

Estudo da Aplicabilidade de um Arrefecedor a Ar de Ponto de Orvalho a Climas Portugueses

Marcos André Moreira da Silva

Relatório da Dissertação do MIEM

Orientador

Armando Carlos Figueiredo Coelho de Oliveira
Professor Associado da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



FEUP

Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Julho/2008

Resumo

Este trabalho tem como objectivo analisar até que ponto um arrefecedor de ar de ponto de orvalho é uma alternativa viável para arrefecimento ambiente em Portugal. Trata-se duma tecnologia recentemente desenvolvida que opera com custos energéticos mais baixos. No entanto para que esta máquina tenha um bom desempenho é necessário que esta se encontre num contexto climático favorável.

Para estudar a afectação do clima português, neste tipo de sistemas, foram criados dois modelos matemáticos de máquinas que operam segundo este princípio. Foi ainda realizado um estudo paramétrico para cada um dos modelos, com o intuito de conhecer as suas potencialidades e de as maximizar.

Um dos modelos criados foi integrado em conjunto com um modelo de um edifício característico com a tipologia de uso de um gabinete de escritórios. De seguida foram feitos estudos de como este conjunto se comportaria perante o clima típico de quatro cidades, Bragança, Évora, Lisboa e Porto.

Os resultados mostram que este tipo de máquina tem um bom desempenho para a maioria das zonas de Portugal, principalmente no que diz respeito à promoção do conforto térmico.

Study of the Applicability to Portuguese Climates of a Dew Point Air Cooler

Abstract

The objective of this work is to investigate if a dew point air cooler is a good alternative for indoor cooling in Portugal. Dew point cooling is a recently developed technology that allows cooling with a minor energy cost. However, to reach a good performance, this kind of device needs to be inserted in a place with a favourable weather.

To know how the weather conditions affect the dew point cooler, two different mathematical models that represent two different units working under this principle were developed. A parametric study on these units was also made to know and maximize the potential of each unit.

One of these models was integrated with a typical office building. The global cooler and building model was run with the weather data of four Portuguese cities; Bragança, Évora, Lisboa and Porto.

The results show that this kind of machine has a good performance under most climatic conditions analysed, since the results of indoor thermal comfort were very good.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Professor Armando Oliveira a orientação deste trabalho, por partilhar a sua experiência e conhecimento, lembrando o modo como sempre me direccionou na busca das melhores respostas a todas as perguntas que foram suscitadas.

De igual modo, agradeço à minha mãe que como sempre me apoiou e incentivou, no mínimo, a dar “o meu melhor”.

Queria agradecer ao meu melhor amigo e tio, Moisés Moreira, por me apoiar incansavelmente, pelas “discussões” sobre energias renováveis, e por acima de tudo, sempre acreditar em mim.

Reconhecendo o modo como afectam a minha vida, principalmente a minha disposição, deixo uma palavra de apreço às minhas irmãs.

Agradeço a todos os restantes dos meus familiares e amigos pela compreensão associada a todos os “bons momentos” em que não pude estar presente.

Finalmente, agradeço ao meu Criador por me conceder todo o fôlego necessário para a realização deste trabalho.

Índice

1.	CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	1
1.1.	Revisão Bibliográfica	4
1.2.	Objectivos.....	5
1.3.	Organização da Tese	6
2.	CAPÍTULO 2 - MODELAÇÃO DE UM ARREFECEDOR A AR DE PONTO DE ORVALHO	7
2.1.	Elaboração do modelo matemático do AEPO	7
2.2.	Fenómenos de transferência de calor e massa e respectivos coeficientes	7
2.3.	Hipóteses.....	11
2.4.	Material usado no revestimento do canal húmido.....	11
2.5.	Condução monodimensional	12
2.6.	Modelo 1	15
2.6.1.	Alhetas.....	15
2.6.2.	Colocação dos módulos.....	16
2.7.	Modelo 2	17
2.8.	Medidas de eficiência da permuta de massa e calor	18
2.9.	Cálculo da potência para ventilação	19
2.10.	Cálculo do COP	20
3.	CAPÍTULO 3 - ESTUDOS PARAMÉTRICOS	21
3.1.	Modelo 1	22
3.1.1.	Análise ao número de nós.....	22
3.1.2.	Análise à altura do canal	23
3.1.3.	Análise ao espaço entre paredes laterais (alhetas)	24
3.1.4.	Análise ao comprimento do canal.....	24
3.1.5.	Análise à razão de caudais e velocidade	25
3.1.6.	Análise do COP	28
3.1.7.	Análise do Atravancamento	29
3.2.	Modelo 2	29
3.2.1.	Análise ao número de elementos	29
3.2.2.	Análise ao comprimento dos tubos	30
3.2.3.	Análise ao raio exterior do canal 1 com variação da velocidade	31
3.2.4.	Análise ao raio exterior do canal 2 com variação da velocidade	32
3.2.5.	Análise ao raio exterior do canal 3 com variação da velocidade	33
3.3.	Comparação entre as duas configurações	34

4.	CAPÍTULO 4 – DEFINIÇÃO DO EDIFÍCIO EM ESTUDO.....	37
4.1.	Definição geométrica.....	37
4.2.	Envolvente	38
4.3.	Ganhos.....	39
4.3.1.	Ganhos por ocupação.....	39
4.3.2.	Ganhos por iluminação.....	40
4.3.3.	Ganhos por equipamento.....	41
4.3.4.	Ganhos Solares	42
4.4.	Locais usados para a simulação.....	43
4.5.	Integração do modelo no espaço	48
4.6.	Humidade no interior do edifício	50
4.7.	Ventilação.....	51
4.8.	Análise de Resultados.....	51
4.8.1.	Condições de Conforto	51
4.8.2.	Determinação dos custos de operação	52
5.	CAPÍTULO 5 – RESULTADOS OBTIDOS	55
5.1.	Pior semana para cada local.....	55
5.1.1.	Bragança	55
5.1.2.	Évora.....	57
5.1.3.	Lisboa.....	58
5.1.4.	Porto.....	59
5.2.	Diagramas psicrométricos	61
5.3.	Energia removida do espaço	63
5.4.	Eficiência do AEPO.....	64
5.5.	Consumo de electricidade	65
5.6.	Consumo de água	66
5.7.	Custos de operação da máquina	67
5.8.	Análise da frequência do conforto para cada local	68
6.	CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES.....	69
6.1.	Trabalhos futuros	70

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – HUMIDIFICAÇÃO E ARREFECIMENTO DO AR NUM CANAL MOLHADO	2
FIGURA 2 - PERCURSO DO AR NUM ARREFECEDOR EVAPORATIVO	3
FIGURA 3 - DETERMINAÇÃO DE TEMPERATURA DE BOLBO HÚMIDO E PONTO DE ORVALHO ATRAVÉS DE CARTA PSICROMÉTRICA	4
FIGURA 4 – VARIÁVEIS RELATIVAS À TRANSFERÊNCIA DE MASSA	9
FIGURA 5 – CONDUÇÃO ENTRE UM ELEMENTO E OS ELEMENTOS VIZINHOS	13
FIGURA 6 – ELEMENTO E FLUXOS DE CALOR E MASSA ASSOCIADOS	14
FIGURA 7 – MÓDULO DE UM ARREFECEDOR EVAPORATIVO DE PONTO DE ORVALHO DE PLACAS PLANAS.....	15
FIGURA 8 – REPRESENTAÇÃO DE UM CANAL COM ALHETAS E DIMENSÕES DESTAS	16
FIGURA 9 – MÓDULOS DE UM ARREFECEDOR EVAPORATIVO DE PONTO DE ORVALHO DE TUBOS CONCÊNTRICOS.....	17
FIGURA 10 – ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO AEPO DE TUBOS CONCÊNTRICOS	18
FIGURA 11 – EFICIÊNCIA DE BOLBO HÚMIDO E PONTO DE ORVALHO PARA DIFERENTES NÚMEROS DE ELEMENTOS	22
FIGURA 12 – VALOR DE EFICIÊNCIA DE BOLBO HÚMIDO E PONTO DE ORVALHO PARA DIFERENTES VALORES DA ALTURA DOS CANAIS.....	23
FIGURA 13 - VALOR DE EFICIÊNCIA DE BOLBO HÚMIDO E PONTO DE ORVALHO PARA DIFERENTES VALORES DE ESPAÇO ENTRE PAREDES LATERAIS	24
FIGURA 14 - VALOR DE EFICIÊNCIA DE BOLBO HÚMIDO E PONTO DE ORVALHO PARA DIFERENTES VALORES DO COMPRIMENTO DOS CANAIS	25
FIGURA 15 – POTÊNCIA DE ARREFECIMENTO EM UM CANAL, PARA VÁRIAS VELOCIDADES DO ESCOAMENTO DO AR E PARA DIFERENTES RAZÕES DE CAUDAL.....	26
FIGURA 16 - VALOR DE EFICIÊNCIA DE BOLBO HÚMIDO PARA VÁRIAS VELOCIDADES DO ESCOAMENTO DE AR E A DIFERENTES RAZÕES DE CAUDAL	27
FIGURA 17 – ANÁLISE DO COEFICIENTE DE PERFORMANCE PARA DIFERENTES VELOCIDADES DO ESCOAMENTO	28
FIGURA 18 - EFICIÊNCIA DE BOLBO HÚMIDO E PONTO DE ORVALHO PARA DIFERENTES NÚMEROS DE ELEMENTOS.....	30
FIGURA 19 – EFICIÊNCIA DE BOLBO HÚMIDO E POTÊNCIA DE ARREFECIMENTO POR CANAL EM FUNÇÃO DO COMPRIMENTO DO CANAL.....	31
FIGURA 20 E 21 – INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO ESCOAMENTO E DO CANAL INTERIOR NA EFICIÊNCIA DE BOLBO HÚMIDO E POTÊNCIA DE ARREFECIMENTO.....	32
FIGURA 22 E 23 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO ESCOAMENTO E DO RAIO DO CANAL INTERMÉDIO NA EFICIÊNCIA DE BOLBO HÚMIDO E POTÊNCIA DE ARREFECIMENTO	33
FIGURA 24 E 25 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO ESCOAMENTO E DO RAIO DO CANAL EXTERIOR NA EFICIÊNCIA DE BOLBO HÚMIDO E POTÊNCIA DE ARREFECIMENTO	33
FIGURA 26 – MAPA DE PORTUGAL CONTINENTAL	44

FIGURA 27 - TEMPERATURAS DE BOLBO HÚMIDO EM BRAGANÇA NAS HORAS DE OCUPAÇÃO E EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA AMBIENTE.....	45
FIGURA 28 - TEMPERATURAS DE BOLBO HÚMIDO EM ÉVORA NAS HORAS DE OCUPAÇÃO E EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA AMBIENTE.....	46
FIGURA 29 - TEMPERATURAS DE BOLBO HÚMIDO EM LISBOA NAS HORAS DE OCUPAÇÃO E EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA AMBIENTE.....	47
FIGURA 30 – TEMPERATURAS DE BOLBO HÚMIDO NO PORTO NAS HORAS DE OCUPAÇÃO E EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA AMBIENTE.....	48
FIGURA 31 – HISTERESE ENTRE A TEMPERATURA DE ACTIVAÇÃO E A TEMPERATURA DE DESACTIVAÇÃO DO AEPO.....	49
FIGURA 32 – ESQUEMA DA LIGAÇÃO ARREFECEDOR-EDIFÍCIO.....	49
FIGURA 33 – INTERVALO DE TEMPERATURA E HUMIDADE ONDE EXISTE CONFORTO.....	52
FIGURA 34 – EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS EXTERIOR, INTERIOR E DE INSUFLAÇÃO.....	56
FIGURA 35 - EVOLUÇÃO DA HUMIDADE ABSOLUTA EXTERIOR E INTERIOR.....	56
FIGURA 36 – EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS EXTERIOR, INTERIOR E DE INSUFLAÇÃO.....	57
FIGURA 37 - EVOLUÇÃO DA HUMIDADE ABSOLUTA EXTERIOR E INTERIOR.....	58
FIGURA 38 – EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS EXTERIOR, INTERIOR E DE INSUFLAÇÃO.....	59
FIGURA 39 - EVOLUÇÃO DA HUMIDADE ABSOLUTA EXTERIOR E INTERIOR.....	59
FIGURA 40 – EVOLUÇÃO DAS TEMPERATURAS EXTERIOR, INTERIOR E DE INSUFLAÇÃO.....	60
FIGURA 41 - EVOLUÇÃO DA HUMIDADE ABSOLUTA EXTERIOR E INTERIOR.....	60
FIGURA 42 – DIAGRAMA PSICROMÉTRICO COM AS CONDIÇÕES OBTIDAS NO INTERIOR DO EDIFÍCIO EM BRAGANÇA.....	61
FIGURA 43 – DIAGRAMA PSICROMÉTRICO COM AS CONDIÇÕES OBTIDAS NO INTERIOR DO EDIFÍCIO EM ÉVORA.....	62
FIGURA 44 – DIAGRAMA PSICROMÉTRICO COM AS CONDIÇÕES OBTIDAS NO INTERIOR DO EDIFÍCIO EM LISBOA.....	62
FIGURA 45 – DIAGRAMA PSICROMÉTRICO COM AS CONDIÇÕES OBTIDAS NO INTERIOR DO EDIFÍCIO NO PORTO.....	63
FIGURA 46 – ENERGIA REMOVIDA DO ESPAÇO DURANTE OS 4 MESES DE ARREFECIMENTO.....	64
FIGURA 47 – COP MÉDIO DE FUNCIONAMENTO ALCANÇADO DURANTE A ESTAÇÃO DE ARREFECIMENTO EM CADA LOCAL.....	65
FIGURA 48 – CONSUMO ENERGÉTICO DO AEPO.....	66
FIGURA 49 – QUANTIDADE DE ÁGUA GASTA NO PROCESSO DE ARREFECIMENTO.....	66
FIGURA 50 – CUSTOS DE OPERACIONAIS DO AEPO PARA OS 4 MESES.....	67
FIGURA 51 – FREQUÊNCIA DE HORAS EM QUE É ATINGIDO CONFORTO E TEMPERATURA ACEITÁVEL PARA OCUPAÇÃO NO ESPAÇO.....	68

Nomenclatura

A	área elementar, m^2
A_C	área da secção transversal, m^2
b	altura do canal, m
c_p	calor específico a pressão constante, $J/kg \cdot K$
D_h	diâmetro hidráulico
f	factor de atrito, coeficiente de perda de carga em linha
g	factor de obstrução do envidraçado
h	entalpia, J/kg
h_{fg}	calor latente de vaporização, J/kg
h_f	entalpia de líquido saturado, J/kg
j	sector adimensional de Colburn para a transferência de calor
j_m	sector adimensional de Colburn para a transferência de massa
L	comprimento do elemento ou tubo, m
Le	número de Lewis
k	coeficiente de perda de carga local
\dot{m}	caudal mássico, kg/s
Nu	número de Nusselt
Pr	número de Prandtl
\dot{Q}	potência, W
r_{sul}	radiação incidente numa superfície voltada a sul, W/m^2
Re	número de Reynolds
Sc	número de Schmidt
Sh	número de Sherwood
T	temperatura, $^{\circ}C$
U	coeficiente de transmissão térmica do elemento da envolvente, $W/m^2 \cdot ^{\circ}C$
u	velocidade, m/s
\dot{V}	caudal volúmico, m^3/s
V	volume, m^3
x	humidade absoluta, kg vapor/ kg ar seco

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

α	coeficiente de convecção, $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$
α_m	coeficiente de transferência de massa, $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$
δ_i	espessura da alheta, m
ε	eficiência
η	rendimento
θ	fracção de uso
Δp	diferencial de pressão, Pa
λ	condutibilidade térmica
ρ	densidade, kg/m^3
ϕ	densidade energética, W/m^2

Índice

<i>a</i>	alheta
<i>ar</i>	ar
<i>a. s.</i>	ar seco
<i>ag</i>	água
<i>arref</i>	arrefecimento
<i>bh</i>	bolbo húmido
<i>conv</i>	convecção
<i>equip</i>	equipamento
<i>evap</i>	evaporação
<i>ext</i>	exterior
<i>i</i>	interface parede-ar
<i>illum</i>	iluminação
<i>ins</i>	insuflação
<i>int</i>	interior
<i>p</i>	parede
<i>po</i>	ponto de orvalho
<i>ocup</i>	ocupação
<i>rad</i>	radiação
<i>vent</i>	ventilação

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

O panorama energético do mundo está em transição. As mudanças climáticas, e o preço crescente do barril de petróleo, provocaram uma reacção de racionalização do uso da energia e de procura de alternativas para a sua produção.

Neste sentido, a área da eficiência energética dos edifícios é indicada como tendo grande potencial para melhoramento. Estudos mostram que o consumo energético dos edifícios (domésticos e serviços) representa actualmente cerca de 20 % do consumo energético total do país, [1], sendo mesmo superior na União Europeia (40% na EU-25[2]). De toda a energia gasta nos edifícios, 25% são usados para adaptar o espaço ao conforto humano. No entanto, há que salientar que existe uma grande heterogeneidade no consumo eléctrico nos edifícios. Um exemplo disso, é aquilo que acontece nos supermercados em que 99% da energia consumida é eléctrica e desta 70% é usada para climatização. O arrefecedor de ar de ponto de orvalho apresenta-se como uma possível solução para ser usada no arrefecimento ou pré-arrefecimento de um espaço. Este tipo de equipamento tem a capacidade de arrefecer ar, despendendo apenas de cerca de um quarto da energia consumida por um sistema convencional, com um efeito idêntico. Contudo, o arrefecedor evaporativo apresenta algumas limitações que tornam este sistema pouco atractivo em certas zonas. Estas estão relacionadas com as condições do ar exterior, que, quando não são favoráveis ao desempenho desta máquina, prejudicam seriamente o seu funcionamento e eficiência. Os sistemas evaporativos, são já conhecidos e usados em Portugal há algum tempo, mas nunca tiveram uma afirmação no mercado, apesar de apresentavam-se como uma alternativa mais económica aos sistemas convencionais de climatização. As causas prendem-se com o facto de estes muitas vezes não atingirem temperaturas suficientemente baixas sendo a potência total de arrefecimento insuficiente para remover a carga térmica do espaço.

Existem basicamente dois tipos de arrefecedores evaporativos: os arrefecedores evaporativos directos e indirectos. Tanto num caso como no outro a temperatura mínima teórica que estes conseguem atingir é a temperatura de bolbo húmido. Os arrefecedores evaporativos directos são, os de construção mais simples e, talvez por isso este tipo foi o mais comercializado. Neste tipo de arrefecedor o ar que é insuflado no espaço, passa previamente

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

por uma superfície molhada aumentando a sua humidade e diminuindo a temperatura. No arrefecedor evaporativo indirecto existem dois circuitos de ar diferentes que trocam calor entre si. O ar de um dos circuitos atravessa uma superfície húmida, baixando a sua temperatura; este, em seguida, entra num permutador onde recebe calor do outro circuito de ar, proveniente do exterior. Por último o ar que perde calor no permutador é o insuflado no espaço. Este tipo de arrefecedor tem como grande vantagem não aumentar a humidade no interior da área a climatizar, mas, por outro lado, não consegue atingir uma temperatura tão baixa como no arrefecedor evaporativo directo.

O arrefecedor evaporativo de ponto de orvalho apresenta-se como uma nova geração de arrefecedor evaporativo que atinge a máxima: fazer mais e melhor com menos. [2]. Apesar do seu melhor ou pior funcionamento estar dependente das condições climáticas locais, esta dependência é menos incisiva no arrefecedor evaporativo de ponto de orvalho (AEPO) do que nos outros arrefecedores evaporativos. O AEPO é por isso mais eficiente, conseguindo atingir temperaturas do ar mais baixas, para as mesmas condições do ar ambiente, sendo que o faz, sem adicionar vapor ao ar, que é insuflado no espaço. Estes aspectos tornam este tipo de arrefecedor evaporativo mais atractivo, pois permitem melhorar as condições de conforto no espaço e ao mesmo tempo aumentar a potência calorífica removida.

Para perceber o porquê da dependência climática da eficiência deste arrefecedor de ar, há que explicar o seu modo de funcionamento.

O arrefecedor evaporativo de ponto de orvalho, numa das suas configurações mais básicas, é composto por várias placas sobrepostas. Adjacentes a cada uma destas placas existem dois canais, onde circula ar em sentidos contrários.

O princípio de funcionamento deste ciclo assenta na evaporação de água que normalmente se dá entre uma parede molhada e um escoamento de ar, conforme se exemplifica na Figura 1.

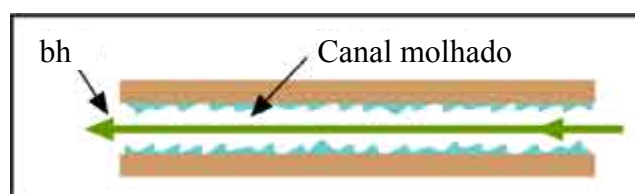


Figura 1 – Humidificação e arrefecimento do ar num canal molhado

A diferente concentração de vapor de água é o propulsor do arrefecimento evaporativo, sendo que existe uma tendência natural para igualar esta diferença de

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

concentrações. No entanto, para que a água passe do estado líquido para o gasoso, é necessário que ultrapasse a barreira energética do calor latente de vaporização. O que acontece é que o ar cede esta energia à água para que esta evapore, diminuindo assim a sua temperatura. Este processo é conhecido como arrefecimento evaporativo. Assim, de um modo resumido, pode-se dizer que o arrefecedor evaporativo usa um gradiente de concentração de vapor de água para criar um gradiente térmico favorável.

Conhecendo as propriedades psicrométricas do ar sabemos que este apresenta um máximo de humidade que pode absorver. Em climas quentes e secos esta capacidade é maior e, em climas húmidos e frios esta desce significativamente. Entende-se assim, porque o clima afecta de um modo determinante a performance destas máquinas.

No AEPO, acontece o mesmo fenómeno, conforme ilustra a Figura 2. A grande diferença do AEPO para um AED é, que no AEPO o ar que entra é primeiro arrefecido no canal seco (1-2, na Figura 2). Quando chega ao final deste, o caudal de ar é dividido, sendo que uma parte serve como ar de trabalho, que é humidificado no canal molhado, e assim absorve calor do canal seco (2-3, Figura 2). O ar de trabalho é depois enviado para o exterior, pois não apresenta mais nenhuma utilidade. O resto do ar que chega ao ponto 2, que foi também arrefecido no canal seco, chamado de ar produto, é enviado para o espaço a tratar.

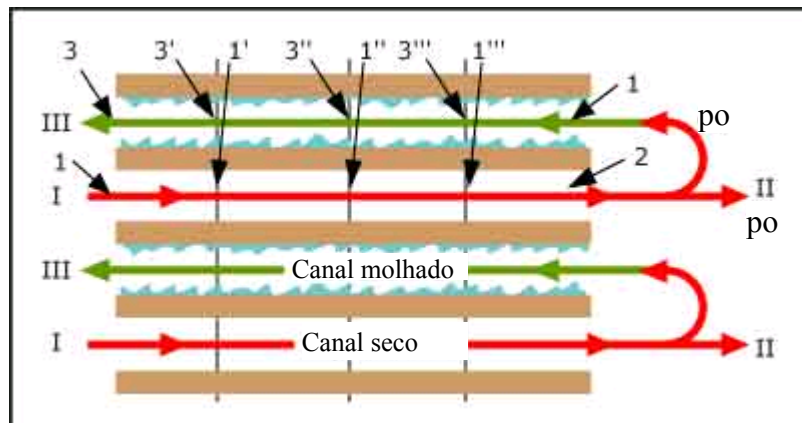


Figura 2 - Percurso do ar num arrefecedor evaporativo

As limitações que estes sistemas apresentam, estão assim relacionadas com o ar de admissão e com a sua humidade. Espera-se assim que, num clima seco, a eficiência destas máquinas seja alta, e em climas com humidade elevada a eficiência seja baixa. É por isso necessário avaliar a aplicabilidade de sistemas deste tipo, em vários locais geográficos de Portugal com condições climatéricas diferentes. Existem vários parâmetros que podem ser

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

usados para medir a capacidade do ar de absorver vapor de água. Um destes é a temperatura mínima, para uma determinada condição ambiente, até à qual o ar pode ser arrefecido por adição de vapor, a esta chama-se temperatura de bolbo húmido. Este processo é representado em carta psicrométrica por uma evolução característica, conforme representado na Figura 3 na linha a vermelho. Por outro lado, a temperatura de ponto de orvalho é a temperatura à qual o

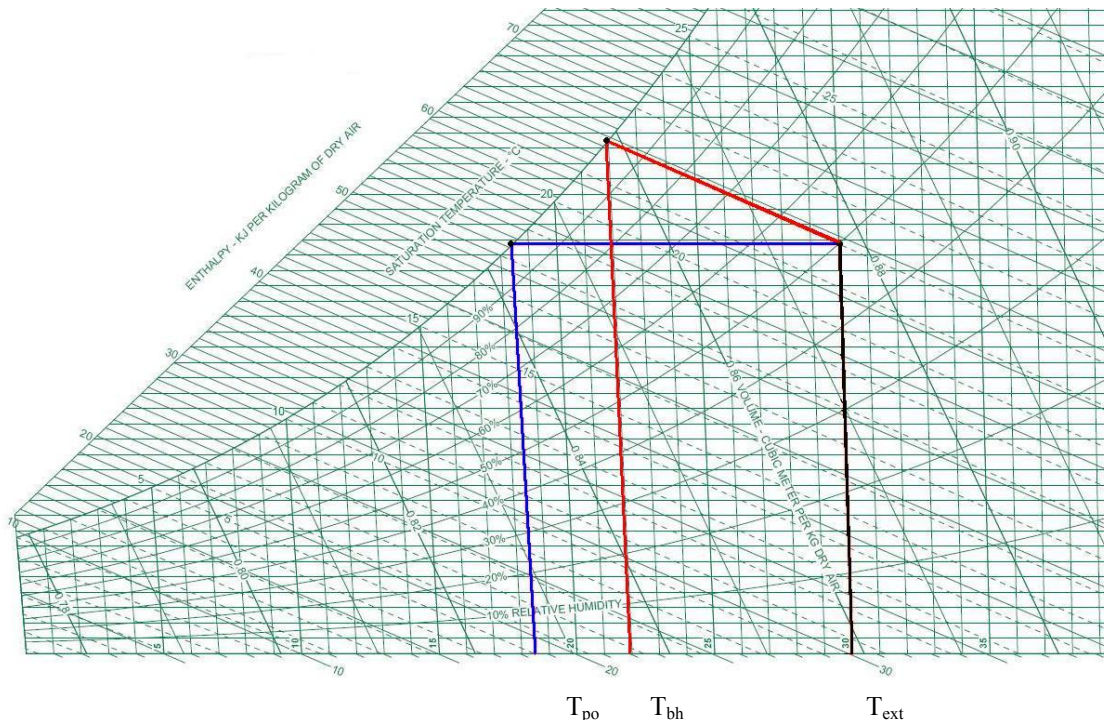


Figura 3 - Determinação de temperatura de bolbo húmido e ponto de orvalho através de carta psicrométrica
ar torna-se saturado quando arrefecido, sem que exista adição ou remoção de vapor durante o processo. Esta evolução é também apresentada na Figura 3, pela linha a azul.

1.1. *Revisão Bibliográfica*

A técnica de arrefecer o ar em direção ao ponto de orvalho por evaporação de vapor de água é relativamente recente, sendo que a primeira patente deste tipo de processo foi apenas registada em 2003 [3]. A comercialização do primeiro aparelho deste tipo, começou em 2006 e neste momento esse aparelho é o único do género no mercado[4].

Quanto a publicações, podem ser encontradas algumas patentes e ainda um artigo, muito recente onde, é apresentado o estudo numérico de uma solução de construção nova para um AEPO [5]. Daqui se pode entender o pouco que ainda foi feito em relação a este tipo de arrefecedor de ar.

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

Apesar disso, existem vários trabalhos relacionados com arrefecedores evaporativos convencionais. Destes destacam-se os artigos que tratam de arrefecedores evaporativos indirectos, visto que estes apresentam várias semelhanças com os AEPO. Estas permitem aplicar métodos e conclusões tiradas de artigos e outros documentos sobre arrefecedores evaporativos indirectos. Desses artigos distinguem-se os de Peterson [6, 7].

1.2. Objectivos

O AEPO é um sistema que começou a ser comercializado há relativamente pouco tempo. Neste momento encontra-se numa fase de conquista de mercado, o que está a acontecer principalmente nos EUA, onde é produzido e vendido.

Este trabalho pretende ser uma contribuição para dar a conhecer melhor esta técnica de arrefecimento de ar, e ao mesmo tempo demonstrar até que ponto pode ser interessante a sua utilização em Portugal.

Para o conseguir elaborou-se um modelo matemático que representa o comportamento de um AEPO, perante diferentes condições de temperatura e humidade ambientes. Para este modelo procedeu-se ao uso de uma configuração diferente da existente no mercado americano, a qual usa sentidos do fluxo do ar concorrentes. Neste modelo os fluxos irão circular em contra-corrente, o que em princípio resultará numa maior eficiência de permuta de calor .

Pretende-se também integrar este modelo num edifício, para analisar até que ponto o arrefecedor será suficiente para obter condições de conforto, na estação de arrefecimento. A simulação será repetida para locais diferentes de Portugal, usando dados climáticos de referência de cada zona.

Os resultados obtidos, permitirão perceber até que ponto o clima português limita ou favorece o funcionamento desta nova tecnologia, que permite arrefecer o ar gastando praticamente só energia para a circulação das correntes de ar.

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

1.3. *Organização da Tese*

O capítulo 2 explica o funcionamento pormenorizado do AEPO e descreve a construção do modelo matemático deste. São também apresentadas e desenvolvidas as fórmulas matemáticas que descrevem os fenómenos associados ao funcionamento do AEPO e que são essenciais ao modelo matemático.

No capítulo 3 são exibidos os resultados da procura das características óptimas de funcionamento, obtidas com o modelo matemático criado. É apresentada uma comparação final entre os dois modelos desenvolvidos, para duas configurações geométricas diferentes.

O capítulo 4 explica todos os detalhes de como o espaço a climatizar foi concebido e modelado. Mostra qual a configuração deste quanto a cargas internas, exposição solar, trocas com a envolvente e outras considerações de importância para a criação do modelo.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos para os meses da estação de arrefecimento e para os diferentes locais calculados.

O capítulo 6 aborda as conclusões finais deste trabalho e lança um conjunto de propostas de trabalhos que poderão ser desenvolvidos no âmbito deste tema.

CAPÍTULO 2 - MODELAÇÃO DE UM ARREFECEDOR A AR DE PUNTO DE ORVALHO

2.1. *Elaboração do modelo matemático do AEPO*

Para representar o comportamento de um AEPO, foi criado um modelo matemático baseado em equações que representam os fenómenos físicos que ocorrem na máquina real. Estas equações são apresentadas neste capítulo, assim como algumas hipóteses importantes. É também explicado como a conjugação destas foi usada para obter o modelo matemático criado no EES [8], através de um algoritmo teórico e simples. Existem no mercado soluções com potencial maior do que aquele que o EES oferece. Devido ao tempo atribuído para a execução do projecto, e à dificuldade de aproximação a software mais complexo, decidiu-se usar o software EES, visto que este consegue dar resultados satisfatórios e era já conhecido do autor. O EES é um pacote de fácil programação e interacção; além disso contém uma biblioteca com as propriedades térmicas de vários materiais, nestas incluem-se as propriedades do ar com a possibilidade de ajustar a humidade deste, o que foi altamente interessante para a execução deste trabalho. O EES permite ainda a análise de resultados sob a forma gráfica de um modo acessível incluindo a análise em diagramas psicrométricos.

2.2. *Fenómenos de transferência de calor e massa e respectivos coeficientes*

Coefficiente de transferência de calor (convecção)

Para o cálculo dos coeficientes de transferência de calor por convecção, foram usadas as correlações existentes no software comercial EES. A rotina do EES é dinâmica, pois esta determina se o escoamento é laminar ou turbulento e usa assim a correlação apropriada ao tipo de escoamento. Como os escoamentos desenvolvem-se a velocidades baixas e pelos dados recolhidos em outros artigos espera-se que os escoamentos sejam laminares. Assim, o software calcula o número de Nusselt através da correlação obtida por Nellis e Klein [9] e

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

baseada nos dados publicados em 1978 por Shah e London [10]. Com o número de Nusselt obtêm-se o coeficiente de convecção para um escoamento laminar no interior de um tubo.

$$Nu = \frac{\alpha L}{\lambda} \quad (0.1)$$

Coefficiente de Transferência de massa

Para obter o valor deste coeficiente, recorreu-se ao estudo realizado por Chilton e Colburn [11], em que o coeficiente de transferência de calor por convecção e o coeficiente de transferência de massa são correlacionados com um factor de atrito.

$$j = \frac{Nu}{Re \cdot Pr^{\frac{1}{3}}} = \frac{f}{2} \quad (0.2)$$

$$j_m = \frac{Sh}{Re \cdot Sc^{\frac{1}{3}}} = \frac{f}{2} \quad (0.3)$$

vindo

$$j = \frac{\alpha}{\rho \cdot c_p \cdot \bar{u}} \cdot Pr^{\frac{2}{3}} \quad (0.4)$$

$$j_m = \frac{\alpha_m}{\rho \cdot \bar{u}} \cdot Sc^{\frac{2}{3}} \quad (0.5)$$

então e assim como apresentado em Incropera e Dewitt [12] o número de Lewis é definido do seguinte modo

$$Le^{\frac{2}{3}} = \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{\frac{2}{3}} = \frac{\alpha}{c_p \cdot \alpha_m} \quad (0.6)$$

Conforme mostrado por Peterson e Hun [7] admitir que Lewis toma um valor unitário induz a um erro praticamente nulo, sendo que esta simplificação, torna possível a seguinte dedução

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

$$\frac{\alpha}{c_p \cdot \alpha_m} = 1 \quad (0.7)$$

$$\alpha = c_p \cdot \alpha_m \quad (0.8)$$

Obtém-se assim uma relação simples que interliga o coeficiente de transferência de calor por convecção com o coeficiente de transferência de massa.

Transferência de calor

Este processo ocorre entre as paredes e o fluxo de ar, sendo que ocorre quando existe uma diferença de temperaturas, como a própria equação evidencia

$$\dot{Q}_{conv} = \alpha \cdot A \cdot (T_p - T_{ar}) \quad (0.9)$$

Transferência de massa

Existe transferência de massa quando existe um gradiente de concentrações de vapor. Este processo ocorre por evaporação de água. Conforme se presencia na Figura 4, admite-se a existência de duas zonas distintas, para o cálculo deste processo físico. Existe a zona representada em índice por “i”, que representa a interface entre o ar e a zona molhada, que se encontra completamente saturada com vapor de água. A outra zona, representada em índice por “ar”, caracteriza o ar. Assim este fenómeno só ocorre entre um fluxo de ar e paredes que possuam uma zona húmida em contacto com a corrente de ar.

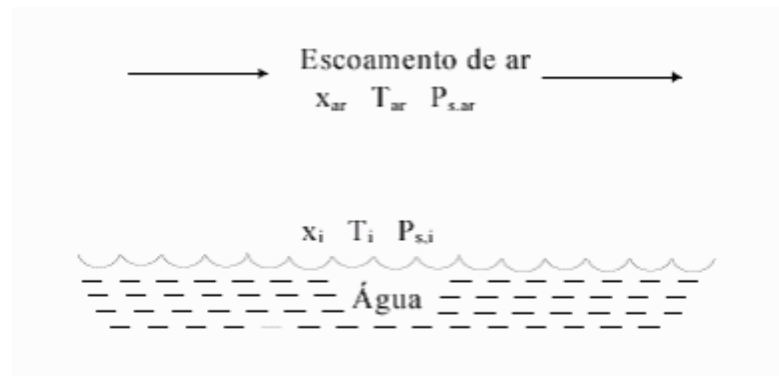


Figura 4 – Variáveis relativas à transferência de massa

O caudal de ar evaporado é calculado pela seguinte equação:

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

$$\dot{m}_{evap} = \alpha_m \cdot A \cdot (x_i - x_{ar}) \quad (0.10)$$

multiplicando pelo calor latente de vaporização tem-se o calor que é trocado por este processo

$$\dot{Q}_{evap} = \alpha_m \cdot A \cdot h_{fg} \cdot (x_i - x_{ar}) \quad (0.11)$$

Transferência de calor e massa combinada

Somando os dois efeitos, convecção e evaporação tem-se, o total de energia transferida numa dada área

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (T_i - T_{ar}) + \alpha_m \cdot A \cdot h_{fg} \cdot (x_i - x_{ar}) \quad (0.12)$$

Através da relação encontrada em (0.8) para a determinação do coeficiente de transferência de massa, é possível a simplificação da equação anterior

$$\dot{Q} = \alpha_m \cdot A \cdot (c_{p_{ar}} \cdot (T_i - T_{ar}) + h_{fg} \cdot (x_i - x_{ar})) \quad (0.13)$$

A definição de entalpia do ar é a seguinte

$$h_i = c_{p_{ar,sec o}} \cdot T_i + x_{ar} \cdot (h_f + h_{fg} + c_{p_v} \cdot T_i) = c_{p_{ar}} \cdot T_i + x_i \cdot (h_j + h_{fg}) \quad (0.14)$$

$$h_{ar} = c_{p_{ar,sec o}} \cdot T_{ar} + x_{ar} \cdot (h_f + h_{fg} + c_{p_v} \cdot T_{ar}) = c_{p_{ar}} \cdot T_{ar} + x_{ar} \cdot (h_j + h_{fg}) \quad (0.15)$$

Assim a diferença de entalpias será:

$$h_i - h_{ar} = c_{p_{ar}} \cdot (T_i - T_{ar}) + h_{fg} \cdot (x_i - x_{ar}) + h_f \cdot (x_i - x_{ar}) \quad (0.16)$$

Agrupando as equações (0.13) e (0.16) obtemos:

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

$$\dot{Q} = \alpha_m \cdot A \cdot [(h_i - h_{ar}) - h_f \cdot (x_i - x_{ar})] \quad (0.17)$$

Como o termo $h_f \cdot (x_i - x_{ar})$ representa apenas cerca de 5% do gradiente entálpico $(h_i - h_{ar})$, a equação anterior pode ser simplificada até à forma:

$$\dot{Q} = A \cdot \alpha_m \cdot (h_i - h_{ar}) \quad (0.18)$$

Esta fórmula permite associar os fenómenos de transferência de calor e massa numa equação simples, de onde vem a designação de potencial entálpico.

2.3. **Hipóteses**

Ainda com o intuito de, obter uma simplificação dos modelos sem prejudicar gravemente a sua aproximação à realidade foram consideradas várias hipóteses simplificativas, como:

1. A transferência de calor e massa ocorrem, apenas na direcção normal ao escoamento.
2. É correcto considerar o número de Lewis de valor unitário.
3. Os coeficientes de transferência de massa e calor são constantes e são usados os seus valores médios.
4. São desprezadas várias quantidades, como a variação da temperatura da água, os ganhos de bombagem e ventilação, assim como também as trocas de calor com o exterior.
5. A superfície do canal secundário encontra-se completamente molhada.
6. Assume-se que a temperatura da superfície interior de cada canal só varia ao longo do comprimento deste (variação monodimensional).
7. O funcionamento do modelo ocorre sempre em regime permanente.

2.4. **Material usado no revestimento do canal húmido**

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

A evaporação da água, nas condições ambientes (pressão e temperatura) é um fenómeno que ocorre de uma forma ténue. Para que exista uma maximização da evaporação, é necessário preencher certos requisitos que visam aumentar a eficiência deste processo. Uma técnica usada para atingir este fim consiste em revestir por dentro, a parede do canal húmido com um material que apresente uma boa condutividade térmica e, que tenha um grau adequado de porosidade. Isso permite, que exista uma boa capacidade de acumular e, distribuir água na parede do canal. Por conseguinte, a intenção é, maximizar a área e o processo de transferência de massa, sem ao mesmo tempo prejudicar a transferência de calor. Deste modo recorreu-se ao artigo [13], onde são analisadas várias possibilidades para o revestimento do canal húmido, em sistemas de arrefecimento evaporativo indirecto. Devido, à proximidade que existe entre o arrefecedor evaporativo indirecto e o AEPO, no processo de evaporação, este estudo pôde ser usado como base para a escolha do material que irá revestir a parede. Nesse trabalho é referido que, as propriedades térmicas do material, afectam pouco a transferência de massa e de calor, e que os parâmetros mais importantes na selecção deste, são a sua maleabilidade, a sua permeabilidade à água, o risco de contaminação que apresenta e o seu custo. Comparando os diferentes materiais, concluiu-se que o material que equaciona da forma mais equilibrada todas estas características é o Alumínio poroso (Wick attained aluminium). Este material apresenta uma boa condutividade térmica e uma boa capacidade de absorver a água assim como satisfaz todos os requisitos mencionados.

2.5. *Condução monodimensional*

As paredes do permutador, foram usadas como a base onde todos os fenómenos mencionados atrás são conjugados. É com estas que os fluidos trocam calor/massa e são estas que possibilitam a passagem de calor entre os vários canais. Assim, esta parte do modelo foi usada como elo de ligação entre os diferentes escoamentos. É necessário também lembrar que a temperatura das paredes varia, principalmente na direcção do escoamento, por isso foi admitida a existência de condução, na troca de calor entre canais, mas também ao longo do canal. Esta base foi obtida usando uma técnica de modelação distribuída, chamada de volumes finitos. O modelo é assim, composto por vários elementos em que ocorrem em cada um ocorre os fenómenos que permitem o funcionamento deste.

Modelação distribuída

A temperatura da parede foi considerada constante para cada secção. Por conseguinte, só havia interesse de analisar as diversas propriedades numa direcção. Foi seleccionado, assim, um modelo monodimensional (1D), o que é suficiente para atingir os objectivos, sem levar a erros nos resultados consideráveis e ao mesmo tempo permite uma maior leveza no processamento de dados. A Figura 5 ilustra como acontece a interacção entre um elemento com os elementos seus vizinhos.

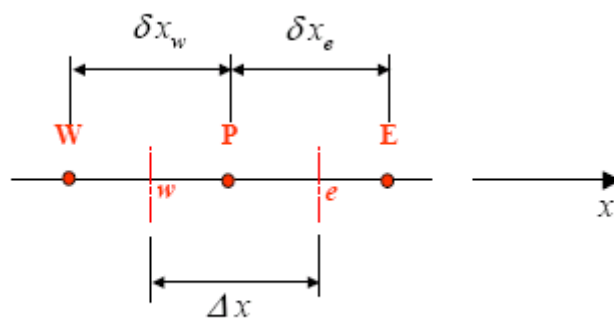


Figura 5 – Condução entre um elemento e os elementos vizinhos

A expressão (0.19) mostra como o fenómeno de condução entre os elementos é contabilizado

$$\frac{\lambda_e(T_E - T_P)}{\delta x_e} - \frac{\lambda_w(T_P - T_W)}{\delta x_w} + \bar{S}\Delta x = 0 \quad (0.19)$$

Assumindo que

$$a_i = \frac{\lambda_i}{\delta x_i} \quad (0.20)$$

$$a_P = a_E + a_W \quad (0.21)$$

$$b = S \cdot \Delta x \quad (0.22)$$

Que de uma forma simplificada pode ser escrita:

$$a_P T_P = a_E T_E + a_W T_W + b \quad (0.23)$$

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

Em que b representa o calor transferido para ou do elemento a dividir pela área da secção normal ao eixo x

Aplicação dos balanços energéticos e mássicos a um elemento

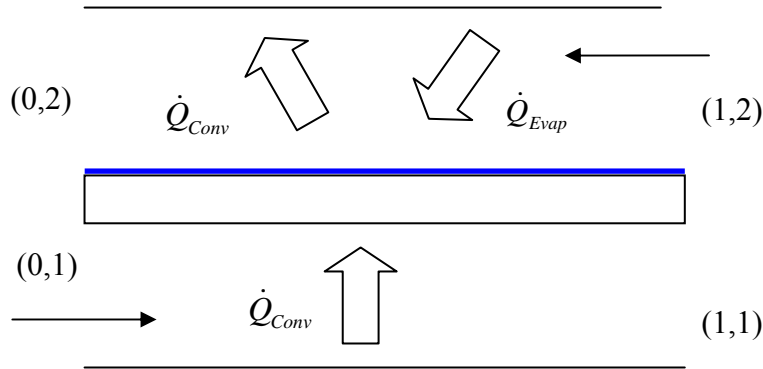


Figura 6 – Elemento e fluxos de calor e massa associados

Através da análise elementar é possível perceber melhor como todos os fenómenos mencionados anteriormente interagem, para criar o efeito desejado. As fórmulas apresentadas mostram como o acumular de efeitos é contabilizado entre a entrada e a saída dos elementos. A contribuição da convecção é calculada com base nas temperaturas ou entalpias médias da parede e do ar entre os nós dos dois elementos.

$$\dot{m} \cdot (h_{1,1} - h_{0,1}) = \alpha \cdot \delta A \cdot (T_{\text{médio},0-1,1} - T_{\text{médio},p0-1}) \quad (0.24)$$

$$\dot{m} \cdot (h_{0,2} - h_{1,2}) = \alpha_m \cdot \delta A \cdot (h_{\text{médio},0-1,2} - h_{\text{médio},p0-1}) \quad (0.25)$$

Como existe variação da humidade ao longo do canal húmido, é preciso que exista uma contabilização deste efeito, pois esta variação afecta a entalpia do ar. O que é representado na equação (0.26) **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** O índice “médio” tem um significado semelhante ao que foi explicado no parágrafo anterior, aplicando-se neste caso à humidade relativa:

$$\dot{m} \cdot x_{1,2} = \alpha_m \cdot \delta A \cdot (x_{\text{médio},p1-0} - x_{\text{médio},1-0}) + \dot{m} \cdot x_{0,2} \quad (0.26)$$

2.6. **Modelo 1**

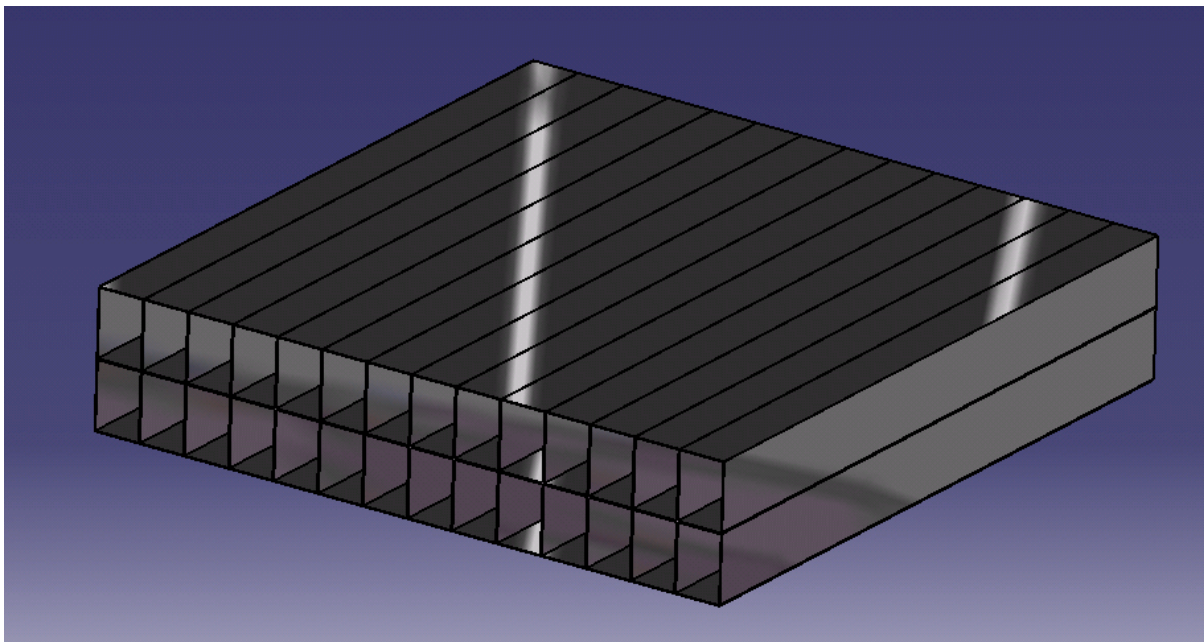


Figura 7 – Módulo de um arrefecedor evaporativo de ponto de orvalho de placas planas

A Figura 7 ilustra um dos módulos do AEPO. Este é composto por dois canais, sendo que um é o canal primário ou seco e o outro é o canal secundário ou canal molhado. Os caudais de ar que passam nestes canais circulam em sentidos opostos. A permuta de calor que ocorre entre estes dois fluxos dá-se através das paredes dos canais. Assim o ar ao entrar no canal seco começa a ceder calor para o canal húmido. No fim deste canal, o ar, conforme a configuração do sistema, pode atingir uma temperatura perto do ponto de orvalho. Conforme explicado antes, uma parte do ar passa para o canal húmido e outra é enviada para o espaço a arrefecer. No canal húmido o ar pré-arrefecido passa em canais revestidos de um material que normalmente é, bom absorvedor de água, com porosidade para conter a água. O ar ao passar por estas zonas molhadas absorve vapor e o calor proveniente do canal seco. Deste modo a temperatura e a humidade do ar aumentam ao longo do canal húmido.

2.6.1. Alhetas

Para aumentar a área de contacto de cada módulo, adoptou-se uma solução que consistia em dividir o canal em vários sub-canais, como se vê na Figura 8. O modelo matemático foi adaptado para contabilizar este acréscimo na área de transferência. As paredes laterais separadoras nos canais foram encaradas como alhetas. Ao funcionamento das alhetas,

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

está associada uma eficiência de permuta de calor. Este valor foi assim usado para corrigir, o efeito da área de transferência acrescida. As principais equações necessárias podem ser encontradas em [14].

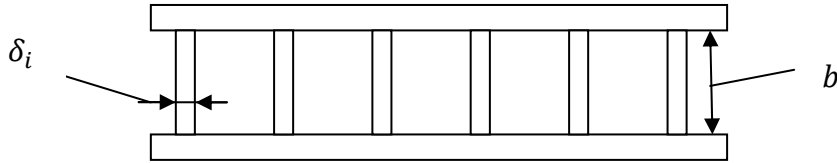


Figura 8 – Representação de um canal com alhetas e dimensões destas

$$l_i = \frac{b}{2} - \delta_i \quad (0.27)$$

$$m_i = \left[\frac{2 \cdot \alpha}{\lambda_a \cdot \delta_i} \left(1 + \frac{\delta_i}{L} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (0.28)$$

$$\eta_a = \frac{\tanh(m_i \cdot l_i)}{(m_i \cdot l_i)} \quad (0.29)$$

$$Q_a = \alpha \cdot A \cdot \eta_a \cdot (T_{ar} - T_a) \quad (0.30)$$

2.6.2. Colocação dos módulos

O modelo do AEPO de placas planas consiste na formulação de apenas um módulo em que existe um canal seco e canal molhado, isto foi feito para obter uma simplificação de cálculo. Na realidade um permutador de calor, deste tipo, é composto por vários módulos destes sobrepostos.

Para conhecer as características de uma máquina composta por vários módulos admitiu-se que esta teria uma configuração em que o canal húmido de um módulo ficaria em contacto com o canal húmido de um módulo vizinho, assim como o canal seco ficaria em contacto com o canal seco de outro módulo assim espera-se que as trocas de calor entre módulos sejam nulas. Desta forma, as características que dependem da dimensão do aparelho foram obtidas multiplicando, os valores obtidos por cada módulo, pelo número de módulos.

Com isto, foi feito um estudo do atravancamento desta máquina, começando nas medidas de cada módulo e acabando na quantidade de módulos necessária para obter uma potência de arrefecimento determinada.

2.7. **Modelo 2**

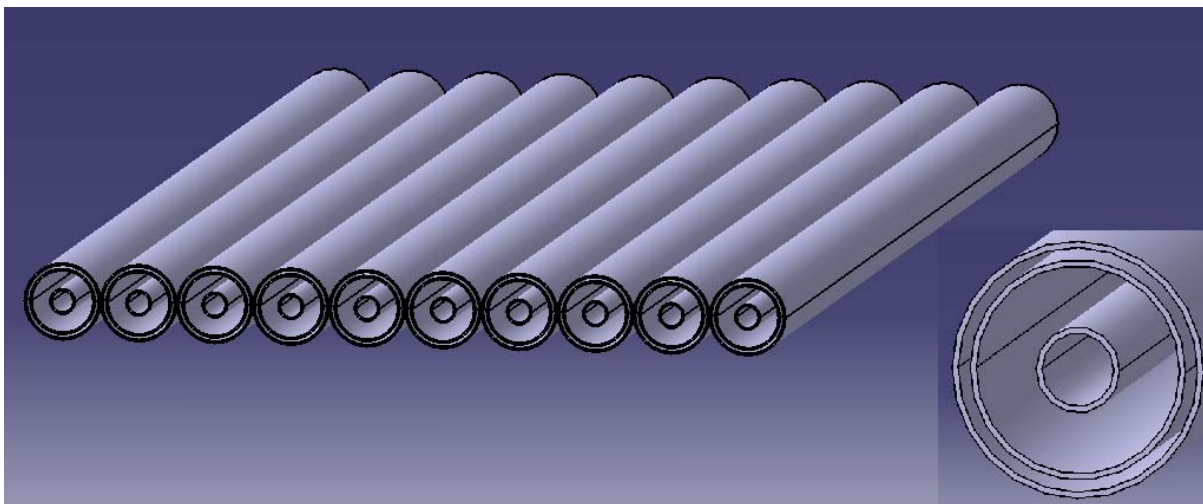


Figura 9 – Módulos de um arrefecedor evaporativo de ponto de orvalho de tubos concêntricos

Além do modelo de placas planas foi elaborado um outro modelo matemático que representa igualmente um AEPO em que o sentido dos fluxos é igualmente em contracorrente, mas com a diferença de os canais serem criados entre tubos colocados concêntricamente. Este tipo de AEPO é caracterizado por ter três canais e não dois como o de placas planas, como se observa na Figura 9. Este conjunto de três canais formados pela colocação concêntrica de três tubos de diferentes raios é definido como módulo.

Nesta solução de construção o ar começa por entrar no canal 1 (ver Figura 10), e ao percorrer este canal cede calor ao canal 2 e arrefece. Quando chega ao final do canal 1, também conhecido por canal de trabalho seco, este passa para o canal 2 e inverte o seu sentido. O canal 2 contém as suas paredes molhadas e assim este perde água sobre a forma de vapor para o escoamento. Ao longo deste canal o ar recebe também calor do canal 1 e do canal 3. No canal 3, o ar apenas é arrefecido, trocando calor com a parede que separa o canal 2 do canal 3. Embora seja possível, com esta solução, alcançar uma temperatura próxima da temperatura de orvalho, ainda não existe nenhuma solução deste tipo no mercado.

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

As velocidades de entrada do ar no canal 1 e 3, por uma simplificação de modelo e pela dificuldade de construção que iria acrescentar ao modelo real foram consideradas iguais nos dois.

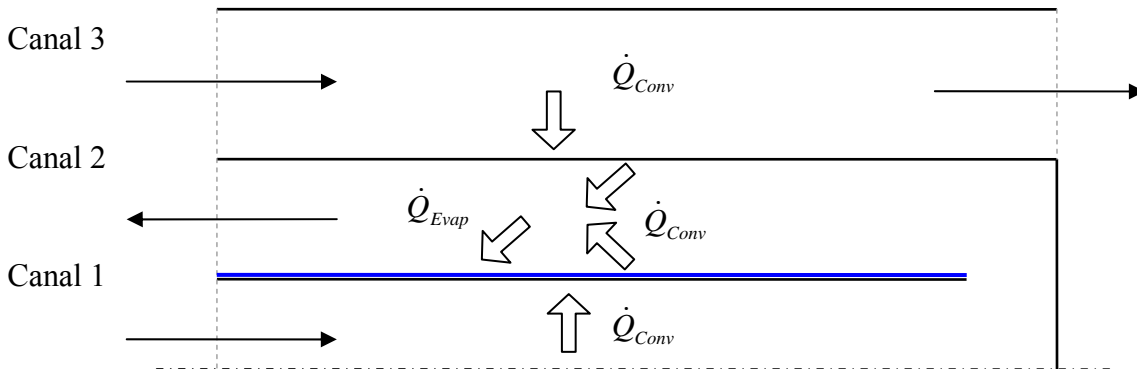
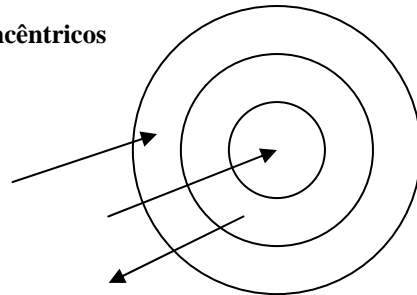


Figura 10 – Esquema de funcionamento do AEPO de tubos concêntricos



2.8. Medidas de eficiência da permuta de massa e calor

A eficiência dos arrefecedores de ar evaporativos, é por norma avaliada usando como referência a temperatura de bolbo húmido. Como no AEPO existe a possibilidade de esta ser ultrapassada, pode acontecer que os valores de eficiência calculados sejam superiores a 100%. Recorre-se assim a uma outra medida de eficiência que usa uma temperatura de referência mais baixa, que é a temperatura de ponto de orvalho e que representa a temperatura mínima ideal que este tipo de condicionadores de ar consegue atingir.

$$\eta_{bh} = \frac{T_{ent} - T_{saída}}{T_{ent} - T_{bh}} \quad (0.31)$$

$$\eta_{po} = \frac{T_{ent} - T_{saída}}{T_{ent} - T_{po}} \quad (0.32)$$

A única diferença entre estas duas medidas é a temperatura de referência. Assim, tanto uma como outra podem ser usadas para avaliar da performance de um AEPO. Uma maior

eficiência de bolbo seco ou bolbo húmido significa atingir uma temperatura de insuflação mais baixa.

2.9. **Cálculo da potência para ventilação**

A potência de ventilação representa a quase totalidade do consumo energético do AEPO, sendo a energia necessária para o bombeamento de água relativamente pequena e podendo assim ser desprezada. Assim, para que possa ser feita uma avaliação do consumo energético, com o mínimo de erro possível é, necessário fazer uma estimativa cuidada da potência de ventilação. Através desta é também possível obter uma medida de eficiência energética: o COP (coefficient of performance), que dá uma medida de eficiência global do arrefecedor.

É conhecido da mecânica de fluidos que a potência de ventilação está relacionada com as perdas de pressão que o ar tem de vencer ao longo do percurso por onde passa [15]. Este tipo de perdas é, subdividido em dois tipos diferentes, locais e de atrito lineares. De seguida são apresentadas as equações usadas para o cálculo das perdas de carga e da potência para ventilação.

$$\Delta p = \Delta p_{linear} + \Delta p_{local} \quad (0.33)$$

$$\Delta p_{linear} = f \frac{l}{d_h} \frac{\rho u^2}{2} \quad (0.34)$$

Como o escoamento é laminar

$$f = \frac{64}{Re} \quad (0.35)$$

A perda de carga local é dada por:

$$\Delta p_{local} = K \frac{\rho u^2}{2} \quad (0.36)$$

o valor K para as várias perdas locais foi obtido em tabelas nos livros [14] e [16], estes são exibidos na Tabela 2.1:

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

Tabela 2.1 – Coeficientes de perda de carga local

Tipo de perda	K
Entrada	11
Saída	-1,5
Curva de 180°	1,9

Com o total das perdas de pressão, pode calcular-se a potência de ventilação com

$$P = \dot{V}_{canalseco} \cdot \Delta p_{canalseco} + \dot{V}_{canalhúmido} \cdot \Delta p_{canalhúmido} \quad (0.37)$$

Ao valor de potência obtido, foi aplicado um factor contabilizando rendimento de ventilação, normalmente da ordem dos 60%. Desta forma, o valor calculado da potência de ventilação é dividido por 0,6.

2.10. **Cálculo do COP**

O COP é uma medida de eficiência energética que, mede a relação entre a energia que o aparelho consegue remover do ar e, a energia necessária para o seu funcionamento. Este valor é calculado através de

$$COP = \frac{\dot{Q}_{arref}}{P_{vent}} \quad (0.38)$$

CAPÍTULO 3 - ESTUDOS PARAMÉTRICOS

Após a implementação do modelo no EES, foi necessário recorrer a alguns estudos paramétricos para conhecer as dimensões e as razões de caudal e velocidade que permitissem o melhor compromisso entre parâmetros como eficiência, potência de arrefecimento, consumos, etc. Como os dois modelos construídos apresentam diferenças construtivas significativas, estes estudos foram repetidos para os dois. Com o intuito de validar os modelos anteriores foi comparada a prestação destes com as características da máquina já existente no mercado.

Para que estes estudos pudessem ser realizados, era necessário que um conjunto de variáveis básicas fosse definido, de modo a que os algoritmos fossem resolvidos. Assim, foram atribuídos valores para essas variáveis que foram usados em todos os estudos paramétricos, quando essas próprias variáveis não faziam parte do estudo em questão. Estes encontram-se definidos na Tabela 2.1 para o modelo 1 e Tabela 3.1 para o modelo 2.

Numa grande parte dos estudos paramétricos a eficiência quer de bolbo húmido como de ponto de orvalho são apresentadas como resultado. Nestes estudos não se vai procurar a configuração que permite maximizar a eficiência, mas antes a configuração que permite obter uma eficiência de bolbo húmido de cerca de 90%. Este critério foi adoptado para que o ar insuflado no espaço não tivesse um valor de humidade relativa elevado. Ao mesmo tempo espera-se, que esta configuração permita retirar uma potência maior do espaço, pois este controlo da eficiência/conforto pode ser alcançado pela variação da velocidade, o que resulta num aumento da potência.

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

3.1. **Modelo 1**

Tabela 3.1 – Valores iniciais de referência para análise do modelo 1

Temperatura ambiente [°C]	30
Humidade absoluta [-]	0,015
Velocidade [m/s]	1
Comprimento do canal [m]	1
Altura do canal [m]	0,01
Largura do canal [m]	1
Espaço entre alhetas [m]	0,01
Razão de caudais [-]	0,5

3.1.1. **Análise ao número de nós**

O número de elementos escolhido, é um factor importante a considerar, pois o resultado final é dependente deste. Embora a tendência seja de o erro diminuir com o aumento do número de elementos, existe também o problema de o programa se tornar mais pesado e mais lento com este aumento.

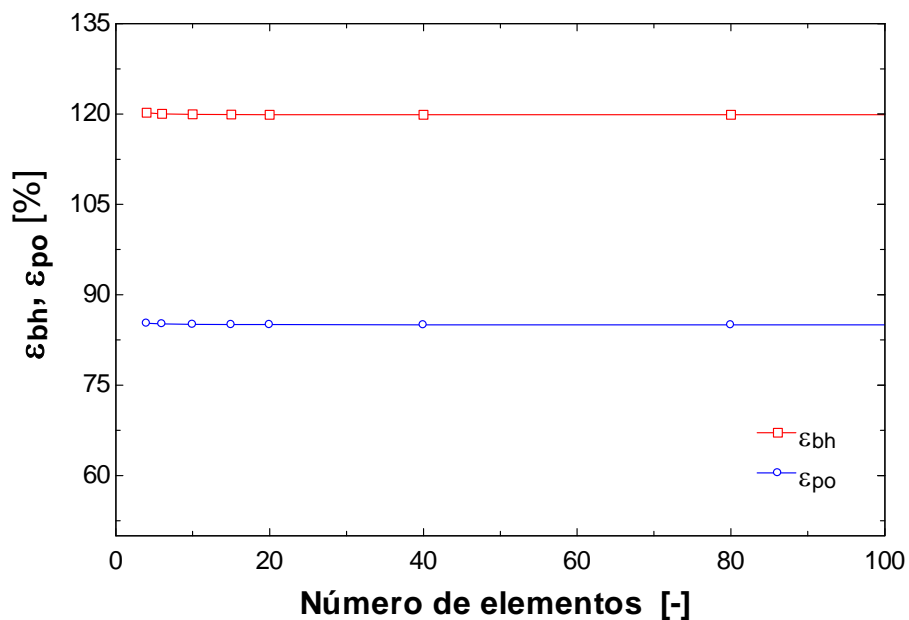


Figura 11 – Eficiência de bolbo húmido e ponto de orvalho para diferentes números de elementos

Como se pode observar, desde um número baixo de elementos existe uma convergência muito forte, sendo que o aumento do número de nós leva a uma variação quase

nula do resultado. Isto acontece devido ao problema ser monodimensional e assim de geometria simples. Considera-se que vinte é um valor equilibrado para o número de elementos

3.1.2. Análise à altura do canal

A altura do canal, é importante pois influencia vários factores, como a área de transferência de calor e massa, o atravancamento, o número de módulos necessários e até mesmo o custo de material e de produção deste tipo de painéis.

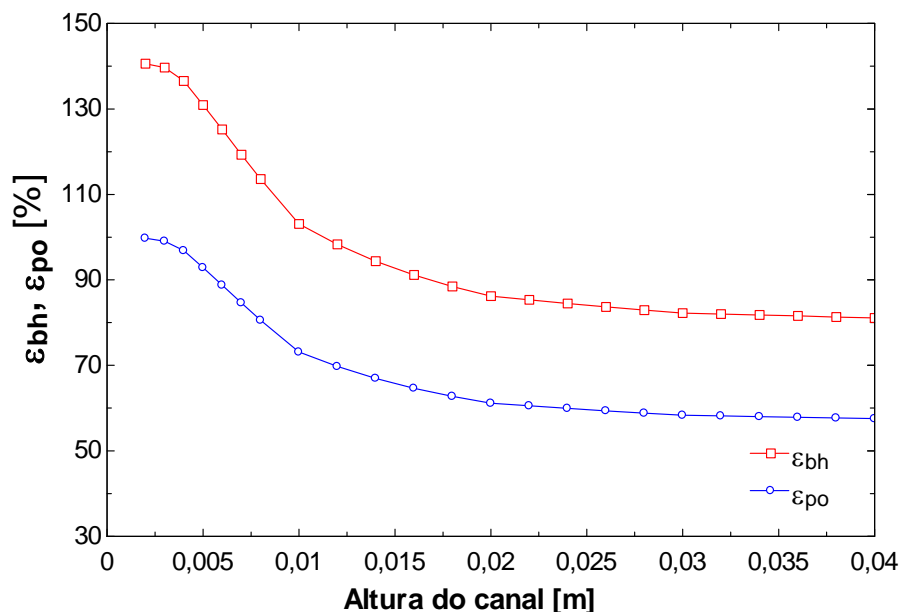


Figura 12 – Valor de eficiência de bolbo húmido e ponto de orvalho para diferentes valores da altura dos canais

Pelo que se observa na Figura 12, a eficiência de bolbo húmido e a eficiência de ponto de orvalho descem significativamente com o aumento da altura do canal até esta alcançar um valor de 0,01m. Provavelmente isto acontece, porque quando a altura aumenta, aumenta também a área de transferência e o caudal de ar que circula no canal. Contudo o aumento total de área de transferência acontece numa proporção menor do que com o caudal de ar uma vez que a área das paredes horizontais não dependem da altura do canal. Existe assim uma zona onde a descida no valor da eficiência deixa de ser tão acentuada. Obtêm-se valores aceitáveis de eficiência para alturas inferiores a 0,015m.

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

3.1.3. Análise ao espaço entre paredes laterais (alhetas)

Este estudo assemelha-se em muito com o realizado acima. No entanto a variação deste parâmetro não tem qualquer influência directa na dimensão do aparelho. Este estudo é interessante pois permite conhecer qual é o peso desta variável e como a “ajustar” para obter uma configuração de interesse, sendo que esta pode ser feita no final e com um impacto menor no modelo.

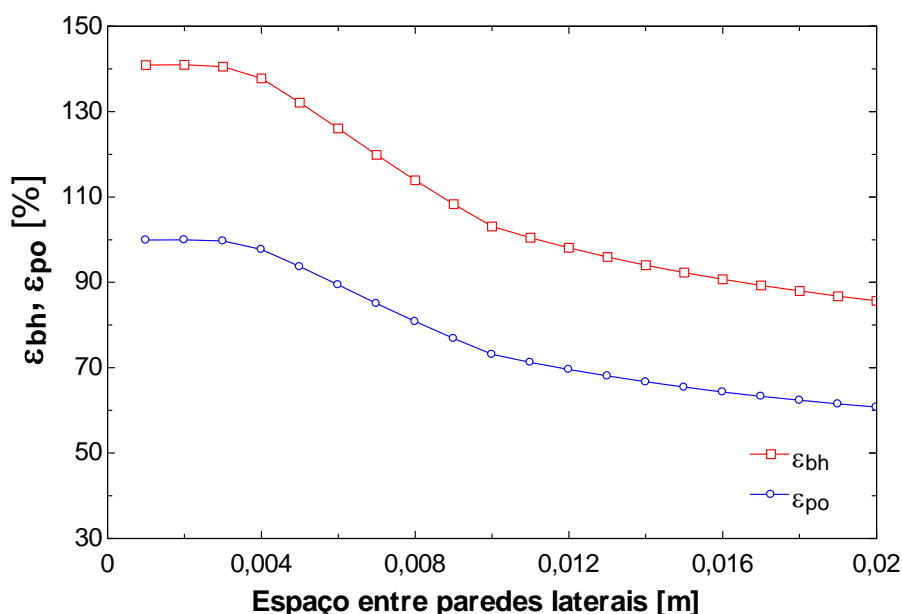


Figura 13 - Valor de eficiência de bolbo húmido e ponto de orvalho para diferentes valores de espaço entre paredes laterais

Os resultados obtidos na análise paramétrica do espaço entre paredes laterais apresentam uma tendência já manifesta no estudo anterior. Esta consiste numa descida, tanto da eficiência de bolbo húmido como da eficiência de ponto de orvalho, com o aumento do espaço entre as paredes. Esta descida é acentuada a partir dos 0,004 m, no entanto até um espaço entre alhetas de 0,016 m os valores de eficiência são suficientes para satisfazer os requisitos definidos.

3.1.4. Análise ao comprimento do canal

O interesse da realização deste estudo paramétrico, reside em concluir qual é a distância que o fluido precisa percorrer para que todos os fenómenos ocorram de uma forma mais completa possível, sem esquecer as preocupações que isso acarreta a nível de espaço ocupado e material.

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

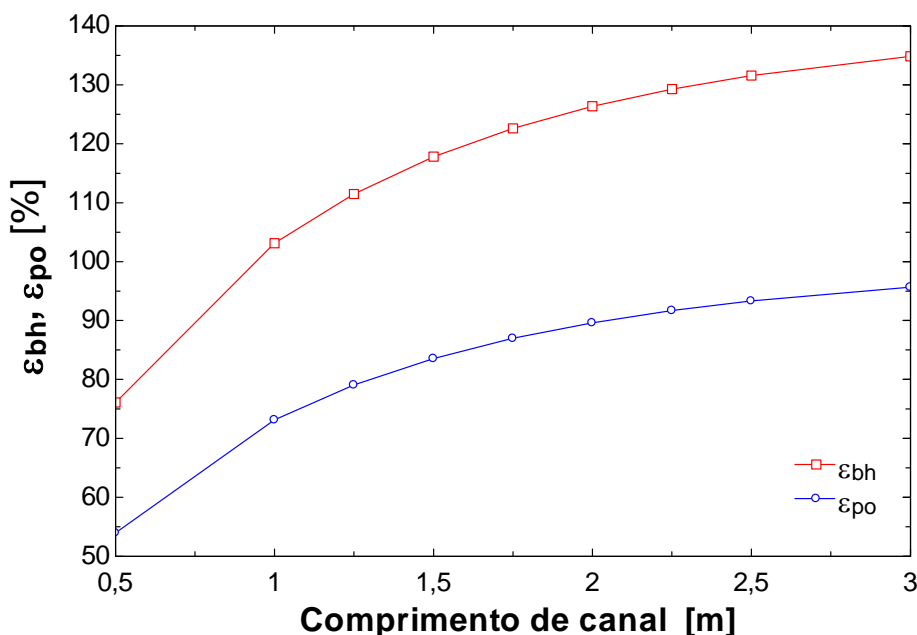


Figura 14 - Valor de eficiência de bolbo húmido e ponto de orvalho para diferentes valores do comprimento dos canais

Os resultados apresentados acima demonstram uma tendência já esperada, visto que existe um aumento da eficiência com o aumento do comprimento do canal. Contudo nota-se que esta variação vai diminuindo para os maiores comprimentos em análise, o que é explicado pela eficiência de ponto de orvalho que aproxima-se de 100%, a eficiência limite possível de atingir. Ao mesmo tempo, observa-se que este parâmetro tem um peso inferior a outras variáveis que com menor aumento no volume conseguem ganhos maiores. Para os valores iniciais definidos na Tabela 3.1, obteve-se uma gama de comprimentos em que praticamente toda ela satisfaz o critério pretendido ($\epsilon_{bh}=90\%$). Assim recomenda-se que o comprimento dos canais seja de pelo menos 1 metro.

3.1.5. Análise à razão de caudais e velocidade

A razão de caudais é um parâmetro que define a relação entre o caudal que é insuflado e o caudal de ar que é usado para criar o efeito de frio. Esta análise tem grande importância porque afecta um grande conjunto de propriedades como a eficiência de bolbo húmido e de ponto de orvalho, a potência de arrefecimento, o COP, os caudais de insuflação, entre outros. Tendo em mente a importância de uma boa caracterização desta propriedade, foi realizada uma análise de influência da velocidade do ar no canal seco para cada valor de razão de caudal, usado neste estudo.

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

Devido à grande densidade dos resultados obtidos, estes são apresentados em duas figuras que são a Figura 15 e a Figura 16. Esta apresentação é favorável porque, como se pode prever, para uma razão igual a 1 teríamos uma eficiência máxima, mas ao mesmo tempo uma potência de arrefecimento nula. Deste modo, é preciso encontrar uma solução que equilibre estas duas características.

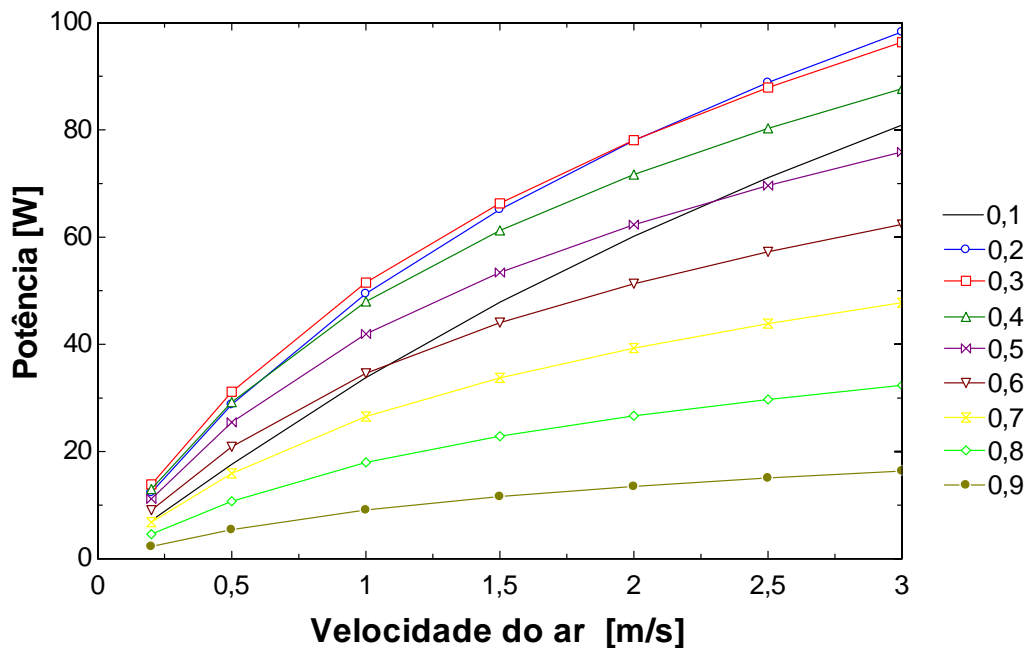


Figura 15 – Potência de arrefecimento em um canal, para várias velocidades do escoamento do ar e para diferentes razões de caudal

A Figura 15 mostra que por norma a potência de arrefecimento é maior para razões de caudal mais baixas. De salientar é a proximidade existente entre as curvas para razões menores que 0,4. Existe assim uma margem para a qual uma variação no valor da razão tem um pequeno efeito na potência de arrefecimento. Nota-se a existência de uma outra tendência sendo esta relacionada com a velocidade em que com o aumento desta observa-se sempre um aumento da potência de arrefecimento.

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

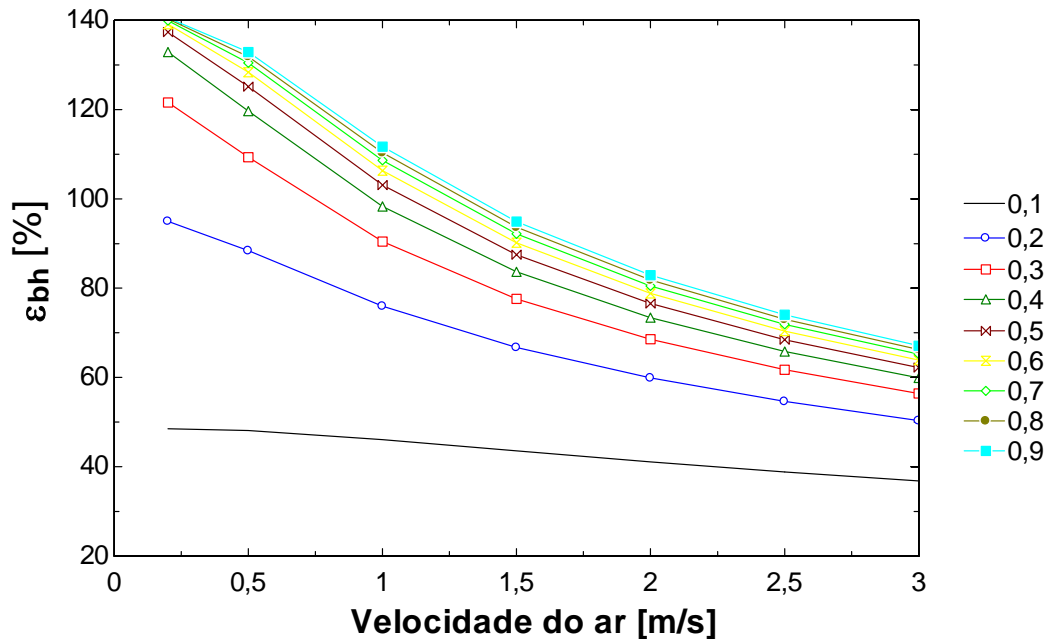


Figura 16 - Valor de eficiência de bolbo húmido para várias velocidades do escoamento de ar e a diferentes razões de caudal

Na Figura 16 é apresentada uma tendência contrária à apresentada na figura anterior. Nesta figura os valores mais favoráveis de eficiência de bolbo húmido são encontrados para velocidades baixas e para razões de caudal de ar elevadas. Desta maneira justifica-se a utilização de duas figuras para esta análise, pois observa-se que existe uma necessidade de equilibrar dois pólos opostos.

No entanto, há uma tendência similar com o que acontece na Figura 15. A variação da eficiência de bolbo húmido é relativamente baixa para valores de razão acima 0,5, sendo que abaixo destes a eficiência de bolbo húmido sofre uma perda dramática. O facto de a eficiência baixar com o aumento da velocidade, demonstra que o aumento da potência está maioritariamente relacionado com o valor de caudal de ar. Facto este que a equação da potência (0.24) ajuda a compreender.

A razão de caudais apresenta-se como um parâmetro de grande interesse, pois permite com alguma flexibilidade ajustar o caudal de ar insuflando e a potência de arrefecimento, mantendo a eficiência de bolbo húmido.

Esta análise revela que os valores mais indicados para a razão de caudais estão entre 0,4 e 0,5. Quanto à velocidade o valor máximo aceitável, para as condições definidas inicialmente seria de 1,5 m/s.

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

3.1.6. Análise do COP

O COP é uma medida de eficiência energética. Deste modo procura-se maximizar o valor do COP podendo intervir através de uma diminuição da energia gasta e um aumento da potência de arrefecimento do ar. O COP oferece também a possibilidade de comparar o desempenho de uma máquina com outras máquinas usadas para arrefecer espaços ocupados por pessoas.

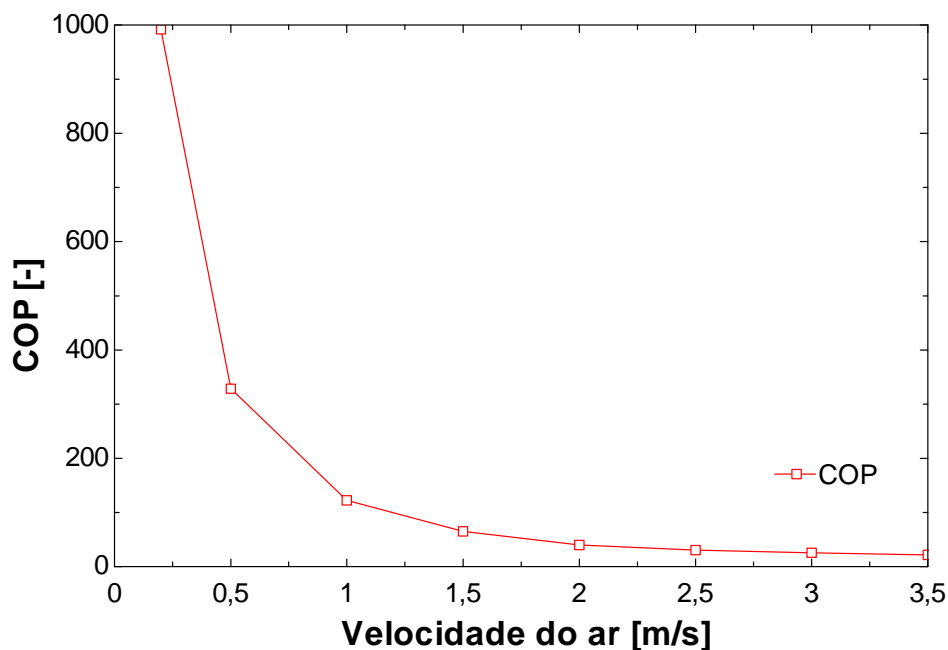


Figura 17 – Análise do coeficiente de performance para diferentes velocidades do escoamento

Como seria de esperar o COP diminui com o aumento da velocidade do escoamento, isto deve-se ao facto da potência de ventilação variar com o cubo da velocidade. Ao olhar para o gráfico nota-se que, a maior perda acontece até aos 1,5 m/s, sendo que a partir daí estabiliza. Embora o desejo em relação a esta característica seja de a maximizar, há que lembrar resultados de análises anteriores que, mostram que para velocidades do ar baixas, a potência de arrefecimento é também baixa. Na Figura 17 observa-se uma grande variação do COP envolvendo até ordens de grandeza, mesmo assim, os valores obtidos para este são superiores aos que são praticados por sistemas convencionais, normalmente abaixo de 4. Para que exista uma margem entre o COP claramente acima da praticada pelos sistemas convencionais, sugere-se que a velocidade do ar não deve ser maior do que 3m/s.

3.1.7. Análise do Atravancamento

Até aqui todas as análises realizadas foram baseadas no modelo composto por um módulo. Foi explicado no capítulo 2 a configuração assumida para a colocação dos vários módulos, e que isso envolvia assumir que a potência de arrefecimento total do conjunto dos módulos, assim como caudal de ar e de água necessários seriam iguais aos do módulo multiplicados pelo número de módulos necessários para realizar o efeito pretendido. Não existe assim a necessidade de fazer uma análise deste tipo visto que a variação é linear.

3.2. Modelo 2

Este tipo de permutados como apresenta um maior número de superfícies envolvidas na permuta de calor e massa, tem um peso de processamento maior pois o modelo é mais complexo. As análises paramétricas realizadas são apresentadas de seguida,

Tabela 3.2 – Valores iniciais de referência para análise do modelo 2

Temperatura ambiente [°C]	30
Humidade absoluta [-]	0,015
Velocidade [m/s]	1
Comprimento do canal [m]	1
Raio do tubo 1 [m]	0,01
Raio do tubo 2 [m]	0,02
Raio do tubo 3 [m]	0,03
Espessura do tubo [m]	0,001

3.2.1. Análise ao número de elementos

Como foi já referido o número de elementos usado no processamento, afecta os resultados obtidos. Assim é sempre importante fazer uma análise deste valor, pois convém que este esteja numa zona em que o erro introduzido é mínimo e o tempo de processamento é baixo.

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

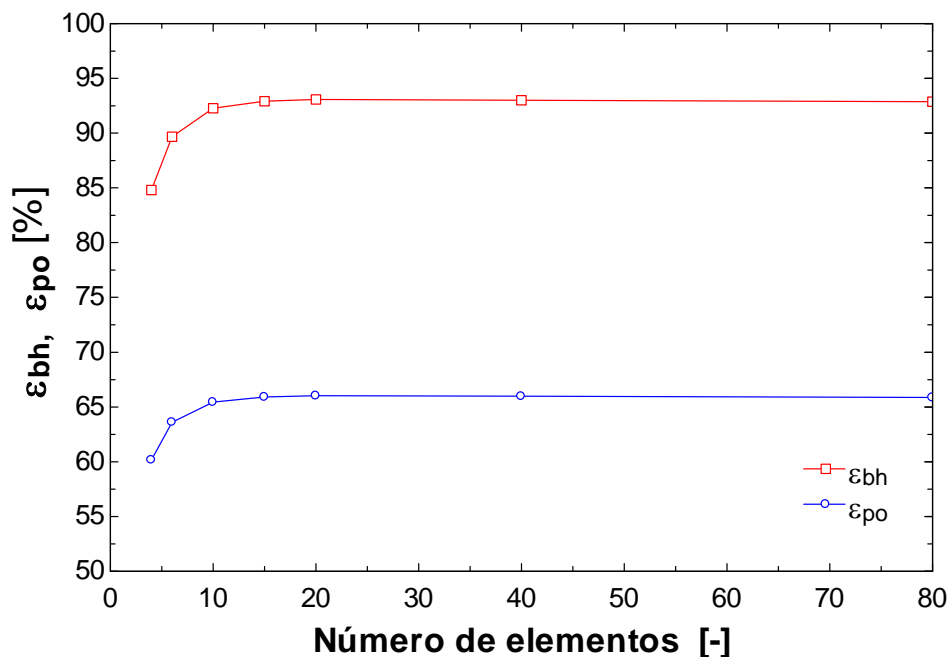


Figura 18 - Eficiência de bolbo húmido e ponto de orvalho para diferentes números de elementos

Ao olhar para o gráfico nota-se que para um valor abaixo de 10 a influência do número de elementos apresenta um peso considerável nos resultados. A partir destes o erro torna-se desprezável visto existir uma estabilização nos valores dos resultados. Recomenda-se o valor de 20 elementos, por este estar numa zona de estabilidade e induzir um tempo de processamento razoável.

3.2.2. Análise ao comprimento dos tubos

Assim como acontece no modelo 1 o comprimento dos tubos é um aspecto que apresenta um relevância significativa. A variação deste parâmetro afecta um conjunto de factores elevado e, para conhecer como estes conjugam para dar o resultado final é necessário realizar um estudo paramétrico.

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

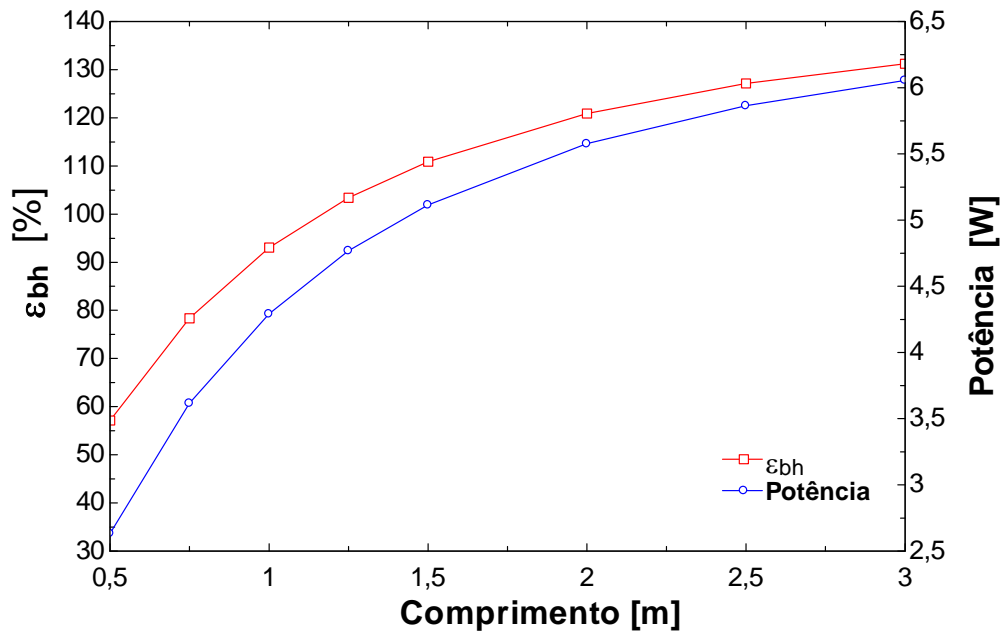


Figura 19 – Eficiência de bolbo húmido e potência de arrefecimento por canal em função do comprimento do canal

Ao analisar a Figura 19 percebe-se que como seria de esperar, o aumento do comprimento dos canais, resulta numa melhoria na eficiência de bolbo húmido e na potência de arrefecimento. No entanto esta tendência de aumento é, drasticamente atenuada a partir dos dois metros de comprimento. Este comportamento foi já presenciado na análise similar que foi feita para o AEPO de placas planas. Verifica-se numa grande gama de comprimentos que são atingidos valores de eficiência aceitáveis. Para comprimentos inferiores a um metro a eficiência obtida não é satisfatória.

3.2.3. Análise ao raio exterior do canal 1 com variação da velocidade

O estudo paramétrico efectuado para o canal 1, também conhecido por canal de trabalho seco, é algo complexo. Este tem uma grande importância na procura do melhor ajustamento deste tipo de AEPO. A complexidade na análise deste, reside no facto de, ao variar o raio, variar um conjunto de outras variáveis com grande peso no resultado como, área de transferência de calor e massa do canal 1 e do canal 2, variação da velocidade no canal dois e afectação também do valor do caudal do ar de trabalho. Assim sendo, neste estudo foi avaliado o impacto que a variação do raio teria na performance do AEPO para diferentes velocidades.

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

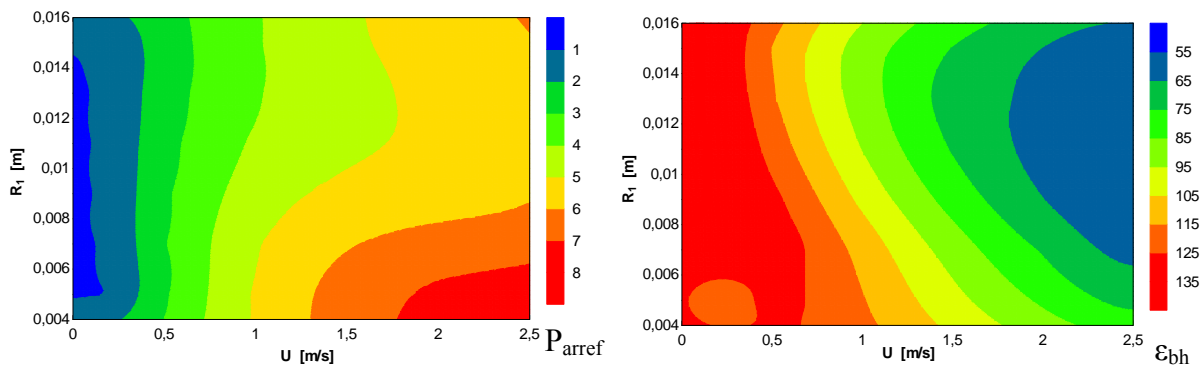


Figura 20 e 21 – Influência da velocidade do escoamento e do canal interior na eficiência de bolbo húmido e potência de arrefecimento

Os resultados mostram que existe um padrão quase linear a velocidades baixas. Nesta zona o raio não parece afectar significativamente o resultado, deste modo o que acontece é que, com o aumento da velocidade, aumenta a potência de arrefecimento e diminui a eficiência de bolbo húmido.

Para velocidades acima dos 1m/s nota-se que, o raio passa a ter mais peso no desempenho da máquina. Assim existe uma zona onde, para uma dada velocidade é possível ter melhores valores de eficiência e de potência. Esta zona encontra-se para valores do raio inferiores a 1 cm e para velocidades do ar até 1,5m/s.

3.2.4. Análise ao raio exterior do canal 2 com variação da velocidade

Este estudo assume um papel de grande importância, assim como o seu predecessor. A variação do raio do canal dois afecta parâmetros com grande relevo como, a velocidade do ar no canal 2, o caudal mássico do canal 3, as áreas onde ocorrem a transferência de calor e massa, entre outros. Como sucedeu no estudo anterior, recorreu-se ao estudo paramétrico da variação do raio para várias velocidades do ar de entrada, para conseguir uma perspectiva mais alargada de como este conjunto de parâmetros se conciliam.

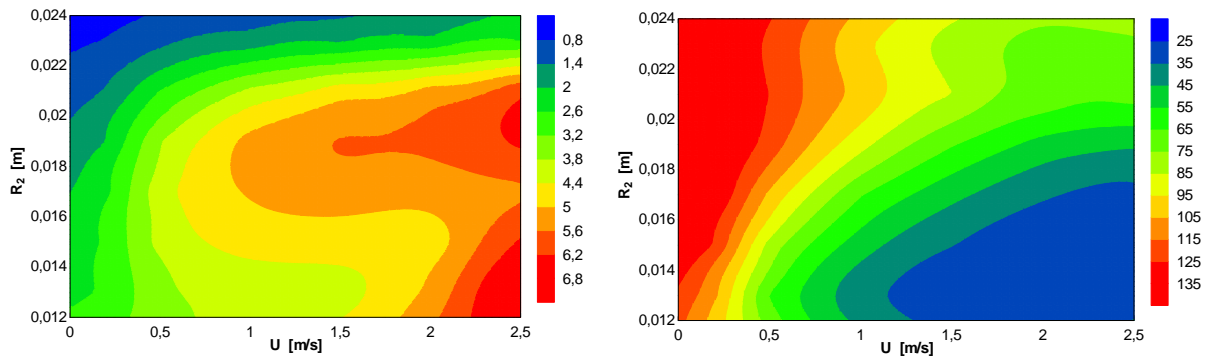


Figura 22 e 23 - Influência da velocidade do escoamento e do raio do canal intermédio na eficiência de bolbo húmido e potência de arrefecimento

Como mostram os resultados não existe, e ao contrário daquilo que acontecia no estudo anterior, praticamente nenhuma zona em que o peso de uma variável ou de outra é insignificante em relação à outra. Existe assim, uma conjugação do valor de raio e velocidade que leva ao melhor compromisso das variáveis em análise. Para a definição inicial usada neste modelo, esta zona encontra-se para os valores de raio 21mm e uma velocidade máxima de até 1,5 m/s.

3.2.5. Análise ao raio exterior do canal 3 com variação da velocidade

Neste caso deseja-se, conhecer como o raio do canal mais exterior, no qual passa o ar que é insuflado no espaço afecta a performance do AEPO de tubos concêntricos. Embora a variação desta incógnita não influencie directamente tantos parâmetros, como acontecia nas análises posteriores, decidiu-se efectuar, o estudo do efeito do raio a diversas velocidades.

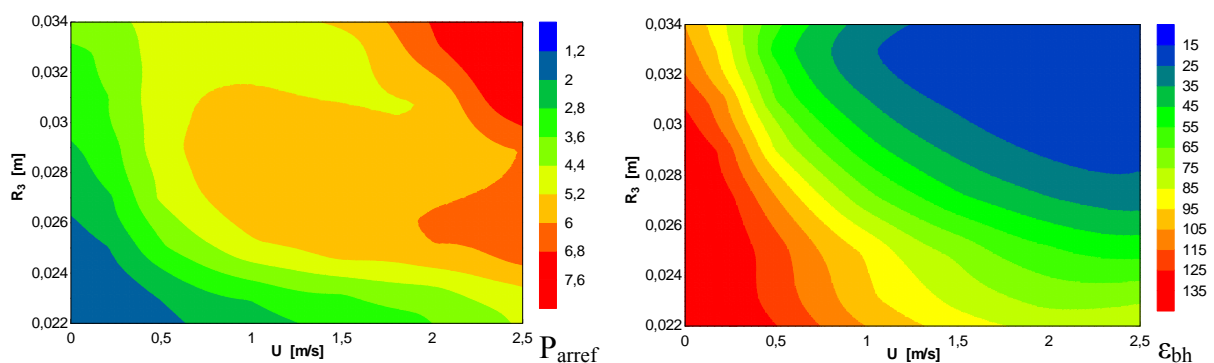


Figura 24 e 25 - Influência da velocidade do escoamento e do raio do canal exterior na eficiência de bolbo húmido e potência de arrefecimento

Ao olhar para os gráficos apresentados, repara-se que a eficiência de bolbo húmido é a característica mais afectada nesta avaliação paramétrica, pois esta varia de uma forma quase

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

linear com a variação da velocidade do ar e do raio. Por outro lado, a potência de arrefecimento por módulo encontra-se, numa grande parte do gráfico a valores próximos de 5,6W. Este pormenor, facilita a tarefa de encontrar uma configuração que, permita atingir um bom compromisso entre os parâmetros em análise. Assim a zona que oferece as melhores condições de operação encontra-se nos 25mm de raio e a uma velocidade de 1m/s.

3.3. Comparação entre as duas configurações

Ao conjugar tudo aquilo que foi aprendido dos estudos anteriores, procurou-se uma configuração adequada para este modelos. Assim são apresentadas de seguida duas hipóteses que, ao mesmo tempo servem para comparação entre as duas configurações, e para escolher uma de modo a ser integrada na simulação transiente do espaço. Nas duas tabelas apresentadas a seguir, todos os valores remetem para uma configuração de uma máquina completa, composta por vários módulos, e com capacidade para tratar um espaço mínimo. Todos os valores apresentados referem-se às características totais da máquina composta por um determinado número de módulos. Há que acrescentar, que uma grande parte das variáveis definidas não é a recomendada pelos estudos anteriores. Isto se dá porque, a configuração inicial nos dois casos levava a eficiências superiores à estipulada e por uma necessidade de aproximação do modelo existente no mercado, procedeu-se a uma compactação e aumento da velocidade do ar nas máquinas. Os resultados apresentados nas tabelas são obtidos para as mesmas condições de temperatura e humidade definidas que foram apresentadas na configuração inicial do modelo e usadas durante os estudos paramétricos. ($T_{ext}=30^{\circ}C$; H.a.= 0,015 kg_{ág}/kg_{a.s.})

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

Modelo 1

Tabela 3.3 – Configuração alcançada com ajuda dos estudos paramétricos para o modelo 1

Valores de entrada:		Resultados:	
Comprimento [m]	1	Eficiência de ponto de orvalho [-]	64,93
Largura do canal [m]	1	Eficiência de bolbo húmido [-]	91,54
Altura do canal [m]	0,01	Potência de arrefecimento [W]	5266
Espaço entre alhetas [m]	0,007	COP [-]	44,47
Número de módulos [-]	65	Consumo de água [kg/s]	13,72
Razão de caudais [-]	0,5	Caudal insuflado [m ³ /h]	2482,2
Velocidade [m/s]	2,2	Volume [m ³]	1,56

Modelo 2

Tabela 3.4 – Configuração alcançada com ajuda dos estudos paramétricos para o modelo 2

Valores de entrada		Resultados	
Comprimento [m]	1	Eficiência de ponto de orvalho [-]	65,9
Raio 2 [m]	0,018	Eficiência de bolbo húmido [-]	92,9
Raio 3 [m]	0,022	Potência de arrefecimento [W]	4331
Número de módulos [-]	950	COP [-]	90,9
Razão de caudais [-]	0,29	Consumo de água [kg/s]	2,8
Velocidade [m/s]	1,6	Caudal insuflado [m ³ /h]	2011
		Volume [m ³]	1,44

Como seria de esperar, existem algumas diferenças entre os resultados obtidos para os dois modelos. Uma destas diferenças encontra-se no caudal de ar insuflado, este é relativamente maior no modelo de placas planas. Isto acontece porque, uma das condições de ajustamento dos modelos era que estes atingissem uma eficiência de bolbo húmido na ordem dos 90%. Para atingir esse valor de eficiência de bolbo húmido no modelo 1 foi necessário aumentar a velocidade do ar, o que fez com que o caudal de ar total também aumentasse. Um outro ponto que justifica esta diferença é a diferença de volume ocupado existente entre os

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

dois modelos. O modelo 1 por possuir um maior atravancamento tem a capacidade de tratar uma maior quantidade de ar do que o modelo 2. Esta diferença afecta assim também a potência de arrefecimento, já que as eficiências de bolbo húmido nos dois arrefecedores de ar são semelhantes.

Contudo a variável que apresenta valores mais distantes para um e para o outro modelo é, o consumo de água. O AEPO de placas planas apresenta um valor de consumo deste bem essencial cerca de 6 vezes superior ao obtido no AEPO de tubos concêntricos. Numa primeira observação, poderíamos tentar associar esta discrepância à diferença de caudais, no entanto esta por si só não é suficiente. Olhando melhor para os dados apresentados, observa-se que o valor da razão de caudais no modelo de tubos concêntricos é 0,29 enquanto, no modelo de placas planas este é de 0,5. Por aqui percebemos que existe uma quantidade de ar consideravelmente menor que passa nos canais húmidos do modelo 2. Por conseguinte existe, menos ar para absorver a água que está nas paredes dos canais húmidos e existe assim um menor consumo de água, sem que exista uma perda acentuada na eficiência do sistema. O interesse deste pormenor será discutido mais à frente. Quanto ao AEPO de placas planas, o seu valor da razão entre caudais foi mantido para que houvesse uma certa similaridade com o modelo que existe à venda no mercado [17], já que este usa essa relação. Deste modo, procurou-se integrar no edificio um modelo próximo de uma máquina que já existe e já é comercializada.

Quanto ao COP, pode-se dizer que o motivo para a existência da diferença encontrada nos dois modelos, reside na diferença de velocidades que ocorre nestes. Sabendo que a potência de ventilação varia com a variação do cubo da velocidade, compreende-se porquê o modelo 2 possui um COP melhor, mesmo não tendo uma potência de arrefecimento tão alta como a alcançada no modelo 1.

Esta comparação permite em tom final perceber, quais são as vantagens de um modelo em relação ao outro. Na simulação do edificio, apenas será utilizado o modelo 1, o modelo de placas planas, com a configuração proposta acima. Todavia, o modo como este se comportará permitirá tirar algumas conclusões que serão extensivas ao modelo de tubos concêntricos. Como, por exemplo, pode-se verificar se o caudal e a potência do modelo 2 são adequados ao espaço.

CAPÍTULO 4 – DEFINIÇÃO DO EDIFÍCIO EM ESTUDO

4.1. *Definição geométrica*

Para poder perceber melhor como um AEPO se comportaria perante o clima português, foi criada uma representação matemática de um edifício típico onde o modelo do arrefecedor de placas planas foi integrado. O objectivo era assim poder perceber, como o AEPO iria interagir com o edifício e com as várias cargas geradas no interior deste numa análise contínua no tempo.

Como se poderá perceber ao longo deste capítulo o modelo elaborado do edifício é básico e simples. A opção de simular um modelo deste tipo foi tomada pela facilidade com que pode ser feito, pelos resultados fiáveis que este consegue devolver e pela fácil representação no EES. Ao usar o EES para a representação conseguiu-se também uma integração directa do AEPO no código.

Em relação ao tipo de edifício escolhido, optou-se por escolher um edifício de serviços, mais especificamente um edifício de escritórios. Deste modo o AEPO não só teria de remover a carga térmica do edifício devida aos ganhos exteriores como também teria de remover uma parcela significativa de energia colocada no espaço por pessoas, iluminação e equipamentos. Considerou-se que a forma do edifício seria igualmente simples e que consistiria num espaço com as seguintes dimensões:

Tabela 4.1 – Dimensões para o edifício em estudo

Dimensão	
Largura [m]	10
Comprimento [m]	15
Pé direito [m]	2,8
Espessura das paredes [m]	0,2
Área Envidraçado [m ²]	15
Área útil [m ²]	150
Volume [m ³]	420

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

Foram contabilizadas as cargas que de um modo geral mais afectam um espaço, e foram usados dados climáticos obtidos em [18] para saber as propriedades do ar e da radiação em cada dia e em cada hora, visto estes afectarem os ganhos pela envolvente e também a prestação do AEPO.

4.2. *Envolvente*

No algoritmo realizado, admitiu-se uma área de parede, que era atravessada por calor sob a forma de condução. Esta parede caracteriza-se por possuir também inércia térmica, um efeito de grandeza considerável neste tipo de construções. Para as propriedades térmicas da parede foram usadas as rotinas do programa EES.

Tabela 4.2 – Propriedades térmicas das paredes

Propriedade	
Massa volúmica [kg/m ³]	2300
Coefficiente de condução [W/(m ² .K)]	1,4
Capacidade térmica [J/(kg.K)]	880

O calor é transmitido do ar exterior para a parede por convecção e por sua vez da parede para o espaço interior pela mesma forma. Para contabilizar este fenómeno foi consultada a informação existente no RCCTE [19] para obter os valores dos coeficientes de convecção respectivos. Os coeficientes de convecção para a troca de calor entre a parede e o ar encontram-se na

Tabela

Na Tabela 4.3 existem também trocas de calor entre o interior e exterior do edifício através do envidraçado. Para determinar o coeficiente de transmissibilidade térmica dos vidros recorreu-se ao ITE50 [20], onde é especificado que um vidro duplo com uma espessura de lâmina de ar de 6mm tem um coeficiente de transmissão térmica de 4,3W/(m².C).

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

Tabela 4.3 – Coeficientes de convecção entre a parede e envolvente

Coeficiente de convecção	W/(m².K)
Exterior	14
Interior	7,7

Em relação às trocas de calor pelo pavimento e pelo tecto, admitiu-se que estas eram desprezáveis, o que é admissível caso se aceite que os espaços vizinhos são climatizados e deste modo a diferença de temperaturas é nula e, por conseguinte a transferência de calor também.

4.3. **Ganhos**

Os ganhos internos foram obtidos através dos padrões de referência de utilização dos edifícios no RSECE [21] para a tipologia de edifício de escritórios. Neste regulamento, é possível obter o padrão de utilização do espaço por parte de ocupantes, da iluminação e dos equipamentos. Com este padrão e com as densidades de energia libertada por estas fontes por metro quadrado, tem-se um valor típico da carga que é gerada no interior de um edifício numa base horária. Essas densidades são apresentadas a seguir para a tipologia de um edifício de escritórios

Tabela 4.4 – Densidades ocupacionais e energéticas do espaço

Fonte	Densidade
Ocupação	10 m ² /Ocupante
Iluminação	10 W/m ²
Equipamento	15 W/m ²

4.3.1. **Ganhos por ocupação**

Os ganhos devido a ocupação provêm do calor libertado pelas pessoas que ocupam o espaço. A energia que o corpo liberta é medida em pela sua actividade metabólica em METs. Um MET em unidades do sistema internacional equivale a aproximadamente 100W. Como o corpo humano em actividades normais desenvolve uma actividade metabólica de 1MET, o

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

calor libertado no espaço por cada um será assim de 100W. Desta forma a densidade energética devida à ocupação será de 10W/m².

A Tabela 4.5 apresenta os perfis, obtidos no RSECE de ocupação horária para dias da semana e para o fim-de-semana, em percentagem de ocupação.

Tabela 4.5 – Padrão de referência da ocupação dos edifícios de escritórios

Horas	% de ocupação				
	Segunda a sexta	Fins-de-semana			
0h às 1h	0	0	12h às 13h	50	0
1h às 2h	0	0	13h às 14h	70	0
2h às 3h	0	0	14h às 15h	90	0
3h às 4h	0	0	15h às 16h	100	0
4h às 5h	0	0	16h às 17h	80	0
5h às 6h	0	0	17h às 18h	50	0
6h às 7h	10	0	18h às 19h	20	0
7h às 8h	20	0	19h às 20h	10	0
8h às 9h	50	0	20h às 21h	0	0
9h às 10h	90	0	21h às 22h	0	0
10h às 11h	100	0	22h às 23h	0	0
11h às 12h	100	0	23h às 24h	0	0

A contabilização da potência gerada pela ocupação humana no espaço pode ser assim medida numa escala horária, através da (0.1)

$$\dot{Q}_{ocup} = A_{pavi} \cdot \theta_{H,ocup} \cdot \phi_{ocup} \quad (0.1)$$

4.3.2. Ganhos por iluminação

Os ganhos de iluminação são contabilizados de uma forma semelhante à forma como são calculados os ganhos por ocupação. Como o valor da densidade de iluminação não é dado no RSECE foi calculado um valor médio para esta. Escolheu-se usar o valor de 10W/m², o que considera que a grande maioria da iluminação do edifício é de alta eficiência. Na Tabela 4.6 são apresentados os valores da percentagem obtidos, no RSECE de iluminação horária para dias da semana e dias de fim-de-semana

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

Tabela 4.6 – Padrão de referência do uso da iluminação nos edifícios de escritórios

Horas	% de iluminação				
	Segunda a sexta	Fins-de-semana			
0h às 1h	5	5	12h às 13h	50	5
1h às 2h	5	5	13h às 14h	85	5
2h às 3h	5	5	14h às 15h	95	5
3h às 4h	5	5	15h às 16h	100	5
4h às 5h	5	5	16h às 17h	95	5
5h às 6h	5	5	17h às 18h	50	5
6h às 7h	10	5	18h às 19h	30	5
7h às 8h	30	5	19h às 20h	25	5
8h às 9h	75	5	20h às 21h	5	5
9h às 10h	85	5	21h às 22h	5	5
10h às 11h	100	5	22h às 23h	5	5
11h às 12h	100	5	23h às 24h	5	5

Para calcular a contribuição da iluminação é usada uma equação semelhante à de ocupação. A equação (0.2) permite igualmente calcular a carga devida a iluminação.

$$\dot{Q}_{ilum} = A_{pavi} \cdot \theta_{H,ilum} \cdot \phi_{ilum} \quad (0.2)$$

4.3.3. Ganhos por equipamento

Este tipo de ganhos corresponde a uma quantidade de energia média, que é libertada no espaço pelos equipamentos que normalmente são usados na tipologia escolhido. Sendo esta a de escritórios podia-se atribuir estes ganhos a computadores, a fotocopiadoras, faxes e outros. Para este tipo de contribuição foi usada a densidade média recomendada pelo RSECE. A Tabela 4.7 exhibe a percentagem de equipamento ligado em regime horário para a tipologia de escritórios e obtida no RSECE.

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

Tabela 4.7 – Padrão de referência do uso de equipamento nos edifícios de escritórios

Horas	% de equipamento		Horas	% de equipamento	
	Segunda a sexta	Fins-de-semana		Segunda a sexta	Fins-de-semana
0h às 1h	15	15	12h às 13h	70	15
1h às 2h	15	15	13h às 14h	70	15
2h às 3h	15	15	14h às 15h	95	15
3h às 4h	15	15	15h às 16h	100	15
4h às 5h	15	15	16h às 17h	90	15
5h às 6h	15	15	17h às 18h	70	15
6h às 7h	30	15	18h às 19h	45	15
7h às 8h	70	15	19h às 20h	30	15
8h às 9h	85	15	20h às 21h	15	15
9h às 10h	95	15	21h às 22h	15	15
10h às 11h	100	15	22h às 23h	15	15
11h às 12h	95	15	23h às 24h	15	15

A equação dos ganhos devidos ao equipamento é assim dada da seguinte forma

$$\dot{Q}_{equip} = A_{pavi} \cdot \theta_{H, equip} \cdot \phi_{equip} \quad (0.3)$$

4.3.4. Ganhos Solares

Em relação à energia que entra por radiação directa no edifício, foram usados valores medidos, para os diversos locais, da radiação média hora a hora para os 4 meses em análise. Estes valores foram, medidos numa superfície voltada a sul, visto ser essa a orientação das janelas. Ao valor da potência incidente devida à radiação é preciso aplicar um factor de correcção que considere a radiação absorvida pelo vidro e a protecção passiva activa a 70%.

O factor de correcção foi calculado do seguinte modo:

$$g_{total} = 0,7 \cdot g_{protecção@100\%} + 0,3 \cdot g_{vidro} \quad (0.4)$$

O total da potência recebida pelo espaço é

$$\dot{Q}_{rad} = A_{vidro} \cdot g_{Total} \cdot r_{Sul} \quad (0.5)$$

4.4. ***Locais usados para a simulação***

Portugal é um país que apresenta alguma variedade climática. O facto de algumas cidades se encontrarem perto do mar, faz com que o clima destas seja mais húmido do que naquelas que se encontram mais afastadas – clima temperado marítimo por oposição a clima temperado continental. Por outro lado, existe também uma variação de latitude considerável entre algumas cidades o que faz com que exista uma variação de temperatura média considerável entre Norte e Sul. Assim sendo, não é possível perceber o quanto um AEPO é adequado ao clima português, fazendo a análise deste com os dados climáticos de apenas um local. Foi assim necessário, escolher dados climáticos para algumas cidades, representativas das variações discutidas acima.

Deste modo foram escolhidas as cidades de Bragança, Évora, Lisboa e Porto. As cidades de Bragança e Porto são duas cidades que se encontram no Norte de Portugal, sendo que a cidade do Porto é uma cidade próxima da orla marítima e Bragança uma cidade mais afastada desta. Quanto a Lisboa e Évora, são duas cidades já mais no Sul de Portugal. Destas é a de Lisboa, a que se encontra próxima do mar. A localização destas é apresentada no mapa em seguida,

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses



Figura 26 – Mapa de Portugal Continental

As Figura 27 aFigura 30 apresentadas a seguir, dão uma perspectiva do potencial climático de arrefecimento evaporativo em cada um dos locais escolhidos. Nestes são exibidas as temperaturas de bolbo húmido, em função das respectivas temperaturas de bolbo seco para todas as horas entre as 6 e as 20 horas de cada dia dos 4 meses em análise. Os quatro meses são os de Junho, Julho, Agosto e Setembro. Este período de análise foi escolhido porque é

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

normalmente o usado para o projecto de instalações AVAC e é também o período de análise aconselhado pelo RCCTE [19]. Os dados climáticos foram obtidos através do software SolTerm [18]. Em cada gráfico existe também uma linha que corresponde à zona onde o ar se encontra saturado.

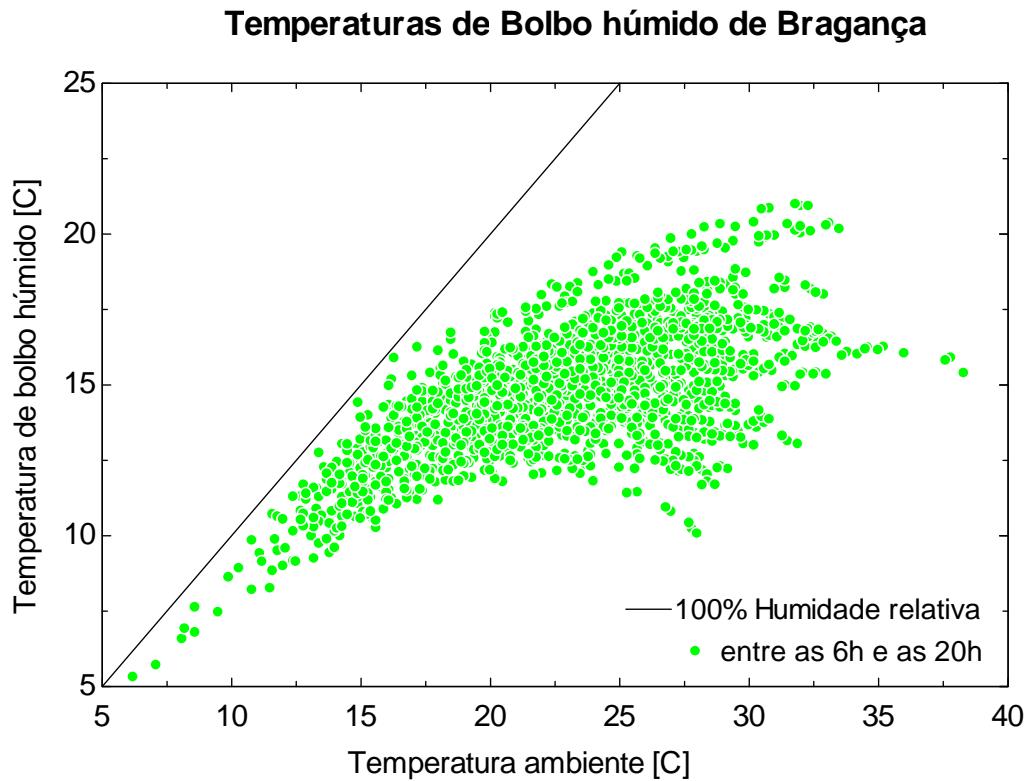


Figura 27 - Temperaturas de Bolbo Húmido em Bragança nas horas de ocupação e em função da temperatura ambiente

Numa primeira observação, é realçada a grande amplitude térmica encontrada neste clima, temperatura mínima 6°C e temperatura máxima 38°C. É visível na Figura 27 que, existe um bom afastamento dos pontos da recta de saturação, principalmente em horas em que a temperatura de bolbo seco é elevada. Espera-se que o AEPO tenha um bom comportamento neste local em vista das baixas temperaturas de bolbo húmido aqui atingidas.

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

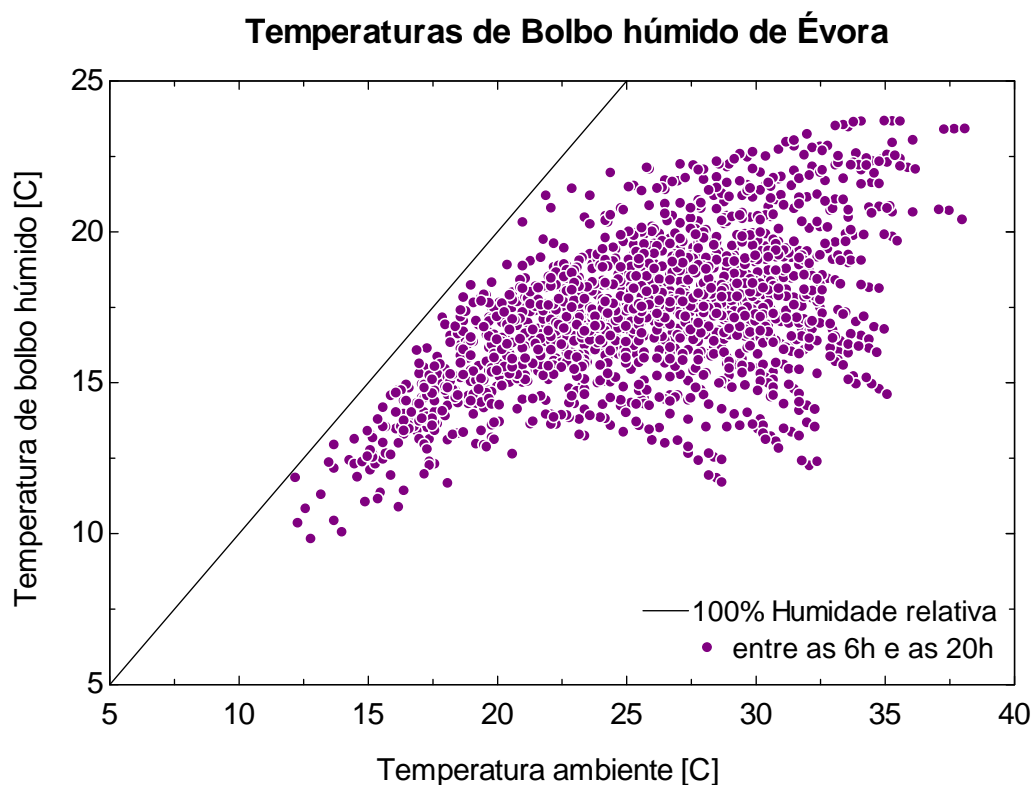


Figura 28 - Temperaturas de Bolbo Húmido em Évora nas horas de ocupação e em função da temperatura ambiente

À semelhança do que acontece em Bragança, percebe-se que este clima é um clima seco. Existem poucas ocasiões em que são atingidas condições perto da recta de saturação e, quando isto acontece normalmente é para temperaturas exteriores baixas, o que provavelmente acontece mais nas horas iniciais ou finais do dia, onde as exigências feitas, à máquina encarregue pelo arrefecimento ambiente, são menores.

Quanto à análise da temperatura de bolbo húmido de modo isolado, repara-se que para algumas horas esta aproxima-se dos 25 °C o que, pode dificultar a tarefa do AEPO de conseguir remover calor suficiente e, promover conforto no espaço.

Temperaturas de Bolbo húmido de Lisboa

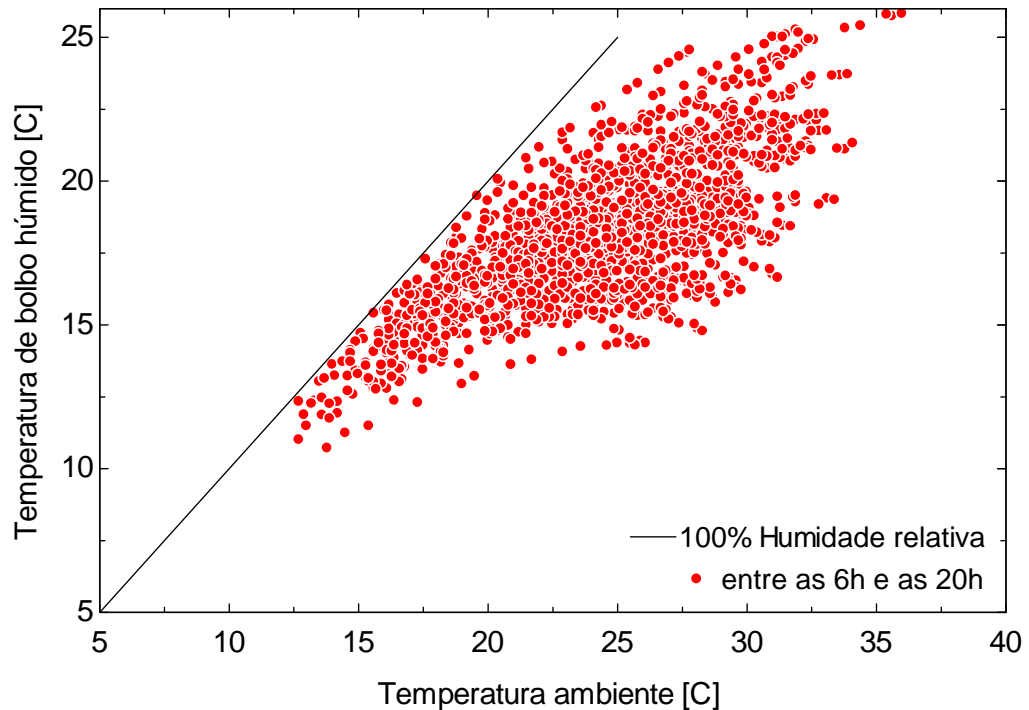


Figura 29 - Temperaturas de Bolbo Húmido em Lisboa nas horas de ocupação e em função da temperatura ambiente

Os dados climáticos para Lisboa, mostram a existência de algumas horas onde a performance do AEPO adivinha-se má. Isto acontece para temperaturas ambientes acima dos 30°C, onde se prevê a possível necessidade da acção do AEPO e onde temperatura de bolbo húmido é superior a 25°C. A máquina poderá não conseguir baixar a temperatura do ar que é insuflado, de forma ao ambiente ser arrefecido até uma temperatura aceitável para ocupação. Isto acontece porque, tal como no Porto, este clima apresenta uma taxa de humidade elevada.

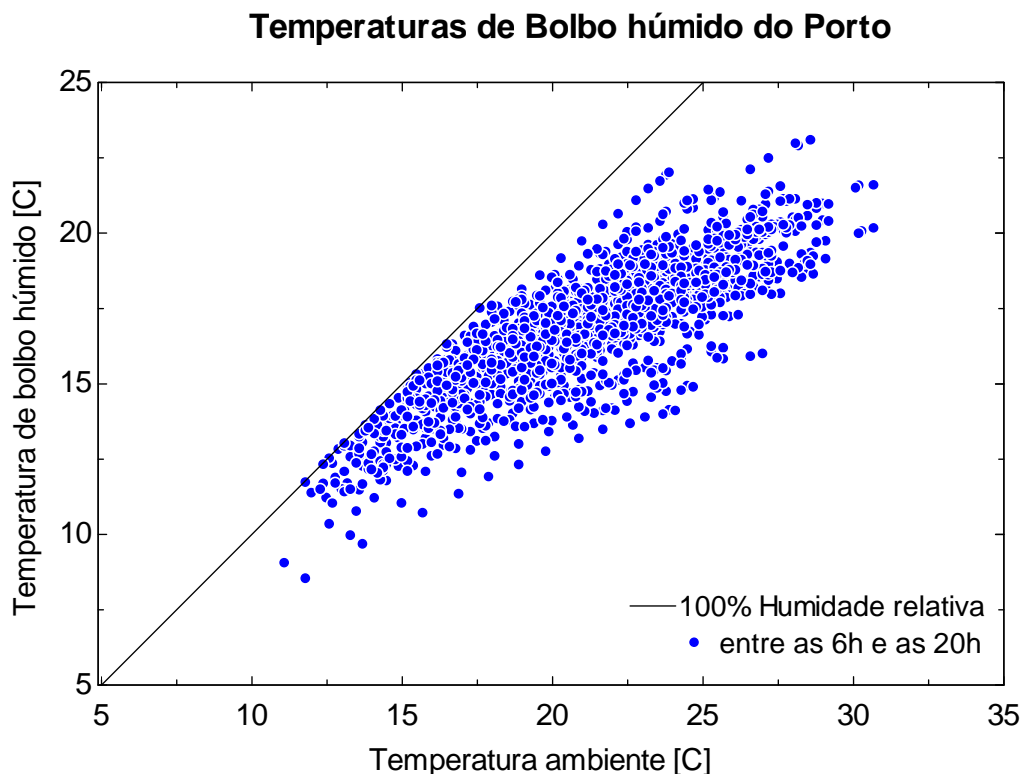


Figura 30 – Temperaturas de Bolbo Húmido no Porto nas horas de ocupação e em função da temperatura ambiente

Ao analisar a Figura 30 nota-se que em nenhuma ocasião é ultrapassada a temperatura de bolbo húmido de 25°C e que existem mesmo poucas horas onde a temperatura de bolbo húmido encontra-se acima dos 22°C. Este aspecto mostra-se interessante, visto a temperatura de insuflação do AEPO ser, um pouco mais alta do que a temperatura de bolbo húmido (para uma configuração em que $\varepsilon_{bh}=0,9$).

Embora esta tendência seja menor para temperaturas ambientes superiores a 20°C, observa-se que, a humidade relativa nesta zona é elevada, o que é identificado pela proximidade dos vários pontos da recta de saturação.

4.5. ***Integração do modelo no espaço***

Para saber como o AEPO iria afectar o conforto no edifício, o modelo de placas planas apresentado no capítulo 2 foi incluído no código do edifício. No entanto para que a acção deste fosse adequada e satisfatória, foram criadas algumas condições de operação debaixo das quais, o aparelho é activado ou desactivado. A Figura 31 é ilustrativa dessas condições.

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

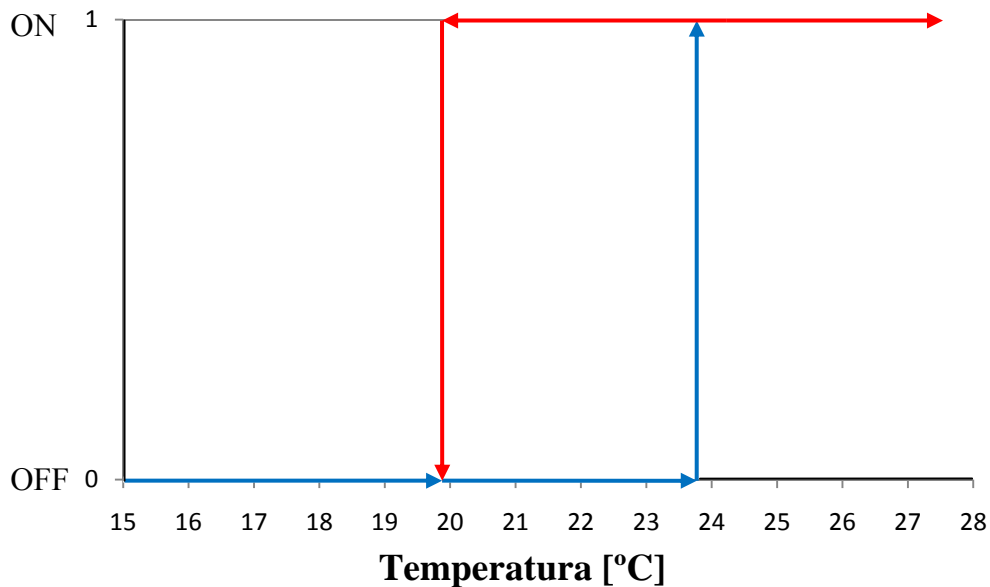


Figura 31 – Histerese entre a temperatura de activação e a temperatura de desactivação do AEPO

Para que não existisse uma zona onde o AEPO seria ligado e desligado sucessivamente, as temperaturas de activação e desactivação do AEPO foram diferenciadas. O gráfico mostra a histerese existente entre as condições de activação e desactivação do AEPO, sendo que este liga quando a temperatura interior atinge os 24 °C e desliga quando esta atinge os 20 °C. A estas duas condições foi, ainda adicionada uma outra, que certifica que o sistema só é ligado em períodos de funcionamento do edifício, ou seja quando existem pessoas lá dentro (ocupação). Assim evita-se o funcionamento deste durante a noite e aos fins-de-semana, alturas em que não é necessário assegurar o conforto. A Figura 32, exemplifica a ligação do AEPO ao edifício, mostrando como este opera para remover a carga gerada no interior do espaço.

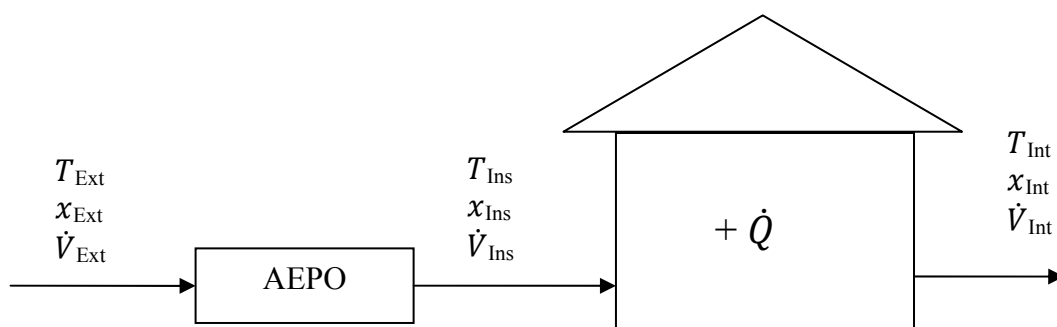


Figura 32 – Esquema da ligação arrefecedor-edifício

Para os períodos em que o funcionamento do AEPO no edifício é desligado, admite-se que existe ventilação natural que renova o ar no interior do edifício. Assumiu-se que este

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

caudal seria de uma renovação por hora, mesmo para horas em que a temperatura exterior é superior à interior.

Considera-se que para cada instante em que é calculado, o funcionamento do AEPO está em regime permanente. Assume-se que a possível inércia que o AEPO poderá apresentar perante mudanças bruscas de temperatura como é desprezável.

4.6. **Humidade no interior do edifício**

A humidade no interior do edifício é uma propriedade que necessita de ser avaliada, pois, como será mostrado à frente, esta é necessária na avaliação do conforto. Para que fosse obtido o valor correcto desta, é necessário conhecer o valor da humidade exterior assim como também é necessário conhecer qual é a quantidade de vapor gerada dentro do espaço. O vapor gerado no interior do espaço é devido à evaporação provocada pelos ocupantes. O cálculo da humidade interior é obtido admitindo-se que dos 100W que normalmente o corpo humano liberta, 30% são sob a forma de calor latente. Assim:

$$\dot{Q}_{evap/pessoa} = 30[W] \quad (0.6)$$

O caudal de vapor libertado por uma pessoa obtém-se através do calor latente de evaporação

$$\dot{m}_{vapor/pessoa} = \frac{\dot{Q}_{evap}}{h_{fg}} \quad (0.7)$$

A contribuição total é assim medida:

$$\dot{m}_{vapor} = \phi_{ocup} \cdot A_{pavi} \cdot \dot{m}_{vapor/pessoa} \quad (0.8)$$

O cálculo da humidade no interior do espaço é obtido desta maneira:

$$V \cdot \rho_{ar} \cdot \frac{\delta x_{int}}{\delta t} = \dot{m}_{ar} \cdot (x_{ext,t=i} - x_{int,t=i}) + \dot{m}_{vapor} \quad (0.9)$$

4.7. Ventilação

Assim como existem preocupações com o consumo energético e com o nível de conforto, existe também uma preocupação com a qualidade de ar interior. Normalmente a qualidade do ar interior é assegurada pela insuflação de ar exterior para o interior do edifício. Deste modo recorreu-se ao RSECE [21] para obter o valor mínimo de caudal de ar-novo que é necessário para que a qualidade de ar interior seja satisfatória.

Como a tipologia do edifício em análise é de gabinetes, os caudais mínimos de ar novo sugeridos são, $35\text{m}^3/(\text{h.ocupante})$ ou $5\text{ m}^3/(\text{h.m}^2)$. Destes dois é, escolhido o pior caso, ou seja o valor de caudal maior. Assim sendo o caudal de ar mínimo para o edifício, em questão, é de $750\text{ m}^3/\text{h}$. Como o aparelho que vai integrar o edifício usa a configuração apresentada no final do capítulo 3, este requisito é alcançado.

4.8. Análise de Resultados

Após obter os resultados é, necessário realizar algum trabalho de tratamento de dados para, que seja feita uma avaliação de alguns parâmetros e de usar estes para até mesmo comparar com valores padrão.

4.8.1. Condições de Conforto

Para medir a capacidade de o AEPO oferecer conforto ao espaço, foi levado em conta o intervalo de temperatura e de humidade sugerido na norma 55 da ASHRAE Standard [22]. Esta norma foi feita numa parceria próxima com as ISO 7726 e 7730, assim os resultados obtidos com uma ou outra serão muito próximos. Este intervalo é apresentado de uma forma gráfica na

Figura 33. Quando as condições do espaço interior se encontram a uma temperatura e humidade correspondente a um ponto da área sombreada, admite-se que pelo menos 80% dos ocupantes estão numa situação de conforto.

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

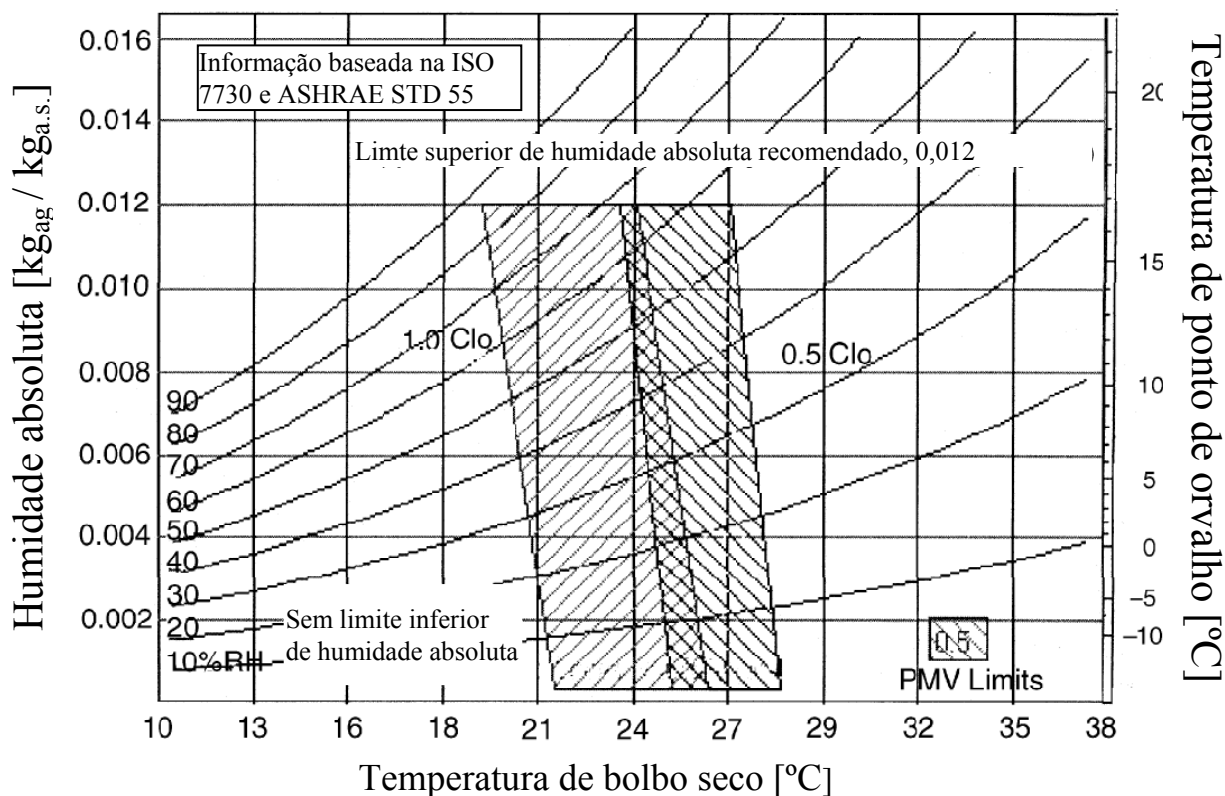


Figura 33 – Intervalo de temperatura e humidade onde existe conforto

Como os dados em análise dizem respeito à estação de arrefecimento, espera-se que a temperatura interior nas horas de utilização seja, quase sempre acima dos 20 °C. Também se sabe pelos dados climáticos que a humidade absoluta se encontra muitas vezes a valores perto dos 0,012 $\text{kg}_{\text{ag}}/\text{kg}_{\text{a.s.}}$. Por conseguinte procedeu-se a uma simplificação das condições de conforto, que possibilita um tratamento mais rápido dos dados. Admite-se assim que estão reunidas as condições mínimas de conforto quando a temperatura no espaço é inferior a 27°C e quando a humidade absoluta é inferior a 0,012 $\text{kg}_{\text{ag}}/\text{kg}_{\text{a.s.}}$.

4.8.2. Determinação dos custos de operação

Os custos permitem obter uma visão económica da possível implementação de um sistema deste tipo em Portugal, daí a importância da sua quantificação e análise. Procedeu-se à consulta do preçário de empresas que disponibilizassem este tipo de serviços para, determinação dos custos de operação. O preço do kWh de electricidade foi obtido no site da EDP [23] para uma tarifa normal. Enquanto que o preço do metro cúbico de água foi obtido no site da empresa Águas de Gaia[24].

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

Tabela 4.8 – Valores das tarifas de água e electricidade

Custo	
Electricidade [€/kWh]	0,118
Água [€/m ³]	
de 1 a 5 m ³	0,33
de 6 a 10 m ³	0,96
de 11 a 20 m ³	1,8

Foi realizada também uma estimativa do consumo energético em quilogramas equivalentes de petróleo, o que é útil para, comparar com os valores de referência de consumo encontrados no RSECE para a época de arrefecimento. O factor de conversão de electricidade em kgep é 0,29 kgep/kWh. O consumo máximo de energia, estipulado pelo RSECE para, um edifício com tipologia de escritório, durante a estação de arrefecimento é de 5 kgep/(m².ano).

CAPÍTULO 5 – RESULTADOS OBTIDOS

No final das simulações e, como seria de esperar, foi tratada uma grande quantidade de dados. Assim sendo, a exposição destes e a sua análise seria um processo moroso e de certo modo repetitivo. Para que fosse possível entender o que acontece em cada lugar, optou-se por escolher os resultados da pior semana completa, em cada local e, fazer uma análise desta. Foi escolhido este intervalo de tempo porque em cada semana cumpre-se um ciclo de ocupação completo e pode-se ao mesmo tempo analisar algum possível efeito cumulativo que exista ao longo desta. Observa-se assim como os diferentes parâmetros variam ao longo da semana.

Ao olhar para as figuras apresentadas identifica-se o accionamento do AEPO por uma descida acentuada na temperatura interior. O meio-dia é a hora em que a ocupação diminui, diminuindo o calor gerado no interior do espaço e assim também a temperatura interior. Com respeito à humidade e embora no espaço interior exista geração de vapor, nota-se que esta quantidade é sempre semelhante à humidade no exterior. Este facto, pode ser explicado pelo elevado caudal a que o AEPO opera. Isto mostra e como seria de esperar que, o AEPO não tem qualquer controlo sobre a humidade interior.

5.1. *Pior semana para cada local*

5.1.1. **Bragança**

Neste local a semana em que foi obtida a maior temperatura interior, corresponde ao período compreendido entre o dia 10 e 16 de Agosto. A temperatura máxima obtida no interior do espaço é de 27,65°C. A Figura 34 mostra que, para os outros dias em que a temperatura máxima atingida não é tão alta, a temperatura exterior máxima é semelhante à atingida no pior dia. Pela observação da temperatura de insuflação para esse dia, repara-se que embora esta seja inferior à Temperatura interior é menor do que nos outros dias e por isso insuficiente para remover a carga. A explicação deste fenómeno encontra-se na Figura 35, como se observa para este período existe um grande aumento no valor da humidade absoluta, o que justifica a incapacidade de o AEPO atingir temperaturas tão baixas como nos outros dias da semana.

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

Mesmo assim, os dados obtidos nesta localidade e para as horas de ocupação mostram que o AEPO é na maioria das horas uma solução viável para remover o calor excessivo.

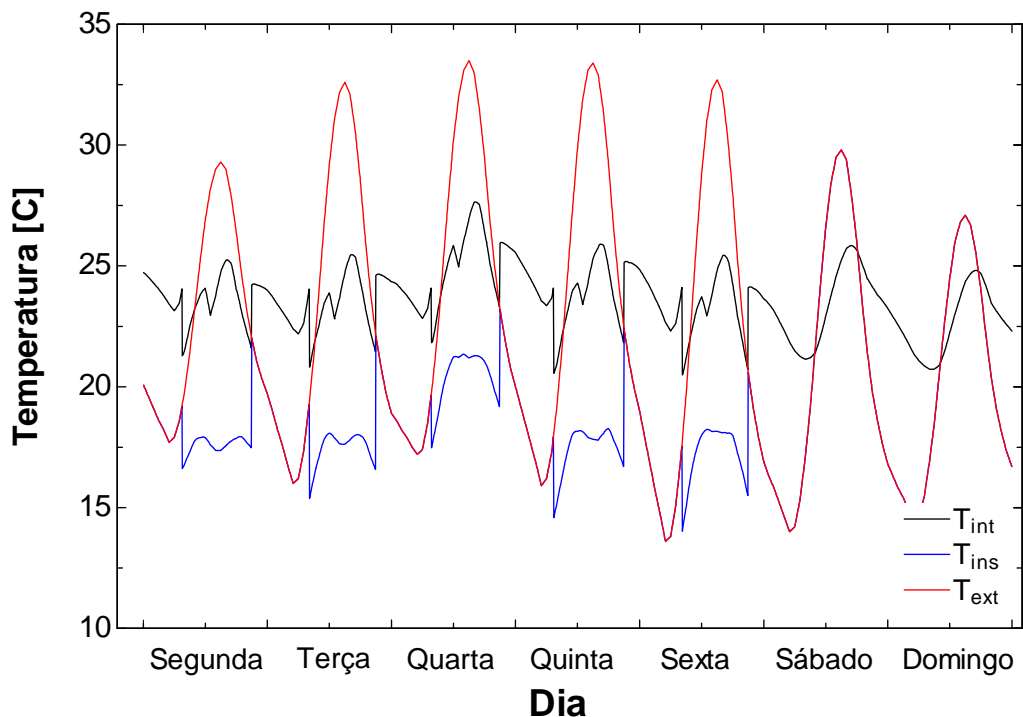


Figura 34 – Evolução das temperaturas exterior, interior e de insuflação

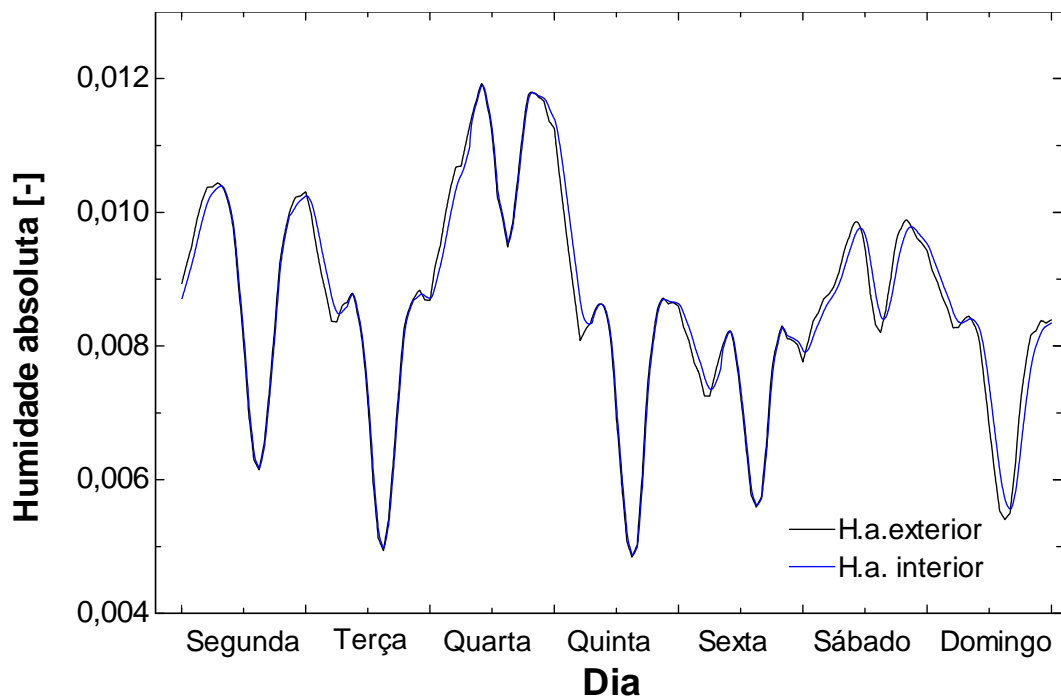


Figura 35 - Evolução da humidade absoluta exterior e interior

5.1.2. Évora

Em Évora a maior temperatura interior foi obtida na semana que começa no dia 24 de Agosto e termina no dia 30. A temperatura máxima alcançada no interior do edifício é de 29,74°C. Ao observar a Figura 36 percebe-se que nesta semana, existe em praticamente todos dias alguns momentos onde a temperatura interior é excessivamente elevada. Por outro lado e como é exibido na Figura 37 os valores de humidade absoluta são elevados na maior parte dos dias, ultrapassando mesmo a quantidade limite de 0,012 acima da qual não existe conforto. Como foi referido anteriormente, a humidade absoluta está completamente dependente da humidade exterior assim, assim só é possível agir no sentido de melhorar o conforto térmico.

À semelhança do que acontece em Bragança, as temperaturas máximas são atingidas em dias da semana onde a humidade absoluta é maior, visto o potencial do AEPO ser limitado nestas condições. Uma solução possível para este problema seria, ajustar o aparelho para que este atingisse uma eficiência maior e por conseguinte uma temperatura de insuflação menor. Para conseguir isto, podia-se diminuir a velocidade do ar e aumentar o volume (maior número de módulos) para compensar a possível perda de potência. Um ajuste destes permitirá, aumentar a capacidade de remover carga e de operar em condições desfavoráveis.

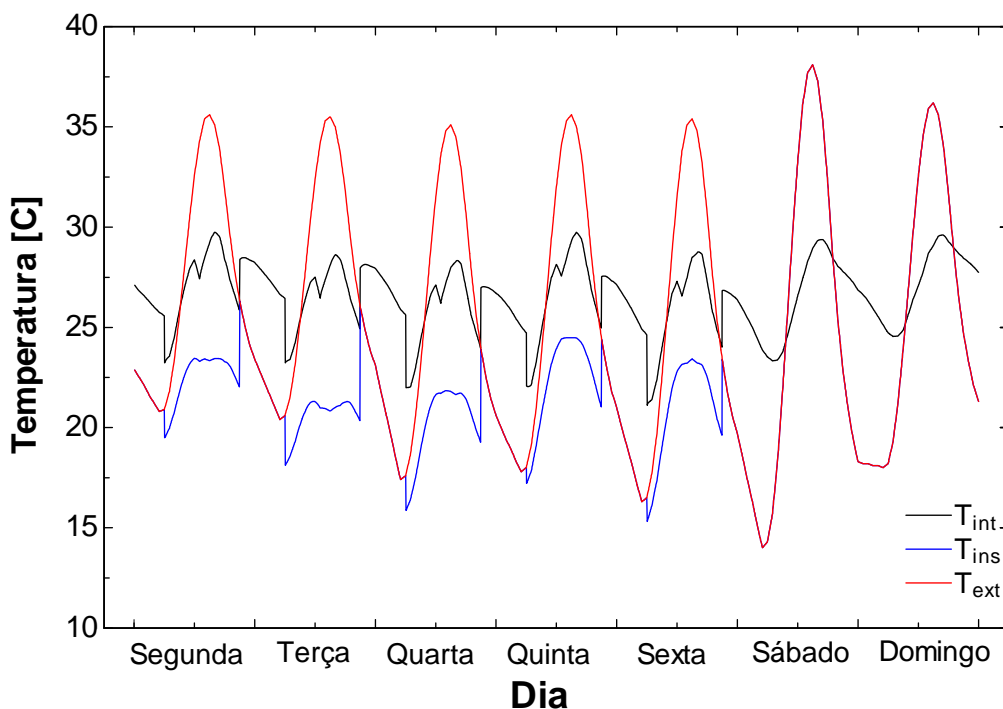


Figura 36 – Evolução das temperaturas exterior, interior e de insuflação

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

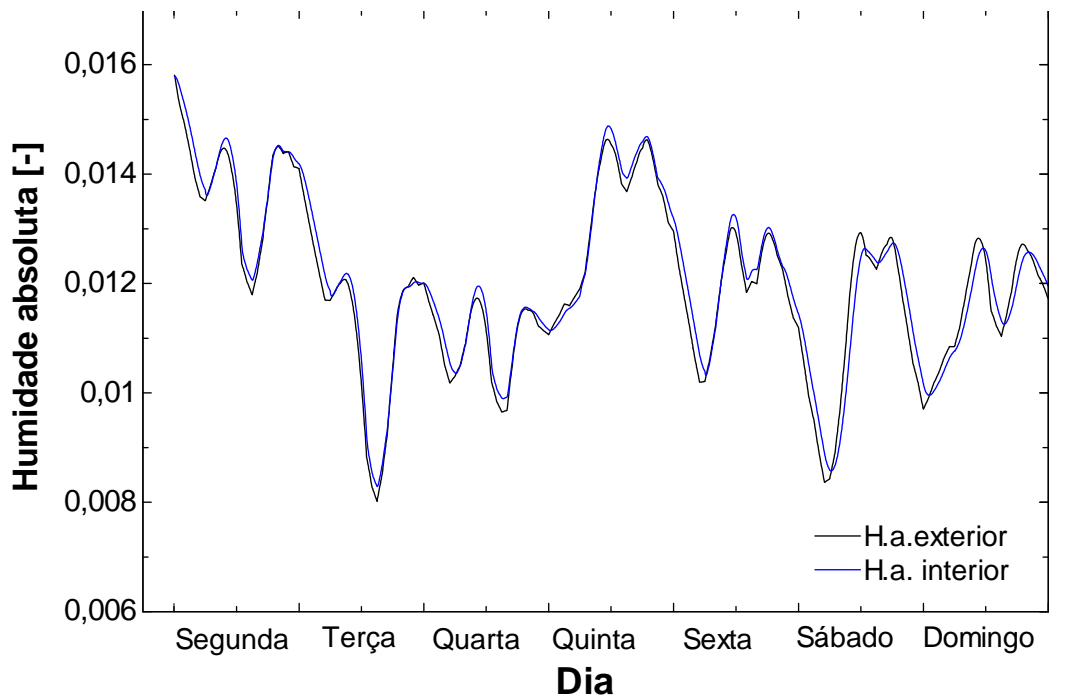


Figura 37 - Evolução da humidade absoluta exterior e interior

5.1.3. Lisboa

Nos resultados referentes a Lisboa, obteve-se o pior valor para a temperatura interior na semana, de 24 a 30 de Agosto. Foi atingida neste período uma temperatura máxima de 28,84 °C. Ao olhar para a Figura 38 observa-se que existem algumas horas, na quinta e sexta-feira, onde não é alcançada uma temperatura aceitável. A isto deve-se o facto de existir um aumento na temperatura exterior e humidade absoluta média.

Em relação aos valores de humidade absoluta encontrados na Figura 39, percebe-se que o conforto é afectado numa grande quantidade de horas, o que explica também a limitação do AEPO de promover o conforto térmico. Mesmo assim e no sentido de atingir um número maior de horas onde se alcança o conforto térmico, podia-se adoptar uma estratégia semelhante à que foi proposta para Bragança, para que houvesse um incremento nas horas de conforto

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

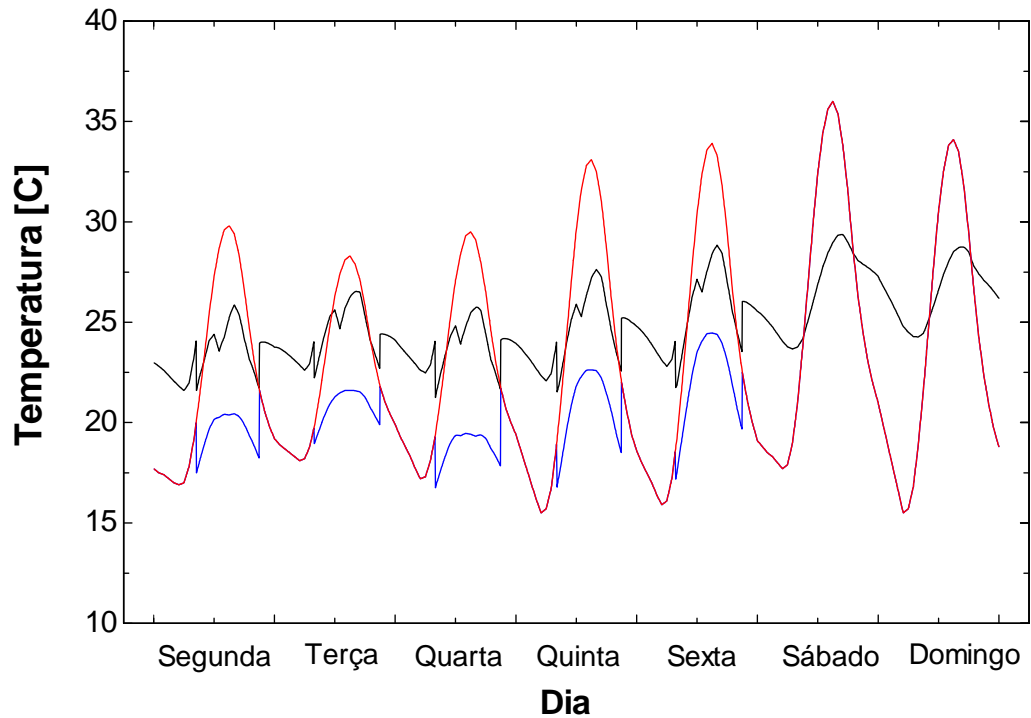


Figura 38 – Evolução das temperaturas exterior, interior e de insuflação

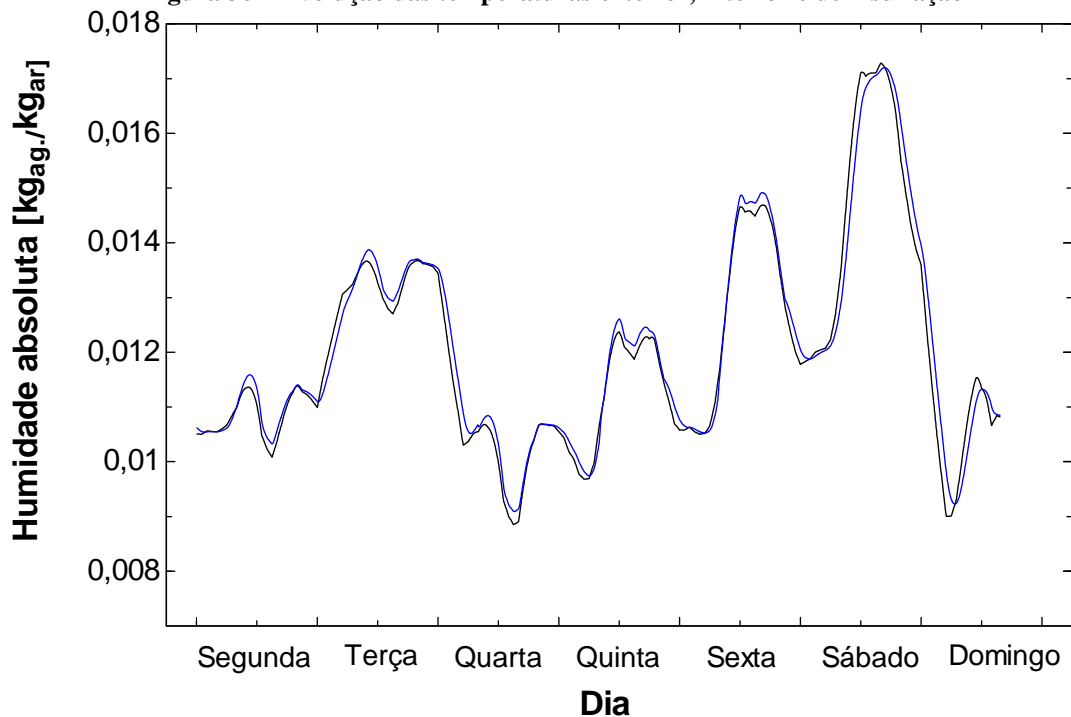


Figura 39 - Evolução da humidade absoluta exterior e interior

5.1.4. Porto

Nos resultados obtidos para o Porto, o dia onde se registou a pior temperatura interior, pertence à semana que começa a 3 de Agosto. O valor de temperatura interior máximo foi de 26,51 °C. Logo conclui-se que para este espaço, a acção do AEPO é suficiente para atingir uma temperatura aceitável. Assim, a humidade absoluta é a propriedade que limita o conforto.

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

Ao observar a Figura 40, revela que a temperatura de insuflação máxima, em períodos de ocupação, encontra-se quase sempre perto dos 20°C, o que é suficiente para retirar a carga do espaço e promover o conforto.

Com respeito à humidade, observa-se na Figura 41 que, o limite máximo é ultrapassado em dois dos dias da semana em análise. Assim, ao comparar os dois gráficos, nota-se que é nestes mesmos dias que são atingidas as temperaturas interiores máximas. Isto ilustra a, relação já conhecida, da capacidade de remoção de calor do AEPO com o a humidade existente no ar exterior.

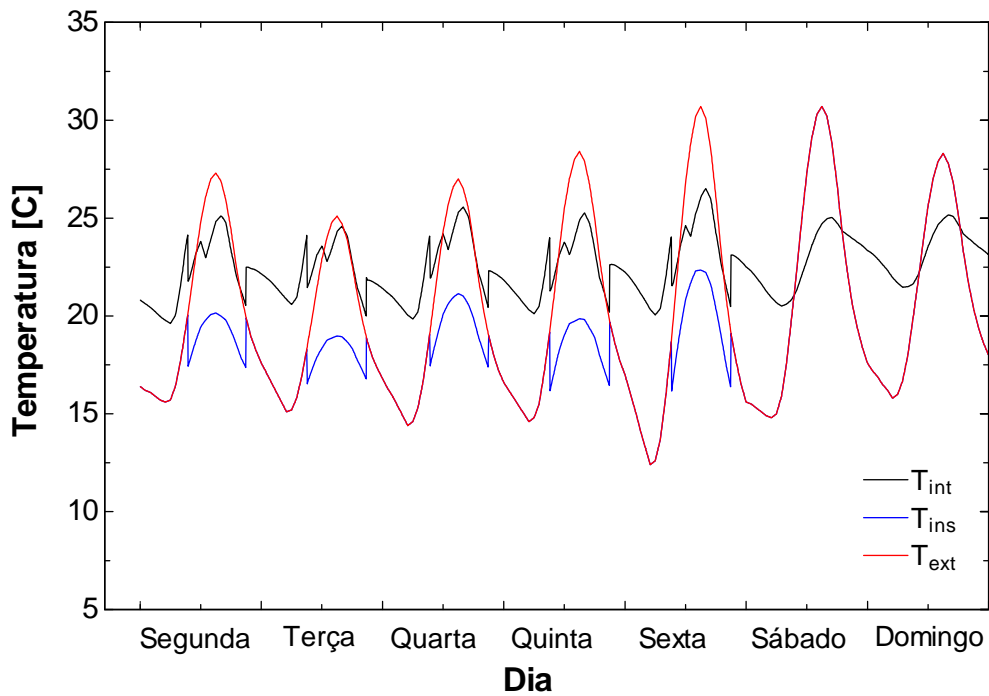


Figura 40 – Evolução das temperaturas exterior, interior e de insuflação

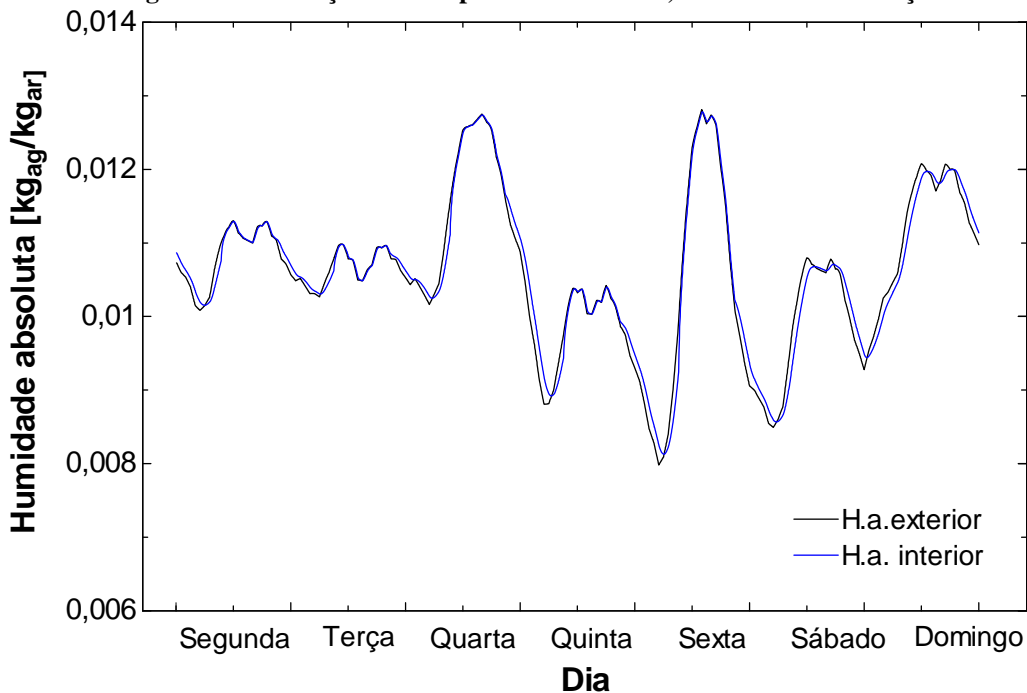


Figura 41 - Evolução da humidade absoluta exterior e interior

5.2. Diagramas psicrométricos

O diagrama psicrométrico é uma ferramenta poderosa que oferece a possibilidade de obter várias propriedades da mistura ar-vapor de uma forma simples. Este tipo de diagramas oferece também, a possibilidade de facilitar a exposição de uma quantidade elevada de informação num modo relativamente fácil e compacto. Com este tipo de representação pretende-se saber, uma percepção da margem de conforto conseguida, da média e da variância das temperaturas interiores. A cada ponto corresponde uma hora na qual existe ocupação no espaço. Estes diagramas são assim apresentados a seguir para as quatro localizações para as quais foram feitas simulações.

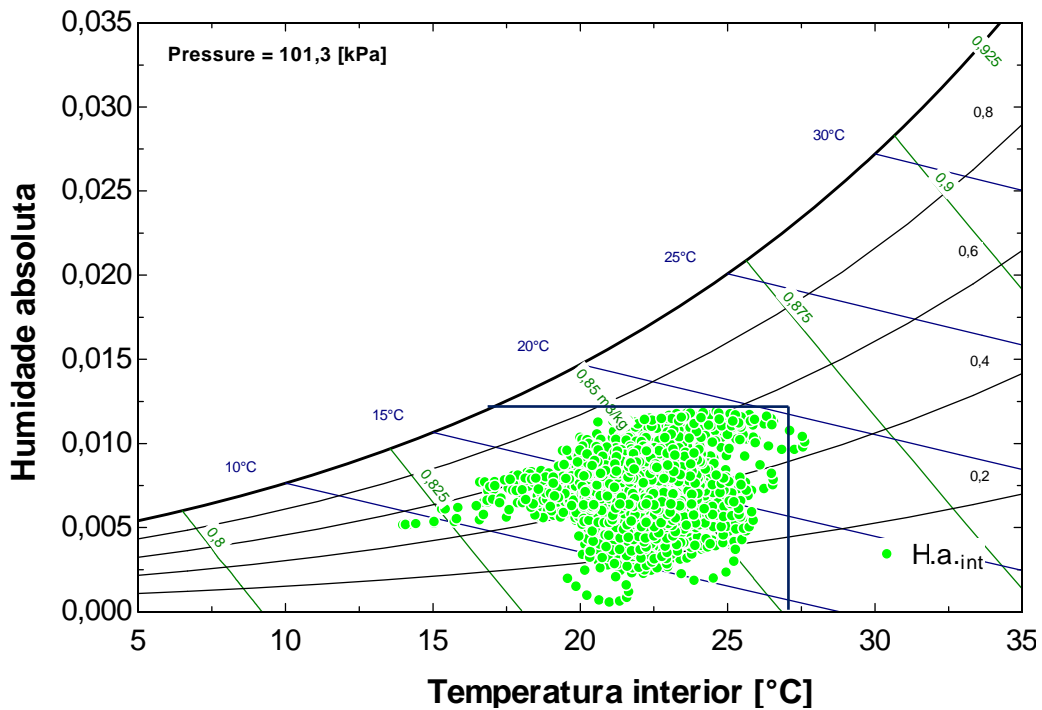


Figura 42 – Diagrama psicrométrico com as condições obtidas no interior do edifício em Bragança

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

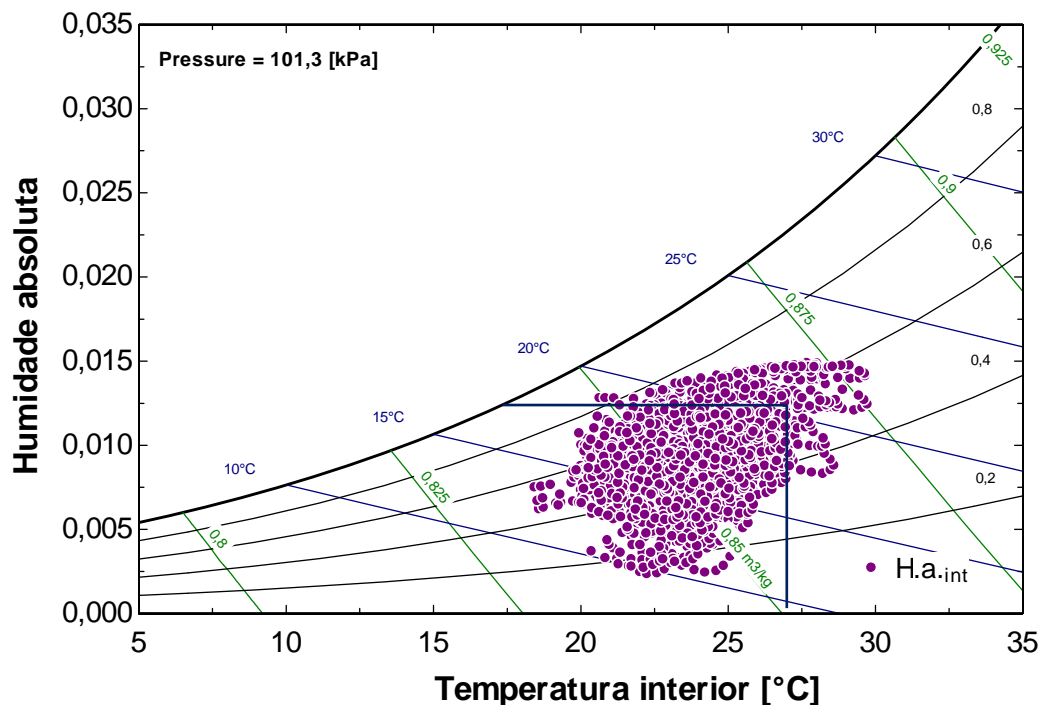


Figura 43 – Diagrama psicrométrico com as condições obtidas no interior do edifício em Évora

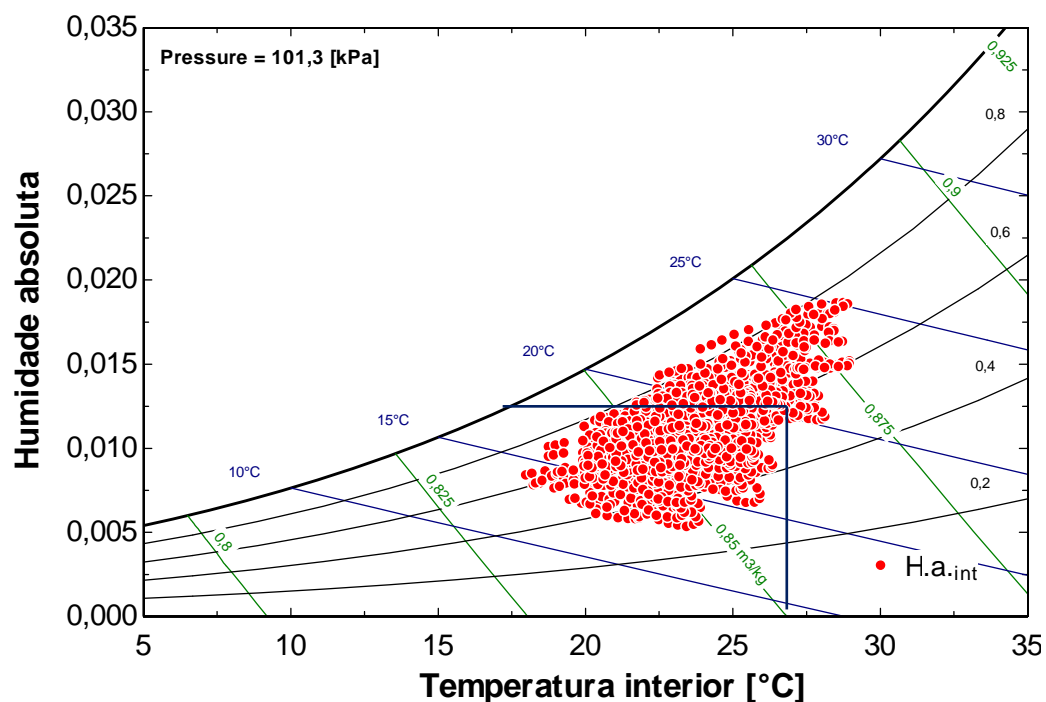


Figura 44 – Diagrama psicrométrico com as condições obtidas no interior do edifício em Lisboa

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

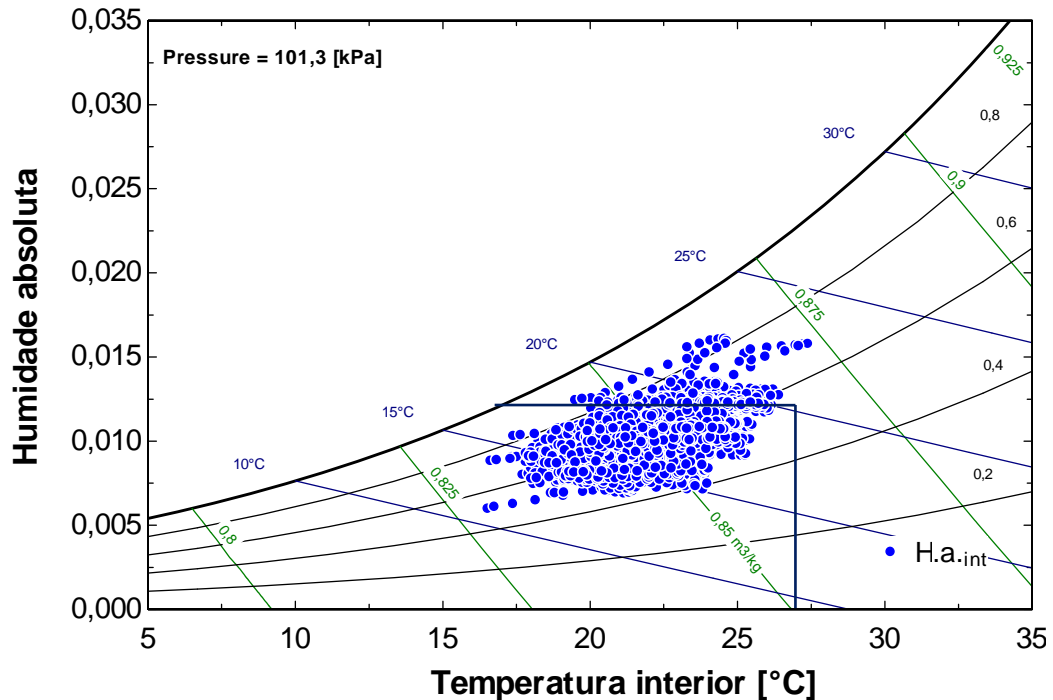


Figura 45 – Diagrama psicrométrico com as condições obtidas no interior do edifício no Porto

Nestes diagramas foram acrescentadas duas linhas que representam os limites de humidade e temperatura estabelecidos no capítulo 4. As conclusões acerca destes gráficos foram remetidas para o tópico sobre análise do conforto, neste capítulo, já que existe uma relação intrínseca entre os dados apresentados nestes diagramas com os dados lá apresentados.

5.3. *Energia removida do espaço*

A Figura 46 apresenta os valores de energia removida pelo AEPO e por ventilação natural para os diferentes locais. Como não é o objectivo deste trabalho estudar as potencialidades da ventilação natural a sua apresentação justifica-se com a necessidade de perceber até que ponto poderia afectar a carga que tem de ser removida pelo aparelho. Os resultados mostram uma proximidade razoável entre a energia removida por ventilação nos quatro locais, sendo esta da ordem dos 7 kWh/m². Portanto a capacidade de remover mais ou menos calor, está dependente da máquina e do clima em que está inserida e não é beneficiada em nenhum dos locais pelo melhor ou pior desempenho da ventilação natural.

Na Figura 46 observa-se a existência de uma clara tendência, a energia removida é maior quanto mais quente e mais seco for o clima da região onde se encontra a máquina. Isto dá-se porque em climas secos existe um maior potencial de arrefecimento, e assim uma maior quantidade de energia que pode ser removida. Em climas quentes a temperatura exterior

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

média é mais alta, assim é de esperar que graças aos ganhos pela envolvente que são maiores exista uma maior quantidade de energia que é necessário remover do espaço. Por outro lado há que mencionar que uma grande parte da energia removida pelo AEPO provém das cargas internas e que são iguais para os quatro locais.

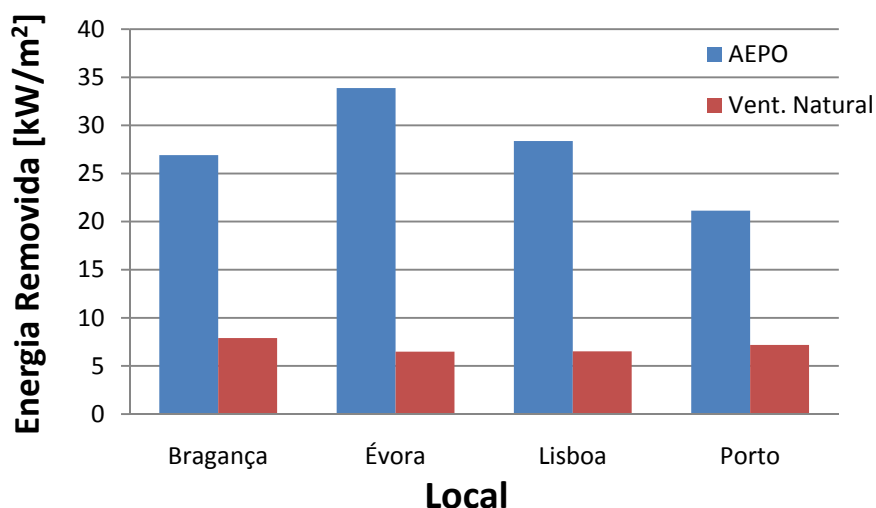


Figura 46 – Energia removida do espaço durante os 4 meses de arrefecimento

5.4. Eficiência do AEPO

Respeitante aos valores de COP, observa-se que este é maior nos climas mais quentes e secos. Justifica-se esta observação com o facto de que, embora a potência de ventilação ser praticamente a mesma nos diferentes locais, a potência de arrefecimento varia de local para local. Esta diferença está associada à diferença de temperaturas existente entre o ar exterior e o ar insuflado, já que o caudal de ar é igual nos quatro locais. Em climas secos, espera-se que a temperatura de bolbo húmido seja mais baixa, nos climas quentes a temperatura exterior é maior.

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

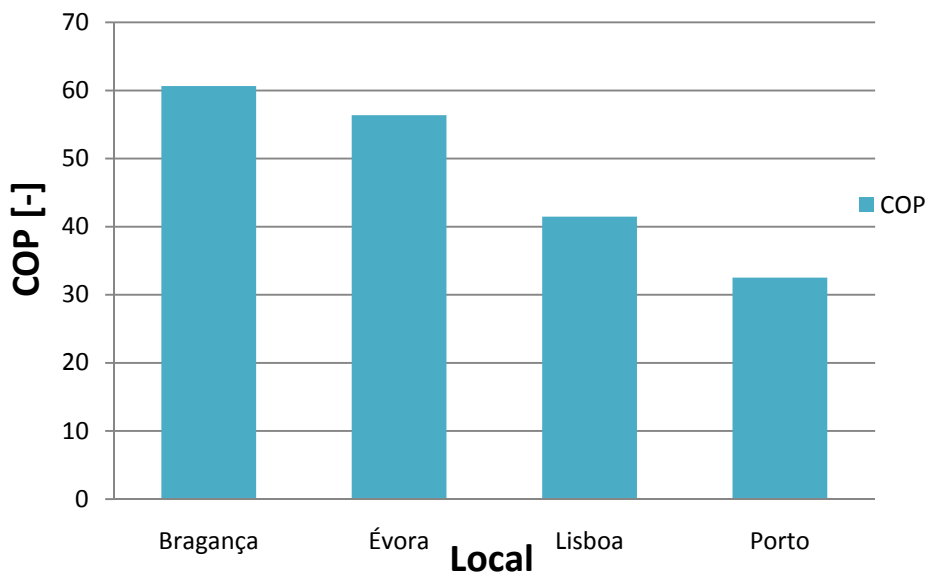


Figura 47 – COP médio de funcionamento alcançado durante a estação de arrefecimento em cada local

5.5. *Consumo de electricidade*

As diferenças entre a energia consumida, nos diferentes locais, estão directamente relacionadas com o tempo que o AEPO esteve ligado. Esta afirmação é válida porque a energia eléctrica consumida está unicamente associada à ventilação, e a potência de ventilação é igual para os diferentes locais. Pela observação do gráfico conclui-se que nas cidades mais a sul e, mais quentes o AEPO é accionado durante mais tempo.

Houve uma preocupação também em representar este resultado em unidades de quilogramas equivalentes de petróleo. Graças ao bom desempenho desta máquina o consumo de energia primária para arrefecimento situa-se, nos diferentes locais muito abaixo dos limites estabelecidos pela lei portuguesa.

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

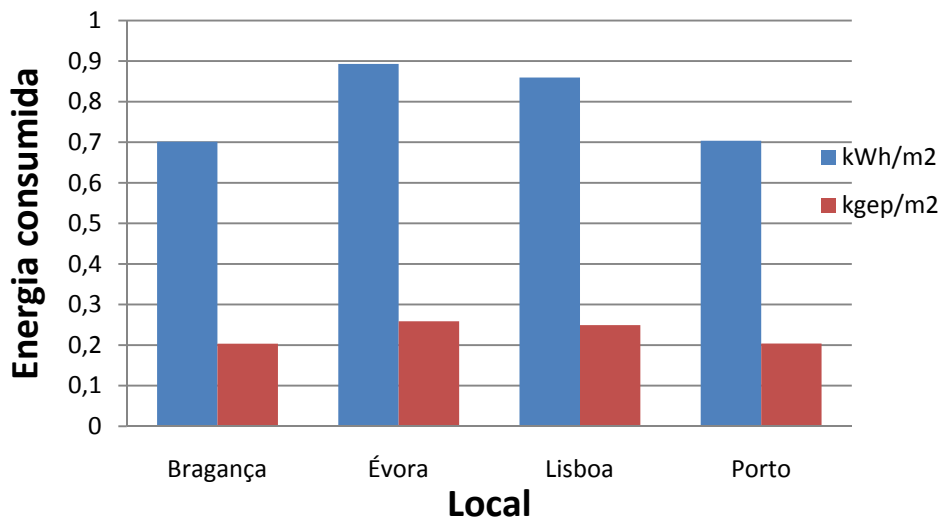


Figura 48 – Consumo energético do AEPO

5.6. Consumo de água

Embora este tipo de máquinas apenas gaste energia eléctrica para ventilação, é com água que faz o efeito de frio. Deste modo é necessário contabilizar o consumo deste bem, para que se possa obter uma ideia do seu peso, tanto a nível prático como, a nível económico. Pela análise à Figura 49, percebe-se uma tendência já conhecida, o consumo de água é maior em climas onde o ar é mais seco e mais quente. Isto acontece, porque como já foi referido quanto mais quente e mais seco for o ar, maior será a sua capacidade de absorver vapor.

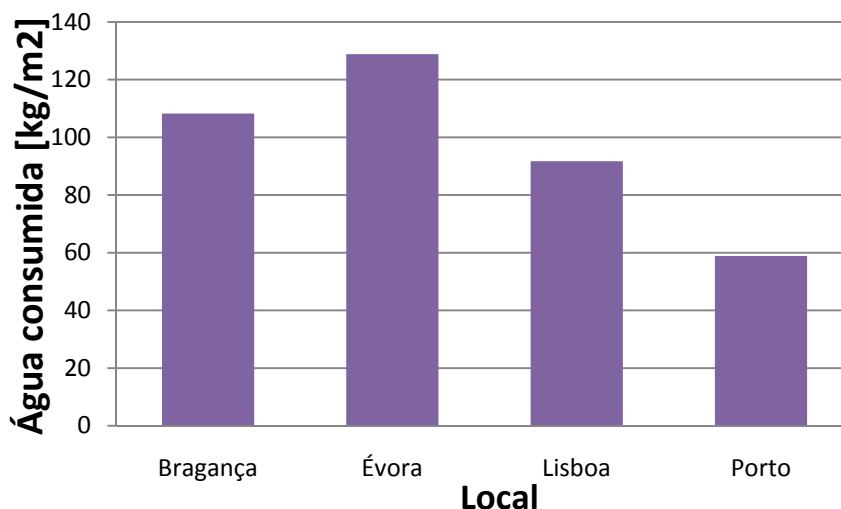


Figura 49 – Quantidade de água gasta no processo de arrefecimento

5.7. Custos de operação da máquina

Numa sociedade capitalista a palavra final sobre a aplicabilidade ou não de algum tipo de tecnologia é dada por custos financeiros que esta apresenta. Devido à dificuldade existente em, calcular os custos de produção e de manutenção de uma máquina deste género, os resultados apresentados na Figura 50 representam apenas os custos operacionais que este tipo de aparelho teria para cada local. Como seria de esperar os custos de electricidade para os diferentes locais diferem pouco. O consumo de água por sua vez, está dependente da energia removida em cada local. É interessante que, em Bragança o AEPO é ligado poucas vezes, mas mesmo assim o seu consumo é o segundo mais elevado. Percebe-se que nesta zona o AEPO consegue remover a carga de um modo mais eficiente.

Finalmente, comparando o peso de cada custo, nota-se que o maior peso destes está relacionado com custos de electricidade e assim associados à ventilação.

É possível ao se somar o custo em electricidade com o de água para cada local, obter-se o custo total de operação de um aparelho destes nos quatro meses de arrefecimento. O custo de operação de uma máquina destas, ronda no pior caso os 5,5€/mês(Évora). Os custos de operação para um sistema convencional, com um efeito similar seriam cerca de seis vezes maiores dos que os obtidos com o AEPO.

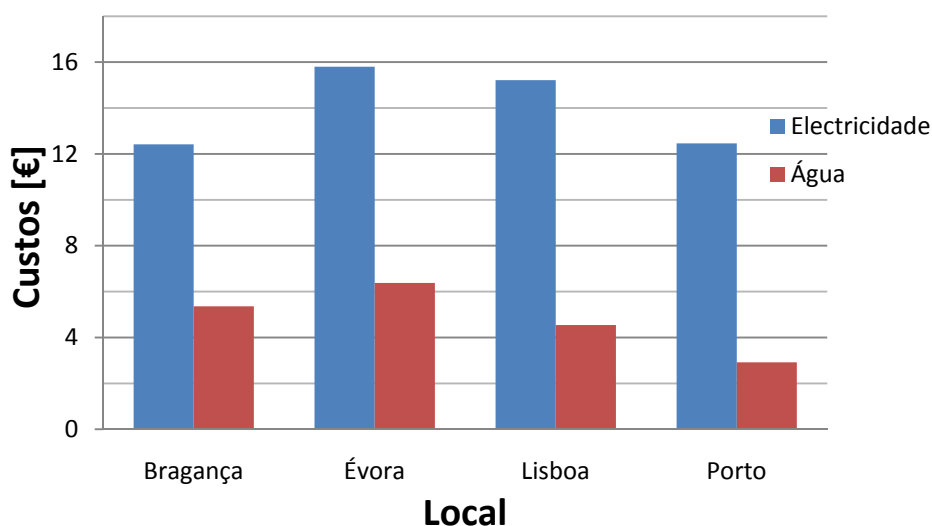


Figura 50 – Custos de operacionais do AEPO para os 4 meses

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

5.8. *Análise da frequência do conforto para cada local*

O objectivo de um sistema de climatização ambiente é o de retirar a carga gerada num espaço e assim assegurar que sejam alcançadas condições de conforto sempre que tal é necessário. Assim para que uma máquina destas tenha utilidade tem de ser capaz de promover condições ambientes adequadas sempre ou na maior parte das vezes que isso lhe é exigido.

Na Figura 51 é apresentado a azul a percentagem de tempo em que, durante as horas de ocupação, existe conforto. Na mesma figura e a vermelho é representada a percentagem de tempo no qual é atingido uma temperatura aceitável. Através da figura é possível entender para cada local qual é o parâmetro que limita mais o conforto.

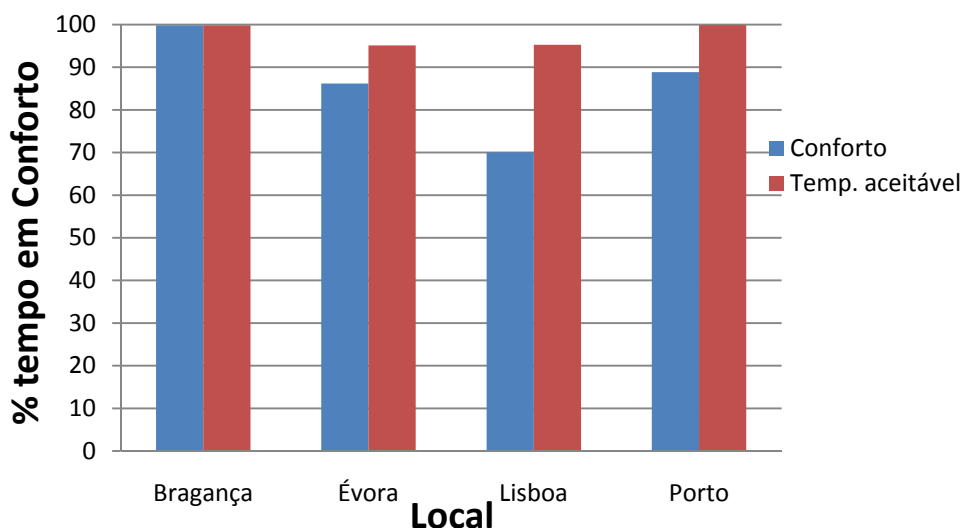


Figura 51 – Frequência de horas em que é atingido conforto e temperatura aceitável para ocupação no espaço

Da análise dos resultados, observa-se que para o clima de Bragança, o AEPO consegue cumprir o seu objectivo durante a maior parte do tempo. Nota-se que para os outros locais o AEPO já não consegue atingir as condições de conforto com tanta frequência. Destes destaca-se e, pela negativa, a percentagem de conforto, atingida em Lisboa, que é da ordem dos 70%. Todavia, como já foi referido o, AEPO não tem capacidade de ajustar a quantidade de humidade do ar inserido no espaço. Daí a importância da análise feita para apenas a temperatura aceitável. Daqui depreende-se que a humidade é a propriedade que mais limita o conforto, pois o valor de conforto térmico encontra-se acima dos 95%, em todos os locais.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES

O objectivo principal deste trabalho consistia em perceber até que ponto o clima português permite ou não, o uso de um AEPO no arrefecimento ambiente. Assim procedeu-se ao desenvolvimento de dois modelos diferentes deste tipo de arrefecedor de ar. Um dos modelos foi escolhido para criar condições de conforto num edifício, para isso teria de regular a temperatura interior, removendo as cargas térmicas deste. Após este processo, vários parâmetros foram analisados e foi possível deduzir algumas relações relevantes.

A ideia com que se terminou este trabalho é que o clima português é favorável ao uso de uma máquina que funcione pelo princípio de arrefecimento evaporativo de ponto de orvalho. Nos quatro locais onde foram feitas as simulações obtiveram-se elevadas percentagens de para a frequência de temperaturas aceitáveis.

Quanto aos custos de operação estes apresentaram-se bastante atractivos, quando comparados com os aparelhos que normalmente são usados para remover as cargas dos espaços, verificou-se que os ganhos são de 6 vezes inferiores aos custos normais. Este aspecto, é confirmado pelo consumo de energia primária para arrefecimento ter-se ficado por valores muito abaixo do limite fixado pela lei portuguesa. São assim argumentos de peso que mostram que esta opção pode não ser só mais uma alternativa às máquinas convencionais mas também a escolha mais vantajosa. Há que lembrar que a tipologia do espaço, não era a mais favorável, visto apresentar ganhos internos elevados provocados pela geração de calor por ocupação, iluminação e equipamentos. Afigura-se que para casos em que a tipologia do edifício implicasse ganhos internos menores, o mesmo aparelho poderia ser usado para climatizar um edifício de maior dimensão, ou então não seria necessária uma máquina tão grande para climatizar o mesmo volume de espaço.

Lembrando os valores obtidos no estudo paramétrico do modelo 2, antevê-se que a prestação deste no edifício e nos locais onde este foi inserido, muito provavelmente seria igualmente satisfatória. Olhando para comparação feita entre os dois modelos, prevê-se que os custos de operação deste seriam ligeiramente menores, mas ao mesmo tempo iria haver uma diminuição na percentagem de vezes em que foi atingido o conforto interior.

O modelo realizado para representar um AEPO de tubos concêntricos, dá a percepção de que esta tecnologia é ainda recente e que existem alguns aspectos que ainda se encontram

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

por desenvolver, principalmente no sentido de encontrar novas configurações para este tipo de sistemas, o que pode torná-los ainda mais promissores.

Exemplo disso é a diferença de consumo de água entre os dois modelos, conseguida em grande parte com a diminuição da razão de caudal de ar. Esta alteração provoca uma diminuição também na quantidade de ar total com que o AEPO trabalha, mostrando que existe deste modo uma possibilidade de diminuir os custos, que são já baixos. Este estudo pode tornar-se ainda mais interessante devido a vários factores como, a possibilidade do armazenamento de água das chuvas, para alimentar o AEPO assim como, também diminuir o impacto ambiental provocado pela libertação de vapor de água no exterior proveniente do canal húmido, visto este gás apresentar um peso elevado no efeito estufa [25] ou [26].

6.1. *Trabalhos futuros*

A tecnologia de arrefecer a ar até o ponto de orvalho através da evaporação de água é, muito recente abrindo assim uma perspectiva ampla de trabalhos que podem ser desenvolvidos. Algumas ideias propostas aqui, inserem-se no âmbito do trabalho que foi realizado até aqui enquanto outras apresentam-se como uma relacionadas com o tema mas numa abordagem nova e direccionadas para perguntas levantadas em direcção com a operação da máquina em si.

Um estudo de interesse relacionado com o que foi feito até aqui, consiste na realização de um estudo experimental através da construção de AEPO com fluxos em contra-corrente. Este podia ser usado para validar os resultados aqui obtidos.

Outra possibilidades seria a realização de um estudo sobre, a melhor relação entre o tamanho de um AEPO e a área que este pode tratar, tendo em conta o local, e a tipologia do edifício em que este vai operar. Oferecendo uma perspectiva de aplicabilidade mais generalizada deste tipo de máquinas.

Neste trabalho o AEPO foi ajustado para operar com uma eficiência de bolbo húmido máxima de 90%. Poderia ser analisado se esta configuração é, a que permite retirar a maior quantidade de calor do espaço, ou se até mesmo com um sistema de controlo que ajustasse a eficiência de bolbo húmido conforme a necessidade seria possível obter-se melhores resultados.

Com respeito a trabalhos que podem ser desenvolvidos, numa linha de estudo mais afastada da desenvolvida neste trabalho, destaca-se um que analisaria a possibilidade de o AEPO poder ser usado para aquecimento ou pré-aquecimento, conforme sugerido numa das patentes sobre AEPOs.

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

Com intuito de aumentar a independência climática do AEPO, poderiam ser estudadas possibilidades de diminuir a humidade do ar à entrada do AEPO como por exemplo, pelo uso de rodas dissecantes.

Os valores obtidos para o modelo 2, mostram que é possível realizar melhorias no desempenho deste tipo de máquinas. Seria oportuno a realização de um estudo de geometrias ou configurações diferentes para estas máquinas. Como por exemplo, um modelo de tubos concêntricos onde não fosse usado o tubo exterior, ou um modelo de placas planas com orifícios entre o canal seco e canal húmido.

REFERÊNCIAS

- [1] *Eficiência Energética nos Edifícios*: Direcção Geral de Energia - Ministério da Economia, Fevereiro 2002.
- [2] *Livro Verde sobre a eficiência energética*. Bruxelas: Comissão Europeia, 2005.
- [3] V. Maitsoenko, L. E. Gillan, T. L. Heaton, and A. D. Gillan, "Method and plate apparatus for dew point evaporative cooler," in *United States Patent*. vol. 6581402, 2003.
- [4] "http://www.idalex.com/technology/how_it_works_-_engineering_perspective.htm."
- [5] X. Zhao, "Numerical study of a novel counter-flow heat and mass exchanger for dew point evaporative cooling," *Applied Thermal Engineering*, p. 10, 2008.
- [6] J. L. Peterson, "An effectiveness model for indirect evaporative coolers," *ASHRAE Transactions*.
- [7] J. L. Peterson and B. D. Hunn, "Experimental performance of an indirect evaporative cooler," *ASHRAE Transactions*, 1992.
- [8] S. A. Klein and F. L. Alvarado, "Equation Engineering Solver," F.-C. Software, Ed. Middleton, 1992-08.
- [9] G. F. Nellis and S. A. Klein, "unpublished work on correlating Nusselt numbers and friction factors for various convective geometries," 2006.
- [10] R. K. Shah and A. L. London, "Laminar Flow Forced Convection in Ducts," *Academic Press*, 1978
- [11] T. H. Chilton and A. P. Colburn, "Mass Transfer (Absorption) Coefficients-Prediction from Data on Heat Transfer and Fluid Friction," *Industrial and Engineering Chemistry*, 1934.
- [12] D. d. W. F. Incropera, *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora, S.A., 2003.
- [13] X. Zhao, S. Liu, and S. B. Riffat, "Comparative study of heat and mass exchanging materials for indirect evaporative cooling systems," *Building and Environment*, in press.
- [14] A. Oliveira, *Permutadores de Calor*: FEUP Edições, 2003.
- [15] F. M. White, *Mecânica dos fluidos*. Rio de Janeiro: McGraw-Hill Interamericana do Brasil, 2002.
- [16] A. J. W. Smith, *Pressure losses in ducted flows*. London: ButterWorths, 1971.
- [17] Coolerado, "Coolerado R600 Brochure," C. Corporation, Ed., 2006.

Estudo da aplicabilidade de um arrefecedor a ar de ponto de orvalho a climas portugueses

[18] "SolTerm - Análise de Desempenho de Sistemas Solares Térmicos e Fotovoltaicos," INETI, Ed., 2006.

[19] "Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE) - Decreto Lei nº 80/2006 de 4 de Abril. 2006, Ministério das Obras Públicas Transportes e Comunicações (MOPTC): Portugal ".

[20] C. A. P. d. Santos and L. Matias, *Coefficientes de transmissão térmica de elementos da envolvente dos edifícios*, LNEC ed. Lisboa, 2007.

[21] "Regulamento dos Sistemas Energéticos de Climatização dos Edifícios (RSECE) - Decreto-Lei nº 79/2006 de 4 de Abril. 2006, Ministério das Obras Públicas Transportes e Comunicações (MOPTC): Portugal."

[22] "ASHRAE Standard 55: Thermal Environmental conditions for human occupancy. 2004," American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers (ASHRAE).

[23]

["http://www.edp.pt/EDPI/Internet/PT/Group/Clients/free_market/Prices/default.htm."](http://www.edp.pt/EDPI/Internet/PT/Group/Clients/free_market/Prices/default.htm)

[24] ["http://www.aguasgaia.eu/pt/dados.php?ref=dist_tarifario."](http://www.aguasgaia.eu/pt/dados.php?ref=dist_tarifario)

[25] T. Flannery, *Os senhores do tempo: O impacto do homem nas alterações climáticas e no futuro do planeta*: Editorial Presença, 2005.

[26] S. R. Weart, *The Discovery of Global Warming; New Histories of Science Technology and Medicine*. Massachusetts: Harvard University Press., 2003.