



## AValiação DO DESEMPENHO DE SISTEMAS DE ARREFECIMENTO DE AMBIENTES INTERIORES COM PAINÉIS RADIANTES

SARA FRANCISCO, ANTÓNIO RAIMUNDO, ADÉLIO GASPAR, DIVO QUINTELA

Pólo II da Universidade de Coimbra  
ADAI, Departamento de Engenharia Mecânica, FCTUC  
Rua Luís Reis Santos, 3030 - 788 Coimbra, Portugal

*(Recibido 20 de noviembre de 2011, para publicación 16 de febrero de 2012)*

**Resumo** – No seu quotidiano normal, o ser humano está em permanente interacção com o ambiente e espaço que o rodeia e cada vez mais se desenvolvem esforços para melhorar o conforto térmico dos ocupantes, visando soluções de compromisso entre a sua satisfação e exigências de eficiência energética. O estudo aprofundado das trocas de energia que envolvem fenómenos de transferência de calor (por condução, convecção e radiação) e de massa entre o ser humano e o ambiente é essencial uma vez que a sensação térmica do resulta em grande medida destas interações complexas. Neste sentido, o presente trabalho recorre a um código 3D-CFD para avaliar as trocas de calor entre o corpo humano e o ambiente envolvente, com especial incidência em espaços onde a climatização possa ser garantida por sistemas de arrefecimento radiativo. Pretende-se também caracterizar a resposta do corpo humano face à utilização de sistemas radiativos com soluções distintas, seja em termos de localização ou de funcionamento. Procede-se à análise de situações alternativas de arrefecimento radiativo pelo teto e pelas paredes. A solução de arrefecimento mais vantajosa corresponde ao painel de teto, com uma dimensão de 80% da sua área e a funcionar a 19°C. Para esta configuração determinou-se um PMV=- 0.11, sugerindo um elevado nível de conforto térmico.

**Palavras-chave** – Sistemas de arrefecimento radiante, conforto térmico, eficiência energética.

### 1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de arrefecimento radiativo encontram-se atualmente em crescente expansão de mercado. Admite-se que, num futuro próximo, seja o sistema mais usado nas habitações, nos edifícios de serviços e até na indústria [1,2].

De um modo geral, os sistemas de climatização radiativos podem ser eléctricos ou hidráulicos, sendo estes últimos os mais utilizados. O sistema de pavimento radiante hidráulico baseia-se na instalação de uma rede de tubos localizada por baixo do pavimento onde circula água quente ou fria em circuito fechado, aquecendo ou arrefecendo o ambiente. Um sistema semelhante ao utilizado num pavimento radiante pode ser usado para alimentar painéis radiantes de teto ou de parede. O calor é transferido entre o espaço e os painéis como consequência da diferença de temperatura e a quantidade transferida depende de vários factores como a temperatura das superfícies emissoras e receptoras, a emissividade, reflectância, absorptância e transmitância, e ainda do factor de forma entre os painéis e as superfícies.

O problema das condensações nos painéis tem sido alvo de muitos estudos. Segundo alguns autores [3,4] a solução passa normalmente pelo cuidado de garantir que a temperatura de entrada da água nos painéis seja pelo menos 1°C acima da temperatura de orvalho do ar no interior do espaço. Outros autores [5-7] sugerem a utilização de sistemas de ventilação acoplados a sistemas radiantes com o objectivo de diminuir os problemas de condensações e melhorar a eficiência do arrefecimento. Outra desvantagem associada à utilização de sistemas de climatização radiativos é a sua resposta deficiente face a variações bruscas da carga interna.

Em termos da eficiência energética, um sistema simples de painéis radiantes refrigerados promove uma eficiência de refrigeração superior a um sistema convencional. Além disso, as cargas sensíveis são remo-

vidas directamente, promovendo velocidades do ar mais reduzidas, não se verificando a sensação de “corrente de ar” [3,4,8] promovendo um nível de conforto superior, quando comparado a outros sistemas

Vários autores [9-12] estudaram o conforto térmico do corpo humano quando sujeito a situações de arrefecimento radiante, e em situações de simetria e assimetria radiante. Os resultados que obtiveram demonstraram que, com este tipo de sistema de arrefecimento, se consegue uma grande uniformidade de conforto térmico.

O presente trabalho visa aprofundar a eficiência e a viabilidade (em termos do nível de conforto promovido ao ocupante) de sistemas de arrefecimento radiante em edifícios do sector terciário, tendo sido analisadas para o efeito duas configurações alternativas: o arrefecimento por tectos radiantes e o arrefecimento por paredes radiantes. Pretende-se ainda avaliar as trocas de calor entre o corpo humano e a envolvente que o rodeia, nomeadamente em espaços onde a climatização é garantida pelos sistemas referidos anteriormente.

## 2. MODELAÇÃO NUMÉRICA

A vertente numérica deste trabalho pretende contribuir para a caracterização dos ambientes térmicos promovidos pelos sistemas de arrefecimento radiantes em análise. Foi usado um código 3D-CFD desenvolvido pelos autores e que é constituído por cinco módulos: (i) gerador da malha de cálculo; (ii) pré-processador; (iii) código de cálculo CFD; (iv) pós-processador de impressão de resultados e (v) o pós-processador de adaptação dos campos das variáveis para realização de gráficos [13].

O pré-processador tem como objectivo o cálculo de parâmetros geométricos, nomeadamente as áreas radiativas das superfícies, os factores de forma e, a partir destes, os factores de absorção de Gebhart. Neste pré-processador o cálculo dos factores de forma é efectuado com recurso ao teorema de Stokes e permite cálculos radiativos para geometrias genéricas [14]. Este pré-processador tem a capacidade de importar a informação geométrica do domínio directamente a partir de ficheiros do tipo CAD.

O código de cálculo 3D-CFD simula escoamentos não isotérmicos tridimensionais, incompressíveis mas termicamente dilatáveis, em regime permanente, através da resolução das equações médias temporais de conservação. A turbulência é modelada recorrendo a vários modelos alternativos do tipo  $k - \epsilon$  o que envolve duas equações de transporte adicionais: uma para a energia cinética turbulenta ( $k$ ) e outra para a sua taxa de dissipação ( $\epsilon$ ) [15,16].

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A metodologia apresentada foi utilizada para o estudo de várias configurações de sistemas de painéis radiantes para arrefecimento ambiente. Para o efeito, adoptou-se a configuração representada na Fig. 1. Trata-se de um gabinete individual com  $13.4 \text{ m}^2$  de área de pavimento e dimensões interiores de  $2.86 \times 4.70 \times 2.96 = 39.79 \text{ m}^3$ . Como elementos interiores consideram-se uma pessoa sentada, uma cadeira, uma secretária e um computador pessoal. Nas paredes orientadas a Este e a Oeste foram consideradas a existência de uma porta e uma janela cujas frinchas (horizontal sob a porta e vertical no meio da janela) funcionam para infiltrações de ar.

Uma vez que se pretendia uma representação realista do problema em estudo, a geometria foi criada com recurso ao *software* comercial Autodesk 3ds Max. Na Fig. 1 representa-se o domínio completo e do corpo humano virtual criado. O cálculo dos factores de forma e dos correspondentes factores de absorção de Gebhart foi efectuado com recurso ao pré-processador radiativo. Os factores de absorção de Gebhart assim obtidos foram incorporados como dados no código 3D-CFD. No entanto, devido ao facto do módulo de CFD do programa estar limitado a geometrias cartesianas, a pessoa e o mobiliário passaram a estar representados por 22 blocos paralelepípedicos. A discretização do domínio para o cálculo CFD foi efectuada com recurso a uma malha de  $48 \times 50 \times 40$  nodos, uniformemente expandida construída em função das interfaces sólido-fluido e necessariamente mais apertada junto destas.

As condições a impor como fronteira na modelação CFD foram obtidas recorrendo ao programa de simulação do comportamento térmico de edifícios ESP-r. Considerou-se que o gabinete em estudo está

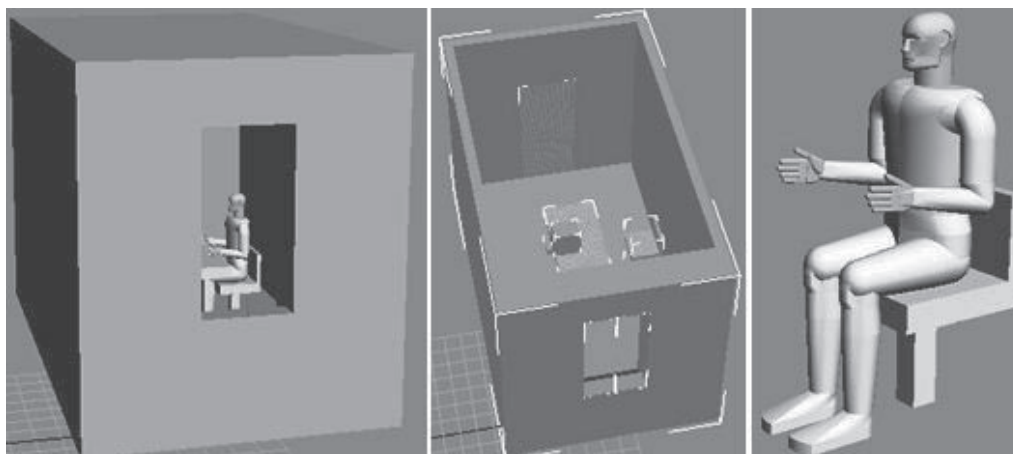


Fig. 1. Configuração genérica do caso de estudo.

Tabela 1. Condições fronteira para as situações de sistema de arrefecimento desligado e ligado.

Face interior da:	T(°C)	
	Sistema Desligado	Sistema Ligado
Parede a Norte	26.2	25.1
Parede a Sul	26.2	25.1
Parede a Este	25.6	25.6
Parede a Oeste	26.6	25.8
Tecto	25.9	24.8
Pavimento	25.7	24.9
Porta	26.4	25.2
Janela	42.3	41.5

inserido num edifício localizado no concelho de Coimbra, na periferia da zona urbana. A porta de entrada localiza-se na parede a Este, a qual dá acesso a um corredor sem ocupação permanente. A janela na parede a Oeste contacta com o exterior. As paredes a Norte e a Sul e o pavimento separam o gabinete de outros gabinetes supostos sob as mesmas condições térmicas.

Dadas as características apresentadas, e de acordo com a actual regulamentação em vigor (DL 80/2006), admitiu-se um caudal de ar correspondente a 0.95 renovações por hora. Admitiu-se que nos dias úteis a ocupação do gabinete é contínua entre as 9 e as 18h, período em que existe uma pessoa por gabinete com um computador (120W de potência) e 84W referentes a potência de iluminação.

Para as condições mais extremas, ou seja para o dia mais quente e hora em que se obtiveram as necessidades de arrefecimento máximas, o programa Esp-r determinou os valores representados na Tabela 1, relativos às temperaturas nas faces interiores das superfícies da envolvente do gabinete para as situações de painéis de arrefecimento radiante desligados e ligados, e que foram impostas como condições de fronteira para efeitos de cálculo com o código 3D-CFD.

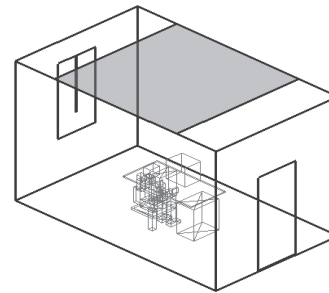
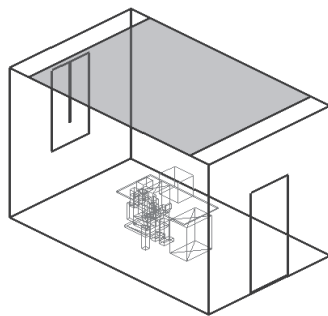
### 3.1. Casos de estudo

As situações de arrefecimento por painéis radiantes analisadas neste trabalho podem ser agrupadas em três grupos. No primeiro, consta apenas a configuração com o funcionamento do gabinete sem qualquer sistema de climatização, designada por Caso 1. No segundo grupo são incluídas 4 situações (Casos 2 a 5) nas quais a climatização é realizada por um sistema de painéis radiantes localizados no tecto do gabinete. No terceiro grupo (Casos 6 a 9) foi considerado o mesmo tipo de sistema de climatização mas agora colocado na parede atrás do posto de trabalho (Sul). No quarto (Casos 10 a 13) o sistema de arrefecimento radiante está localizado na parede a Norte.

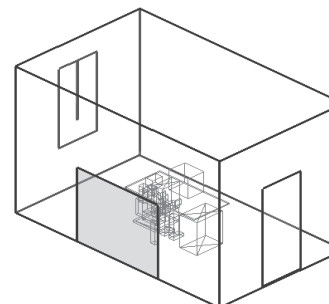
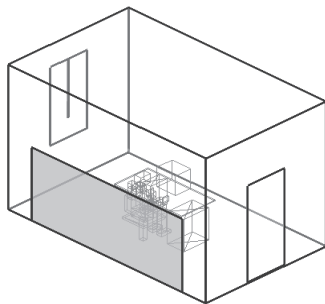
Para painéis aplicados no tecto foram consideradas áreas radiantes entre 40 e 80% da área de tecto, a temperaturas de 19 e 22°C. Para as paredes foram consideradas áreas menores, nomeadamente de 20 a

Tabela 2. Casos de estudo considerados.

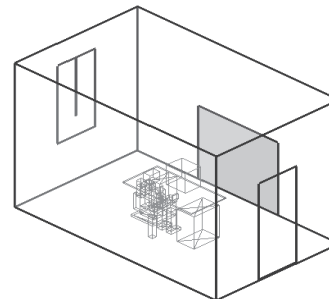
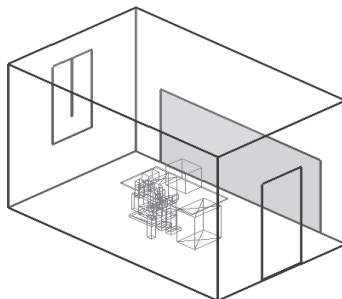
Caso	Localização do Painel	Área Ocupada (%)	Temperatura do painel (°C)
1	-	-	Sem climatização
2	Tecto	80	22
3			19
4		40	22
5			19
6	Parede Sul	40	22
7			19
8		20	22
9			19
10	Parede Norte	40	22
11			19
12		20	22
13			19



Casos 2 a 5



Casos 6 a 9



Casos 10 a 13

Fig. 2. Esquematização dos diversos casos de estudo.

40% da superfície das paredes, a funcionar às mesmas temperaturas dos casos anteriores. Na tabela 2 listam-se as condições relativas aos casos de estudo realizados.

Tabela 3. Factores de forma do corpo humano completo para a situação sem climatização.

<b>Superfícies de destino</b>	<b>Factor de forma</b>
Parede a Norte	0.10
Parede a Sul	0.14
Parede a Este (porta não incluída)	0.04
Parede a Oeste (janela não incluída)	0.04
Tecto	0.08
Pavimento	0.19
Porta	0.02
Janela	0.01
Secretária	0.01
Gavetas	0.02
Cadeira	0.05
Computador	0.02
Painéis radiantes	-
Corpo humano	0.29
<b>SOMA</b>	<b>1.00</b>

Em todos os casos de estudo apresentados, o corpo humano não apresenta vestuário nas pernas, braços, antebraços e mãos, sendo o isolamento relativo ao vestuário de 0.63clo.

### 3.2. Caso de estudo 1 – Situação sem sistema de arrefecimento

Para produzir resultados para uma situação que pudesse servir de referência para comparação, iniciou-se este trabalho pela simulação da situação que não considerava a existência de qualquer sistema de arrefecimento.

#### 3.2.1. Factores de forma entre o corpo humano

Indicam-se na tabela 3 os valores, obtidos com recurso ao novo pré-processador radiativo, do factor de forma entre o corpo humano completo e a envolvente, ou seja, com as diversas paredes (zona da porta e janela não incluídas), a porta, a janela, a secretária, a cadeira e o computador. Indica-se ainda o factor de forma entre o corpo humano e ele mesmo.

Verifica-se uma grande diferença entre o factor de forma do corpo humano com ele próprio e o factor de forma entre o corpo e as superfícies do domínio. Relativamente às superfícies são as paredes Sul, a Norte e o chão que apresentam maior valor. Este facto deve-se à menor distância ao corpo humano. Quanto aos obstáculos, a cadeira é a que apresenta maior valor de factor de forma com o corpo humano, com um valor de 0.05.

#### 3.2.2. Campos de temperatura

Encontram-se na Fig. 3 os resultados obtidos pelo código 3D-CFD relativos aos campos de temperatura para planos transversais e longitudinais que seccionam o esquema do corpo humano na situação sem sistema de climatização (Caso 1).

Verifica-se uma certa homogeneidade do campo de temperatura em toda a sala à excepção da proximidade das paredes (principalmente da parede Este) e dos obstáculos/fontes de calor, nomeadamente as lâmpadas no tecto, o corpo humano e o computador.

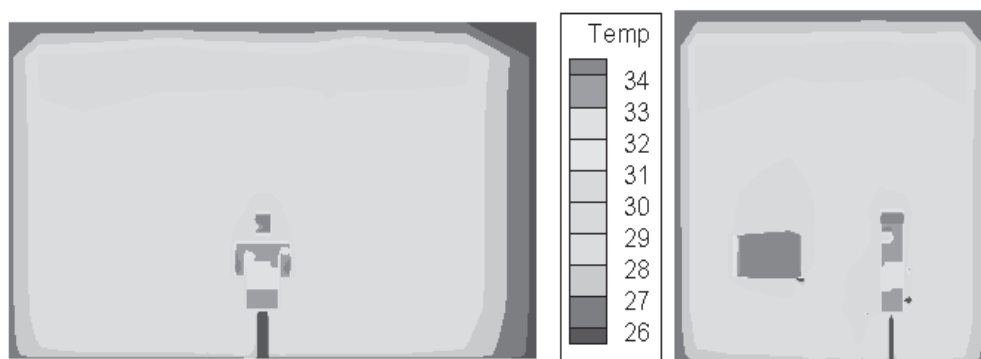


Fig. 3. Campos de temperatura em planos longitudinais (esquerda) e transversais (direita) que seccionam o corpo representativo do indivíduo, no Caso 1.

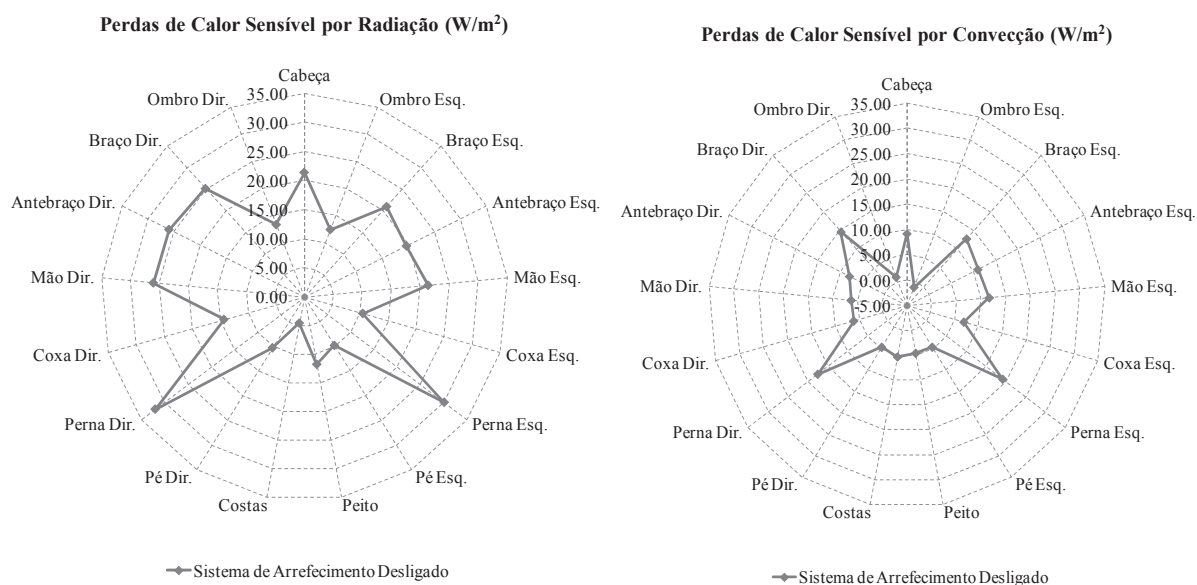


Fig. 4. Representação das perdas de calor por convecção e radiação em cada parte do corpo representativo do indivíduo (Caso 1, sistema de arrefecimento desligado).

### 3.2.3. Trocas de calor do corpo humano e avaliação do conforto térmico

Foram igualmente determinados os fluxos de calor trocados entre o corpo humano e o meio envolvente, de um modo global e por cada parte do corpo.

Apresentam-se na Fig. 4 as perdas de calor sensível do corpo humano para a envolvente que o rodeia. Os resultados encontram-se descritos pelas secções em que supostamente se compartimentou o corpo humano. A não simetria dos resultados prende-se com o facto de o escoamento não ser simétrico relativamente à pessoa, assim como as temperaturas das superfícies da envolvente.

Em termos convectivos os fluxos de calor mais elevados verificam-se nas pernas, na cabeça, braços e antebraço e mão esquerda. O lado esquerdo do corpo humano apresenta valores mais elevados comparativamente ao lado direito (orientado a Este). O valor mais elevado ocorre na perna esquerda, com cerca de  $19 \text{ W/m}^2$ . Uma das possíveis justificações para esta assimetria será a proximidade ao computador onde as velocidades do ar são mais elevadas ( $0.07 \text{ m/s}$ ). Os valores mais baixos ocorrem nos pés, costas e peito, resultado do isolamento térmico do vestuário e da protecção por parte da cadeira (no caso das costas).



Tabela 4. Potências térmicas retiradas ao domínio pelos painéis localizados no tecto.

Caso	Área ocupada (%)	Temperatura do painel (°C)	Convecção (W)	Radiação (W)	Total (W)
2	80	22	67.15	179.23	246.38
3		19	133.54	329.91	463.45
4	40	22	71.24	148.95	220.19
5		19	88.36	273.87	362.22

Para todas as partes as trocas radiativas são superiores às convectivas verificando-se valores mais elevados para a parte direita do corpo, mais próxima da parede a Este (Fig. 4). Recorde-se que o conjunto da porta com esta parede apresentava um factor de forma com o corpo humano superior ao conjunto da janela com parede a Oeste (vd. tabela 3).

Fazendo uma avaliação global, numa situação sem sistema de arrefecimento verifica-se uma perda de calor sensível total de 59.63 W das quais 19.93 W correspondem a trocas convectivas e 39.70 W a trocas radiativas. Avaliando o nível de conforto do indivíduo, admitindo um nível de actividade de 1.2 Met e um isolamento do vestuário de 0.63 clo, obteve-se um valor de  $PMV = 1.94$ .

### 3.3. Casos 2 a 5 – Tectos arrefecidos

Apresenta-se nesta secção a análise das situações em que o arrefecimento é efectuado através de um sistema radiante localizado no tecto do gabinete. Foram analisadas quatro situações distintas (Casos 2 a 5) onde se consideram os painéis a 22°C e a 19°C e com áreas de cobertura de 80% e 40%.

#### 3.3.1. Caracterização do elemento activo

Apresentam-se na tabela 4 os valores das potências térmicas, por convecção, por radiação e total, retiradas pelos painéis para as situações de estes ocuparem 80% e 40% da área do tecto e para as temperaturas de funcionamento dos mesmos de 19°C e de 22°C.

Nas condições especificadas, no caso do painel com 80% de área do tecto o valor mais elevado da potência necessária para o painel obtida foi de 463.45 W, para uma temperatura de 19°C. Para um painel com 40% da área do tecto, à mesma temperatura, obteve-se uma potência de 362.22 W.

De acordo com informação recolhida na literatura [4] era esperado que aproximadamente 95% do calor retirado ao domínio pelo painel ocorresse devido a trocas radiativas. No entanto, nas situações estudadas foram obtidos valores entre 67 e 75%.

#### 3.3.2. Trocas de calor do corpo humano e avaliação do conforto térmico

Para uma situação de 80% da área de tecto, o factor de forma entre o painel e o corpo humano era de 0.0655574 e reduzia para 0.056852 quando se considerava um painel com apenas 40% da área de tecto.

Apresentam-se na Fig. 5 os resultados para a configuração onde se obtiveram maiores perdas de calor do corpo humano, que corresponde à situação em que o painel ocupava 80% da área de tecto e funcionava a 19°C. Como era de esperar verificou-se que as perdas de calor sensível do corpo humano aumentam graças ao funcionamento de um sistema de arrefecimento radiante localizado no tecto do gabinete. Ao contrário do que era esperado, as trocas radiativas não aumentaram significativamente.

Em termos globais e quando comparado com a ausência de sistema de arrefecimento, a colocação de um sistema de arrefecimento radiativo no tecto do gabinete altera as perdas de calor pelo corpo humano. Da análise das perdas de calor sensíveis totais (por convecção e radiação) nas secções com que se compartimentou o corpo humano, verifica-se que a os membros superiores e as pernas são as zonas do corpo com um aumento mais significativo de trocas radiativas face à situação inicial.

Avaliando os vários casos de estudo verificou-se que, com o funcionamento deste sistema refrigerante, as perdas da pessoa por radiação e são pouco dependentes da área do painel e da temperatura a que este se encontra. Por outro lado, as perdas por convecção estão essencialmente relacionadas com a área do sistema radiante e são pouco sensíveis à temperatura do mesmo.

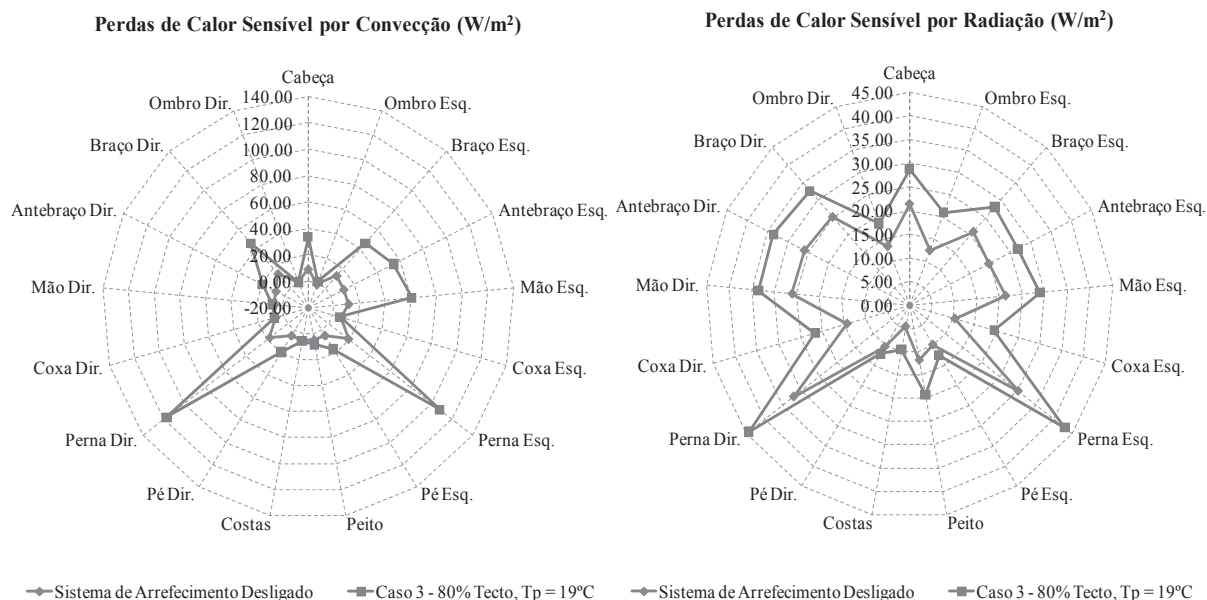


Fig. 5. Representação das perdas de calor por convecção e radiação em cada secção do corpo humano (Caso1 vs Caso 3).

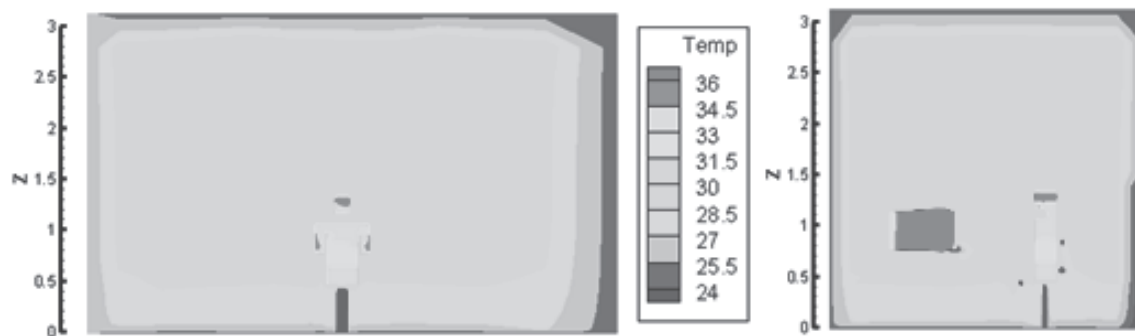


Fig. 6. Campos de temperatura em planos longitudinais (esquerda) e transversais (direita) que seccionam o corpo representativo do indivíduo, no Caso 8.

### 3.4. Caso de estudo 6 a 13 – Paredes arrefecidas

Apresenta-se nesta Secção a análise das situações em que o arrefecimento é efectuado através de um sistema radiante localizado numa das paredes (Casos 6 a 13). Por não incorporarem portas ou janelas ou outras aberturas, seleccionaram-se as paredes a Sul e a Norte. Numa situação corrente não se justifica promover a climatização a todo o nível da parede pois a colocação de móveis iria dificultar/impedir as trocas de calor no gabinete. Os fornecedores deste tipo de sistemas aconselham que se coloquem apenas numa zona ou até ao nível de janela reduzindo também desta forma a possibilidade de ocorrerem danos na tubagem. Analisou-se assim o efeito de painéis radiativos colocados nas paredes Norte e Sul com áreas correspondentes a 40 e 20% da parede, até uma altura de 1.5m e às temperaturas de  $22^\circ\text{C}$  e de  $19^\circ\text{C}$ .

Na Fig. 6 podem encontrar-se os perfis de temperatura para planos transversais e longitudinais que seccionam o esquema do corpo humano para o Caso 8. Quando comparado com o caso sem sistema de arrefecimento (Caso 1) a principal diferença verifica-se nas temperaturas do ar ao nível do pavimento. Enquanto na situação sem arrefecimento a temperatura do ar ao nível do pavimento é de aproximadamente  $29^\circ\text{C}$ , quando aplicado um painel na parede a Sul as mesmas temperaturas tendem a diminuir e, neste caso específico, verificam-se até uma altura de 30 cm, temperaturas do ar aproximadamente  $1^\circ\text{C}$  mais baixas.



Tabela 5. Potências térmicas retiradas ao domínio pelos painéis localizados na parede a Sul.

Caso	Área ocupada (%)	Temperatura do painel (°C)	Convecção (W)	Radiação (W)	Total (W)
6	40	22	59.22	108.80	168.02
7		19	111.64	179.89	291.53
8	20	22	23.89	57.19	81.08
9		19	26.93	58.54	85.47

Tabela 6. Potências térmicas retiradas ao domínio pelos painéis localizados na parede a Norte.

Caso	Área ocupada (%)	Temperatura do painel (°C)	Convecção (W)	Radiação (W)	Total (W)
10	40	22	551.49	89.81	641.30
11		19	1316.23	175.83	1492.06
12	20	22	677.73	51.90	729.63
13		19	740.64	101.17	841.81

### 3.4.1. Caracterização do elemento activo

Apresentam-se na tabela 5 os valores das potências térmicas retiradas ao domínio, para os painéis localizados na parede a Sul e na tabela 6 as mesmas potências mas agora para as situações de painéis localizados na parede a Norte.

A partir dos resultados indicados nas tabelas 5 e 6 pode verificar-se que a localização do painel na parede Norte implica maiores potências, aumentando com a área e com a diminuição da temperatura (situação que era esperada). O valor mínimo de potência verifica-se para uma localização do painel na parede Sul a ocupar 20% da área desta.

Fazendo uma análise ao elemento activo verifica-se que nas situações em que este se encontra localizado na parede a Sul (Casos 6 a 9) o calor retirado do domínio pelo sistema radiante é fundamentalmente por radiação. As trocas convectivas para este caso atingem um máximo de 38% do fluxo total. Esta situação inverte-se para o caso em que os painéis refrigerados se encontram na parede a Norte, onde as trocas convectivas chegam a atingir 82% do fluxo de calor total.

### 3.4.2. Trocas de calor do corpo humano e avaliação do conforto térmico

Faz-se agora uma avaliação mais detalhada das trocas de calor sensível por radiação e convecção, para cada parte do corpo humano, para as situações com os painéis nas paredes atrás e de frente para o indivíduo. Para uma análise mais aprofundada seleccionaram-se as situações com maior área de painel associada a uma menor temperatura do mesmo. Neste sentido apresentam-se na Fig. 7 os fluxos de calor em cada secção do corpo humano para os casos 11 e 7. As escalas dos gráficos são propositadamente diferentes para que as diferenças entre casos sejam mais evidentes.

Verifica-se uma grande diferença em termos das trocas convectivas pelo corpo humano. Em ambos os casos os membros superiores e inferiores são aqueles que apresentam maiores perdas convectivas. No caso 11, em que o painel está mais afastado do corpo humano destaca-se a perna direita onde as trocas convectivas são bastante significativas. Por outro lado, em termos de radiação, as maiores perdas ocorrem nas pernas e não existe diferença significativa de comportamento térmico da pessoa entre o Caso 7 e o 11. Os braços, costas e peito são as partes que apresentam valores mais elevados no Caso 7.

Avaliando todos os resultados obtidos verifica-se que um painel colocado na parede mais distante ao indivíduo, e em frente a este (Casos 10 a 13), promove maiores perdas de calor convectivas pelo corpo

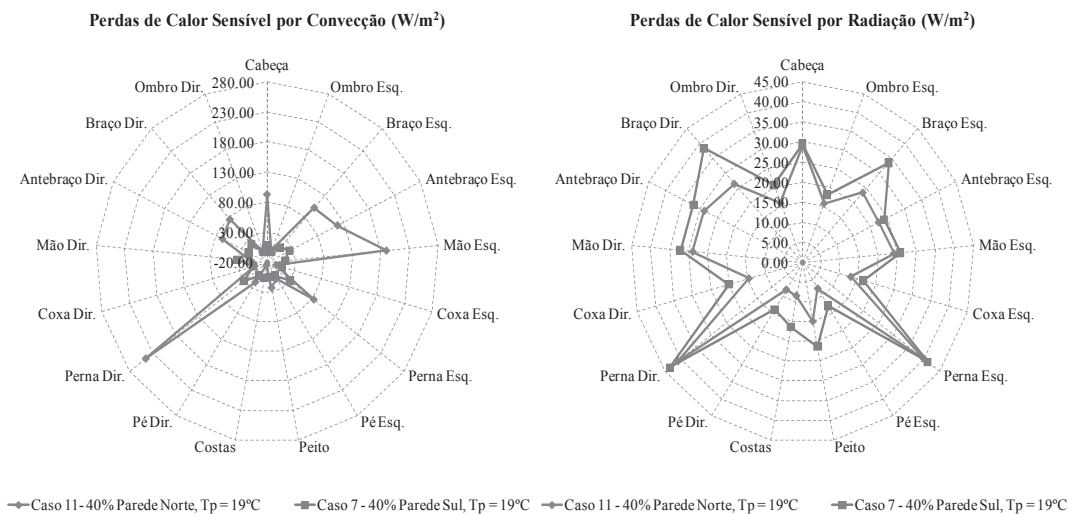


Fig. 7. Representação das perdas de calor por convecção e radiação em cada secção do corpo humano (Caso11 vs Caso 7).

humano. Quando o sistema radiativo se encontra na parede a Sul e por isso mais próxima do indivíduo estas perdas são significativamente menores.

No Caso 10, em que o painel estava localizado na parede em frente ao posto de trabalho a uma temperatura de  $22^\circ\text{C}$ , foi obtido um valor de  $PMV = -0.96$ . Admitindo que, para um  $PMV = 0$  um indivíduo se encontrava numa situação de conforto térmico, neste caso o indivíduo sentir-se-á ligeiramente frio.

Em termos genéricos ressalta que as secções do corpo humano que têm tendência a apresentar maiores perdas de calor são as pertencentes aos membros superiores e inferiores. Para além disto, as perdas de calor radiativas pelas várias secções do corpo humano dependem mais das áreas dos painéis do que da localização e da temperatura a que se encontram. Em termos de perdas convectivas pela pessoa o comportamento é completamente diferente, sendo estes fluxos de calor fortemente dependentes da temperatura e da localização do sistema radiante. Para situações em que o sistema está mais próximo do indivíduo as trocas convectivas são muito pouco dependentes da área do mesmo. Já na situação em que os sistemas estão na parede mais afastada do corpo humano as trocas por convecção do corpo humano são dependentes da área de painel.

#### 4. CONCLUSÕES

A existência de sistemas de arrefecimento radiante permite uma melhoria no conforto dos ocupantes. As perdas de calor máximas pelo corpo humano verificaram-se com a utilização de um painel arrefecido localizado na parede mais distante da pessoa e que ficava em frente deste (na parede a Norte). No entanto essa solução implicava potências térmicas removidas pelo painel muito mais elevadas do que para as restantes situações e as condições de conforto eram mais desfavoráveis. Apesar da solução em que o painel estava mais próximo do corpo humano (na parede Sul) ter perdas preferencialmente radiativas, esta solução não aparentou ser a mais favorável uma vez que era uma das que apresentava menores quantidades de trocas de calor do corpo humano e situações de conforto mais desfavoráveis.

Na tentativa de conciliar as perdas, o conforto térmico do ocupante e a potência de painel necessária, a solução de arrefecimento que parece ser a mais vantajosa corresponde ao Caso 3 (painel a  $19^\circ\text{C}$  ocupando 80% da área do tecto). Para esta situação determinou-se um  $PMV = -0.11$ , sugerindo um elevado grau de conforto térmico.

## REFERÊNCIAS

- [1] Bean, B.R., Olesen, B.W., Kim, K.W., “History of Radiant Heating & Cooling systems,” *ASHRAE Journal* (2010)
- [2] Polisol, “Princípio de Funcionamento do Arrefecimento por Piso Radiante”, (2011), <http://www.polisol.pt/AquPavRadHid.htm>
- [3] Cavique, M., Coelho, A.G., “Comparação entre Sistemas de Ar Condicionado”, Proceedings, CLIMAMED 2005, 2º Congresso Mediterrânico de Climatização, Madrid, Espanha (2005)
- [4] Watson, R.D., Chapman, K.S., *Radiant Heating & Cooling Handbook*, McGraw-Hill (2002)
- [5] Causone, F., Corgnati, S.P., Filippi, M., Olesen, B.W., “Experimental Evaluation of Heat Transfer Coefficients Between Radiant Ceiling and Room”, *Energy and Buildings*, **41**, 622-628 (2009)
- [6] Kim, T., Kato, S., Murakami, S., Rho, J., “Study on Indoor Thermal Environment of Office Space Controlled by Cooling Panel System Using Field Measurement and the Numerical Simulation”, *Building and Environment*, **40**, 301-310 (2005)
- [7] Lim, J., Jo, J., Kim, Y., Yeo, M., Kim, K., “Application of the Control Methods for Radiant Floor Cooling System in Residential Buildings”, *Building and Environment*, **41**, 60-63 (2006)
- [8] Gondenergy, Manual Técnico Sistema de Calefaccion por Solo Radiante Wirsho – evalPEX, (2011), <http://www.gondenergi.com/>
- [9] Catalina, T., Virgone, J., Kuznik, F., “Evaluation of Thermal Vomfort Using Combined CFD and Experimentation Study in a Test Room Equipped with a Cooling Ceiling”, *Building and Environment*, **44**, 1740-1750 (2009)
- [10] Kitagawa, K., Komoda, N., Hayano, H., S.-ichi, T.B., “Effect of Humidity and Small Air Movement on Thermal Comfort Under a Radiant Cooling Ceiling by Subjective Experiments”, *Energy and Buildings*, **30**, 185–193 (1999)
- [11] Miyanaga, T., “Simplified Human Body Model for Evaluating Thermal Radiant Environment in a Radiant Cooled Space”, *Building and Environment*, **36**, 801-808 (2001)
- [12] Nagano, K., Mochida, T., “Experiments on Thermal Environmental Design of Ceiling Radiant Cooling for Supine Human Subjects”, *Building and Environment*, **39**, 267-275 (2004)
- [13] Raimundo, A.M., “Contribuição para o Estudo de Escoamentos Rotativos - Análise do Transporte de Calor em Condições Tridimensionais Não-axissimétricas”, Tese de doutoramento, Universidade de Coimbra, Portugal (1998)
- [14] Francisco, S.C., Raimundo, A.M., Gaspar, A.R., Quintela, D.A., “Calculation of Detailed Heat Exchanges Using Stokes’ Theorem,” Proceedings, 713m, 7<sup>th</sup> International Thermal Manikin and Modelling Meeting, Coimbra, Portugal (2008)
- [15] Gaspar, A.R., “Contribuição para o Estudo de Ambientes Térmicos Interiores,” Tese de doutoramento, Universidade de Coimbra, Portugal (2004)
- [16] Raimundo, A.M., Gaspar, A.R., Quintela, D.A., “Numerical Modelling of Radiative Heat Exchanges Between the Human Body and Surrounding Surfaces”, Proceedings, Climamed 2004, Mediterranean Congress of Climatization, Lisboa, Portugal (2004)
- [17] Patankar, S., *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Washington DC: Hemisphere Publishing Corporation, USA (1980)
- [18] Raimundo, A.M., Oliveira, L.A., Figueiredo, A.R., “Numerical Simulation and Experimental Validation of Heat Transfer within Rotating Flows for Three-dimensional Non-axisymmetric, Turbulent Conditions”, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, **40**, 821–840 (2002)

## PERFORMANCE EVALUATION OF RADIANT COOLING PANELS IN INDOOR ENVIRONMENTS

**Abstract** – Every day the human being is in constant interaction with the environment and the surroundings and a lot of efforts have been made to increase the comfort of the occupants by improving the thermal environments and seeking for their satisfaction. The main objective of this work is focused on the evaluation of heat exchange-

es between the human body and the surrounding areas, provided by radiant cooling systems. It is also intended to evaluate the response of the human body when using the same radiative systems at different locations and the same operating conditions. Alternative scenarios of radiant ceiling panels and radiant wall panels will be analyzed. The results show that the radiant ceiling option is the one that ensure the thermal comfort of occupants with lower power consumption.

**Keywords** – Radiative cooling systems, Thermal comfort, Thermal performance.