

Avaliação do potencial de arrefecimento com sistemas evaporativos

Eng.º Carlos Gonçalves Nascimento

Escola Superior de Tecnologia – Universidade do Algarve, Campus da Penha 8000-117 Faro, Portugal.

Resumo

O processo de evaporação da água provoca, num escoamento de ar confinado, o seu arrefecimento, efeito que poderá ser aproveitado para evitar o recurso, total ou parcial, a sistemas de arrefecimento ditos mecânicos, com as inerentes poupanças de energia convencional.

A descrição dos fenómenos é conhecida e a sua formulação tratada em algumas disciplinas dos cursos de engenharia mecânica e, por isso, é aqui tida como um dado adquirido.

O conhecimento do potencial poderá constituir uma ferramenta de uso rápido e simples na avaliação económica de projectos de investimento em sistemas de arrefecimento para diversos fins.

A disponibilidade de dados climáticos para o local e o seu tratamento estatístico são aspectos críticos para o sucesso desta avaliação. Por isso, neste trabalho, apenas se pode apresentar (sugerir) a metodologia e fazer uma aplicação com dados climáticos de um só ano, para Faro.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de energia para o arrefecimento dos edifícios representa uma parcela importante no todo das suas necessidades energéticas apresentando valores crescentes nos últimos anos, com especial incidência na última década.

É publicamente reconhecido que o crescimento do sector terciário tem imposto, nem sempre da melhor forma, um acréscimo das necessidades de conforto nos edifícios, devido ao uso imperativo, e quase generalizado, do ar condicionado.

Por outro lado, é sabido que os equipamentos das instalações de ar condicionado utilizam na sua grande maioria a energia eléctrica como forma “primária” de energia, quer para o aquecimento quer para o arrefecimento, a qual é fornecida através da rede pública de abastecimento.

O valor máximo do pedido de potência eléctrica para fins de arrefecimento dos edifícios verifica-se durante o dia, período em que as cargas térmicas são mais elevadas devido à influência dos ganhos solares e da ocupação, o que é, em parte, responsável pelo desequilíbrio da rede eléctrica no que respeita à variação diária da potência tomada.

Embora seja também (re) conhecido que existem estratégias de projecto das instalações de ar condicionado com o objectivo de reduzir os picos de consumo eléctrico, a verdade é que elas não conduzem à redução das necessidades efectivas de energia. Pelo seu lado, através da metodologia aqui apresentada, o que se pretende por em evidência é a existência de um potencial praticamente gratuito e que, através dele, se podem dimensionar os equipamentos de arrefecimento num primeiro “estágio energético”, tendo em vista a redução da utilização do “recurso electricidade” nas instalações de ar condicionado, ou mais propriamente de arrefecimento de ambiente.

Desde logo, é preciso estabelecer alguns princípios acerca da utilização do potencial de arrefecimento evaporativo, os quais funcionam também como alertas:

- A- Não conduz, de uma maneira geral, à eliminação da necessidade de recorrer a outro processo de arrefecimento;
- B- Poderá conduzir a alguma simplificação das instalações, uma vez que o número de equipamentos é mais reduzido;
- C- Poderá trazer benefícios significativos no que à ventilação dos edifícios diz respeito, já que o processo evaporativo recorre à utilização de apenas “ar novo”.

Embora o processo de arrefecimento evaporativo seja mais eficaz em regiões cujo clima é quente e seco, a disponibilidade de dados climáticos apenas para Faro constituiu uma restrição que não permitiu ir mais além. Serão, sem dúvida, as regiões do interior de Portugal, incluindo o Alentejo, Ribatejo, Beiras e Trás-os-Montes, os locais com maior potencial para a utilização do arrefecimento evaporativo.

2. O PROCESSO DE ARREFECIMENTO EVAPORATIVO

Um caudal de ar, nas condições iniciais T_1 , w_1 e h_1 , respectivamente temperatura de bolbo seco ($^{\circ}\text{C}$), humidade específica ($\text{kg}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$, ou abreviadamente $\text{kg}/\text{kg}_{\text{as}}$) e entalpia ($\text{kJ}/\text{kg}_{\text{as}}$) ao atravessar uma superfície permanentemente molhada, vê aquelas propriedades alteradas para T_2 , w_2 e h_2 . A temperatura T_2 tem um valor inferior a T_1 , desde que o ar à entrada não se encontre saturado.

Na figura 1 representa-se esquematicamente o processo descrito, em que a água é continuamente recirculada por meio de uma bomba e distribuída através de um conjunto de aspersores sobre uma superfície cuja função é servir como meio de contacto entre o ar e água.

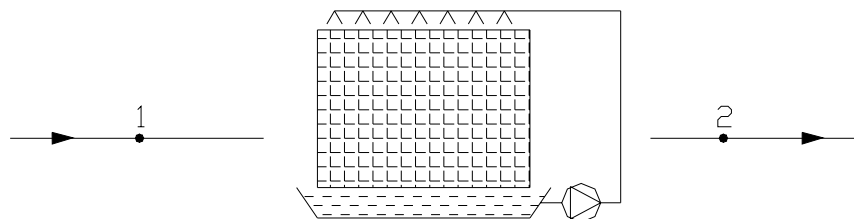


Figura 1 – Processo de arrefecimento evaporativo directo: esquema da instalação.

O efeito pretendido é o arrefecimento do ar, o qual provém da perda de calor para a água, que por sua vez evapora, o que pressupõe reposição, também contínua, da água no reservatório.

As hipóteses simplificação que, em geral, são admitidas na análise deste processo evaporativo, são as seguintes:

- A- a taxa de evaporação, por exemplo em l/s , é muito inferior à taxa de recirculação da água através da superfície de contacto com o ar, o que significa que a energia associada ao caudal de reposição seja desprezável;

A- a potência da bomba de recirculação também em geral é pequena, face aos outros termos energéticos presentes no processo e, por isso, também se pode desprezar o seu efeito;

B- o processo (o dispositivo no seu conjunto) é adiabático.

Nestas condições o ar passa por um processo a temperatura de bolbo húmido constante através do dispositivo da figura 1 e toda a água no reservatório atinge, ao fim de algum tempo, a temperatura de bolbo húmido do ar à entrada. A representação gráfica, no diagrama psicrométrico, é feita esquematicamente na figura 2.

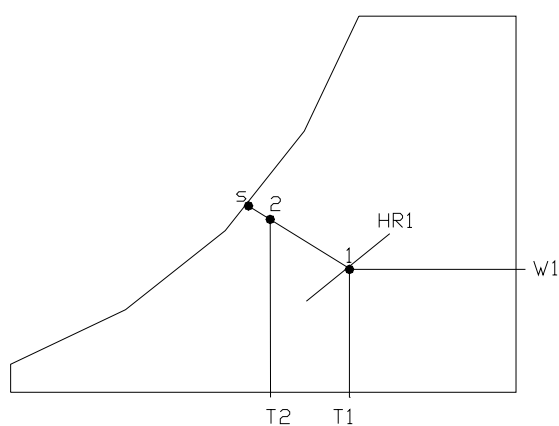


Figura 2 – Representação do processo de arrefecimento evaporativo directo no diagrama psicrométrico.

Na prática o dispositivo descrito é também designado de lavador de ar, sendo caracterizado por um rendimento, definido através da fórmula seguinte:

$$\eta_{evap} = \frac{w_2 - w_1}{w_s^* - w_1} \quad (1)$$

Admitindo que o calor específico do ar se mantém constante durante o processo, então a equação (1) também se pode escrever:

$$\eta_{evap} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_s^*} \quad (2)$$

3. O SISTEMA DE ARREFECIMENTO EVAPORATIVO INDIRECTO

O processo de arrefecimento evaporativo directo provoca, para além do desejado arrefecimento do ar também a sua humedificação, o que poderá ser indesejável para certas aplicações, nomeadamente as que se destinam ao conforto em espaços cujos ganhos de calor latentes sejam elevados. Nesses casos, pode-se recorrer a um dispositivo mais complexo,

conforme se representa esquematicamente na figura 3, com o objectivo de evitar, pelo menos durante alguns períodos, os ganhos indesejados de humidade.

O dispositivo estritamente necessário ao processo de arrefecimento evaporativo acima descrito é o que se representa a traço escuro na figura 3, sendo a parte representada a traço interrompido respeitante a um novo processo de arrefecimento evaporativo (suplementar) o qual poderá assim, em certas condições de funcionamento, produzir mais algum arrefecimento ao ar.

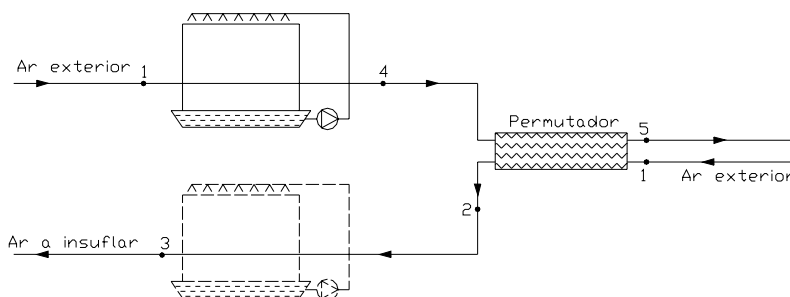


Figura 3 – Processo de arrefecimento evaporativo indirecto: esquema da instalação.

Este processo completo poderá designar-se por indirecto/directo, em virtude da sequência de processos pelos quais passa o ar.

A representação dos processos no diagrama psicrométrico é conforme se mostra qualitativamente na figura 4.

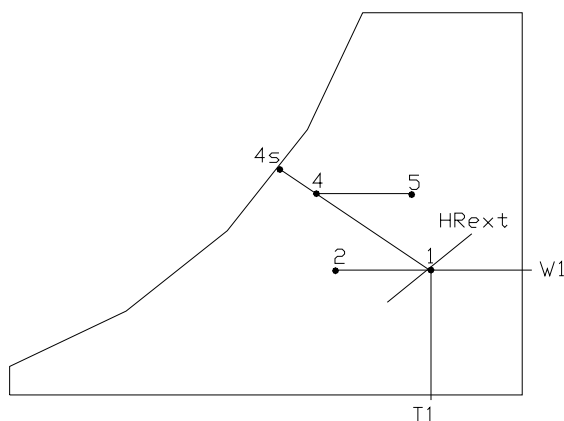


Figura 4 – Representação do processo de arrefecimento evaporativo indirecto no diagrama psicrométrico.

O ar nas condições do ponto 2, na figura 4, pode ainda sofrer um processo de arrefecimento evaporativo directo, o que lhe permite atingir uma temperatura mais baixa e com isso, um acréscimo do potencial de arrefecimento. A representação gráfica desses processos no diagrama psicrométrico encontra-se na figura 5.

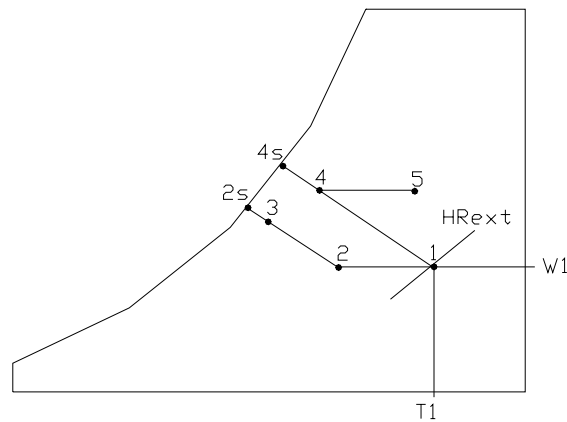


Figura 5 – Representação do processo de arrefecimento evaporativo indirecto-directo no diagrama psicrométrico.

No processo de arrefecimento evaporativo indirecto pode definir-se uma eficiência energética através da igualdade

$$\varepsilon_{\text{evap,ind}} = \frac{\dot{m}_1 c_p (T_1 - T_2)}{\dot{m}_2 c_p (T_1 - T_{4s}^*)} \quad (3)$$

Se as capacidades caloríficas dos dois escoamentos forem iguais, então:

$$\varepsilon_{\text{evap,ind}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1 - T_{4s}^*} \quad (4)$$

Mas, a eficiência do permutador de calor pode-se calcular através de:

$$\varepsilon_{\text{perm}} = \frac{C_1 (T_1 - T_2)}{C_{\min} (T_1 - T_4)} \quad (5)$$

Em que C_1 é a capacidade calorífica do fluxo de ar m_1 e C_{\min} é a capacidade mínima dos dois fluxos que passam no permutador.

Por outro lado, sabe-se que o rendimento do processo de arrefecimento directo é dado por uma expressão semelhante a (2):

$$\eta_{\text{evap}} = \frac{T_1 - T_4}{T_1 - T_{4s}^*} \quad (6)$$

Combinando as equações (4), (5) e (6) pode-se escrever:

$$\varepsilon_{\text{evap,ind}} = \frac{C_{\text{min}}}{C_1} \eta_{\text{evap}} \varepsilon_{\text{perm}} \quad (7)$$

Para valores iguais de m_1 e de m_2 ,

$$\varepsilon_{\text{evap,ind}} = \eta_{\text{evap}} \varepsilon_{\text{perm}} \quad (8)$$

ou seja, a eficiência do processo de arrefecimento evaporativo indirecto é, em condições idênticas, sempre inferior à do correspondente processo de arrefecimento evaporativo directo.

4. O POTENCIAL DE ARREFECIMENTO EVAPORATIVO

Uma vez estabelecidas as rotinas de cálculo para os processos de arrefecimento, para os sistemas directo e indirecto, iniciou-se um processo sistemático de cálculo das temperaturas obtidas à saída de cada um dos respectivos dispositivos.

Como dados de base foram utilizados os valores de temperatura de bolbo seco, da humidade relativa do ar e da pressão atmosférica, em intervalos de meia hora, para Faro, nos meses de Maio a Outubro de 2000, os quais possibilitam assim um primeiro teste da metodologia deste trabalho e retirar algumas conclusões, embora com a ressalva que, a seu tempo será exarada.

Foram ainda utilizadas como ferramentas de cálculo o *MSE_{Excel}* e um conjunto de “macros” programadas em *Visual Basic* com vista á obtenção de algumas propriedades do ar húmido, em particular da sua temperatura de bolbo húmido.

De seguida foram fixados alguns valores, constantes para os efeitos destes cálculos, tais como o rendimento do processo de humificação e da eficiência do permutador de calor, os quais são respectivamente 0.9 e 0.85.

Igualmente se admitiram constantes e iguais os caudais de ar no sistema de arrefecimento evaporativo indirecto da figura 3, pelo que, de acordo com os dois valores acima apresentados e com a equação (8) a eficiência do processo indirecto é de 0.77.

Finalmente foi necessário definir uma base de referência para as condições ditas interiores, o que, para os fins pretendidos com este texto se utiliza apenas 24°C.

De forma contrária ao existente para a determinação do Número de Graus-Dia de Arrefecimento, pode-se definir um potencial de arrefecimento evaporativo directo (PAED), na base 24°C, através da seguinte expressão:

$$PAED_{24/0.9} = \sum_1^{48} \frac{(T_b - T_j)}{48} \quad (9)$$

uma vez que as propriedades do ar se encontram disponíveis em intervalos de meia hora, conforme já foi referido.

Na equação (9) T_b é a temperatura de base, constante, neste caso igual a 24°C e T_j a temperatura obtida, para cada intervalo de meia hora, à saída do dispositivo de arrefecimento. Os índices 24/0.9 referem-se respectivamente à temperatura de base e o segundo ao rendimento do processo.

Para o arrefecimento evaporativo indirecto pode-se igualmente definir um potencial de arrefecimento, neste caso PAEI, através de:

$$PAEI_{24/0.9/0.85} = \sum_1^{48} \frac{(T_b - T_j)}{48} \quad (10)$$

em tudo idêntico ao anterior, mas, em cuja definição aparece mais um índice, neste caso 0.85, o qual se refere à eficiência do permutador de calor imprescindível ao processo indirecto.

Tanto para PAED como para PAEI as unidades são °C.dia (graus-dia).

5. ALGUNS RESULTADOS

Conforme foi referido, logo na Introdução, apenas se dispõe de dados climáticos para Faro, apenas para o ano de 2000, e daqui se possa facilmente inferir que os resultados obtidos não apresentem consistência do ponto de vista estatístico.

Por outro lado, julgou-se mais interessante admitir neste trabalho que o período de arrefecimento é o que vai de Maio a Outubro, hipótese que parece absolutamente verosímil face aos valores das temperaturas médias do ar exterior nos restantes meses. Nestes meses é mais fácil remover as cargas térmicas de arrefecimento, sem necessidade de recurso a qualquer processo adicional de arrefecimento – recorda-se, a propósito, que é nesse período que o vulgar *free-cooling* é mais eficaz.

A este propósito, a figura 6 é bastante expressiva – nesta figura é feita a representação gráfica dos valores médios mensais do diferencial de temperaturas abaixo de 24°C, obtidos através dos sistemas evaporativos directo, indirecto e indirecto/directo e também dos valores médios do diferencial de temperaturas acima de 24°C. De facto, os valores deste último diferencial são mais elevados em Julho e em Agosto, época em que o *free cooling* pode ser menos utilizado.

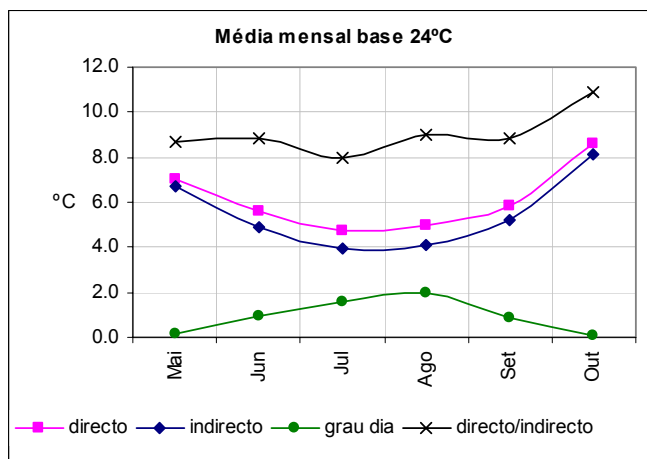


Figura 6 – Diferencial médio mensal de temperaturas obtido através dos processos evaporativos.

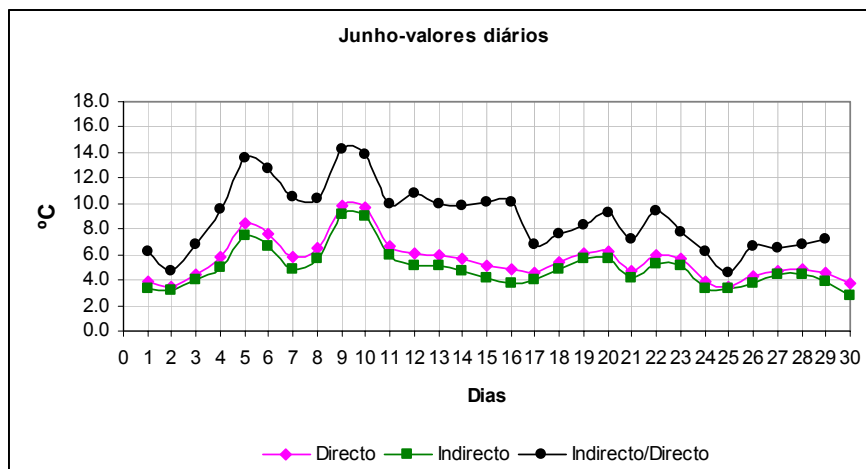


Figura 7 – Diferencial médio diário de temperaturas obtido através dos processos evaporativos, para Junho.

A figura 6 é também elucidativa no que se refere ao potencial de arrefecimento evaporativo. Neste caso, o processo indirecto/directo é o que permite obter os valores mais elevados do diferencial de temperaturas e simultaneamente o que permite obter os valores mais elevados em Julho e em Agosto.

Daqui em diante, sempre que for referido apenas diferencial de temperaturas está a referir-se o diferencial de temperaturas abaixo de 24°C, ou seja, o diferencial conseguido à custa dos sistemas evaporativos e que pode contribuir para o arrefecimento.

As figuras 7 e 8 apresentam a variação diária do diferencial de temperaturas, para cada um daqueles três processos, para os meses de Junho e de Agosto.

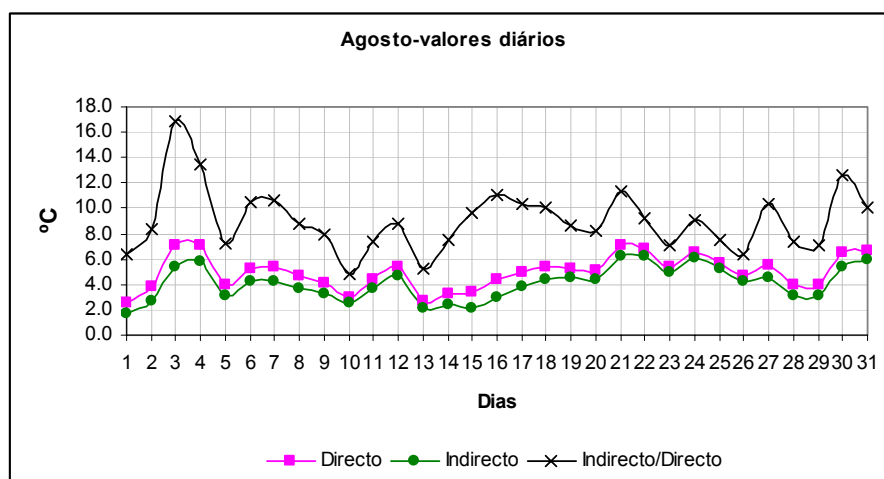


Figura 8 – Diferencial médio diário de temperaturas obtido através dos processos evaporativos, para Agosto.

Através dos gráficos das figuras 7 e 8 é possível detectar aspectos particulares da variação do clima, como por exemplo o que se verifica, em particular, no dia 10 de Agosto, caracterizado por temperaturas mais baixas e humidade mais elevada.

A determinação da probabilidade de ocorrência de um determinado diferencial de temperaturas é outro resultado que se pode retirar desta análise. Assim, a figura 9 apresenta, para os três processos e para toda a época de arrefecimento, a probabilidade acumulada de ocorrência de um determinado diferencial de temperaturas.

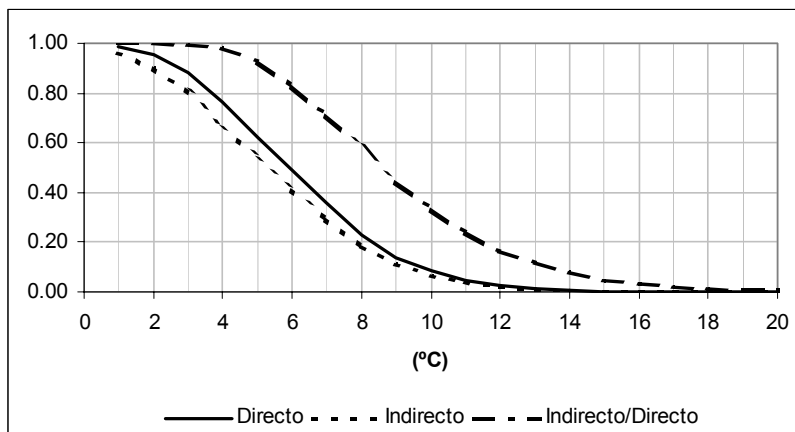


Figura 9 – Probabilidade acumulada de ocorrência de um determinado diferencial de temperaturas, para os três processos de arrefecimento evaporativo.

Da figura 9 é fácil retirar, por exemplo, que um diferencial de 7 °C se verifica durante 29% e 36% do período considerado, respectivamente para os sistemas evaporativos indirecto e directo e que um diferencial de 10°C é conseguido durante muito pouco tempo com qualquer destes dois sistemas. A realização deste diferencial poderá, no entanto, ser mais facilmente conseguida por meio do sistema misto indirecto/directo.

Os mesmos resultados podem ser apresentados através do gráfico da figura 10, neste, mostrando-se os valores do número de observações para cada diferencial, em que cada observação corresponde a um período de meia hora.

O potencial de arrefecimento evaporativo, em graus-dia, calculado através das equações (9) e (10) obtido através de cada um dos sistemas que têm vindo a ser tratados apresenta-se no quadro 1.

Quadro 1 – Potencial de arrefecimento evaporativo (graus-dia).

	Directo	Indirecto	Indirecto/Directo
Maio	218	208	268
Junho	168	147	265
Julho	146	124	246
Agosto	154	127	280
Setembro	181	155	274
Outubro	257	251	327
Total	1123	1012	1660

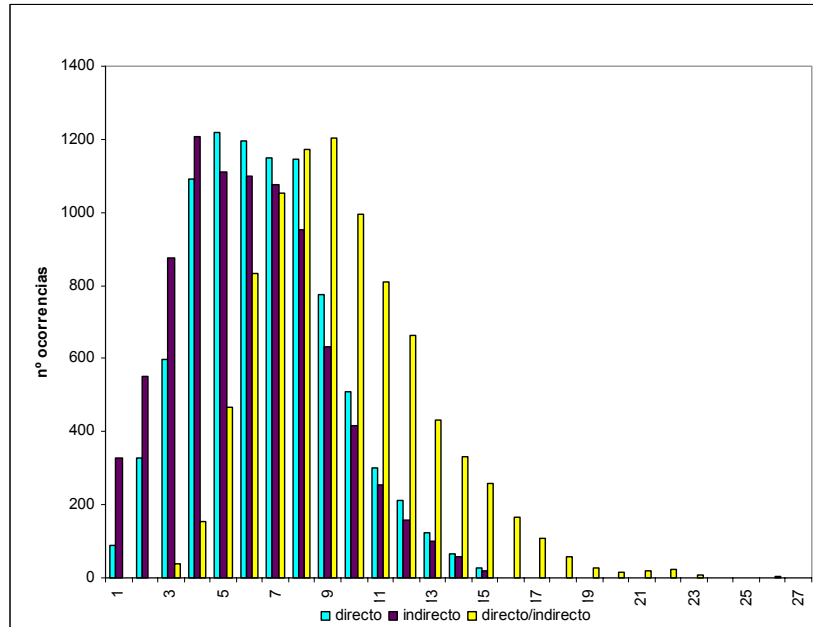


Figura 10 – Número de ocorrências de um determinado diferencial de temperaturas, para os três processos de arrefecimento evaporativo.

Foi também avaliado o potencial de arrefecimento gratuito simples, acima designado de *free cooling*, tendo-se obtido o valor total de 544 Graus-Dia, para o mesmo período.

Com a ajuda dos sistemas evaporativos consegue-se praticamente duplicar o potencial de arrefecimento gratuito disponível no ar exterior, o que, do ponto de vista económico, poderá vir a tornar-se interessante. Por cada 1000 m³/h de ar exterior, o potencial de arrefecimento devido aos sistemas evaporativos é de 9074 kWh para o directo, de 8177 kWh para o indirecto e de 13413 kWh para o indirecto/directo, admitindo os valores médios de 1.2 kg/m³, para a massa específica do ar e de 1010 J/ (kg.K) para o calor específico a pressão constante do ar.

Para o clássico número de graus-dia de arrefecimento, no mesmo período, obteve-se 172, valor que se pode considerar consentâneo com as publicações existentes (para Faro, na base 24°C e para o período entre Junho e Setembro, o número de graus-dia de arrefecimento é de 120, *in Temperaturas Exteriores de Projecto e Número de Graus-Dia, Instituto Nacional de Meteorologia e Geofísica e Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa 1989*)

Se no mesmo período se calcular a diferença das poupanças energéticas obtidas para o arrefecimento através de cada um daqueles dois sistemas, relativamente ao *free cooling* simples, ela é de 4703 kWh e de 3781 kWh, respectivamente para o sistema directo e indirecto, por cada 1000 m³/h de ar exterior.

6. CONCLUSÕES

Em primeiro lugar deverá referir-se, mais uma vez, que o recurso aos processos evaporativos não elimina a necessidade da existência de outro processo de arrefecimento, se não puder ser admitida a variação das condições a manter num determinado ambiente, já que eles estão directamente dependentes das condições atmosféricas.

Um dos objectivos que se procura com a análise efectuada neste trabalho é o lançamento de uma metodologia simplificada que permite avaliar o valor das poupanças energéticas introduzidas por meio do arrefecimento evaporativo. Sem dúvida, que o seu montante não será desprezável em muitas das regiões climáticas dos país e o seu campo de aplicação não se restringe exclusivamente ao ar condicionado para conforto humano.

Por isso, será interessante analisar o clima de outras regiões de Portugal, divulgando amplamente os resultados e incentivando a utilização de um recurso gratuito, cujo resultado poderá ter um peso significativo na redução do uso de recursos energéticos fósseis.

Com este estudo apenas se podem estimar os potenciais de arrefecimento sensível devidos aos sistemas evaporativos. Contudo, é sabido que o designado sistema directo introduz um acréscimo de humidade no ar (razão por que se recorre ao sistema indirecto). Nesse sentido, deve-se explorar, no futuro, uma outra via que possibilite também caracterizar o eventual potencial de arrefecimento latente.

Conforme se referiu no ponto 6 deste trabalho, a probabilidade de ocorrência de um determinado diferencial de temperaturas poderá ser um parâmetro importante que esta metodologia também fornece, com vista ao dimensionamento dos sistemas.

BIBLIOGRAFIA

- W.P. JONES, Engenharia de Ar Condicionado, Editora Campus, 1983
- ASHRAE 1987, HVAC Handbook.
- ASHRAE 1989, Fundamentals Hanbook.
- ASHRAE 1996, Systems and Equipment Handbook

NOTA FINAL

Este texto foi elaborado com base no trabalho realizado no âmbito da avaliação da disciplina de Termodinâmica Aplicada I do 2º ano do 2º ciclo do curso de Engenharia Mecânica da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Algarve, sob a orientação do Professor Armando Costa Inverno.