

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE  
PROTÓTIPO DE SECADOR SOLAR PASSIVO PARA  
TRATAMENTO DE EFLUENTE DE PROCESSO DE  
DESSALINIZAÇÃO POR DESTILAÇÃO MULTI-EFEITO**

**J. Mendes, P. Horta**

INETI-Instituto Nacional de Engenharia Tecnologia e Inovação IP, Departamento de  
Energias Renováveis, Estrada do Paço do Lumiar, 22, 1649-038 Lisboa, Portugal

farinha.mendes @ineti.pt, pedro.horta @ineti.pt

**M.Collares Pereira**

AO SOL Energias Renováveis Lda., Parque Industrial do Porto Alto, Sesmária Limpa,  
2135-402 Samora Correia, Portugal

mpicp @aosol.pt

**N.Korovessis**

Hellenic Saltworks SA, Asklipiou 1, 10679 Atenas, Grécia

nkor@hol.gr

**Resumo**

*O projecto AQUASOL-Enhanced Zero Discharge Seawater Desalination using Hybrid Solar Technology (EVK1-CT2001-00102) teve como principais objectivos a melhoria do desempenho económico e a minimização dos impactes ambientais associados a um processo de dessalinização por Destilação Multi-Efeito (MED)(Blanco et al, 2002).*

*No âmbito do projecto, decorre o estudo de um secador solar passivo utilizado no tratamento do efluente produzido no processo de dessalinização, salmoura, através da sua concentração e/ou através da produção directa de sal a partir do efluente. Nesta etapa adicional do processo de dessalinização foi considerada não só a maior concentração do efluente relativamente à concentração da água marinha utilizada no processo MED, mas também a sua possível integração numa salina tradicional, com o potencial de substituir etapas intermédias da evaporação com vantagem face ao processo convencional de produção de sal marinho.*

*Após um estudo das especificidades da produção de sal em Salinas tradicionais e do processo de evaporação de uma camada de salmoura, a construção e avaliação de cinco configurações distintas de um protótipo preliminar de secador solar passivo, permitiu o desenho final de um secador para a recuperação de sal a partir do efluente do processo MED (Collares Pereira et al, 2004), construído numa salina industrial na ilha de Lesvos (Grécia) (Collares Pereira et al, 2005). Neste artigo serão apresentados os primeiros resultados de operação do protótipo, bem como uma avaliação inicial do seu desempenho.*

## 1. Introdução

A crescente exploração dos recursos aquíferos em décadas recentes, tem resultado em situações de stress hídrico ou escassez de água em muitas regiões europeias e mesmo à escala mundial. Frequentemente este problema surge em regiões onde se verifica uma abundância de recursos de água marinha e de energia solar, podendo a exploração destes recursos num processo de dessalinização traduzir-se numa solução sustentável, a médio prazo. Dada a proximidade, nestas zonas, de ecossistemas marinhos sensíveis, especial atenção deve ser dada à rejeição do efluente do processo de dessalinização.

No âmbito de projecto AQUASOL-Enhanced Zero Discharge Seawater Desalination using Hybrid Solar Technology (EVK1-CT2001-00102), a energia solar assumiu um papel de destaque na prossecução de uma melhoria do desempenho económico e ambiental de um processo MED, principal objectivo do projecto, quer como fonte de calor para o processo de destilação, mas também no desenvolvimento de um secador solar passivo para o tratamento do efluente do processo.

No presente artigo é abordado o tratamento do efluente do processo de dessalinização. Após desenvolvimento de uma nova concepção para um secador solar passivo, baseado no estudo de um modelo numérico para simulação da operação do secador, foi construído e testado um protótipo preliminar, permitindo a observação dos resultados de evaporação e o estudo de diferentes estratégias de optimização (Collares Pereira et al, 2004). A conjugação destas estratégias com as especificidades do processo de concentração da salmoura, tendo em vista a sua introdução numa salina convencional, num estágio mais avançado da evaporação, levaram à concepção do protótipo final do secador solar, edificado em Lesvos (Grécia) para monitorização em condições reais de operação (Collares Pereira et al, 2005).

O artigo encontra-se organizado do seguinte modo: descrição do protótipo; resultados preliminares de operação do protótipo; análise aos resultados obtidos; conclusões sobre o estado actual dos trabalhos.

## 2. O protótipo final do Secador Solar Passivo

### 2.1 Concepção

A concepção do protótipo final teve por base as estratégias de optimização identificadas no estudo de um protótipo preliminar do secador (Collares Pereira et al, 2004), assentes no rebaixamento do canal de evaporação, promovendo um regime de maiores velocidades do escoamento de ar na interface salmoura-ar.

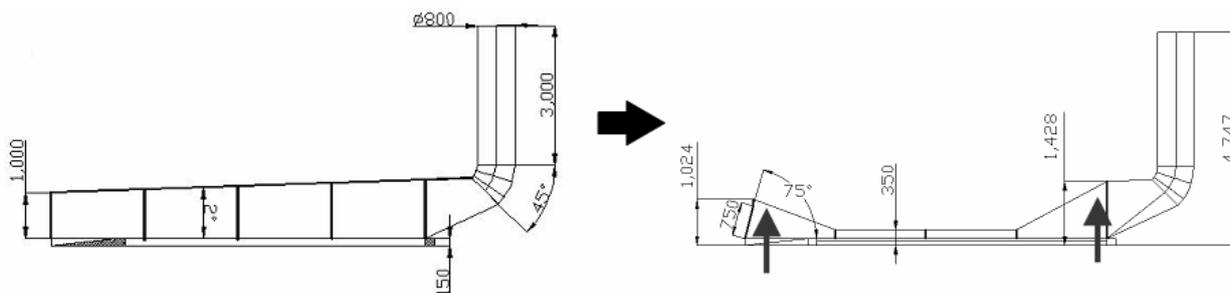
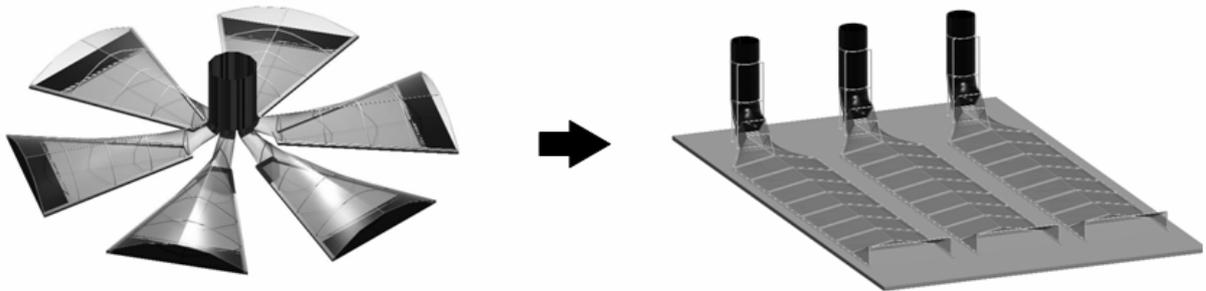


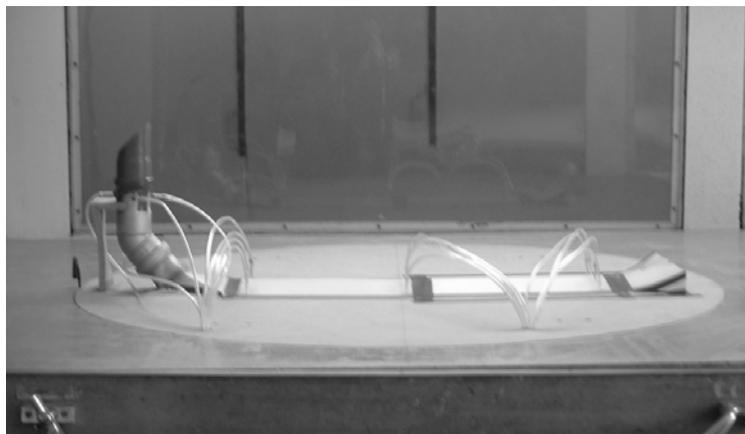
Figura 1 – Vista lateral das configurações inicial e final do canal de evaporação no protótipo preliminar

As especificidades do processo de concentração da salmoura levaram a uma alteração da concepção inicial do protótipo, baseada na ligação de seis canais de evaporação convergentes a uma chaminé solar central, para uma concepção baseada na construção de módulos canal de evaporação/chaminé independentes, permitindo a existência de condições de evaporação semelhantes em todos a área de evaporação (Collares Pereira et al, 2005).



**Figura 2 – Vista simulada das concepções inicial e final do protótipo de secador solar**

As alterações introduzidas na concepção do protótipo foram alvo de um ensaio em túnel de vento. Neste ensaio, com um modelo da nova configuração do secador, foi possível identificar uma melhoria do desempenho do secador por via da introdução de alterações na configuração do módulo de entrada no canal de evaporação, bem como por via da adopção de uma barreira auto-orientável no topo da chaminé.



**Figura 3 – Ensaio em túnel de vento do modelo de secador com módulo de entrada otimizado e com barreira orientada na chaminé**

## ***2.2 Protótipo final***

O protótipo final, erigido em Lesvos (Grécia) para monitorização em condições reais de concentração de salmoura, consiste em três módulos de evaporação, com uma área de evaporação unitária de 65 m<sup>2</sup>, orientados na direcção dos ventos dominantes. Nestes módulos foi adoptado, de origem, o módulo de entrada optimizado. Nesta fase não foi instalada, no topo das chaminés solares, a barreira auto-orientável estudada no ensaio em túnel de vento do modelo do secador.

Foi construído, no mesmo local, um tanque de evaporação aberto (descoberto) com a mesma configuração e dimensões dos existentes no interior de cada módulo de secador solar, como forma de comparar os resultados de evaporação do protótipo com os resultados obtidos no processo de evaporação tradicional.



Figura 4 – Protótipo final do secador solar em Lesvos, Grécia

### 2.3 Monitorização

Na monitorização do protótipo são registados todos os parâmetros relevantes para a avaliação do seu desempenho, nomeadamente:

- **as condições ambientais exteriores** (temperatura ambiente; humidade relativa; radiação global no plano horizontal; a velocidade e direcção do vento à altura da chaminé (~5 m); a temperatura do solo 20 cm abaixo do tanque de evaporação),
- **as condições ambientais e as condições da salmoura no interior do canal de evaporação** (temperatura do ar a jusante do módulo de entrada (pré-aquecedor); temperatura do ar a meio-comprimento do canal de evaporação; temperatura do ar no final do canal de evaporação; temperatura do ar a meio-comprimento da chaminé solar; temperatura do ar na secção de saída da chaminé solar; humidade relativa no final do canal de evaporação; temperatura da salmoura no fundo e à superfície do tanque de evaporação; nível da salmoura no tanque de evaporação; temperatura da parede Sul da chaminé solar; velocidade do escoamento interior no canal de evaporação e na chaminé solar),
- bem como as **condições da salmoura em tanque de evaporação aberto** (temperatura da salmoura no fundo e à superfície do tanque de evaporação; nível da salmoura no tanque de evaporação).

Refira-se que o posicionamento dos anemómetros utilizados na medição da velocidade do escoamento no interior do secador (canal de evaporação e chaminé solar) foi determinado tendo em conta a medição aproximada da velocidade média do escoamento no perfil de velocidades estimado para cada uma das secções.

### 3. Resultados preliminares de operação do protótipo

Os resultados apresentados no presente artigo referem-se a um período inicial de monitorização do protótipo, compreendido entre 20 de Maio e 17 de Julho, ao longo do qual foi possível recolher dados climáticos de 36 dias completos e dados de evaporação de 18 dias completos.

#### 3.1 Resultados de evaporação

Na tabela 1 sumarizam-se os resultados de evaporação obtidos ao longo do período de monitorização reportado.

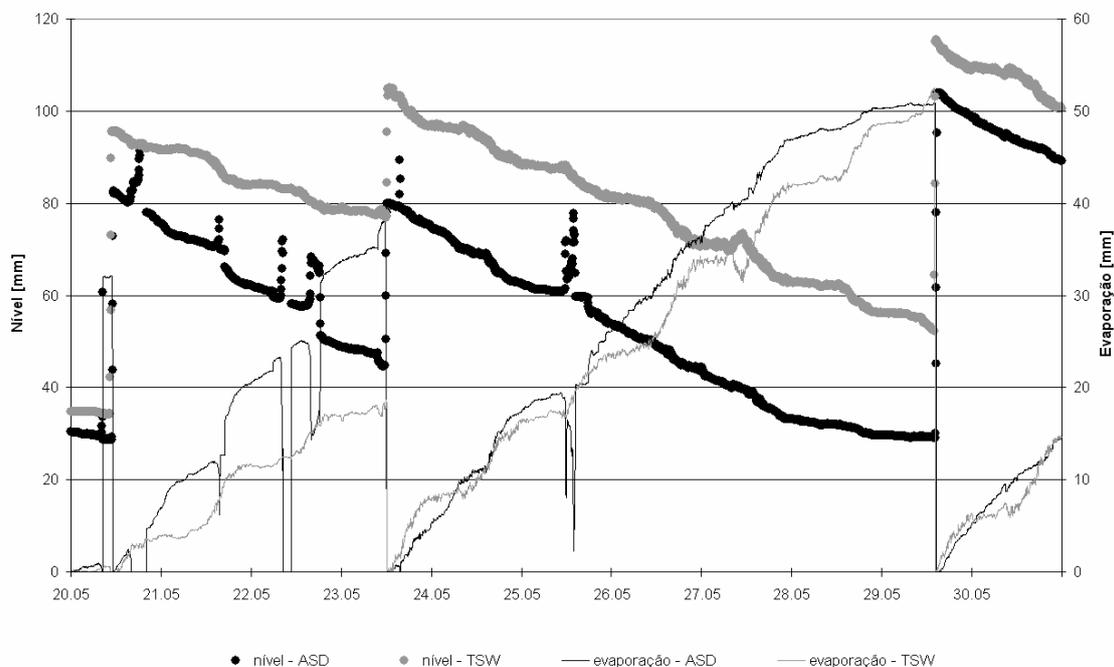
**Tabela 1 – Resultados de evaporação no protótipo de secador solar (ASD) e no tanque de evaporação aberto (TSW)**

Período	Dias completos	Evaporação total [mm]		Evaporação média diária [mm/dia]	
		ASD	TSW	ASD	TSW
20.Mai - 30.Mai	11	103.4	85.9	9.4	7.8
11.Jul - 17.Jul *	7	64.2	71.4	9.2	10.2
<b>TOTAL</b>	<b>18</b>	<b>167.6</b>	<b>157.3</b>	<b>9.3</b>	<b>8.7</b>

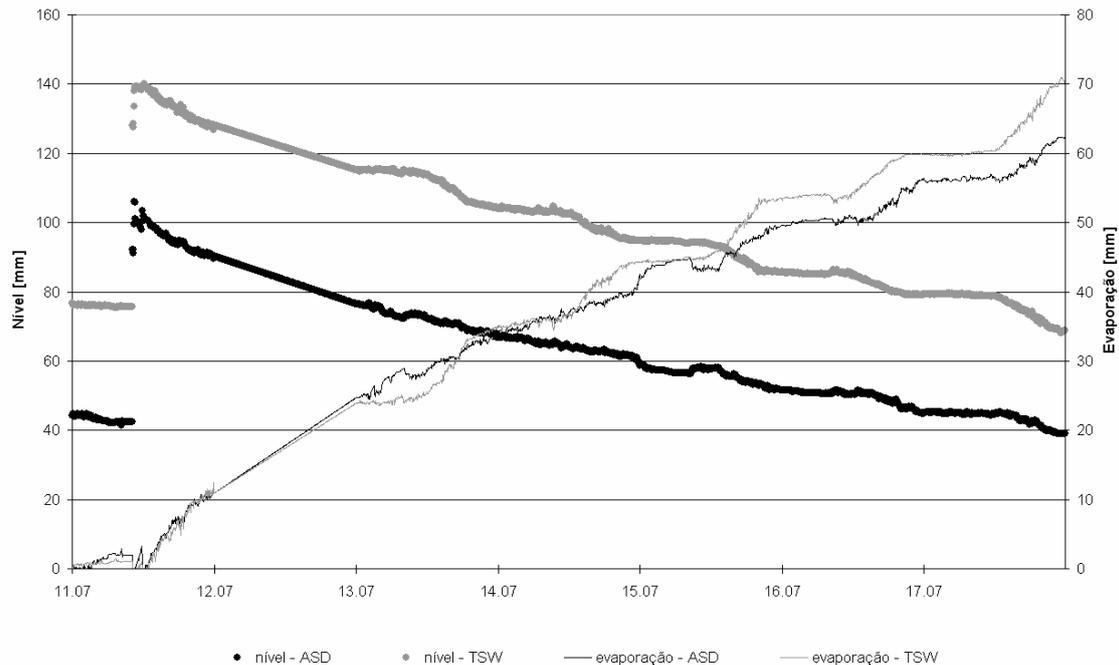
\* dados em falta para 12 de Julho irrelevantes para o resultado apresentado

Estes resultados foram obtidos para condições de salinidade iniciais semelhantes em ambos os tanques de evaporação: secador solar (ASD) e tanque aberto (TSW).

A evolução registada para a evaporação em ambos os tanques está de acordo com as figuras 4 e 5, para cada um dos períodos reportados.



**Figura 5 – Evolução da evaporação no período compreendido entre 20 e 30 de Maio**



**Figura 6 – Evolução da evaporação no período compreendido entre 11 e 17 de Julho**

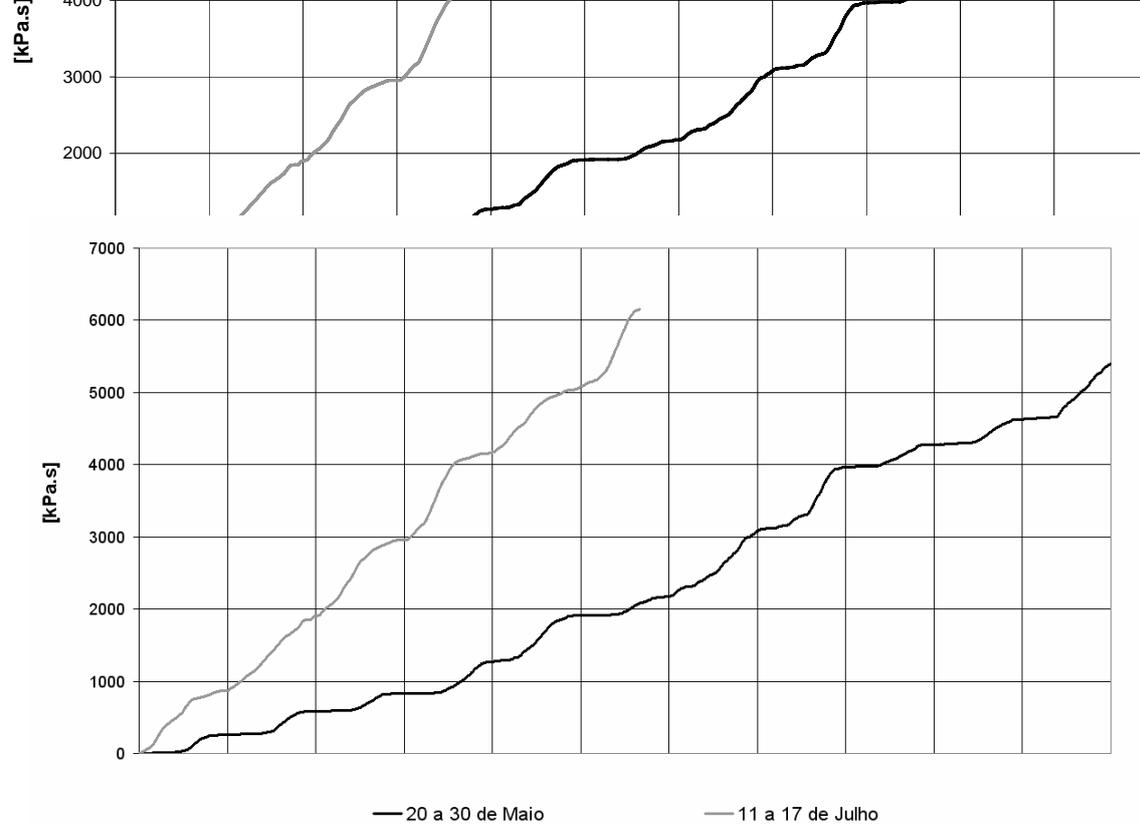
### 3.2 Dinâmica do escoamento interior

A velocidade do escoamento no interior do secador depende não só de um gradiente de densidades do ar e de cotas entre as secções de entrada e saída do secador (Corvalan, 1992), mas também das condições do escoamento exterior, o que levou à adopção de um parâmetro indicador da força motriz do escoamento interior, traduzindo não só a influência da irradiação (resultando num gradiente de densidade do ar), mas também a influência do escoamento exterior, traduzida num diferencial de pressões estática e dinâmica entre a entrada no canal de evaporação e a saída da chaminé solar (Collares Pereira et al, 2004). A contabilização deste parâmetro decorre da aplicação da expressão:

$$\Delta P_{df} = (\rho_{in} - \rho_{out})gh + \frac{1}{2} \rho_{in} u_{inlet}(a)^2 + \frac{1}{2} \rho_{in} [u_{ext}(a)^2 - u_{ext}(b)^2] \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

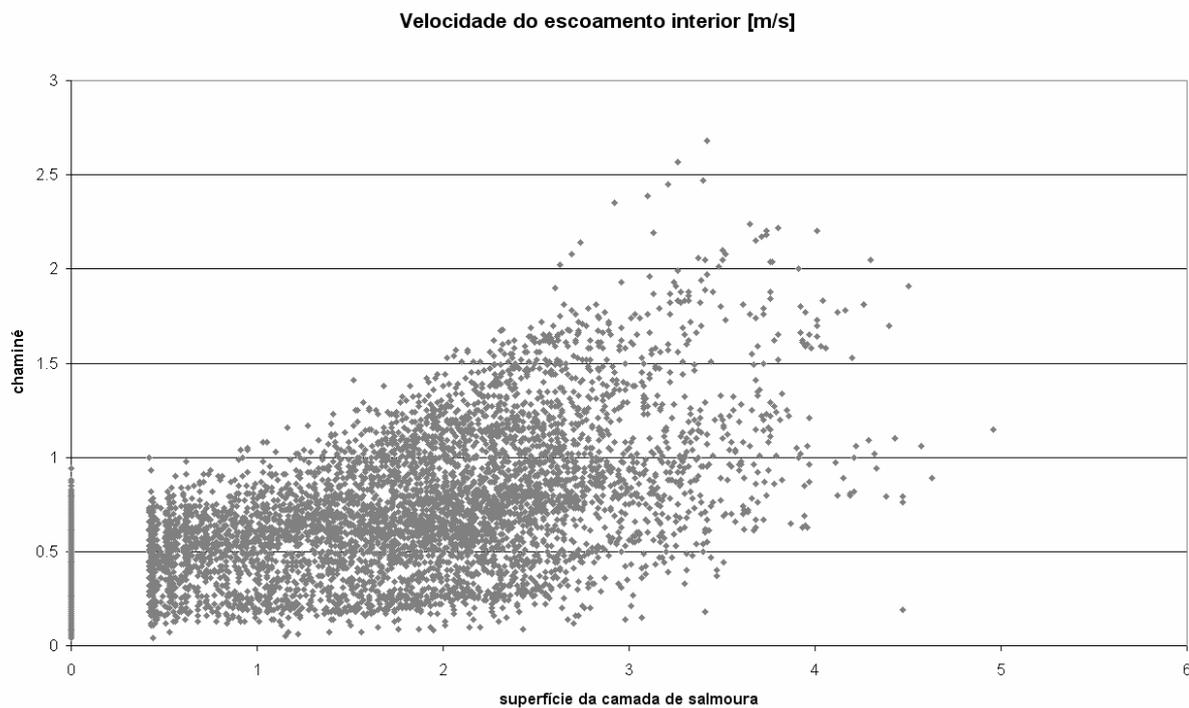
onde in e out se refere às condições do ar à entrada do secador e à saída da chaminé, inlet e ext se refere às condições de velocidade do escoamento na entrada do secador e no exterior, respectivamente, e (a) e (b) se refere à cota a que é tomada a velocidade do escoamento exterior, do canal de evaporação ou do topo da chaminé solar, respectivamente.

Na figura 7 apresenta-se a evolução do valor acumulado da força motriz ao longo dos dois períodos de monitorização de resultados de evaporação.



**Figura 7 – Evolução dos valores acumulados de força motriz do escoamento interior**

Na figura 8 apresentam-se os valores de velocidade do escoamento interior na chaminé solar em função dos valores de velocidade do escoamento obtidos sobre a camada de salmoura, no interior do canal de evaporação.



**Figura 8 – Velocidade do escoamento interior na chaminé solar em função da velocidade do escoamento interior sobre a camada de salmoura**

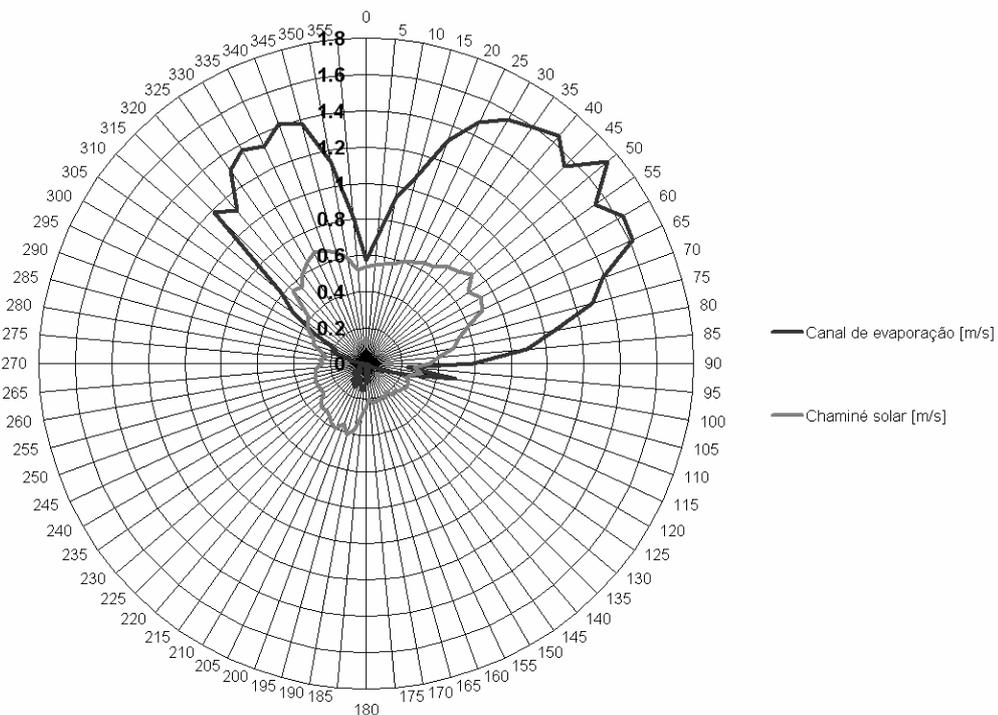
#### 4. Análise de resultados

Os resultados obtidos neste período de monitorização inicial permitem, essencialmente, uma avaliação preliminar das condições do escoamento no interior do secador. Os resultados obtidos para a evaporação não permitem, para já, uma avaliação do desempenho do secador, por falta de representatividade do período face a uma operação anual.

A análise dos parâmetros relativos ao escoamento interior ao secador permite identificar a existência de condições de recirculação do escoamento na transição canal de evaporação / chaminé.

De facto, e da observação do gráfico da figura 8, pode concluir-se que, ao contrário do que a geometria de secção constante adoptada na concepção do protótipo poderia levar a supor, os valores de velocidade na chaminé e no canal de evaporação não são idênticos.

Na figura 9 apresentam-se os valores médios da velocidade do escoamento interior observados na chaminé solar e no canal de evaporação em função da direcção do escoamento exterior (os valores médios obtidos para o canal de evaporação estão afectados por um valor mínimo de medição de 0,35 m/s no anemómetro utilizado naquela secção).



**Figura 9 – Valores médios da velocidade do escoamento interior observados na chaminé solar e no canal de evaporação em função da direcção do escoamento exterior**

Podem observar-se valores superiores de velocidade média interior para os azimutes mais próximos da direcção Norte (0°), em consonância com a orientação do protótipo.

Verifica-se que a semelhança de velocidades entre as duas secções do secador (canal de evaporação / chaminé) ocorre para valores mais baixos da velocidade média interior no canal de evaporação, aumentando a diferença de velocidades entre as duas secções para valores mais elevados.

Este fenómeno foi, de resto, visualizado in situ através da utilização de flutuadores sobre a camada de salmoura.

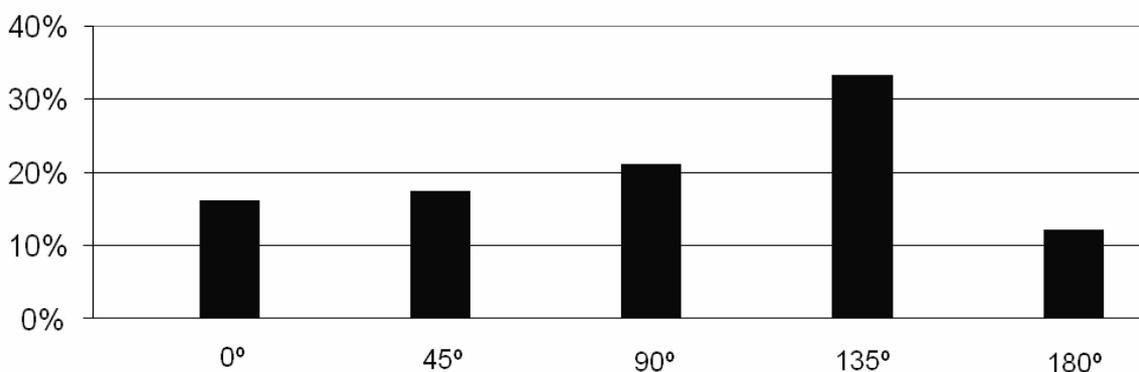
## 5. Conclusões

Os resultados obtidos no período de monitorização reportado permitem, essencialmente, uma avaliação preliminar das condições do escoamento no interior do secador. Os resultados obtidos para a evaporação não permitem, para já, uma avaliação do desempenho do secador, por falta de representatividade do período face a uma operação anual.

A análise dos parâmetros relativos á dinâmica do escoamento interior no protótipo permitem concluir pela existência de condições para a ocorrência de recirculação do escoamento perante escoamentos exteriores frontais. Estas condições são tanto mais evidentes quanto maiores os valores da velocidade do escoamento exterior.

Este fenómeno traduz-se numa penalização das condições de evaporação, porquanto perfigura uma perda de carga e origina uma diminuição da velocidade média do escoamento interior, para além de uma diminuição do diferencial de pressões de saturação entre a superfície da salmoura e o escoamento de ar, força motriz da evaporação, já que o ar húmido não é removido.

A ocorrência deste fenómeno evidencia o interesse na adopção de barreiras auto-orientáveis no topo das chaminés solares. De facto, a adopção deste acessório nos ensaios efectuados, em túnel de vento, num modelo do secador, traduziu-se em aumentos percentuais do escoamento interior entre 17% e 22%, em condições de escoamento no semi-hemisfério frontal (Collares Pereira et al, 2005), como ilustrado na figura 10.



**Figura 10 – Aumento percentual de velocidade média no canal de evaporação após adopção de acessório na chaminé solar, em função do ângulo de ataque do escoamento exterior**

Uma avaliação do desempenho do secador ao nível da evaporação da salmoura, está dependente da obtenção de dados de monitorização ao longo de um período mais representativo do ciclo de operação anual do protótipo.

A prossecução da monitorização do desempenho do protótipo permitirá avaliar a influência das condições climáticas sobre os resultados de evaporação, uma comparação de resultados face à evaporação em salina tradicional e, finalmente, uma avaliação da adequabilidade do protótipo em função das condições climáticas esperadas para uma determinada localização.

## REFERÊNCIAS

Blanco J. et al. (2002), “Advanced Multi-Effect Solar Desalination Technology: The PSA Experience”, 11th Int. Symposium on Concentrated Solar Power and Chemical Energy Technologies, Zurich, Switzerland

Collares-Pereira, M. et al (2004) “Primeiros resultados experimentais do Secador Solar Passivo para Produção de Sal e Tratamento de Efluente de Dessalinização”, Proceedings of CIES2004 - XII Congreso Ibérico y VII Ibero Americano de Energía Solar, September 14-18, Vigo, Spain

Collares-Pereira, M. et al (2005) “Final Design of an Advanced Solar Dryer for Salt recovery from Brine Effluent of a Desalination MED Plant”, Proceedings of 9th CEST Conference, Rhodes, Greece

Corvalan, R. et al (1992) "Circulacion de Aire In Ingenieria del secado solar" (Solar Drying Technology), Subprograma VI: Nuevas Fuentes y Conservación de la Energia, CYTED-D Programa de Ciencia y Tecnologia Para el Desarrollo V Centenario