

Uso de energía solar térmica para refrigeración y riego de invernaderos

Dr. Guillermo Zaragoza

Solar Desalination

CIEMAT-Plataforma Solar de Almería

e-mail: guillermo.zaragoza@psa.es



MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD

Ciemat

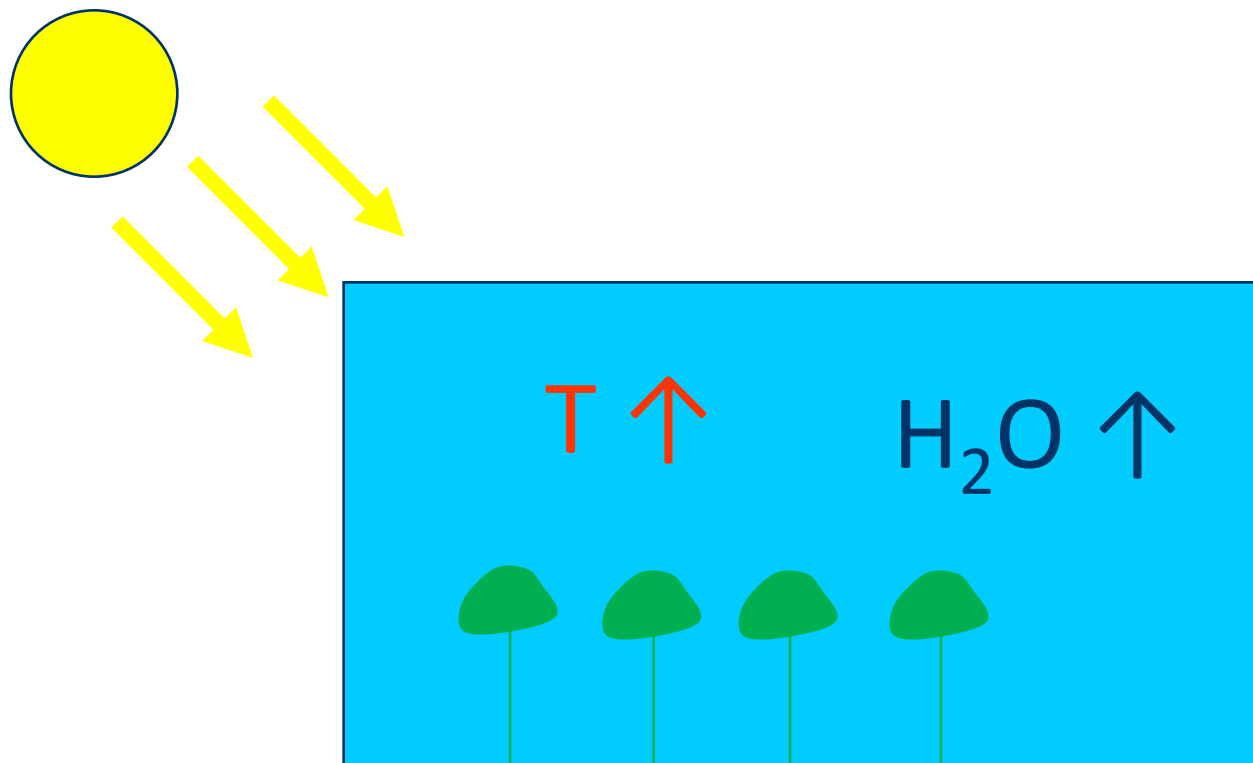
Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas



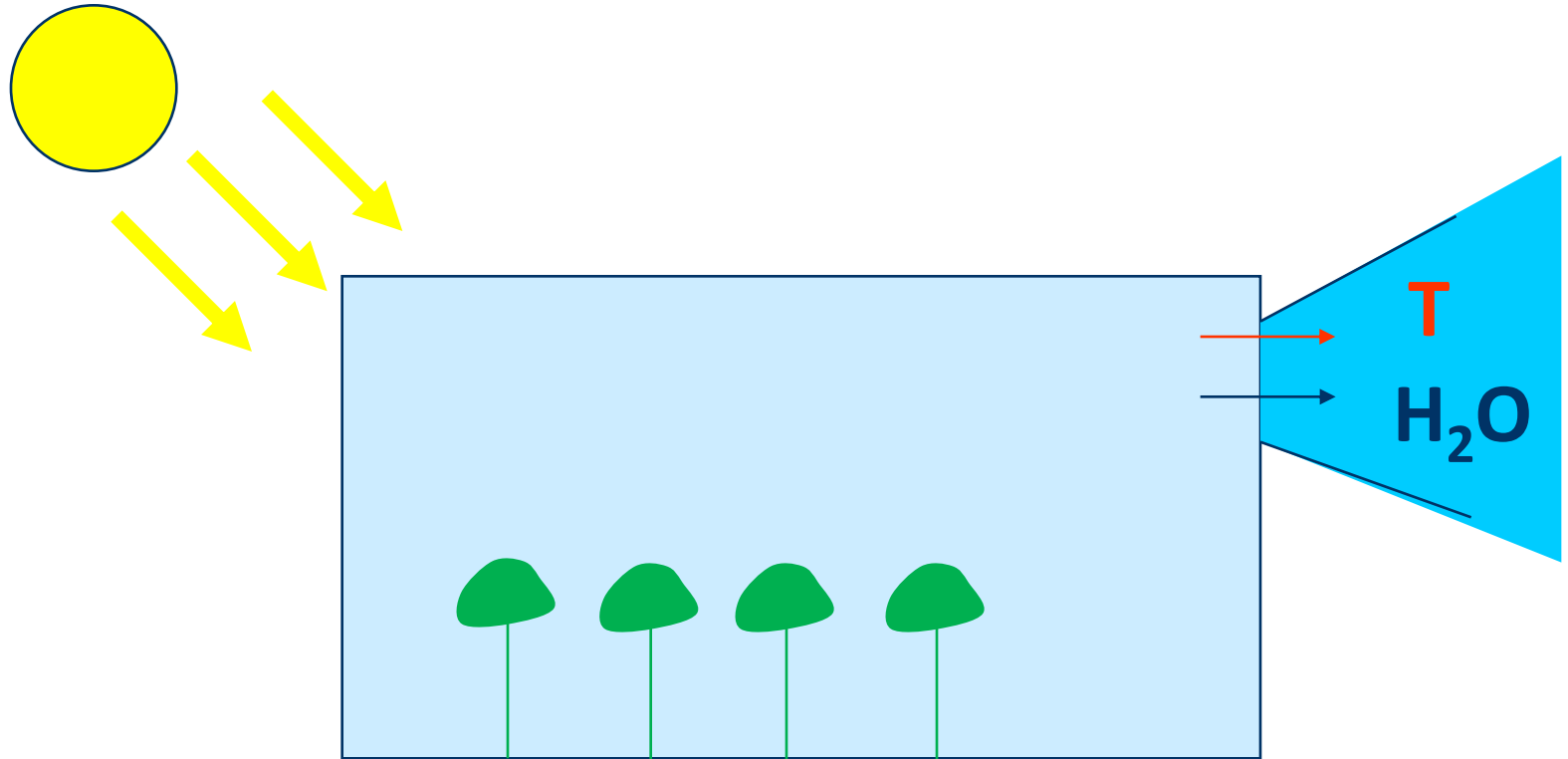
Índice

- Introducción: invernaderos cerrando el ciclo del agua
- Uso de desecantes líquidos para refrigeración: experiencias en la Universidad de Aston
- Aplicación de destilación por membranas solar para la regeneración de desecantes líquidos: experiencias en la PSA

Introducción



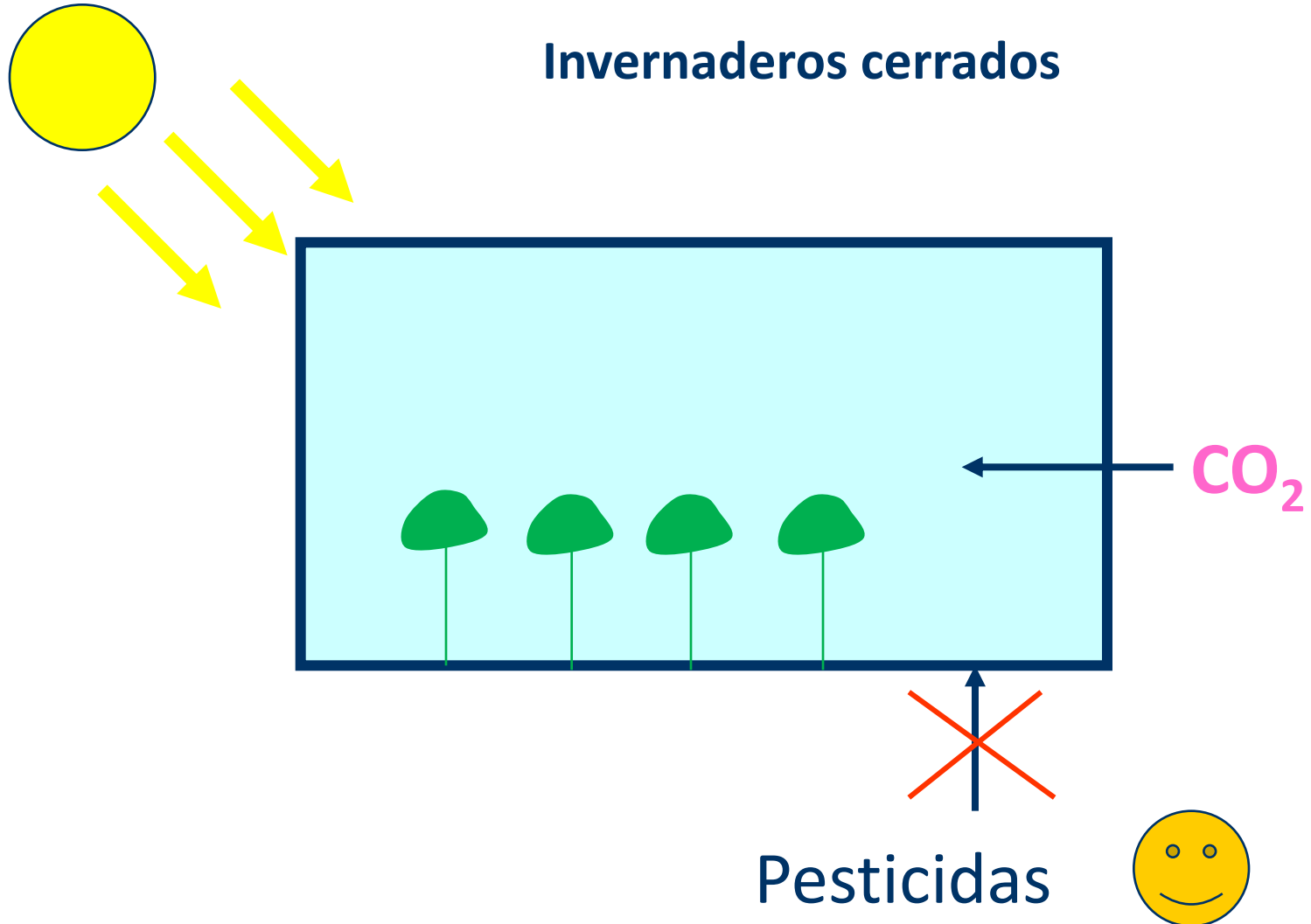
Introducción



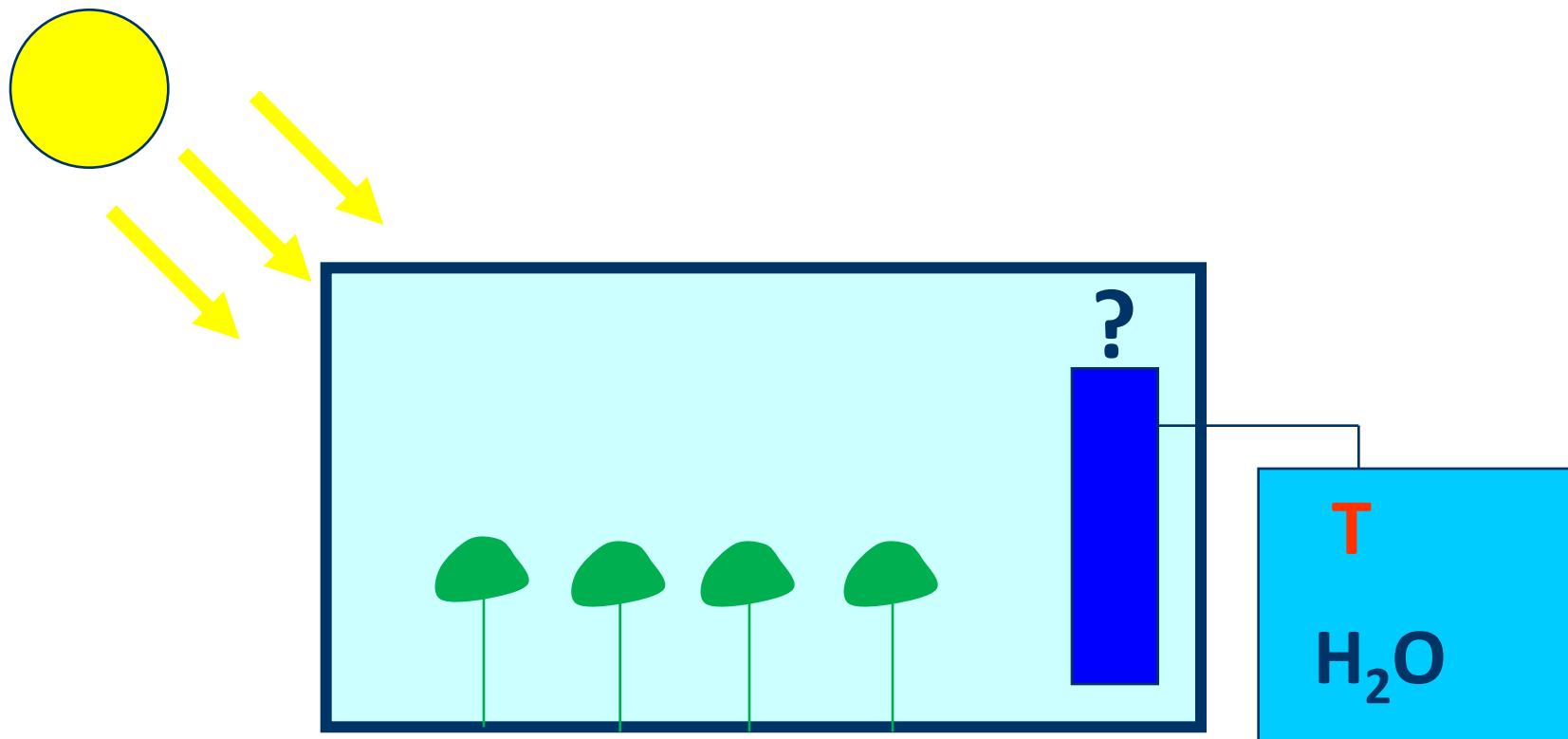
**La necesidad de evacuar calor y humedad suele ser contraria
→ pérdida de energía térmica y/o agua**

Introducción

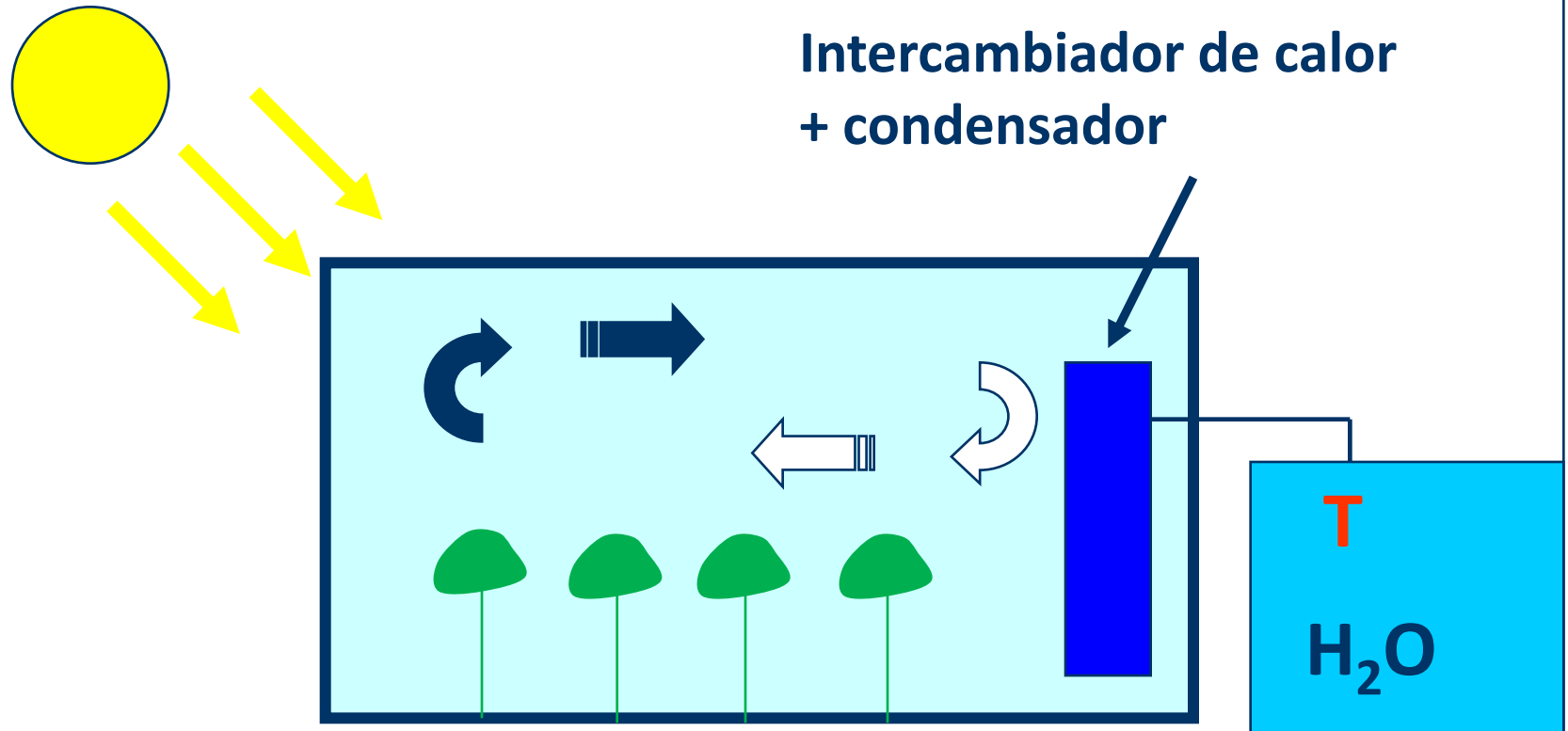
Invernaderos cerrados



Introducción



Introducción



→ necesidad de fuente de frío

Invernaderos cerrados en Holanda

Movimiento forzado del aire

Fuente de frío (el acuífero superficial)

Bomba de calor (gas natural)



Invernaderos cerrados en Holanda



Invernaderos cerrados en Holanda

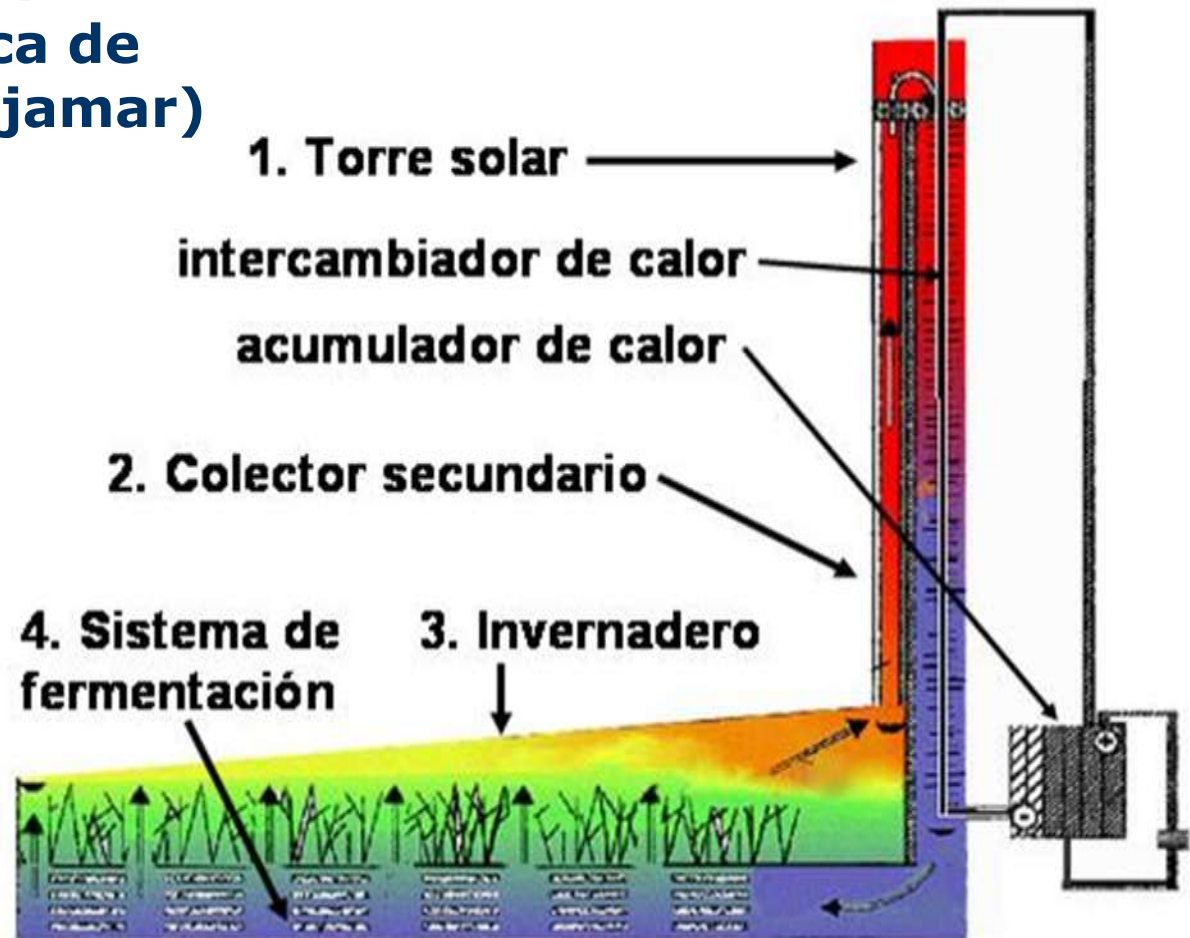


Disipar el calor con un compresor de COP=4 consume unos 365.000 kWh/año de electricidad, emitiendo 130 toneladas de CO₂ para cultivar < 50 toneladas de cultivo!



Colector solar a base de aire húmedo

**Proyecto Watergy
(Universidad Técnica de
Berlín y Fundación Cajamar)**



Invernaderos cerrados en Almería

Watergy prototipo 1 : PT1

*Circulación de aire **frío**
y **caliente** por
convección natural*

Condensación al enfriarse el aire en el
intercambiador de calor





Invernaderos cerrados en Almería

Estación Experimental de Cajamar

“Las Palmerillas” El Ejido



Invernaderos cerrados en Almería

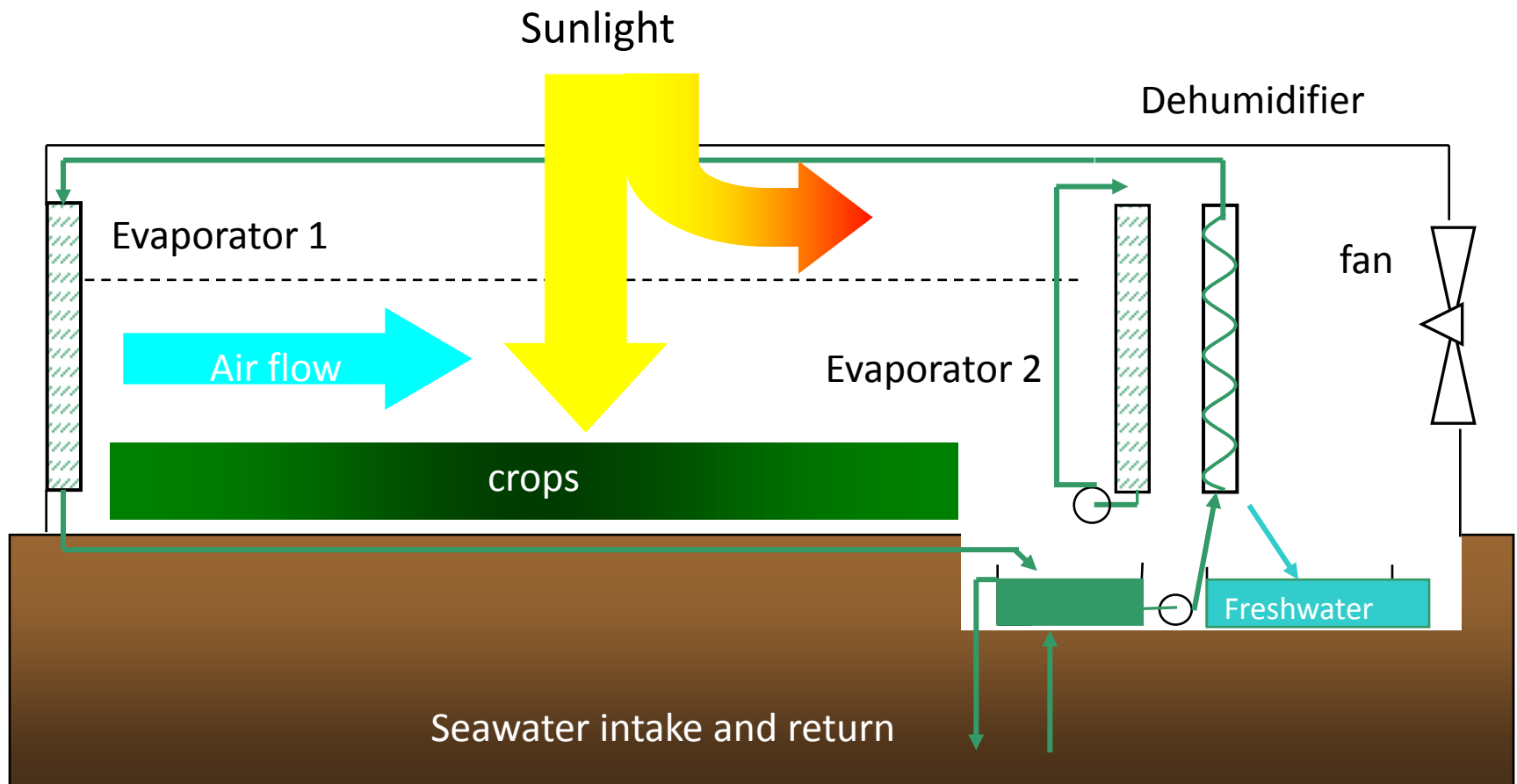
**Watergy
prototipo 1 : PT1**

Producción:
40% mayor

Eficiencia en el uso
de agua 10 veces
mayor (recirculación
de la condensación
recogida)

Seawater greenhouse

Refrigeración evaporativa combinada con desalación



Seawater greenhouse[©] Tenerife (1994)



Seawater greenhouse[©] Oman (2004)



Sundrop Farms Port Augusta (AUS) (2011)



Sahara Forest Project ¿Jordania? (2017)





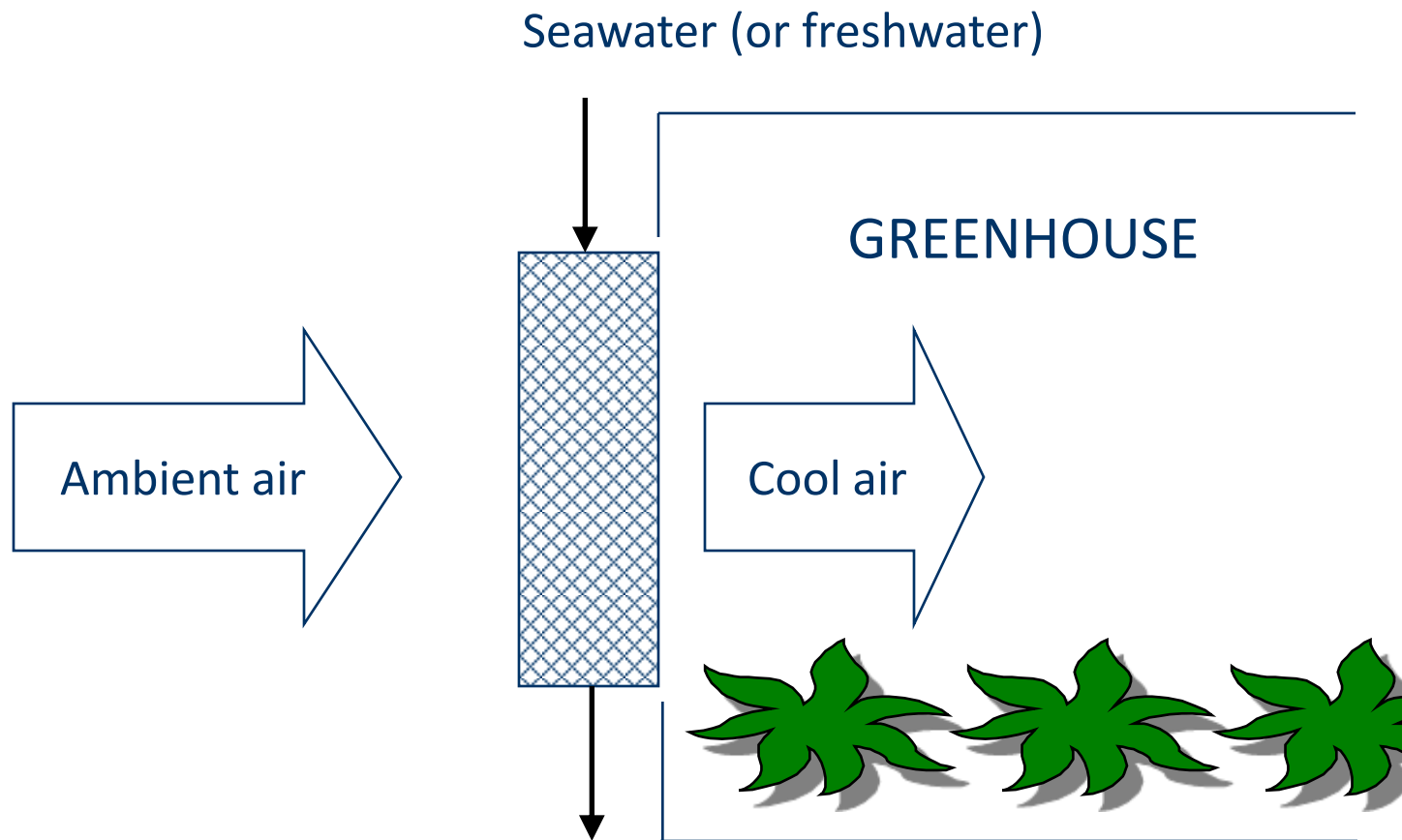
Conclusiones de Seawater Greenhouse



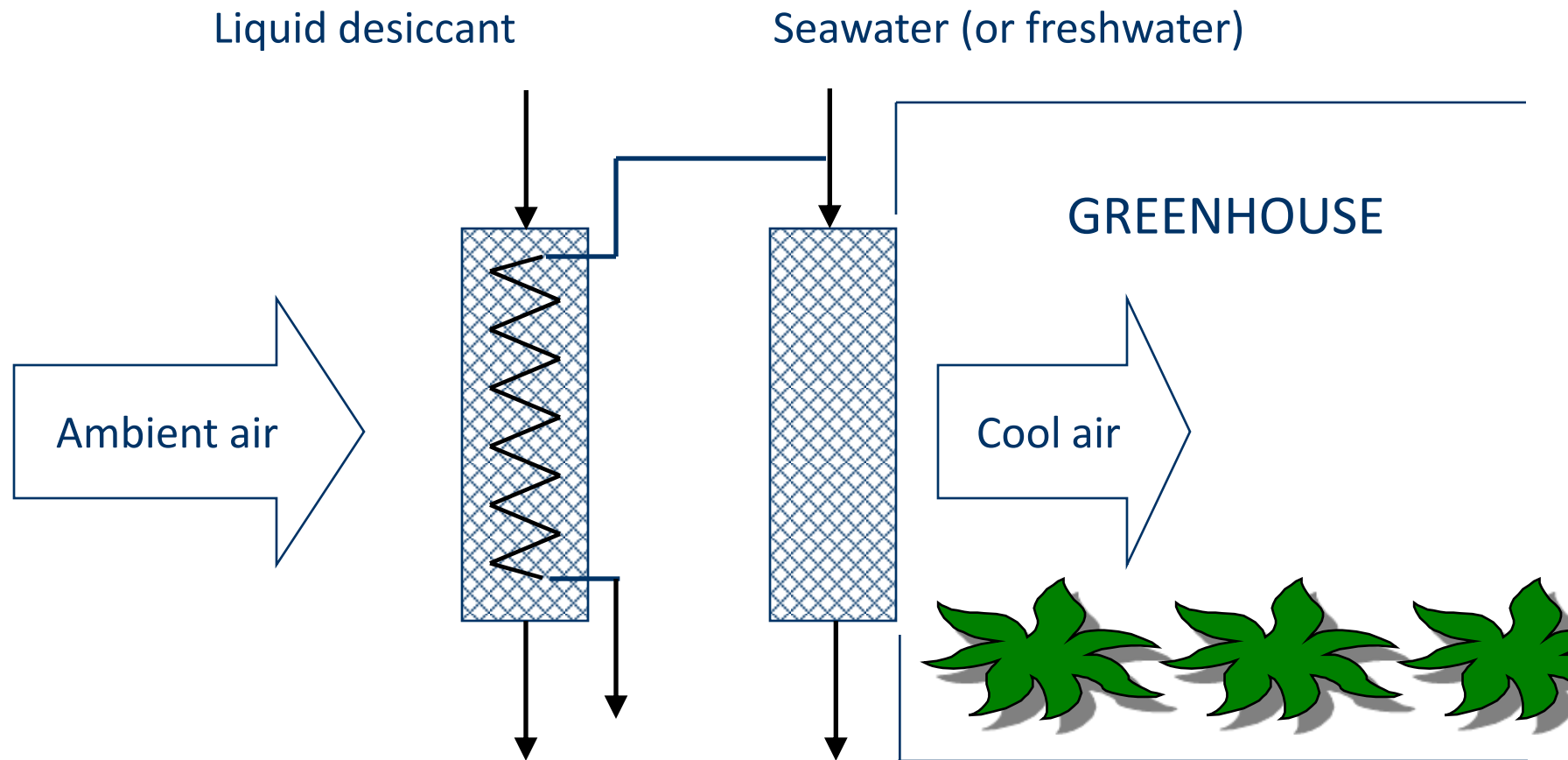
- ▶ El aire fluye preferentemente a lo largo del suelo del invernadero.
- ▶ Se puede aprovechar esto, pero en climas cálidos no es suficiente.
- ▶ Además, el tamaño del condensador es muy grande.
- ▶ El uso único del viento es muy limitado.
- ▶ El sistema estándar de panel evaporativo y ventilador es poco eficiente.
- ▶ Se puede mejorar un 40% optimizando el diseño y ahorrando energía controlando la velocidad.
- ▶ Usar motores en corriente continua supone otro 50% de ahorro.
- ▶ PV parece una buena solución (sin baterías).
- ▶ Se puede potenciar la refrigeración evaporativa si se seca el aire antes usando salmueras concentradas.



Enfriamiento evaporativo



Secado + enfriamiento evaporativo



Experimentos en Aston Univ.



PhD student George Lychnos
at Aston University



APLICACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES A LA AGRICULTURA INTENSIVA
Las Palmerillas (El Ejido) 29 Noviembre 2016



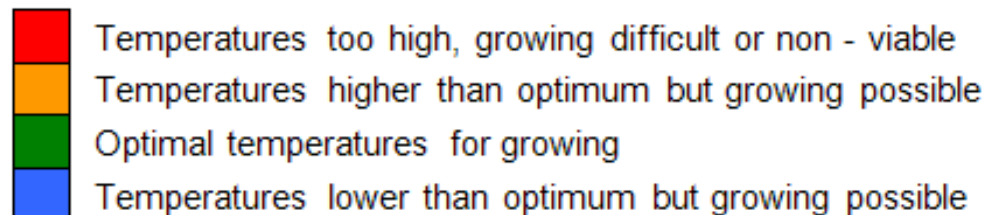
MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD

Ciemat

Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas

Experimentos en Aston Univ.

Crop	Cooling system	Muscat			Havana			Messina			Chittagong			Mumbai			Sfax		
		Month			Month			Month			Month			Month			Month		
		5	6	7	7	8	9	7	8	9	4	5	6	3	4	5	7	8	9
Lettuce	Evaporative																		
	Desiccant																		
Tomato	Evaporative																		
	Desiccant																		
Cucumber	Evaporative																		
	Desiccant																		
Soya bean	Evaporative																		
	Desiccant																		

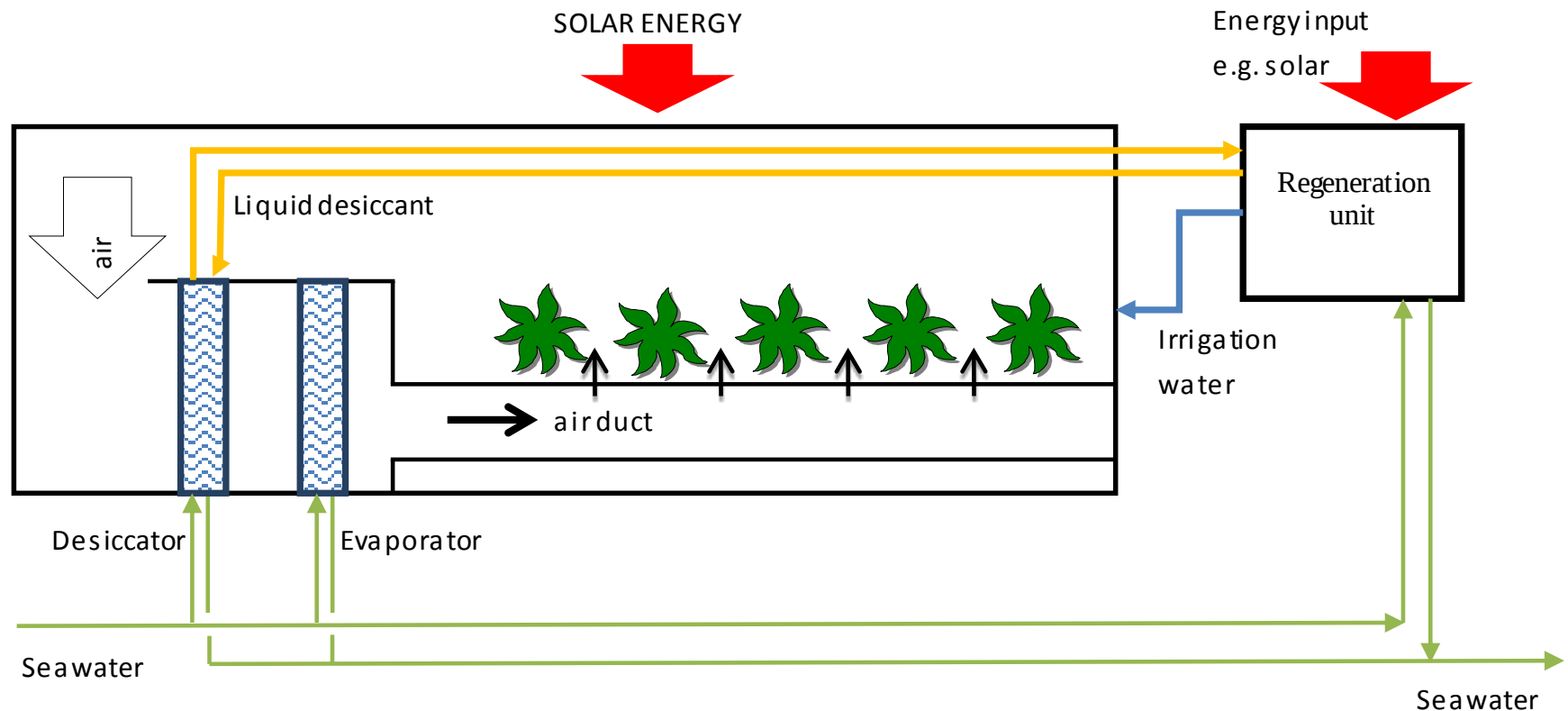


→ Extensión considerable del periodo de cultivo

Lychnos and Davies, Energy, 40, 116-130 (2012)

Uso de desecantes líquidos en invernaderos

Un líquido deshidratante enfría el invernadero y mediante energía solar se recupera el agua del líquido para regar las plantas



Lefers, Ryan, et al. Desalination and Water Treatment (2016): 1-13.

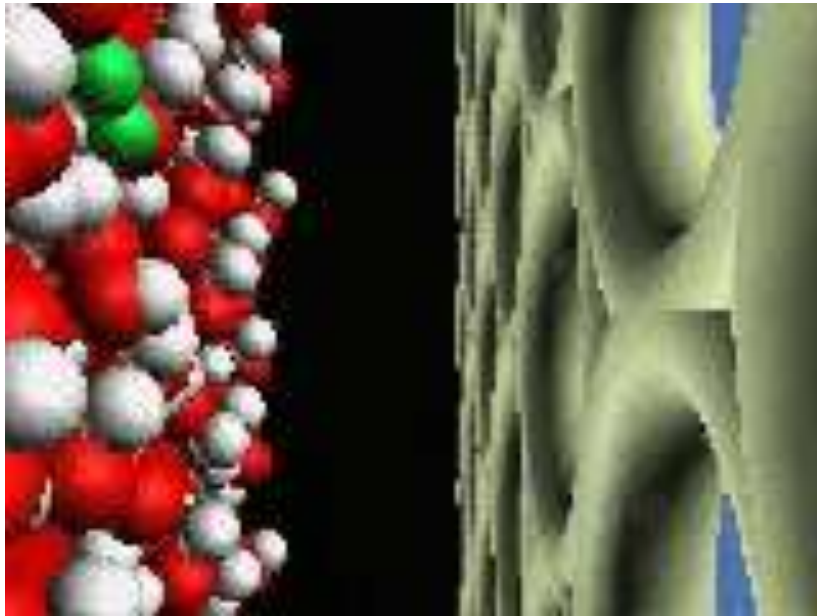
Uso de desecantes líquidos en invernaderos

- Desecantes líquidos como sistemas de refrigeración para invernaderos (tipo seawater greenhouse) en climas calientes y húmedos o en invernaderos cerrados
- Principal desafío: la regeneración del desecante
- Soluciones muy concentradas de CaCl_2 , MgCl_2 , LiCl , glycol...
- Baja presión de vapor: difícil separar el agua
- Muy corrosivos
- Para regenerar el desecante se propone destilación por membranas alimentada por energía solar térmica



Destilación por membranas (MD)

Sistema de desalación evaporativa basado en una membrana hidrofóbica que no deja pasar agua líquida y sí vapor.



Diferencia de presión de vapor (temperatura) crea un flujo de vapor a través de la membrana, separándolo de la fase líquida que contiene la sal.

El vapor se condensa en el otro lado de la membrana.

Modular. Resistente a la corrosión (polímeros)

80°C (energía solar térmica)

MD bench-scale plant at CIEMAT-PSA



MD test module
(effective membrane
surface $25 \times 10 \text{ cm}^2$)

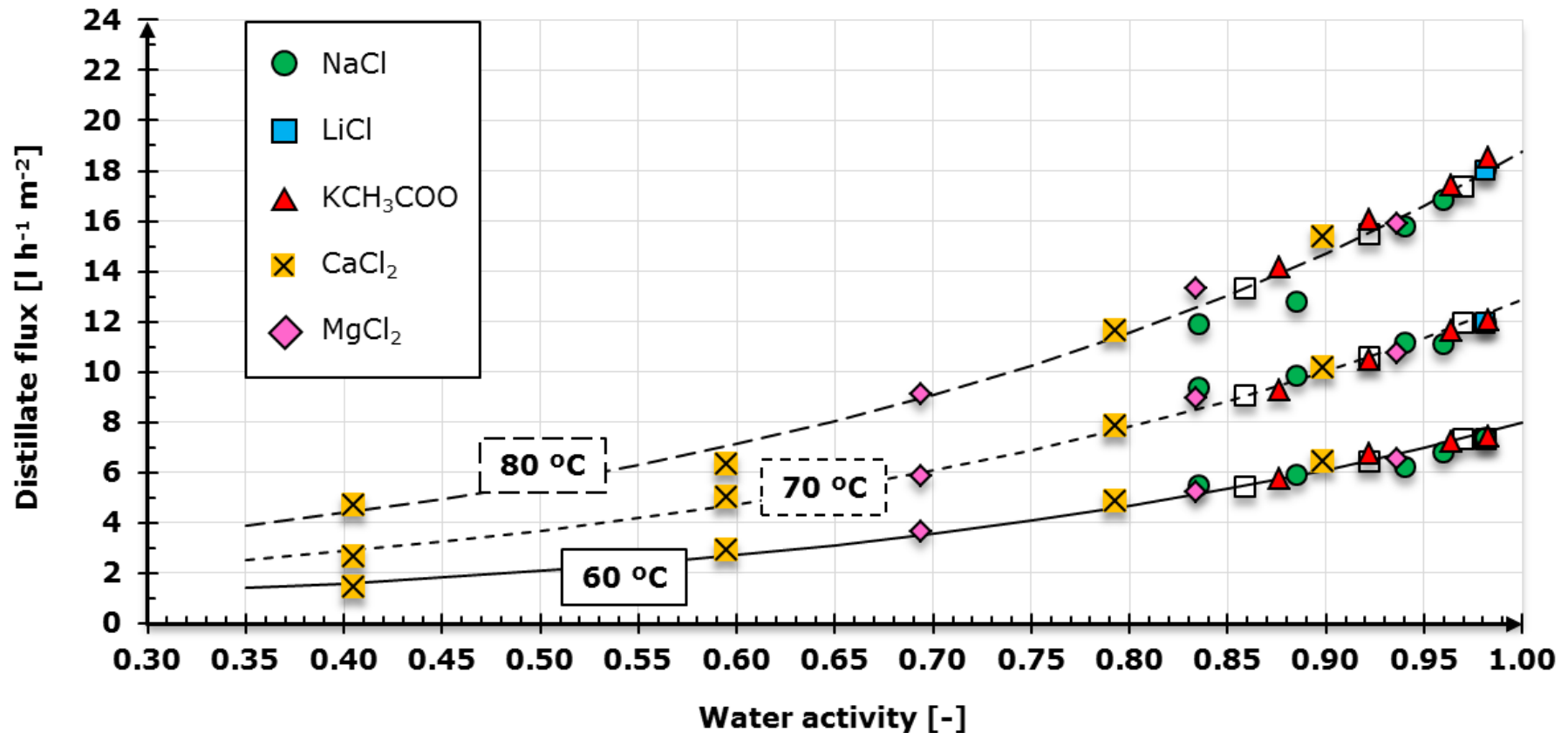


MD bench-scale tests with different salts

Salt	Feed temperature [°C]	Feed concentration [mol l ⁻¹]	Water activity [-]
NaCl ●	60, 70, and 80	0.6	0.9810
		1.2	0.9601
		1.7	0.9405
		3.0	0.8852
		4.0	0.8352
LiCl ■	60, 70, and 80	0.7	0.9812
		1.0	0.9702
		2.0	0.9222
		3.0	0.8590
CH ₃ COOK ▲	60, 70, and 80	0.5	0.9824
		1.0	0.9636
		2.0	0.9224
		3.0	0.8764
CaCl ₂ ✕	60, 70, and 80	1.5	0.8988
		2.4	0.7930
		3.7	0.5946
		5.0	0.4053
MgCl ₂ ◆	60, 70, and 80	1.0	0.9359
		2.0	0.8338
		3.0	0.6937

MD bench-scale tests with different salts

Distillate flux vs water activity, feed flow rate = 400 l/h, AGMD



Feed temperature = 60 °C

$$\text{Flux} = 0.5396 e^{2.6936 \cdot a_w}$$

$$R^2 = 0.9823$$

Feed temperature = 70 °C

$$\text{Flux} = 1.0498 e^{2.5075 \cdot a_w}$$

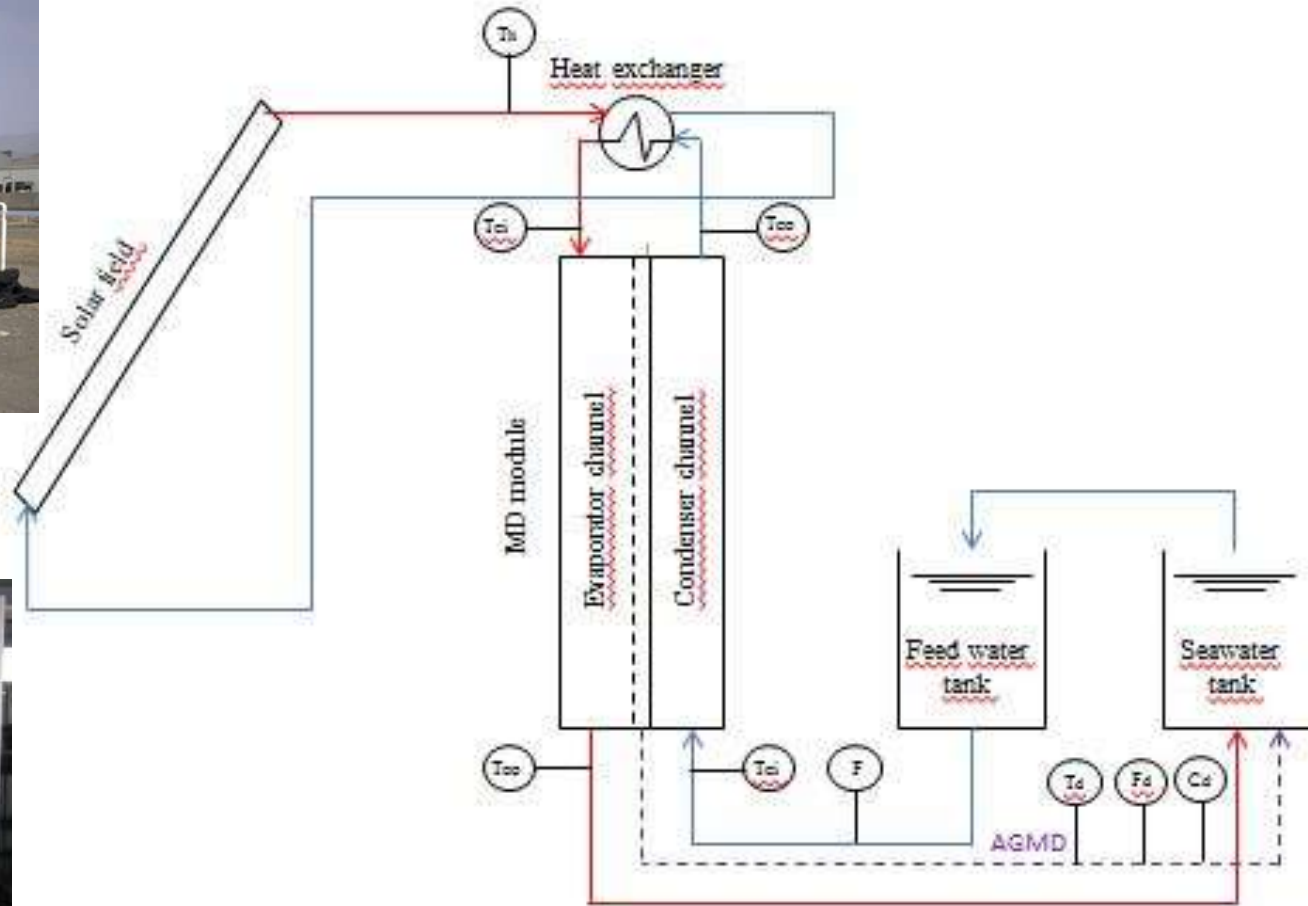
$$R^2 = 0.9879$$

Feed temperature = 80 °C

$$\text{Flux} = 1.6641 e^{2.4223 \cdot a_w}$$

$$R^2 = 0.9843$$

MD pilot-scale plant at CIEMAT-PSA

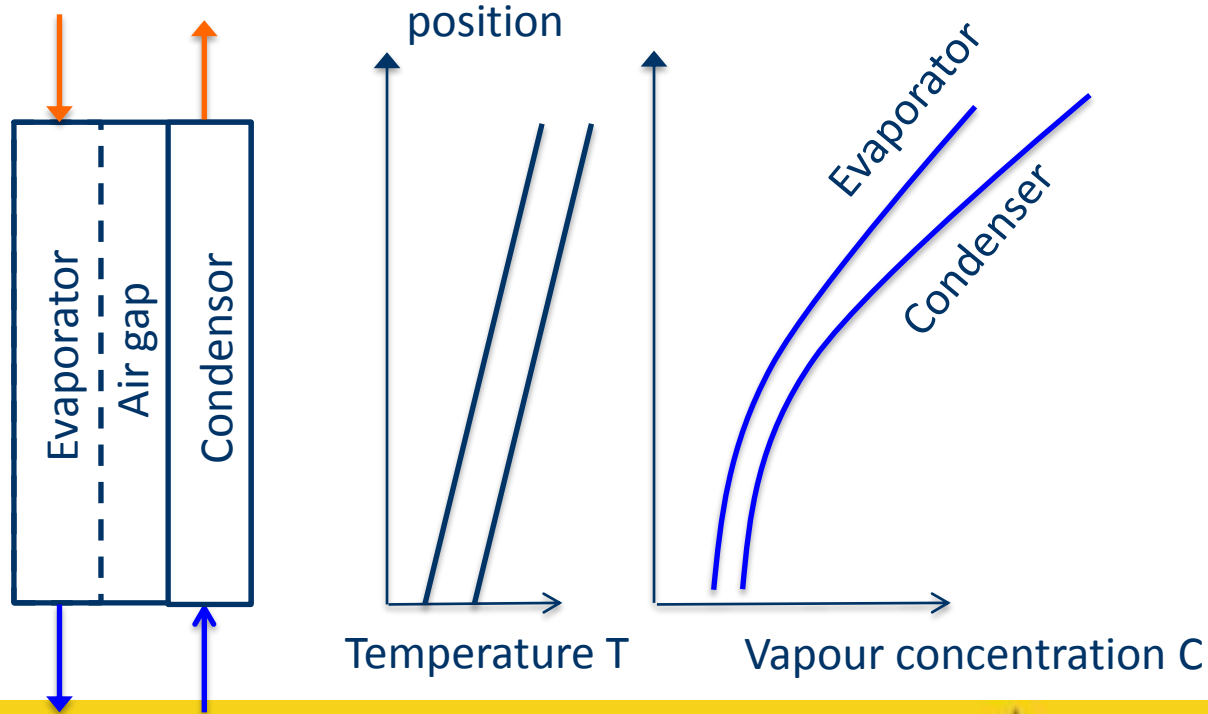


Aquastill experimental results overview

	Small module	Large module
Membrane area (m ²)	7.2	24
Envelope length (m)	1.5	5
GOR	1.95 – 2.72	3.79 – 6.06
Output flux (L/h m ²)	1.27 – 4.32	0.29 – 1.34
T minimum (cond. inlet) °C	20	20
T maximum (evap. inlet) °C	80	80

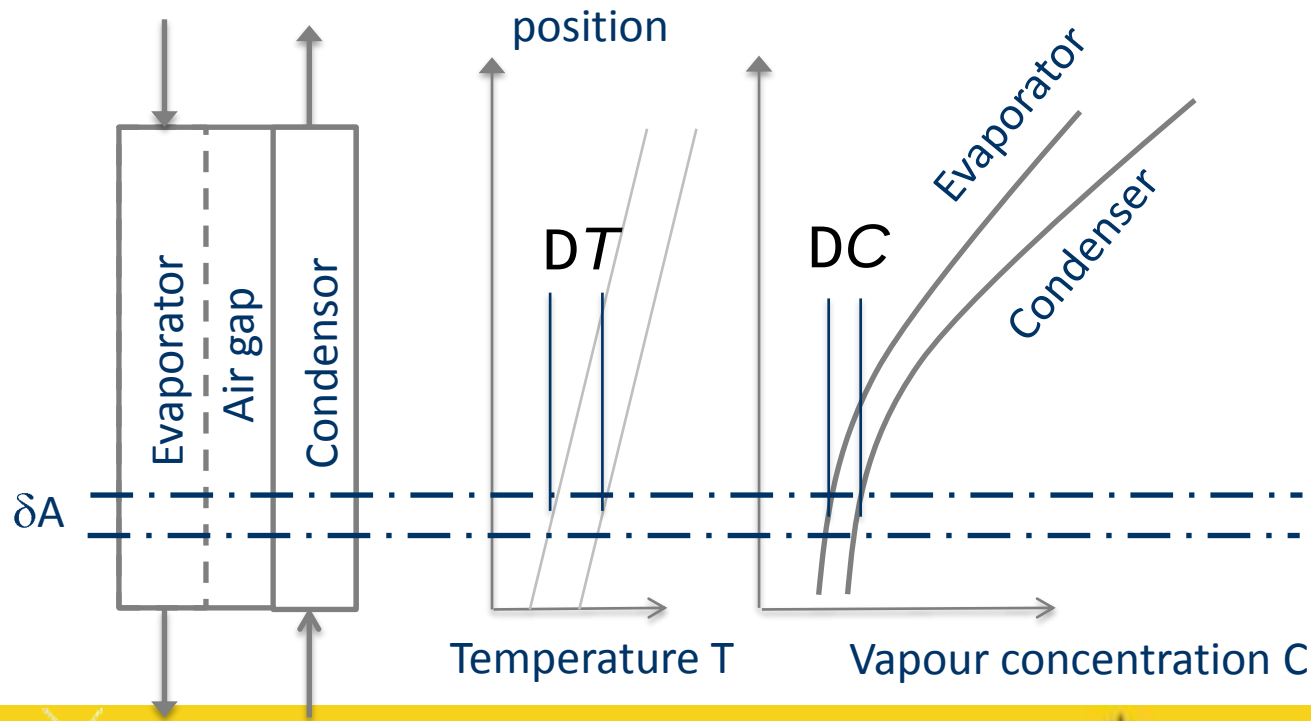
Model of Aquastill

- Two parameter model:
 - Heat transfer coefficient (h) for sensible heat transfer
 - Mass transfer coefficient (k) for vapour transfer
- Assume linear temperature profiles



Model of Aquastill

- Two parameter model:
 - Heat transfer coefficient (h) for sensible heat transfer
 - Mass transfer coefficient (k) for vapour transfer
- Assume linear temperature profiles



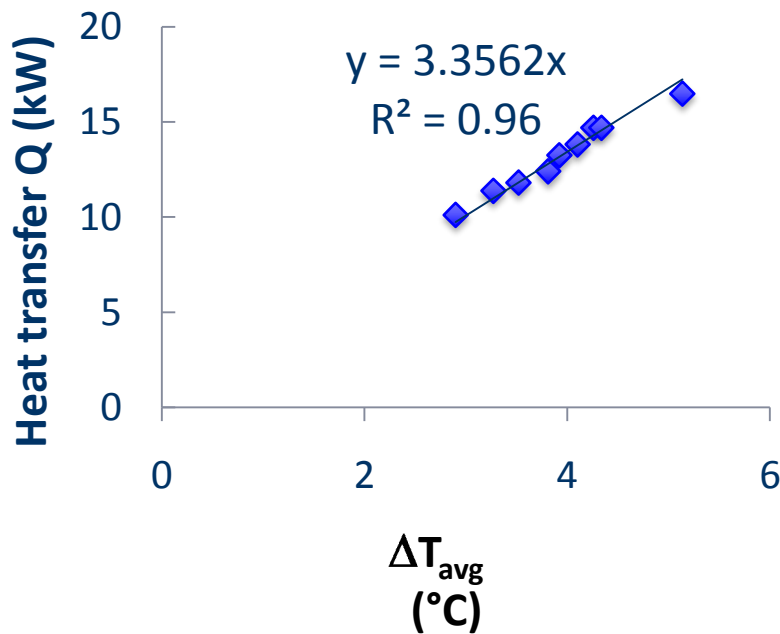
$$\delta Q = \delta A h \Delta T$$

$$\delta m = \delta A k \Delta C$$

Model calibration

24 m² module at 600 l/hr

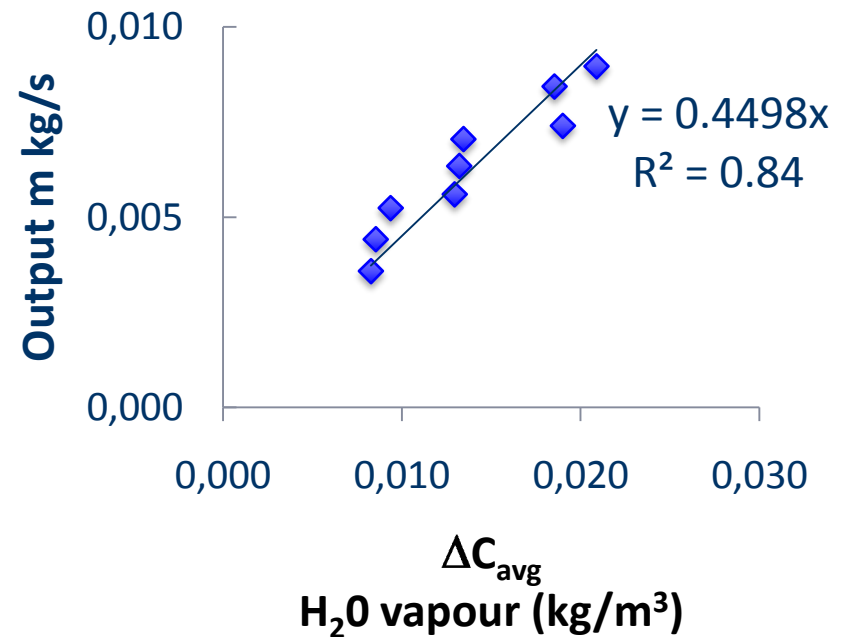
Sensible Heat flow vs. Driving temp difference



$$\dot{Q} = A \cdot h \cdot \Delta T_{avg}$$

$$h = 0.14 \text{ kW/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Output vs. concentration driving force



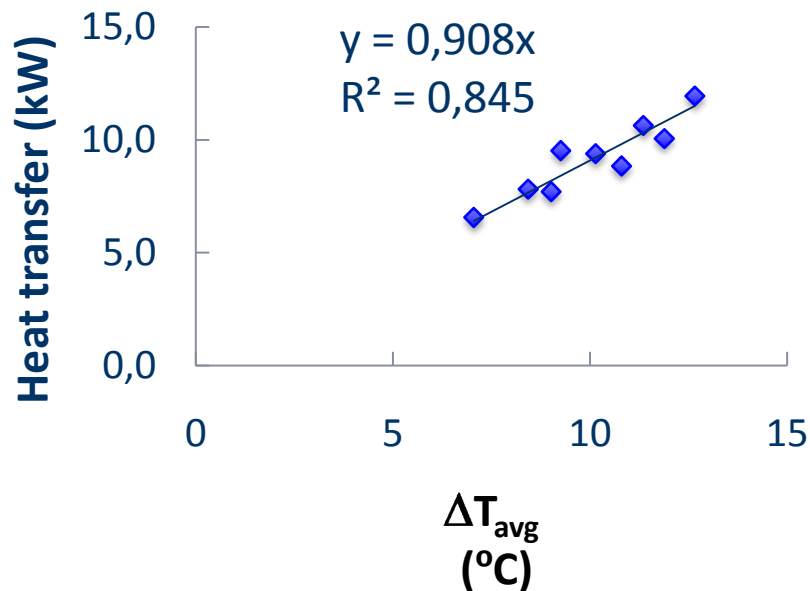
$$\dot{m} = A \cdot k \cdot \Delta C_{avg}$$

$$k = 0.0187 \text{ m/s}$$

Model calibration

7 m² module at 600 l/hr

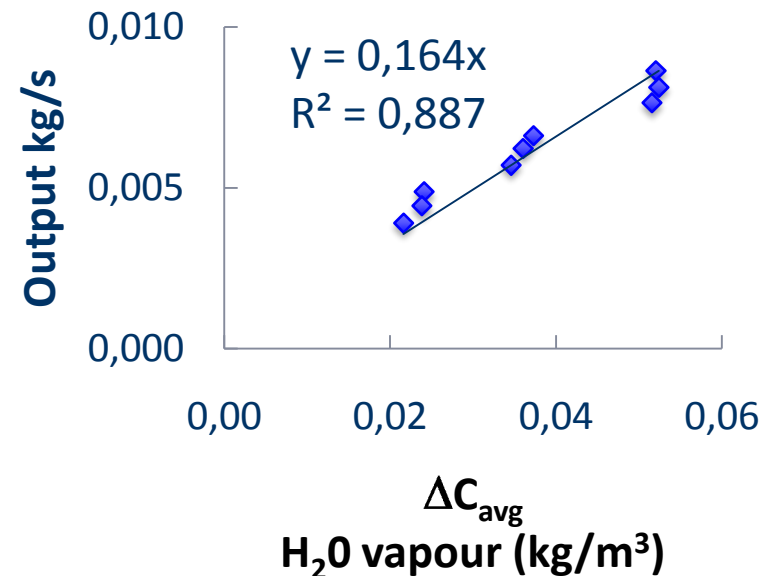
Sensible Heat flow vs. Driving temp difference



$$\dot{Q} = A \cdot h \cdot \Delta T_{avg}$$

$$h = 0.126 \text{ kW/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

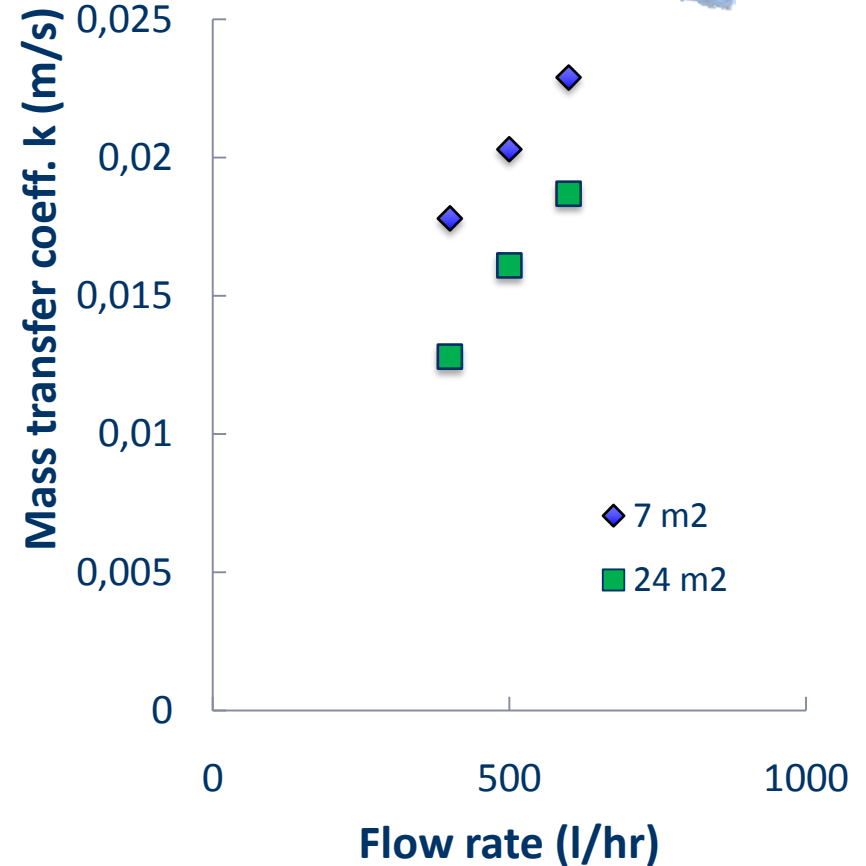
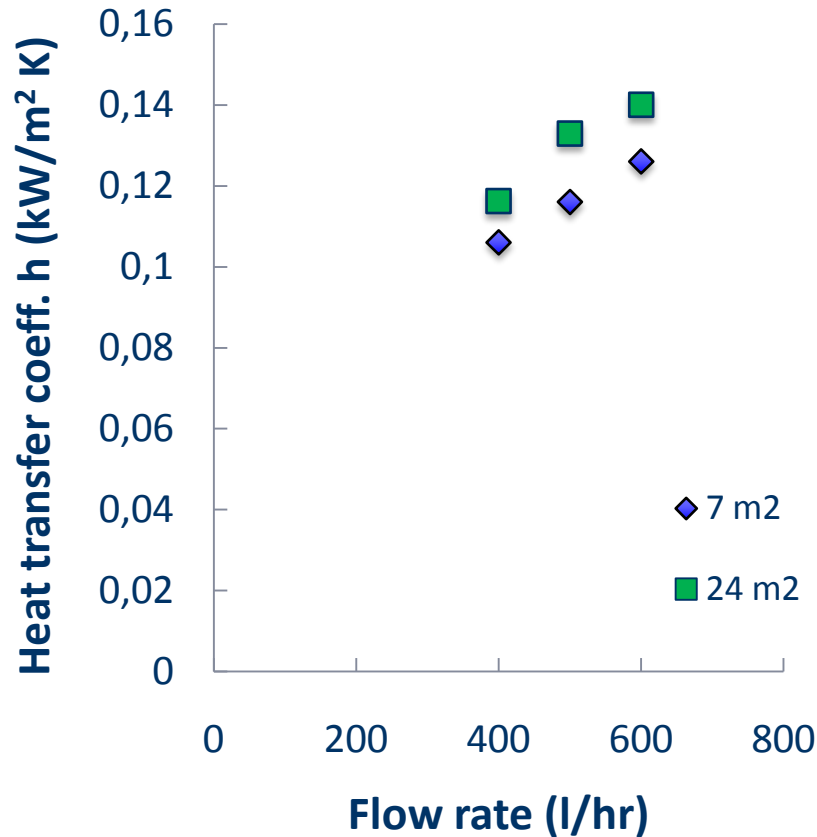
Output vs. concentration driving force



$$\dot{m} = A \cdot k \cdot \Delta C_{avg}$$

$$k = 0.0229 \text{ m/s}$$

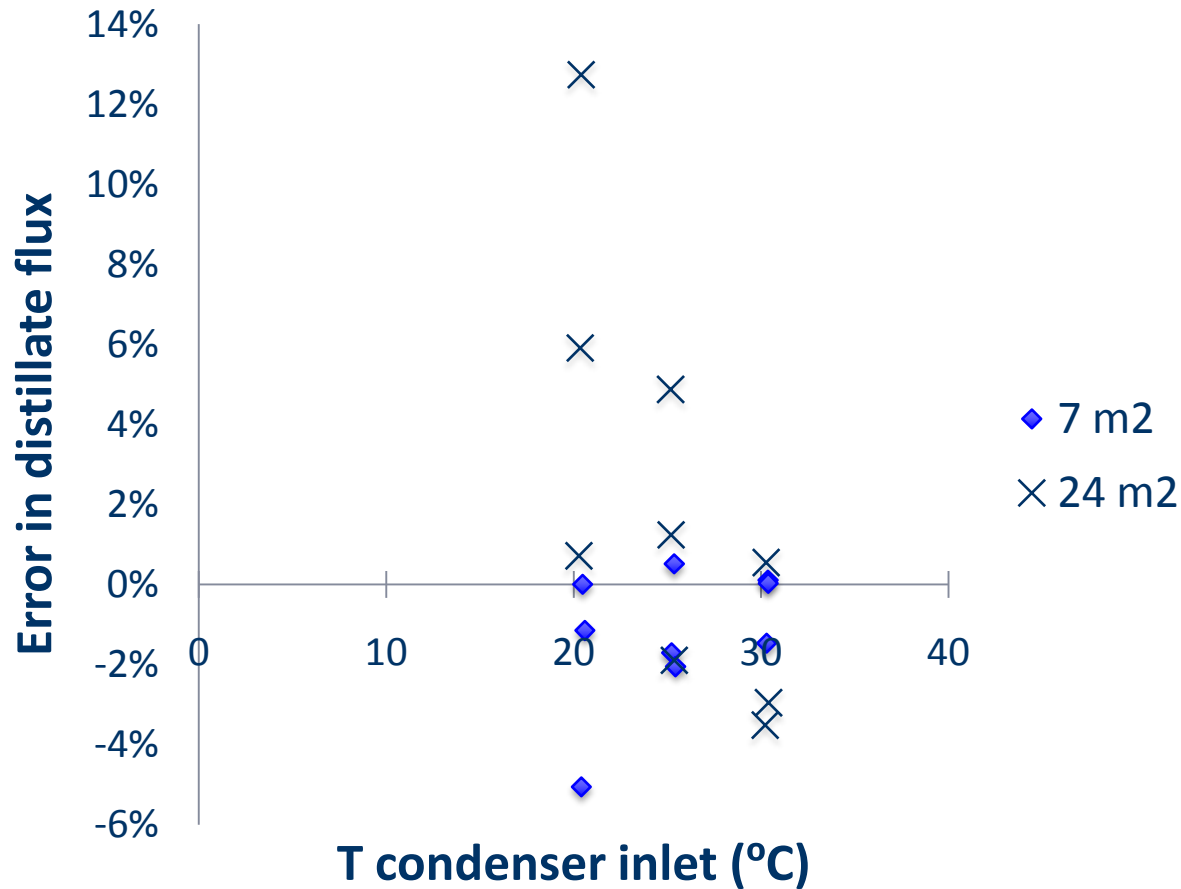
Model calibration summary



- Heat and mass transfer coefficients increase with flow rate
- Small module has larger mass transfer coeff. but lower heat trans. coeff than large module

Model validation (600 l/hr)

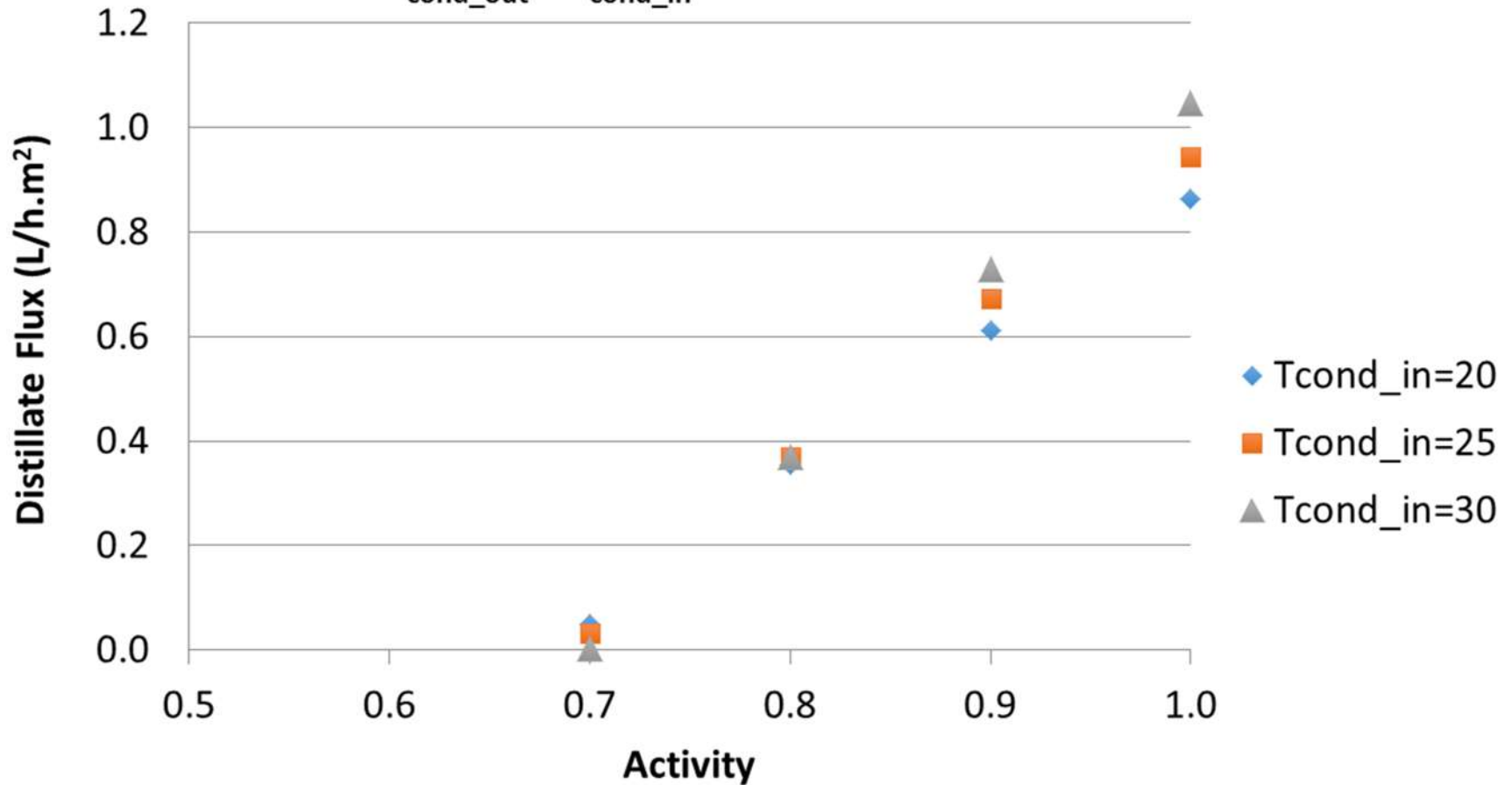
Error is generally < 10%



Resultados de MD a escala piloto

24 m² module, Feed flow 600 l/hr

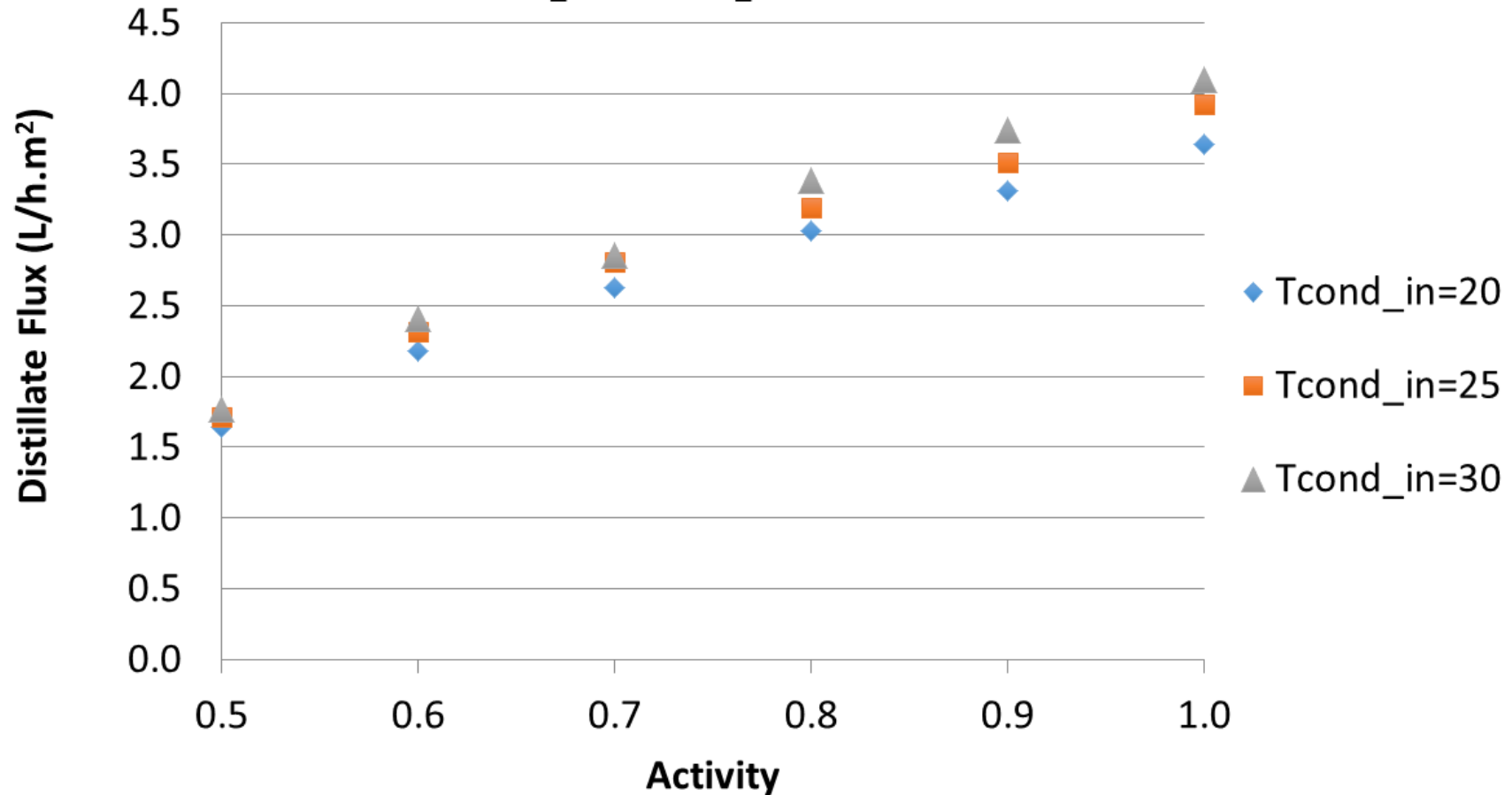
$$T_{\text{cond_out}} - T_{\text{cond_in}} = 40^{\circ}\text{C}$$



Resultados de MD a escala piloto

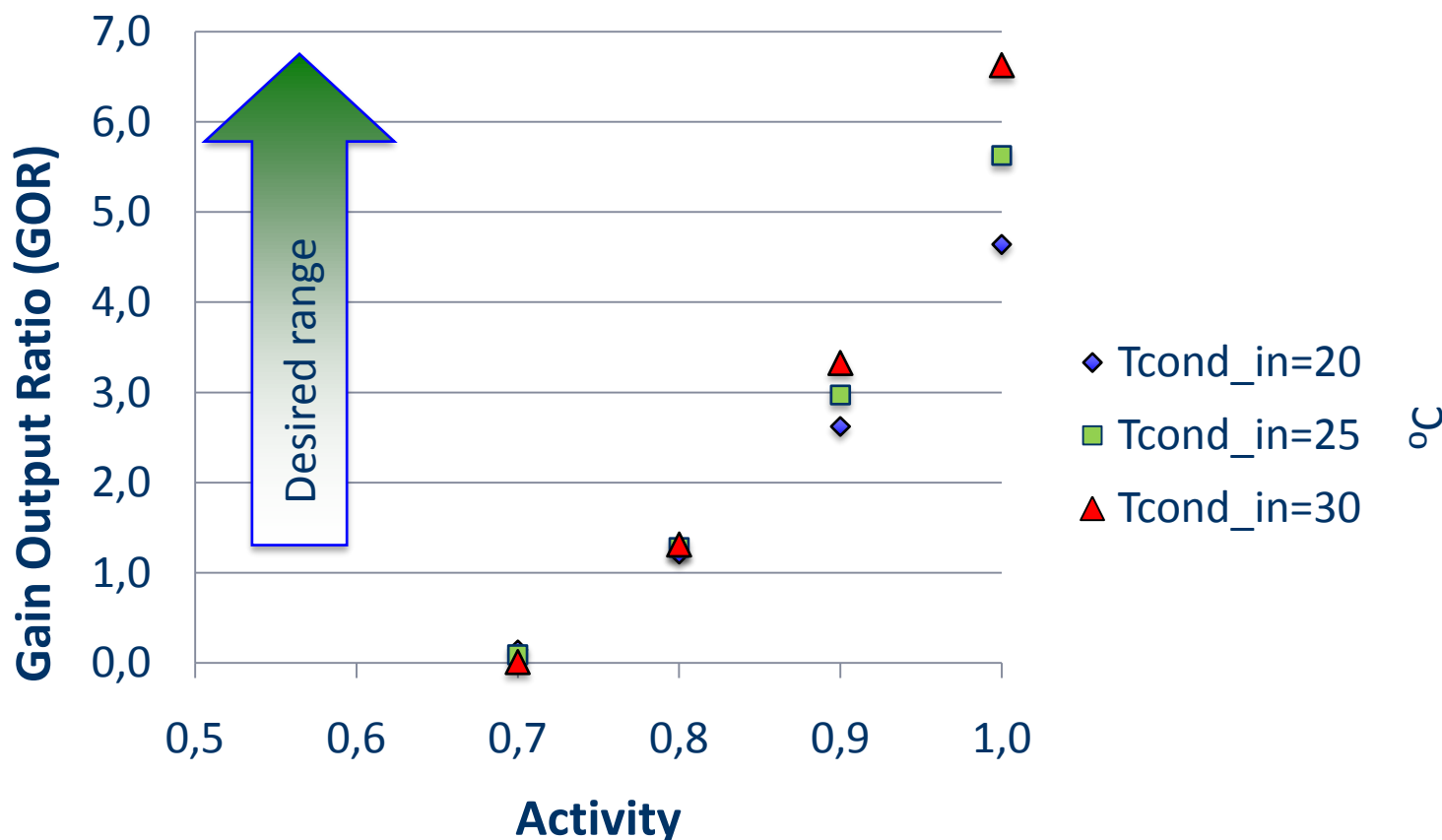
7 m² module, Feed flow 600 l/hr

$$T_{\text{cond_out}} - T_{\text{cond_in}} = 40^{\circ}\text{C}$$



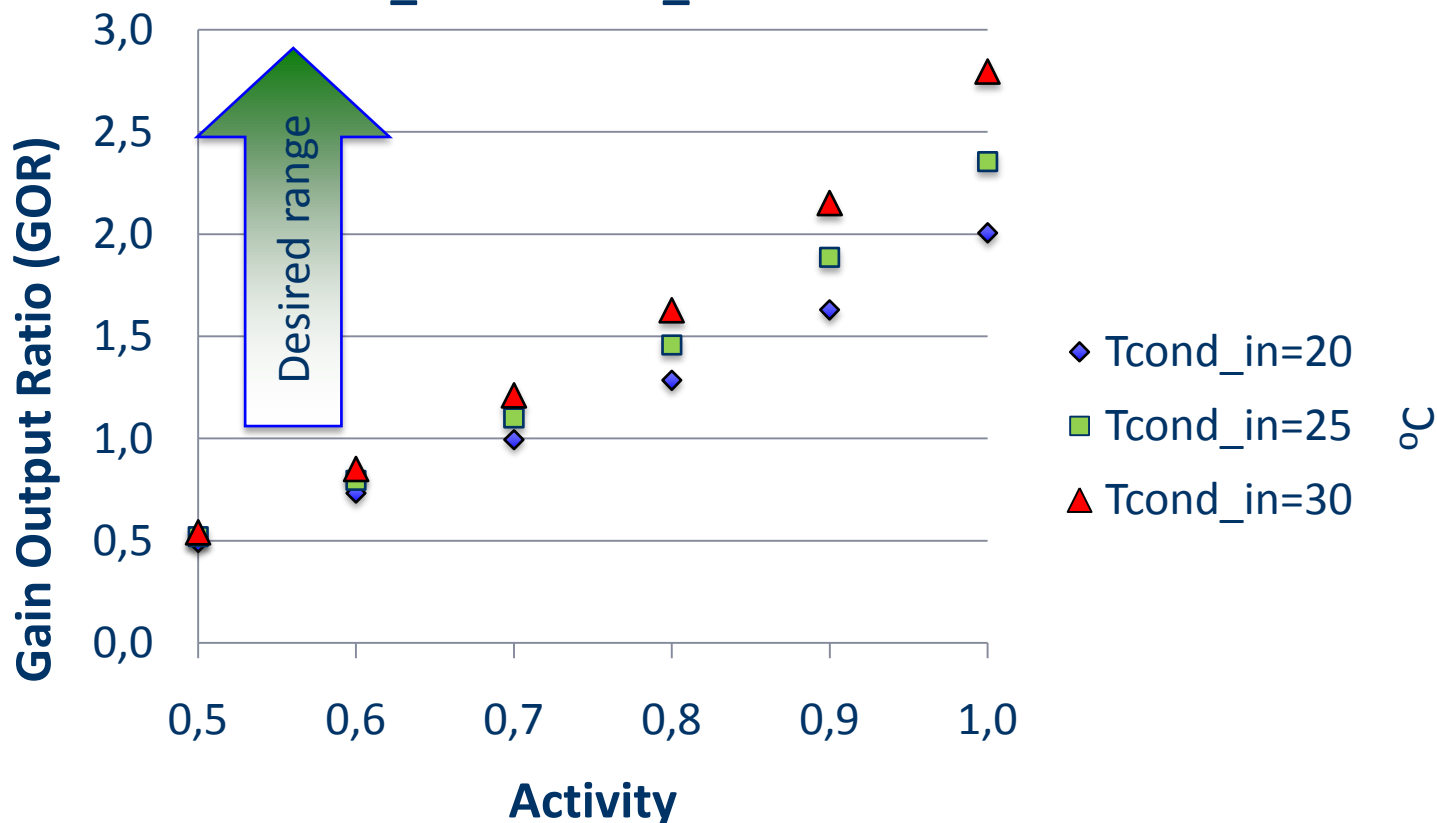
Resultados de MD a escala piloto para alta concentración (baja actividad)

24 m² module, Feed flow 600 l/hr
 $T_{cond_out} - T_{cond_in} = 40\text{ °C}$

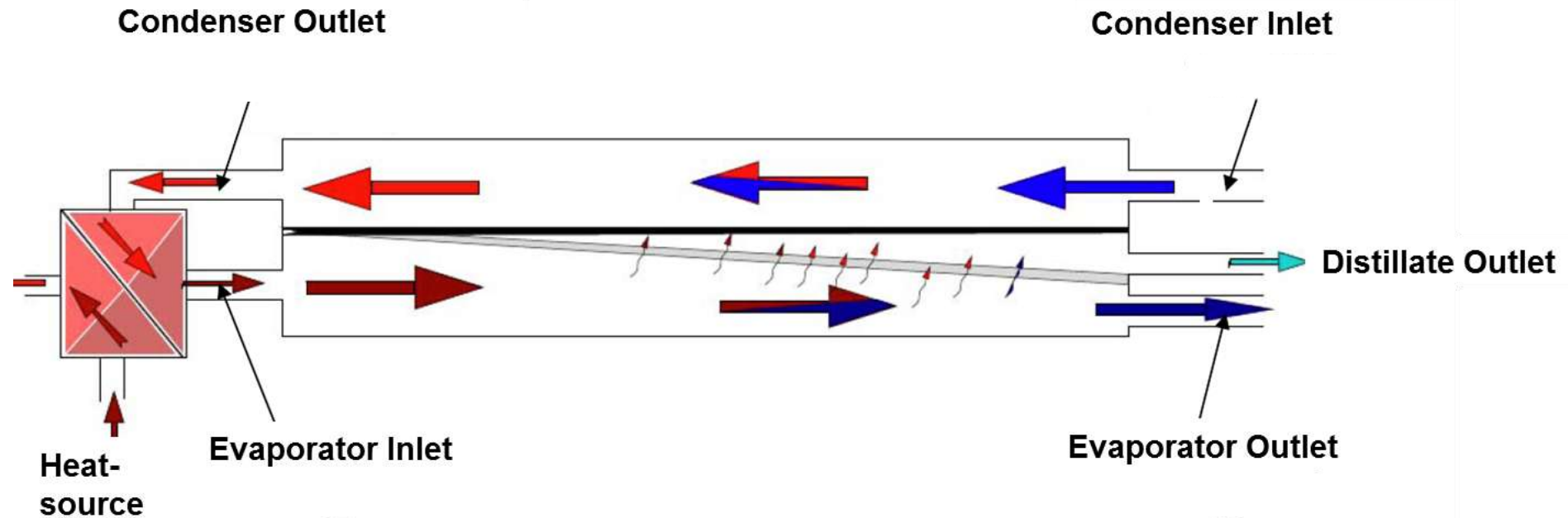


Resultados de MD a escala piloto para alta concentración (baja actividad)

7 m² module, Feed flow 600 l/hr
Tcond_out - Tcond_in = 40 °C



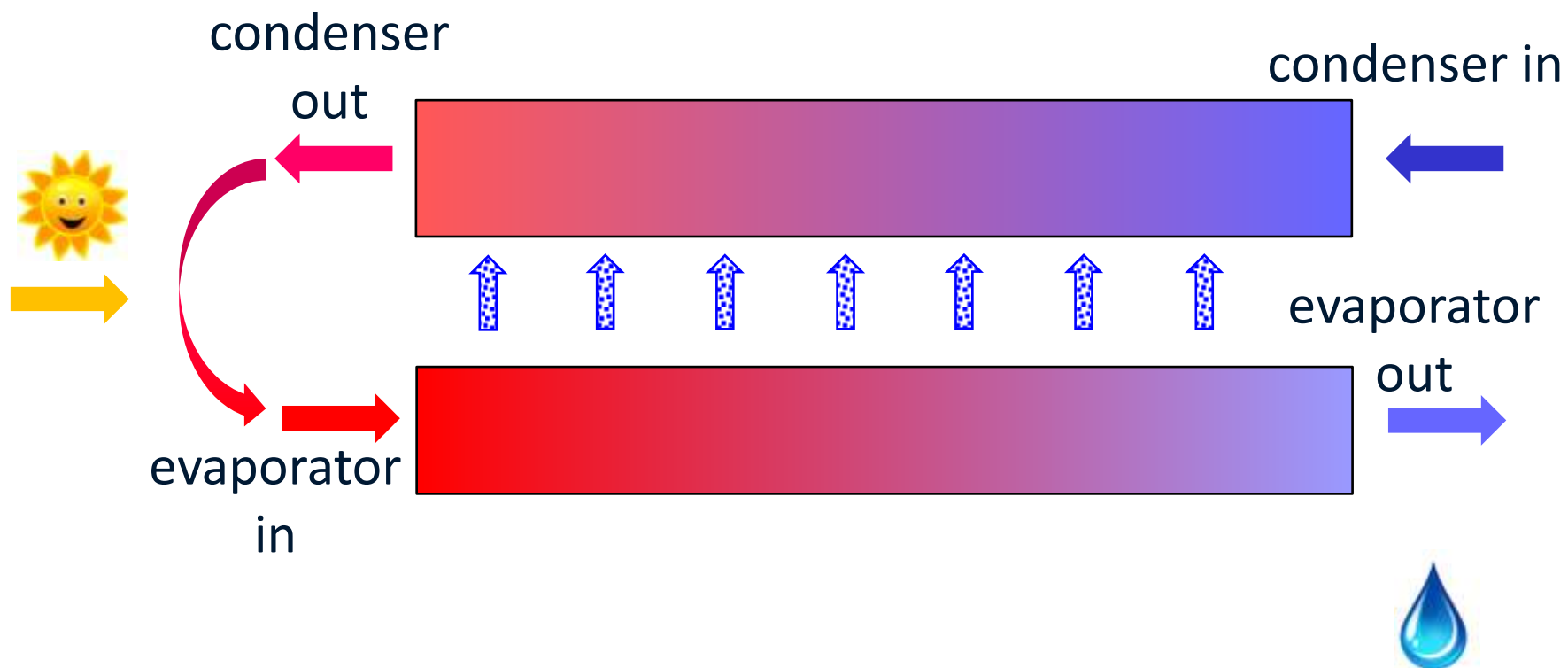
Recuperación de calor en MD



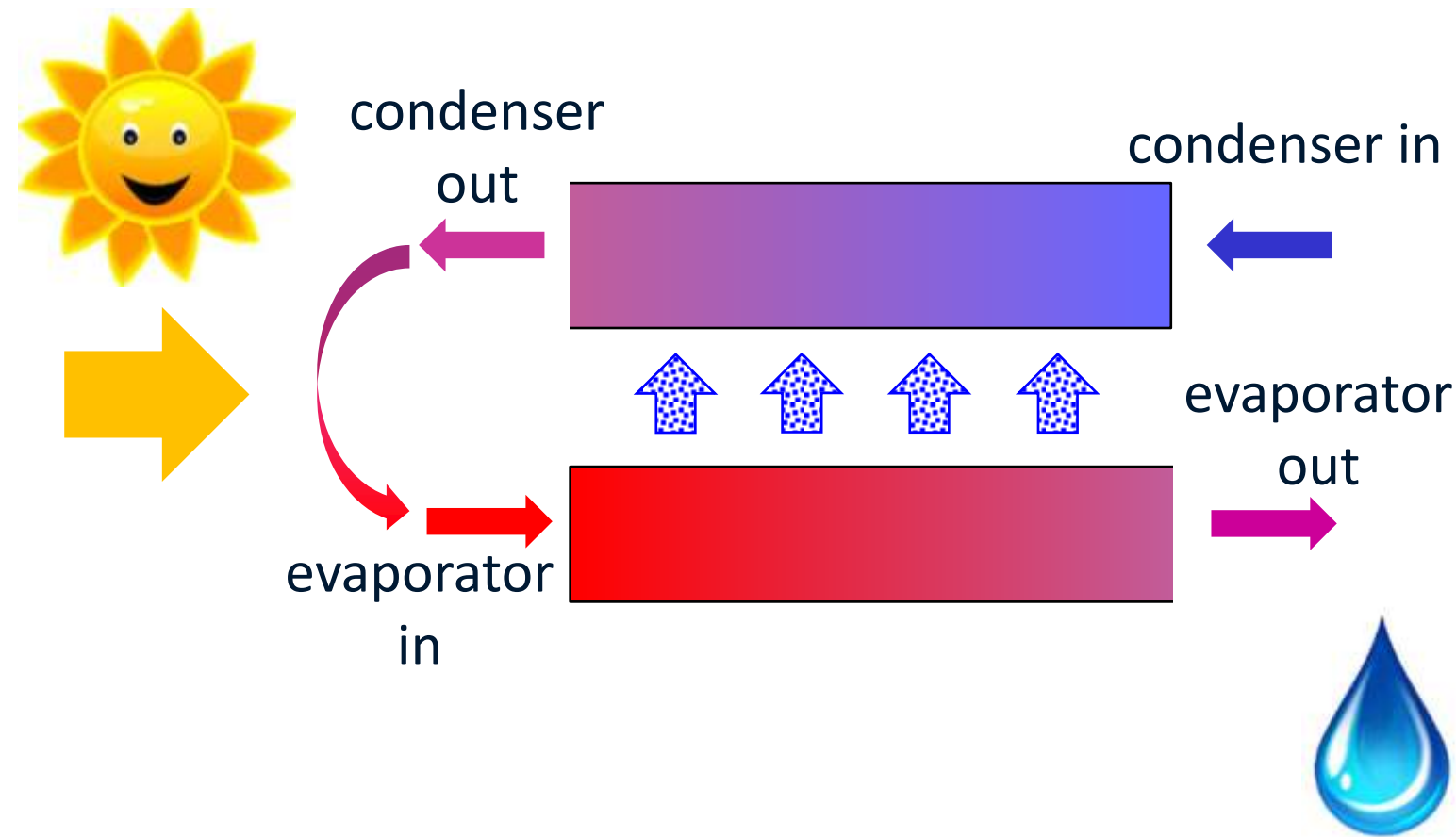
(from Fraunhofer-ISE)

Conversión del calor latente de condensación en calor sensible
para precalentar el agua salada

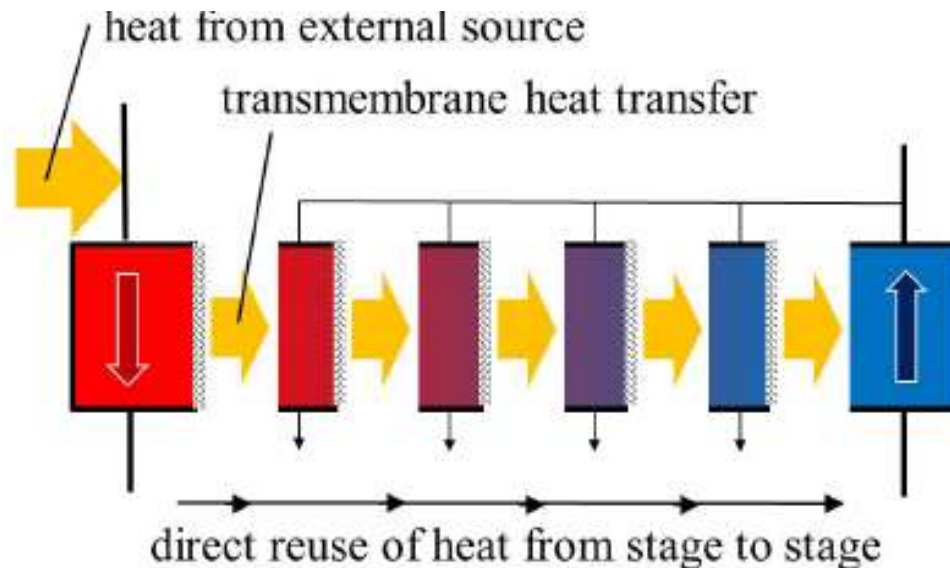
Recuperación de calor en MD



Recuperación de calor en MD



Recuperación de calor en MD

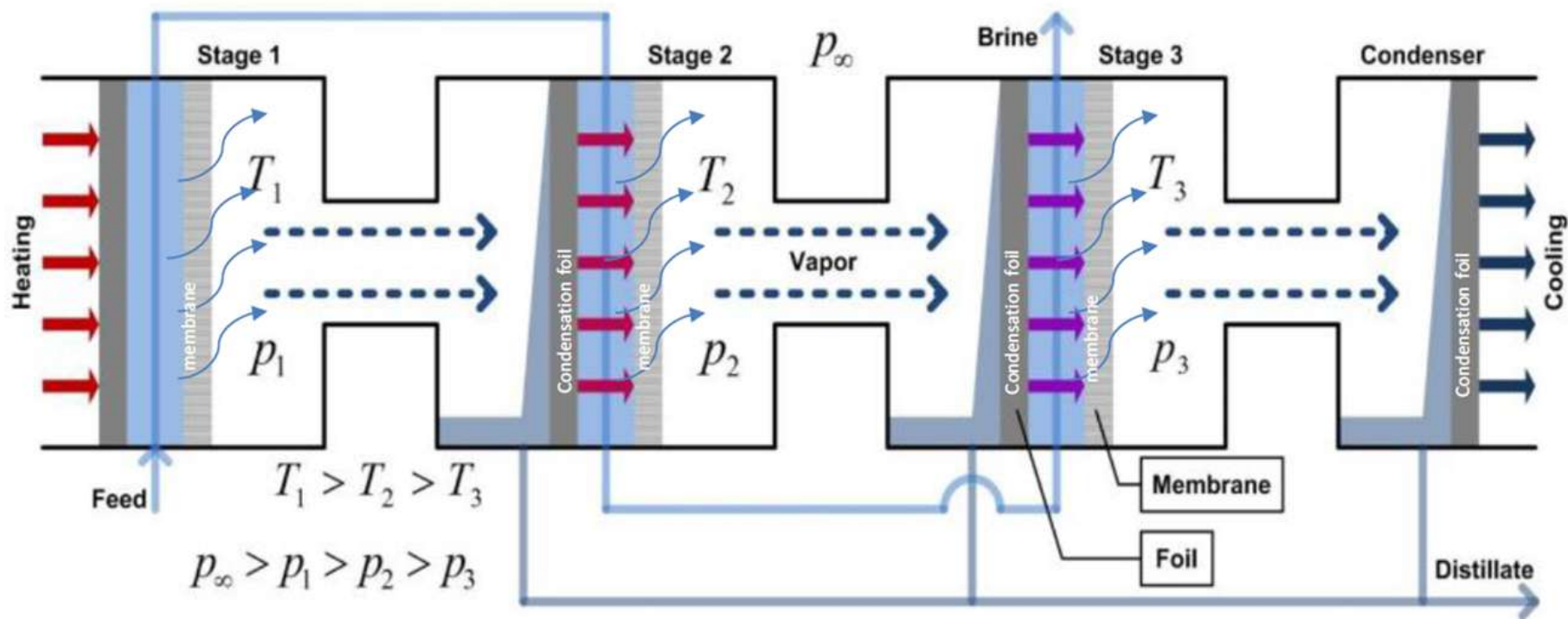


Conversión del calor latente de condensación en calor latente de evaporación (concepto multi-efecto o multi-etapa)

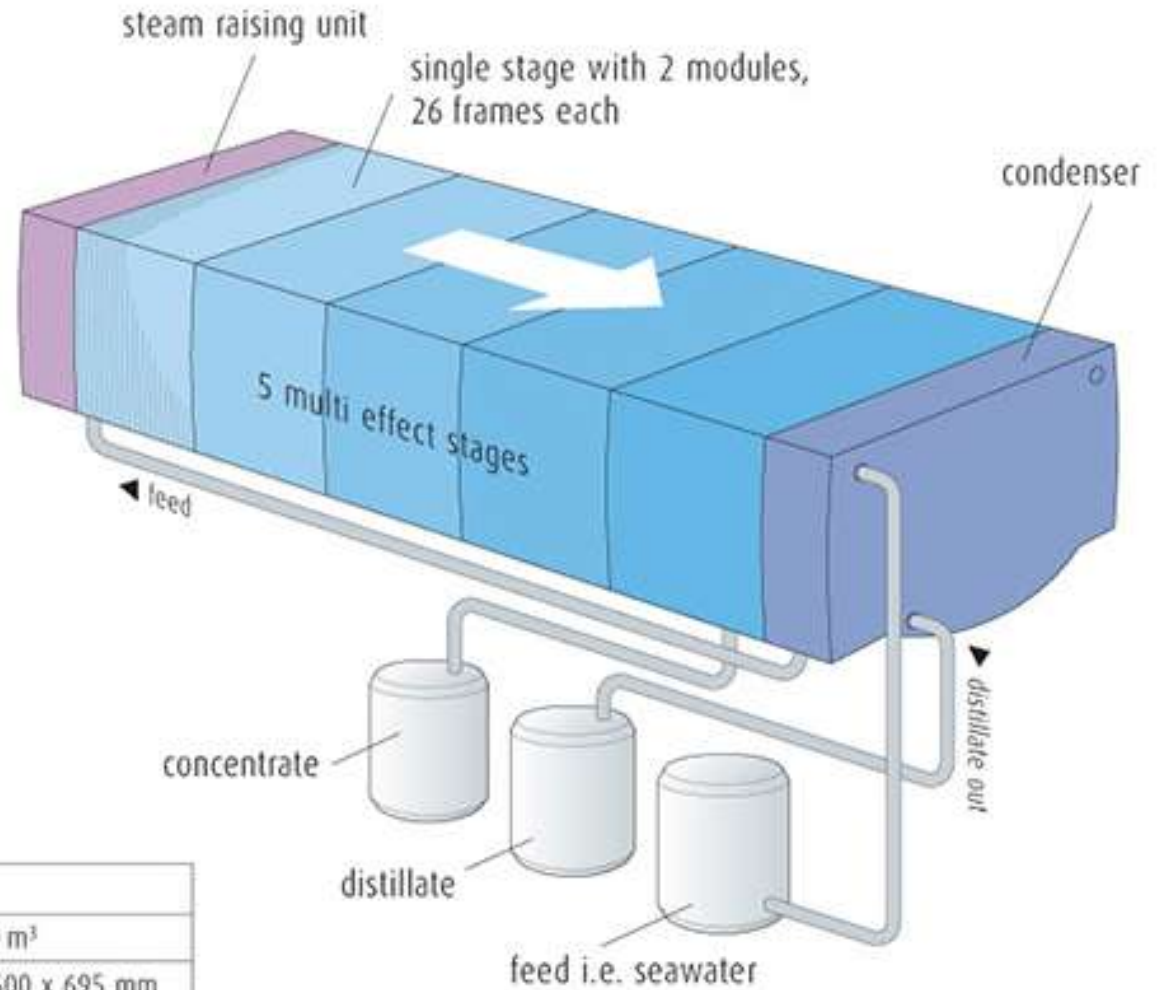
Recuperación de calor en MD



Vacuum Multi-effect MD



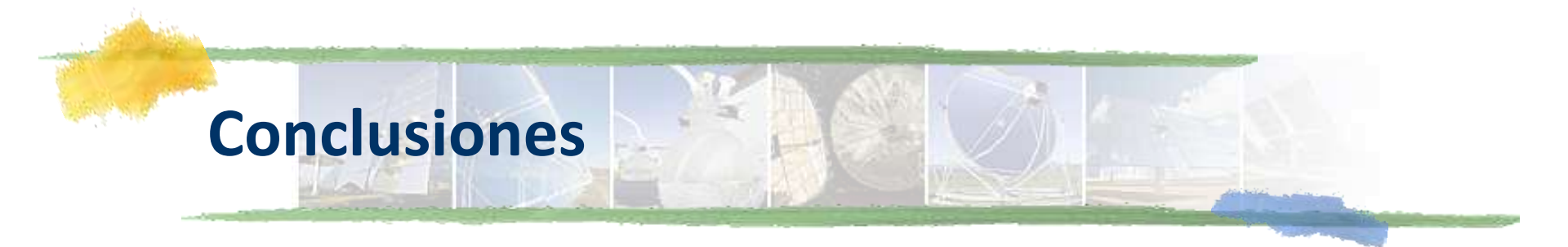
Vacuum Multi-effect MD



sample unit
daily production 10 m ³
WxHxD: 1800 x 1600 x 695 mm

Vacuum Multi-effect MD





Conclusiones

- En los módulos de mayor longitud la eficiencia energética es mayor, pero la producción es menor y sufre más el efecto de la alta salinidad
- El calor sensible en el hueco de aire es dominante
- Los módulos más cortos tienen menos eficiencia energética pero pueden tratar soluciones más concentradas, porque la transferencia de masa es dominante
- Para trabajar con mayor concentración hay que elevar la temperatura, pero por encima de 90 °C no es posible (materiales)
- Usar vacío en lugar de aire permite una mejora
- Los sistemas multi-efecto tienen mayor potencial para tratar soluciones concentradas con mejor eficiencia energética

Agradecimientos

EU 7th Framework Program SFERA-II project (Grant Agreement n. 312643)

Dr. Philip Davies

Sustainable Environment Research

Aston University, UK

e-mail: p.a.davies@aston.ac.uk



Alba Ruiz-Aguirre

(University of Almería-CIESOL - Spain)

Juan Antonio Andrés-Mañas

(Plataforma Solar de Almería – CIEMAT - Spain)

Melina Roccamante

(University of Almería-CIESOL - Spain)



Comparison of Aquastill AGMD modules

