAC, com o sistema convencional a dois-tubos e ventiloconectores.

Como o sistema híbrido tem por base o sistema a dois-tubos e ventiloconectores, a modelação é muito semelhante para ambos os sistemas. No que diz respeito à parte convectiva do sistema híbrido (relativa aos ventiloconectores), considera-se que esta deve assegurar a manutenção de uma temperatura do ar interior constante durante o período de climatização e igual a 18°C/26°C (Inverno/Verão), ou seja, valores 1 K inferior/superior aos do sistema convencional, e que a contribuição radiante do sistema híbrido deve assegurar a elevação/redução de 1 K da TRM nos espaços com temperatura do ar constante e igual a 18°C/26°C.

Para além da alteração dos *set-points*, admite-se que a parte convectiva do sistema híbrido opera com temperaturas de fluido térmico secundário moderadas de forma a evitar danos nas paredes radiantes devidos a aquecimento/arrefecimento excessivo. Por esta razão, também se admite que a variação da temperatura da água circulada entre a entrada e saída do ventiloconvector é menor no sistema híbrido. A Tabela 3, resume as diferenças entre a modelação do sistema convencional e da parte convectiva do sistema híbrido.

Tabela 3 — Modelação dos sistemas de climatização com o programa DOE2.

	Sistema	
	híbrido (parte conv.)	convencional
Varição de temperatura da água fria entre entrada e saída do ventiloconvector	5°C	10°C
Varição de temperatura da água quente entre entrada e saída do ventiloconvector	10°C	20°C
Temperatura da água fria à saída do <i>chiller</i>	12°C	7°C

A Figura 4 apresenta a variação do consumo de energia para aquecimento, arrefecimento, bombas e ventilação, apenas como resultado da variação dos *set-point* nos termostatos de 19°C para 18°C no Inverno, e de 25°C para 26°C no Verão. A Figura 5 apresenta o efeito de considerar as alterações apresentadas na Tabela 3.

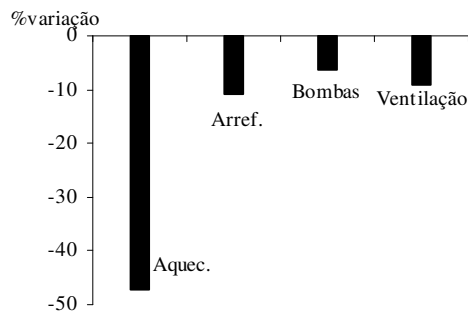


Figura 4 — Efeito da alteração dos *set-points*.

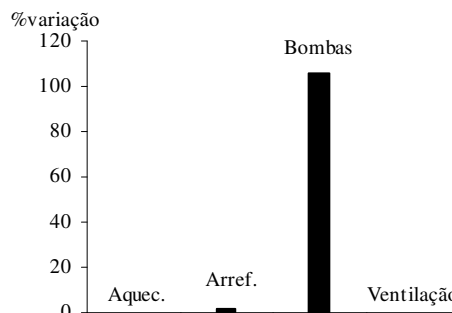


Figura 5 — Efeito das alterações apresentadas na Tabela 3.

A contabilização do consumo energético para a elevação e redução de 1 K da TRM nos espaços com temperatura do ar constante e igual a 18°C e 26°C, no Inverno e Verão, respectivamente, toma em consideração os valores de temperatura da superfície da parede radiante apresentados em [4]. Usando um método numérico de diferenças finitas, admitindo o caso bidimensional e o regime estacionário, determinou-se a temperatura da tubagem interior a uma parede interior que permite obter a temperatura superficial da parede interior, pretendida em condições de Inverno e Verão: 27°C e 20°C, respectivamente. Para estas condições, determinou-se a potência calorífica transferida pela tubagem em cada sala, no Inverno e no Verão. Esta potência foi contabilizada na modelação das necessidades da caldeira e *chiller*, como constituindo uma potência calorífica perdida pela tubagem que serve os ventiloconvectores. A Figura 6 apresenta a variação de consumo energético do sistema híbrido face ao sistema convectivo convencional, quando se contabiliza este efeito radiante e a modelação da parte convectiva atrás descrita (alteração de *set-points* e das temperaturas de funcionamento do fluido térmico).

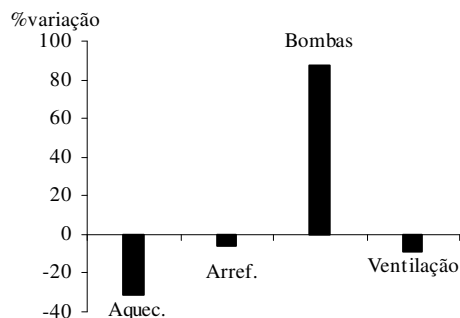


Figura 6 — Variação do consumo energético anual do sistema híbrido (partes convectiva e radiante) face ao sistema convectivo convencional.

No total, para o sistema AVAC, verifica-se uma redução anual de 10% na necessidade energética por implementação do sistema AVAC híbrido em estudo.

### **3. ASPECTOS CONSTRUTIVOS**

O sistema descrito é obtido através da construção duma rede de tubagens de cobre de diâmetro reduzido (aproximadamente 20 mm), que se desenvolve ao longo das paredes divisórias interiores, colocadas em roço refeito com argamassa de cimento e areia. Trata-se portanto de uma solução comum, não representando qualquer dificuldade em termos de execução, à qual os instaladores estão habituados, seguindo os mesmos princípios de outras redes de edifícios. A facilidade de execução também se verifica nas tubagens de distribuição vertical que ocupam menos espaço, libertando área para as circulações.

Em termos de custos, no que respeita à abertura, colocação do tubo e tapamento do roço, estes não são significativamente diferentes dos correspondentes à instalação e fixação das condutas de ventilação de um sistema AVAC, no entanto, nos materiais é evidente a redução de custos das tubagens pela simples comparação dos diâmetros em causa. Também não se pode deixar de referir, pela sua importância, o maior espaço disponível nos tectos falsos para colocação das instalações eléctrica, de iluminação e de detecção de incêndio ou outras, podendo inclusivamente resultar uma diminuição do volume da construção.

Um aspecto condicionante deriva da necessidade da execução das divisórias interiores em alvenaria, que condiciona a funcionalidade do edifício, tendo em vista futuras alterações de ocupação dos espaços e implica forçosamente uma nova instalação das tubagens. Deve ter-se em atenção que a tubagem, colocada nas paredes, é envolvida em argamassa de cimento e areia, um material rígido suporta mal as dilatações dos tubos devidas à circulação do fluido térmico em condições de Inverno, embora as temperaturas em causa sejam relativamente baixas. Esta eventual contrariedade é eliminada através da escolha criteriosa do revestimento final da parede e criação de zonas de dilatação dos tubos, principalmente nas mudanças de direcção.

### **4. CONCLUSÕES**

A utilização dum sistema híbrido radiante convectivo não apresenta dificuldades de construção acrescidas em relação aos sistemas convencionais, e apresenta em termos energéticos um conjunto de vantagens que se traduzem num menor consumo anual, maior uniformidade das condições de funcionamento dos equipamentos principais e menor potência a instalar.

Os resultados apresentados são para um piso tipo que se reproduz no edifício de escritórios. O efeito do último piso na climatização centralizada dum edifício de escritórios de vários pisos é muito reduzida. Desta forma as poupanças determinadas aplicam-se ao total dum edifício de escritórios.

A aplicação dum sistema híbrido conduz a uma importante redução do consumo anual de energia para a produção de frio e de calor. No entanto, devido à redução da diferença de temperaturas entre a entrada e saída dos ventiloconvectores, ocorre uma duplicação da potência para bombagem do fluido térmico secundário. O aumento do consumo de bombagem para recirculação do fluido térmico tem um efeito moderado no consumo global da instalação. As alterações das temperaturas de funcionamento e dos caudais em circulação, conduzem a uma redução do consumo anual da

instalação em cerca de 10% e a uma redução da potência instalada superior a este valor, em particular no que respeita à potência de aquecimento.

## REFERÊNCIAS

- [1] Feustel, E., “Instead of a Foreword”, *Energy and Building* (30), 1999, pp. 117-120.
- [2] Goldman, R., “Extrapolating ASHRAE’s Comfort Model”, *HVAC&R Research*, 1999 Vol.5 (3), pp.189-194.
- [3] ASHRAE, *ASHRAE Fundamentals Handbook*, 1997, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta.
- [4] Roriz, L., Duarte, R., “Redução energética através da climatização por efeito radiativo associada a sistemas de climatização a 2 tubos utilizando ventiloconvectores”, 2000, *Graus Celsius* n. 85
- [5] RCCTE — Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios, Decreto-lei n.º 40/90 de 6 de Fevereiro.
- [6] York, D., Capiello, C. (editors), *DOE-2 Engineers Manual*, 1981, Energy and Environment Division Building Energy Simulation Group, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California.