

Avances en técnicas de control y optimización en desalación de agua utilizando energía solar y ejemplos de aplicación

Manuel Berenguel

arm.ual.es



Departamento de Informática y Automática



CURSO ACADÉMICO 2022-2023

**CONTINUACIÓN del Ciclo de Conferencias del
Máster UNED-UCM y del Programa de Doctorado en
“Ingeniería de Sistemas y de Control”**

Sebastián Dormido

Fernando Morilla

Matilde Santos

Contexto e introducción

Pasos seguidos en la investigación



Modelado y control de bajo nivel de plantas SMD



Modelado y control de flujos y temperaturas



Control jerárquico de plantas SMD



Mejora de métricas como la eficiencia térmica y la producción de destilado



Estrategias de control Avanzado para plantas industriales



Mejora de métricas como la eficiencia térmica y la producción de destilado



Publicaciones y tutoriales



Describir los desarrollos tecnológicos

Juan Diego Gil



Manuel Berenguel

Lidia Roca



Guillermo Zaragoza

Juan A. Andrés-Mañas



ODS




 Bienvenid@s a Ciesol

Línea de investigación: Control automático en nexo agua-energía-alimentos
 Investigación orientada a mejorar el tejido productivo en nuestro entorno

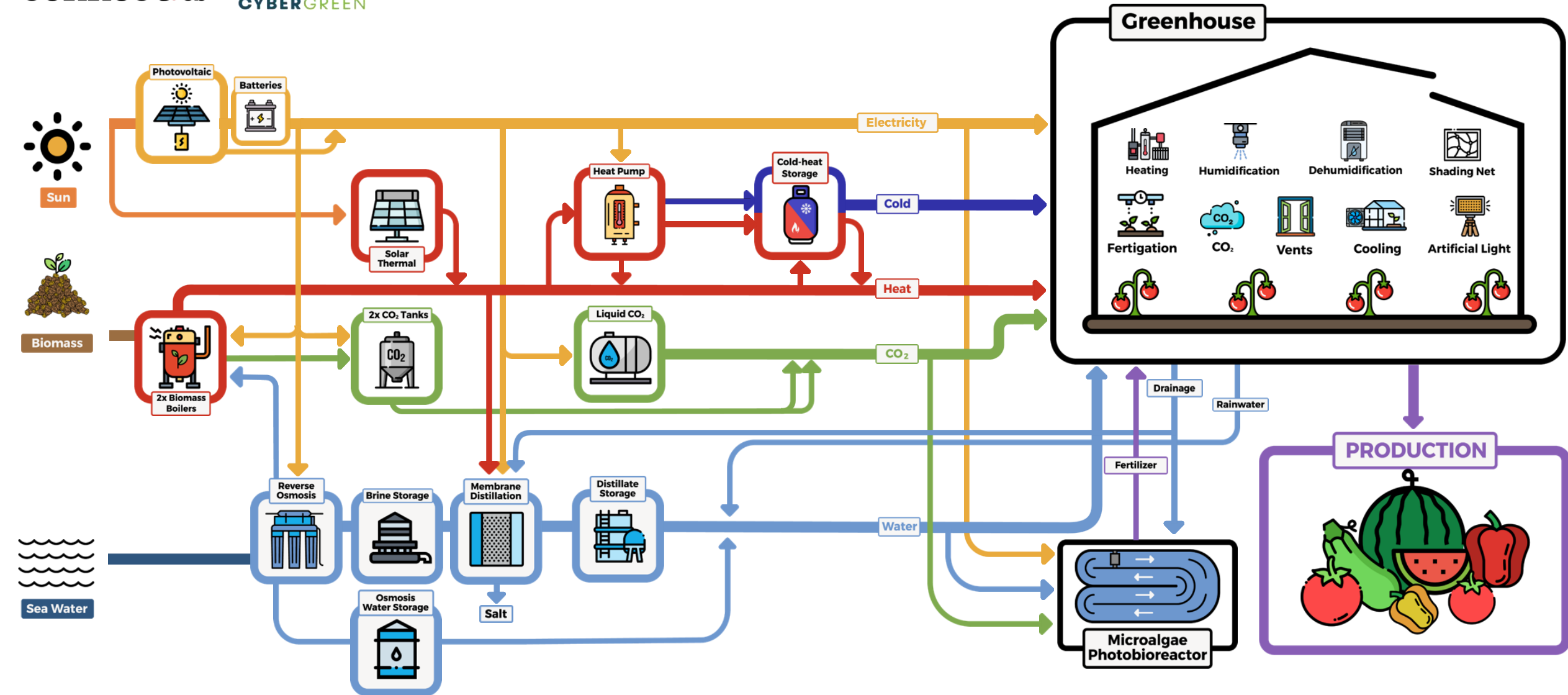


Línea de investigación: Control automático **en nexo agua-energía-alimentos**

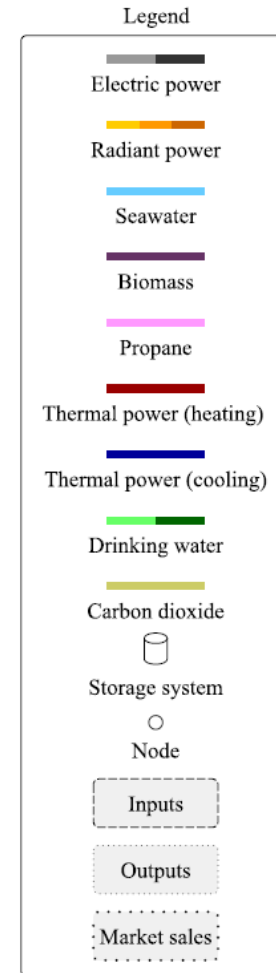
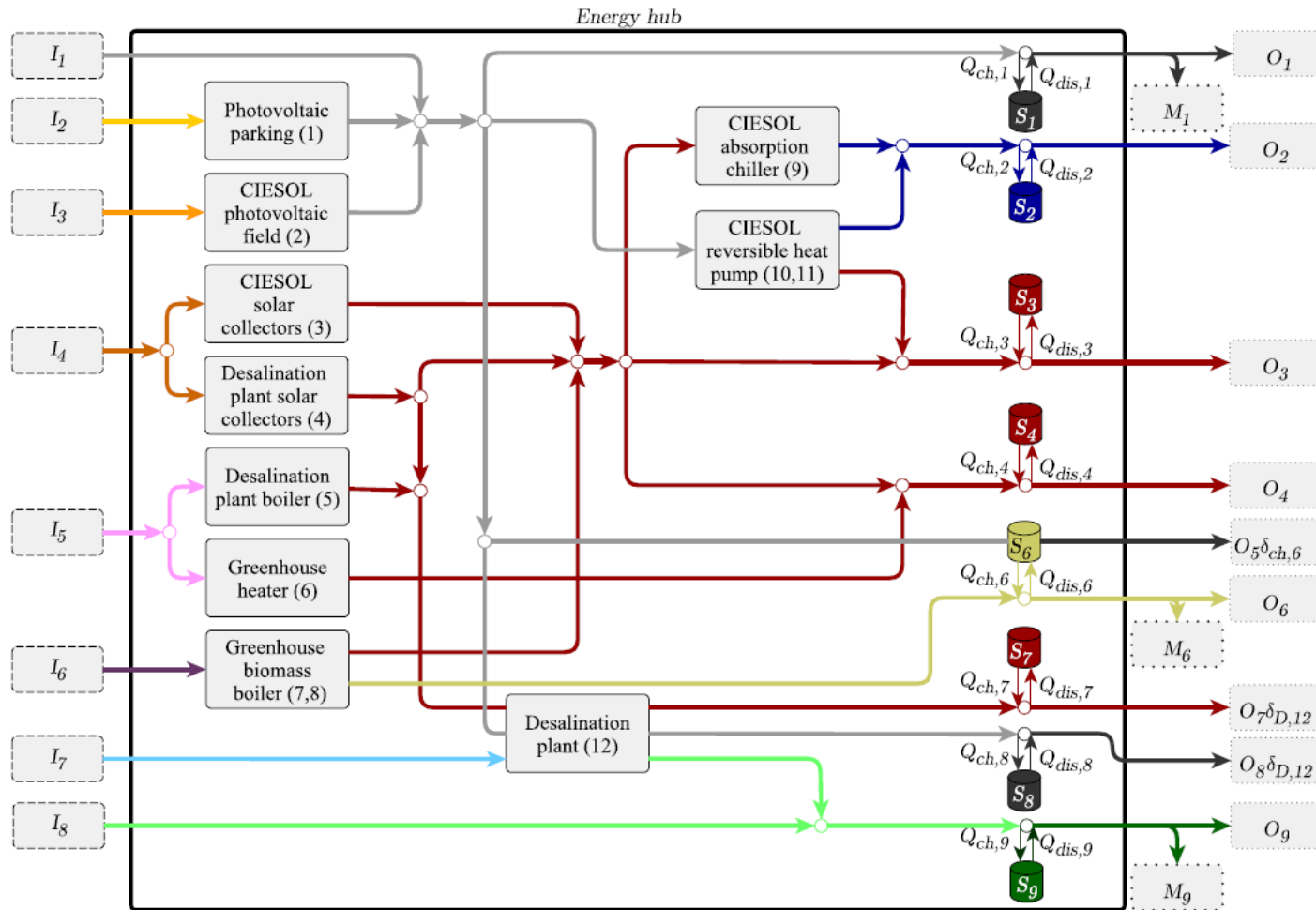
Evolución natural de las líneas previas del grupo en proyectos CHROMAE, Cybergreen, NEGHTRA, HYCO2bio, REALM, Agricobiot, Microprod-solar, Carbon2Green, Control en edificios, ...

- **Agricultura:** Paco Rodríguez, Jorge Sánchez, ...
- **Bioteología:** José Luis Guzmán, ...
- **Energía/edificios/Smart grid:** Domingo Álvarez, María del Mar Castilla, Manuel Pérez, ...
- **Robótica en invernaderos:** Antonio Giménez, José Carlos Moreno, ...

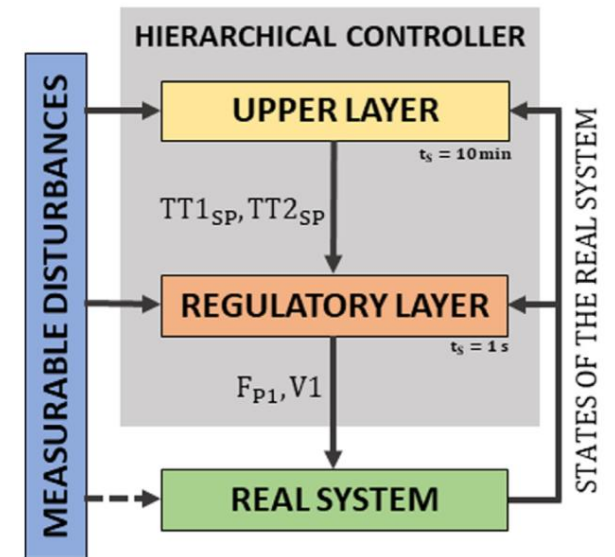
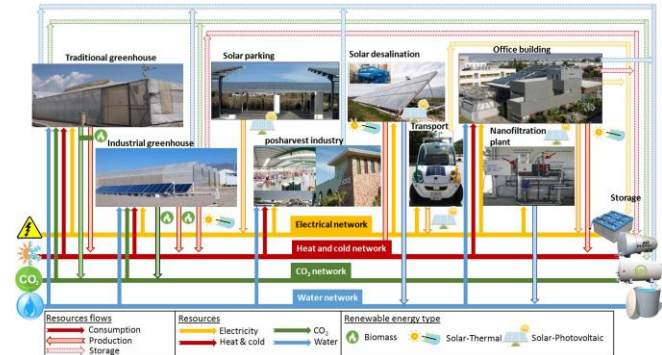
Generación-almacenamiento-consumo



Coordinación de recursos usando paradigma de Energy Hubs: Electricidad, calor/frío, agua, CO₂ y control jerárquico de las instalaciones



CHROMAE: Distrito agroalimentario





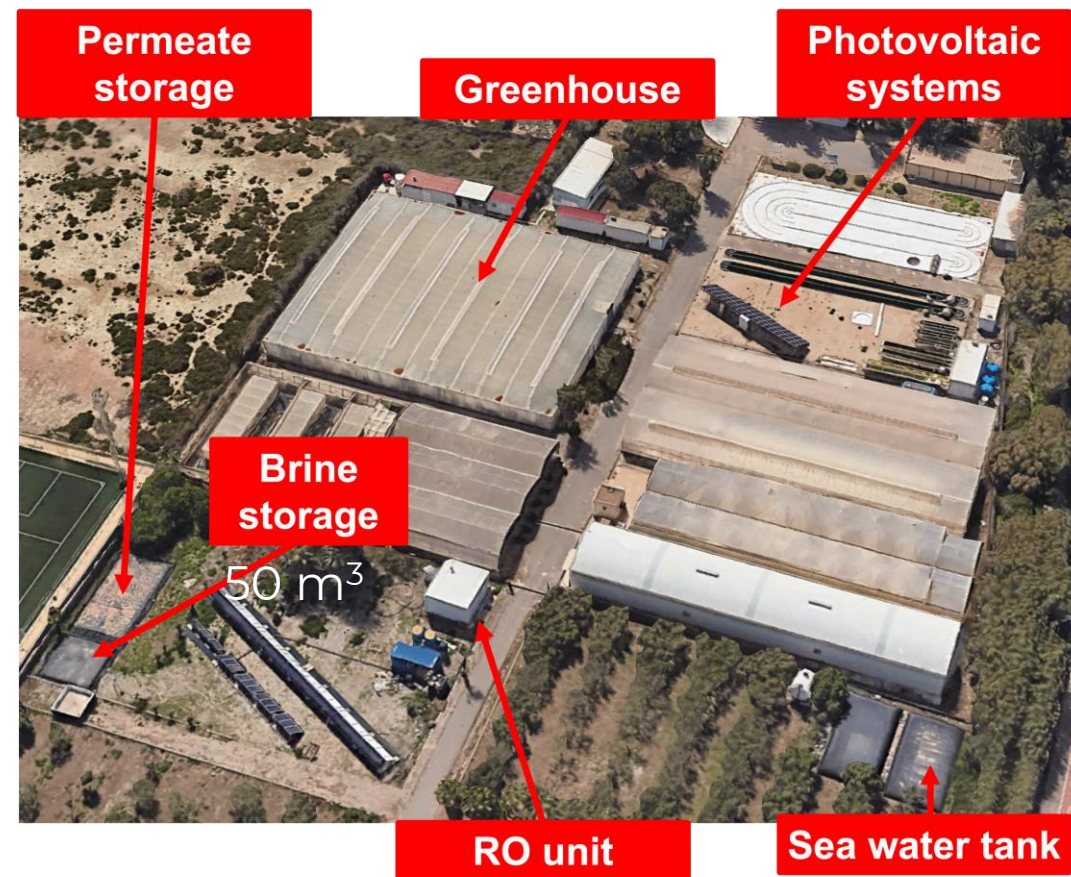
Agradecimiento: Sistema de Cultivo Intensivo Sostenible, Autónomo, Conectado y Abierto (AgroConnect). Ayudas para la adquisición de equipamiento científico-técnico del subprograma estatal de infraestructuras de investigación y equipamiento científico-técnico (Plan Estatal I+D+I 2017-2020), convocatoria 2019. Centro Mixto de Investigación en Energía Solar UAL-CIEMAT (CIESOL). Referencia proyecto: EQC2019-006658-P 2020-2021.

Convenio UAL-IFAPA Agroconnect



agroconnect.es

100 m³



Permeate storage

Greenhouse

Photovoltaic systems

Brine storage

50 m³

RO unit

Sea water tank

thermal energy tank with a capacity of 4000 L

100 m³



Membrane Distillation

6 m³/day of distillate water
56 kWh (thermal)/m³ consumption



30-panel solar thermal generation system
60kW_th

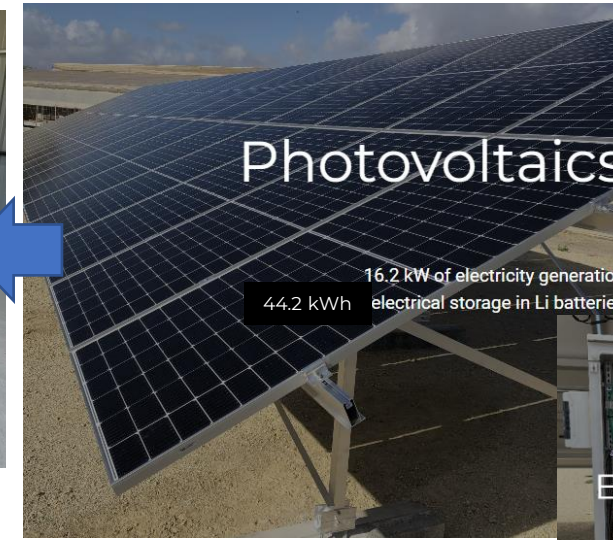


Biomass boiler
160 kW



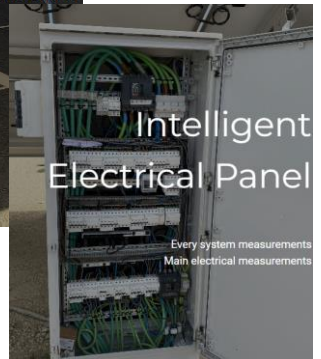
Reverse Osmosis unit

11 m³/day of osmotic water
3 kWh/m³ of electrical consumption
22 m³/h of brine



Photovoltaics

16.2 kW of electricity generation
44.2 kWh electrical storage in Li batteries



Intelligent Electrical Panel

Every system measurements
Main electrical measurements

Contexto: Datos de interés

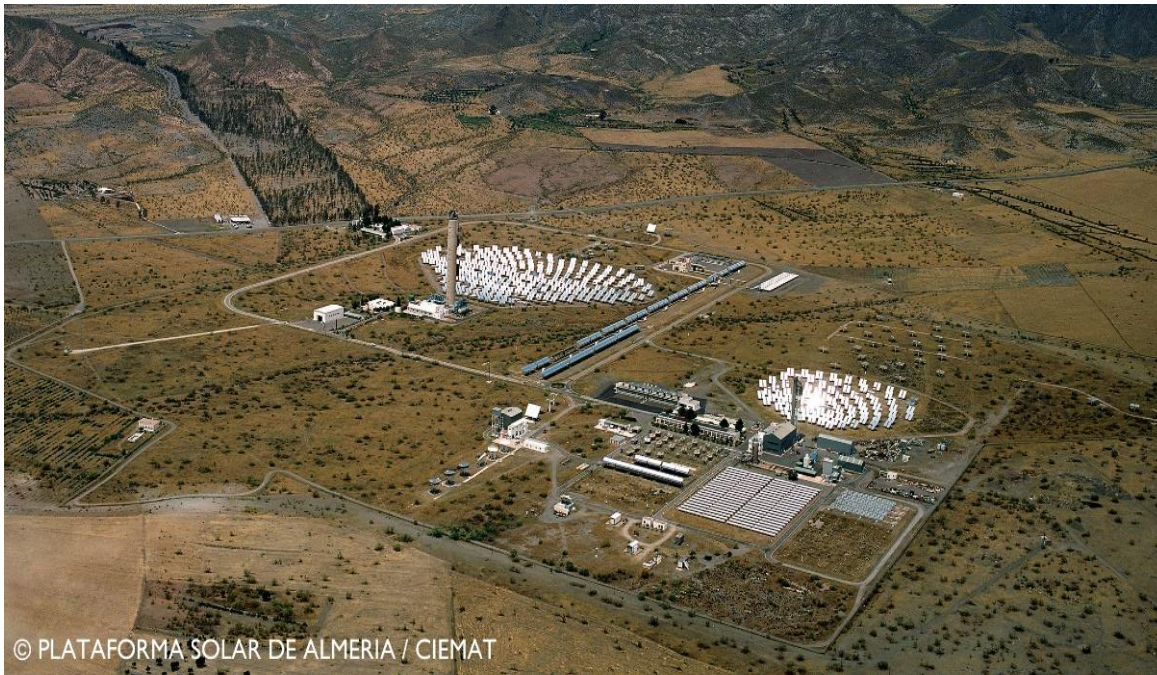
Charla de Pedro Cabrera



	Reverse Osmosis (RO)	Membrane Distillation (MD)
Fuente de energía:	Eléctrica	Térmica (calor residual)
Aplicación	Desalación	Uso con alta salinidad (trata salmueras muy concentradas)
Consumo específico en desalación pura (salinidad de 35 g/L)	3 kWh (eléctricos)/m ³	56 kWh (térmicos)/m ³ Puede llegar a 314.56 kWh (térmicos)/m ³ con alta salinidad y a 49 kWh/m ³ optimizados
Producción en desalación pura en Agroconnect	0.495 m ³ /h	0.58 m ³ /h

¿Qué capacidad de agua dulce puede producir una desaladora comercial?
 Plantas de capacidad media: entre 500 y 10000 m³ de agua desalada al día.

Línea de investigación con CIESOL-PSA: Obtener agua desalada usando energía solar para diversos usos.



Solar Membrane Distillation (SMD)
www.psa.es

Línea de investigación con CIESOL-PSA: Obtener agua desalada usando energía solar para diversos usos.

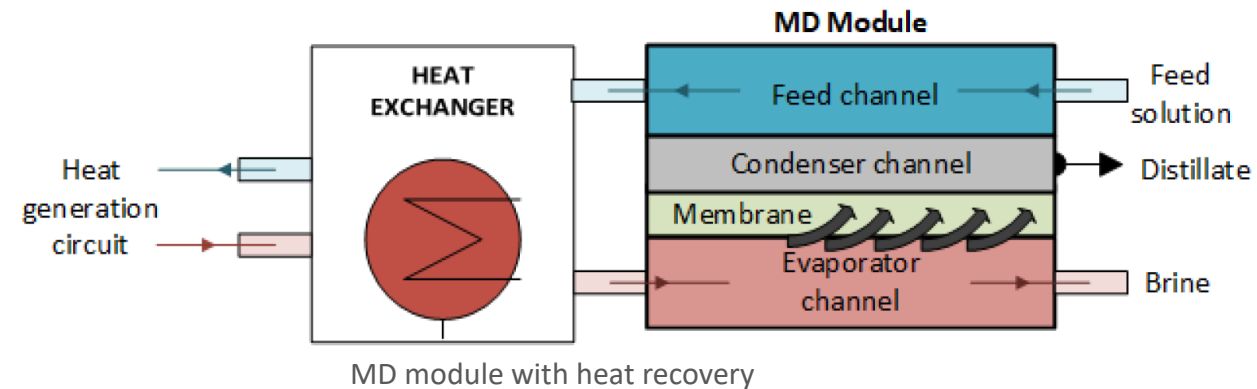
Reto a nivel de investigación: Afrontando problemas reales surgen problemas de control que requieren del desarrollo de nuevas técnicas.



1. Entender el funcionamiento del proceso y los problemas no resueltos asociados.
2. Obtener modelos estáticos y dinámicos para control y optimización.
3. Diseñar bucles de control básicos para ver posible mejora respecto a operación manual.
4. Introducir criterios de optimización para generación de consignas teniendo en cuenta diferente salinidad.
5. Análisis de problemas de implantación industrial y técnicas de optimización.

Destilación por membranas (MD)

La tecnología MD es un **proceso de separación térmico**, aún no plenamente comercializado, basado en el transporte de vapor a través de una **membrana hidrófoba y microporosa** (la diferencia de temperatura produce una **diferencia de presión de vapor** entre ambas superficies de la membrana).

PGMD



- 
Principal ventaja: Baja temperatura de funcionamiento ($< 90^{\circ}\text{C}$) que permite combinar los procesos MD con **energía solar de baja temperatura** y otras fuentes de baja entalpía como **calor residual**.
- 
Principal desventaja: Baja eficiencia térmica. Elevado consumo de energía térmica por unidad de destilado producido.
- Posibles aplicaciones: Plantas desalinizadoras autónomas en zonas sin conexión a la red y tratamiento de soluciones de alimentación concentradas; **campos en los que no pueden aplicarse métodos de desalinización convencionales (salinidad superior a 70 g/L)**.

Destilación por membranas (MD)

- Desde la aparición de la tecnología MD en 1963, el campo de investigación más explotado ha sido la búsqueda de **nuevos diseños** de módulos MD para mejorar la eficiencia térmica.
- Los módulos MD han pasado de un consumo térmico inicial de **810 kWh/m³** al consumo actual de unos **49 kWh/m³**.
- La tecnología MD se encuentra en **una nueva fase de desarrollo** centrada principalmente en **mejorar la operación** de los módulos MD.

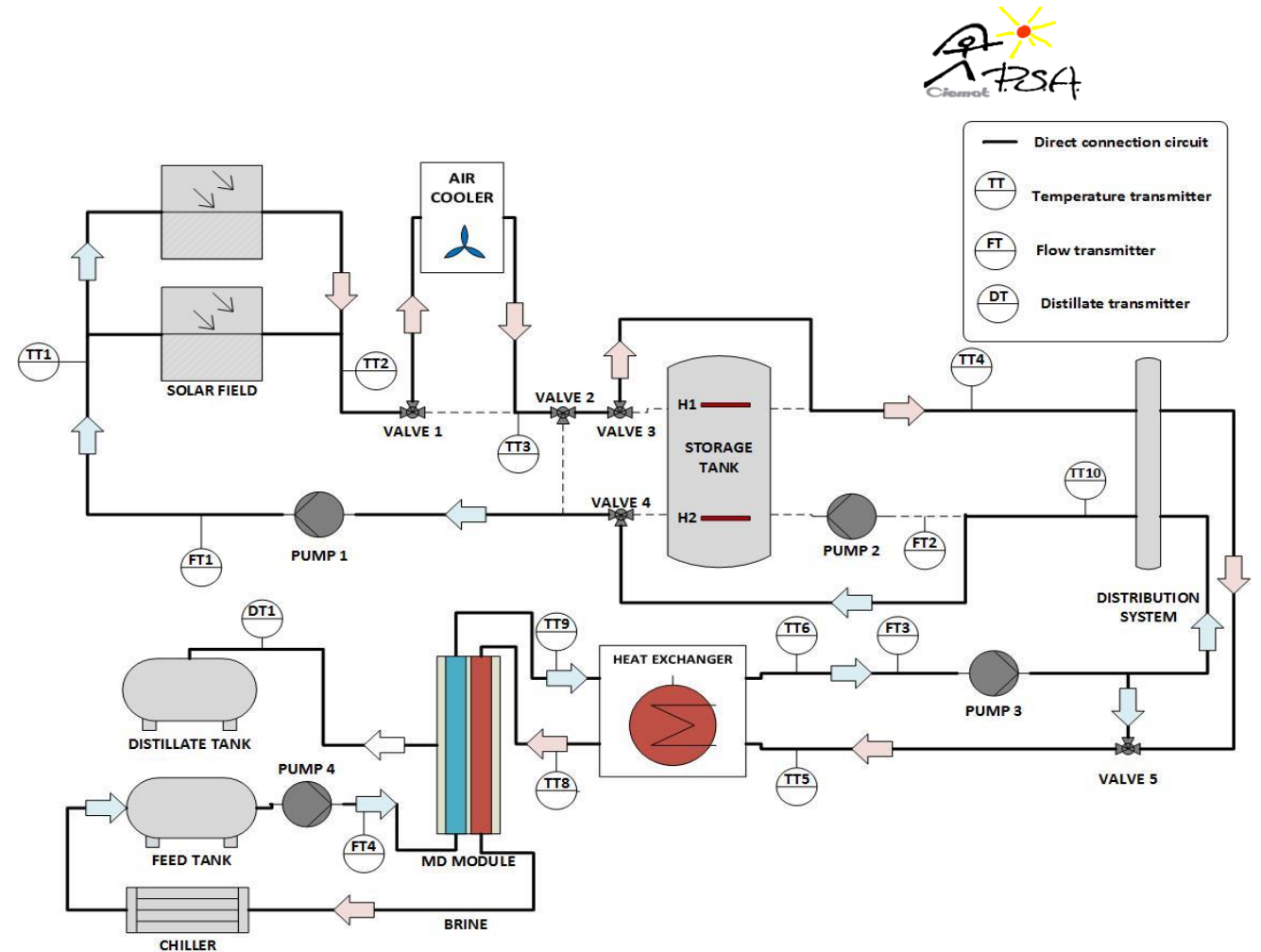
Nuestro objetivo: Desarrollar estrategias operativas que ayuden a comercializar la tecnología MD mediante el uso de técnicas de modelado, control y optimización.



Destilación por membranas (MD)



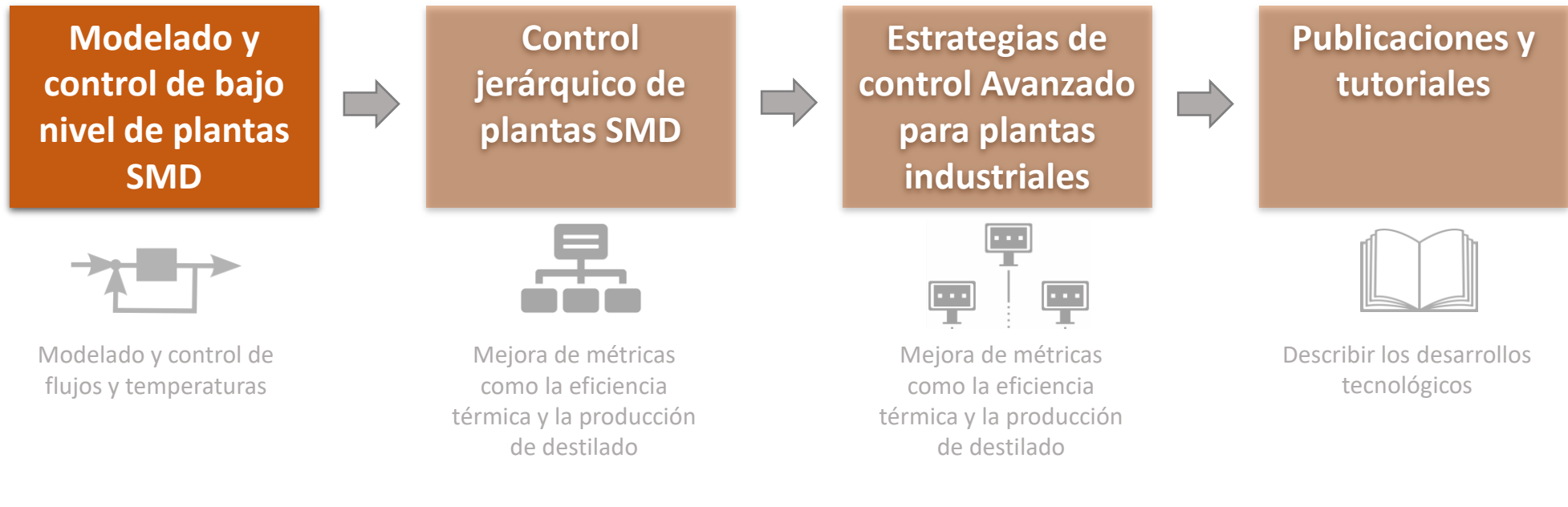
SMD pilot plant at PSA. From top to bottom and from left to right: solar field, Solar Spring module and Aquastill module.



Schematic diagram of the facility



Pasos seguidos



Retos

- Los **modelos** existentes en la bibliografía para el **circuito de generación de calor** de las plantas SMD **no se han validado en condiciones reales**, por lo que pueden ignorar dinámicas de interés.
- Los **controladores** de bajo nivel propuestos para las plantas SMD se basaban en operación manual o en bucles de control simples con controladores **todo/nada**.
- La mayoría de los **modelos** desarrollados para módulos de MD se han validado a escala de **laboratorio**, teniendo en cuenta únicamente como salida la producción de destilado y **sin considerar la salinidad del agua de alimentación como entrada del modelo**.

Modelado y control del circuito de generación de calor (caso más desfavorable – sin almacenamiento)

- Solar field - Simplified lumped-parameters dynamical equation (Roca et al., 2009).

$$A_{sf} \cdot \rho \cdot c_p \cdot \frac{dTT2(t)}{dt} = \beta \cdot I(t) - \frac{H}{L_{eq}} \cdot (\bar{T}(t) - T_a(t)) - c_p \cdot \dot{m}_{eq}(t) \cdot \frac{TT2(t) - TT1(t)}{L_{eq}}$$

$$L_{eq} = L_a \cdot n_{cs},$$

$$\dot{m}_{eq}(t) = \frac{FT1(t) \cdot \rho}{c_f},$$

$$\bar{T}(t) = \frac{TT1(t) + TT2(t)}{2}.$$

- Heat exchanger - First principles steady state model (de la Calle et al., 2016).

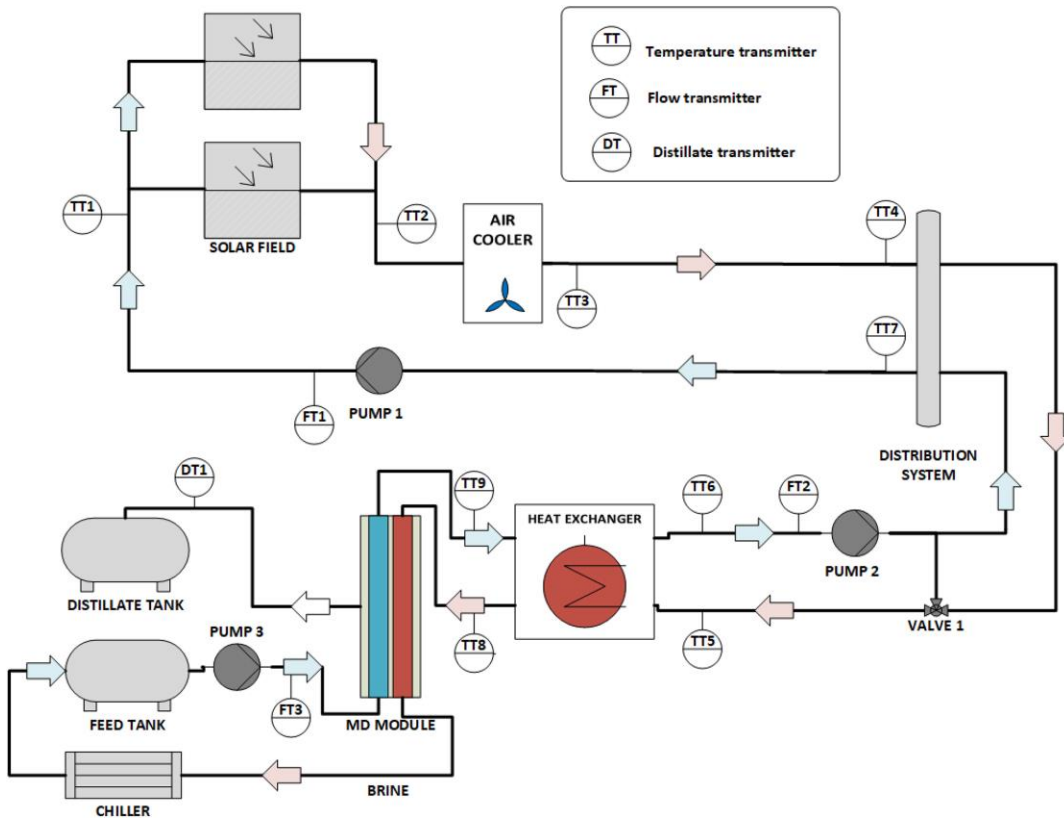
$$TT6_m = TT5 - \eta_{he,1} \cdot (TT5 - TT9),$$

$$TT8_m = TT9 + \eta_{he,2} \cdot (TT5 - TT6_m),$$

$$\eta_{he,1} = \frac{1 - e^{\theta_{he}}}{1 - \frac{\dot{m}_1 \cdot c_{p,1}}{\dot{m}_2 \cdot c_{p,2}} e^{\theta_{he}}},$$

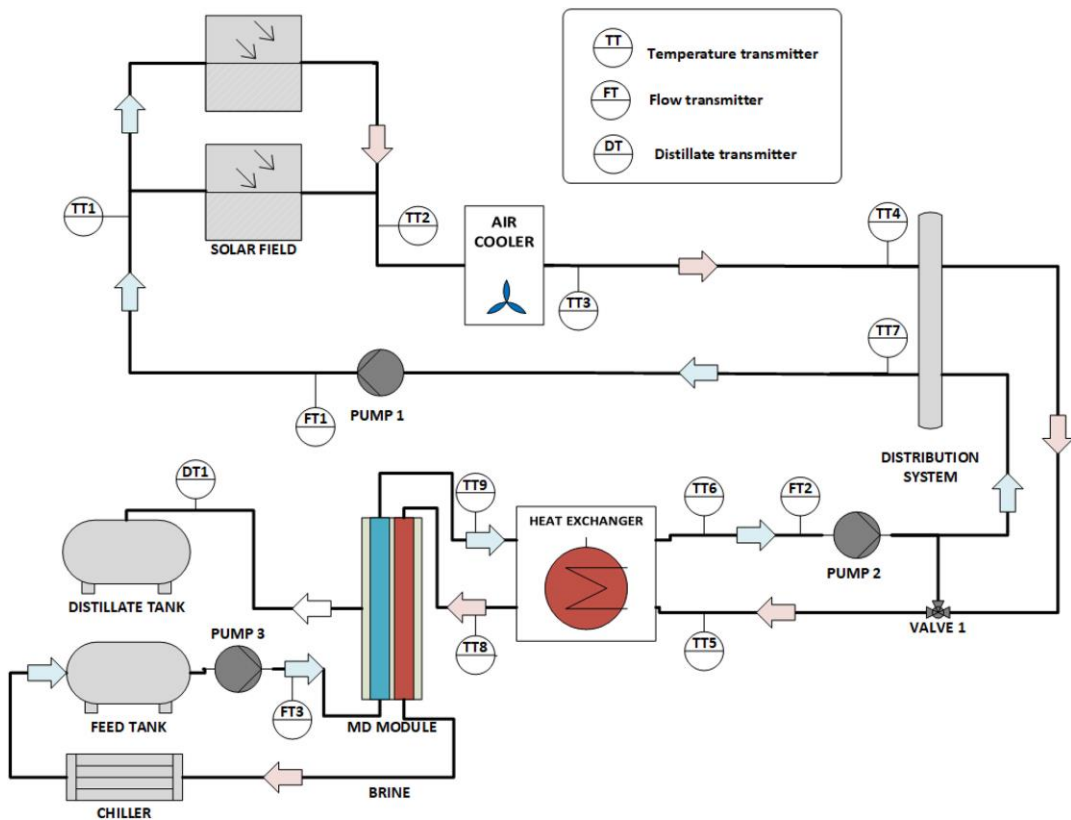
$$\eta_{he,2} = \frac{\dot{m}_1 \cdot c_{p,1}}{\dot{m}_2 \cdot c_{p,2}},$$

$$\theta_{he} = \alpha_{he} \cdot A_{he} \cdot \left(\frac{1}{\dot{m}_1 \cdot c_{p,1}} - \frac{1}{\dot{m}_2 \cdot c_{p,2}} \right).$$



Schematic diagram of the active components in direct connection mode

Modelado y control del circuito de generación de calor (caso más desfavorable – sin almacenamiento)



Schematic diagram of the active components in direct connection mode

- Distribution system a three-way mixing valve - Static energy balances.

$$TT5 \cdot FT2 = TT4 \cdot \gamma \cdot FT2 + TT6 \cdot (1 - \gamma) \cdot FT2,$$

$$TT7 = \frac{TT4 \cdot (FT1 - \gamma \cdot FT2) + TT6 \cdot \gamma \cdot FT2}{FT1},$$

- Models based on experimental data - First order plus dead time transfer functions

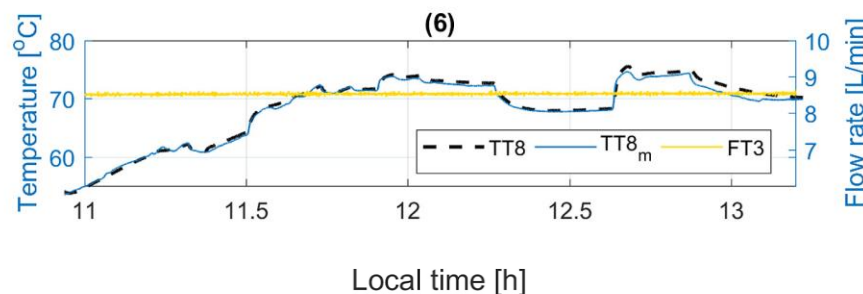
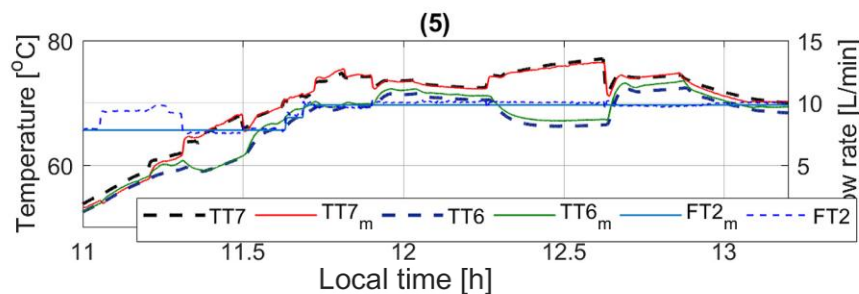
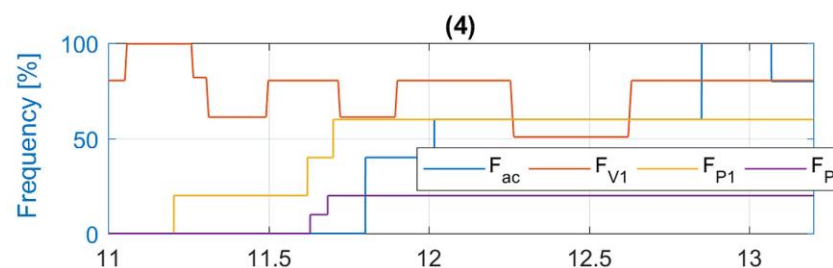
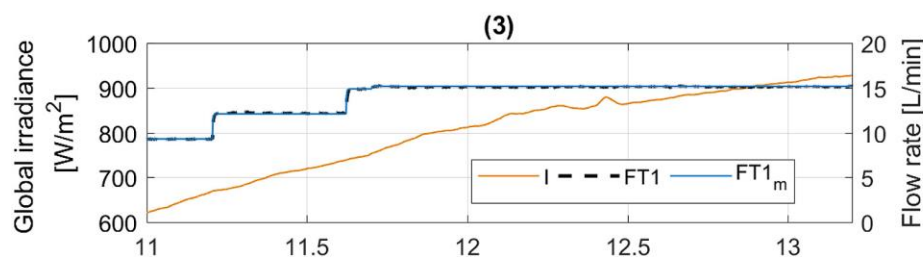
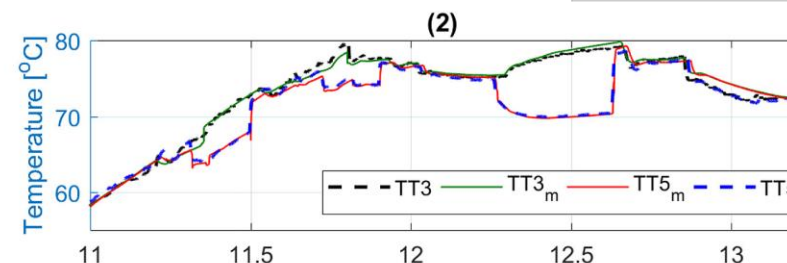
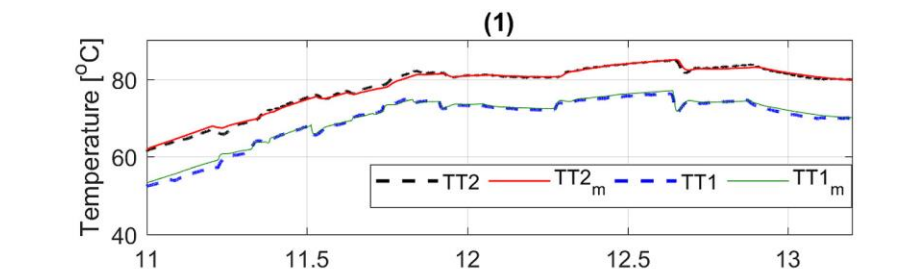
$G(s)$	$Y(s)$	$U(s)$	k	τ [s]	t_d [s]	NRMSE [%]
$G_1(s)$	$FT1(s)$	$F_{P1}(s)$	0.2344	5	1	96.7
$G_2(s)$	$FT2(s)$	$F_{P2}(s)$	0.1345	8.03	3	97.2
$G_3(s)$	$TT2(s)$	$FT1(s)$	-1.37	66.62	16	95.2
$G_4(s)$	$TT3(s)$	$F_{ac}(s)$	-0.1087	27.48	20	96.5
$G_5(s)$	$TT5(s)$	$F_{V1}(s)$	0.1502	14.3	10	86.2

- Dead times

Pipe section	Dead time [s]
TT3-TT4	35
TT7-TT1	65

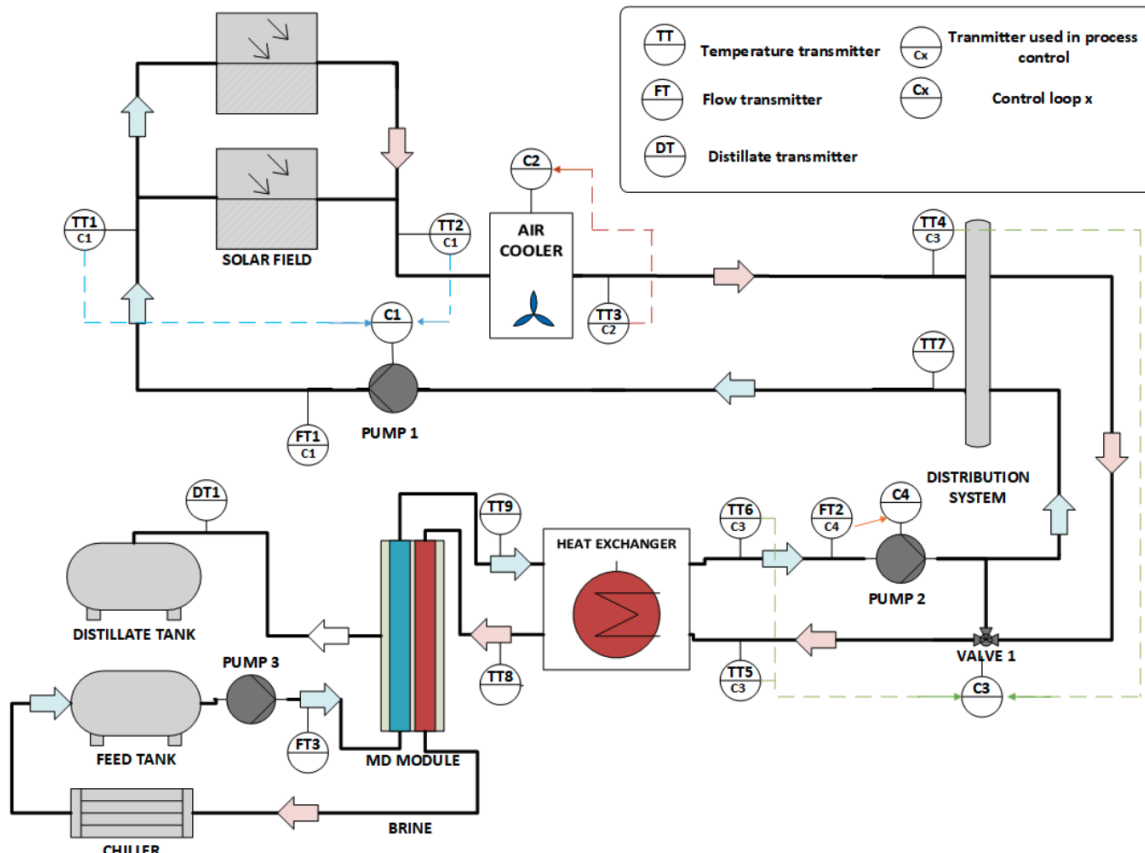
Modelado y control del circuito de generación de calor (caso más desfavorable – sin almacenamiento)

Variable	Mean error [°C]	Maximum error [°C]
TT2	1.05	2.85
TT6	0.445	0.895
TT8	0.36	0.82

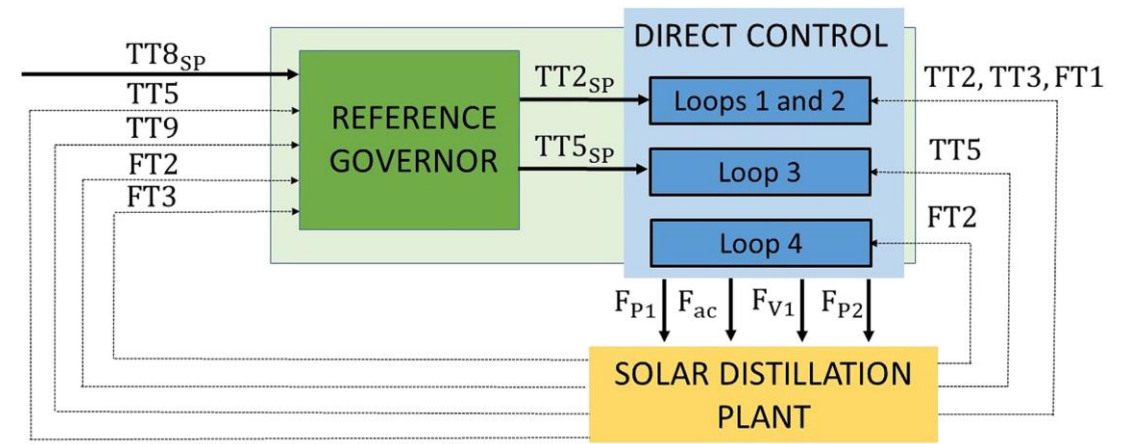


Comparison between real measurements and model outputs

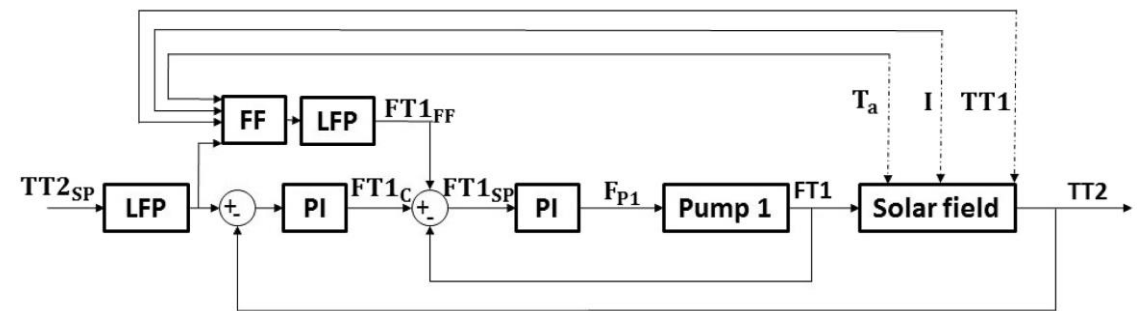
Modelado y control del circuito de generación de calor



Schematic diagram of the active components in direct connection mode with control loops

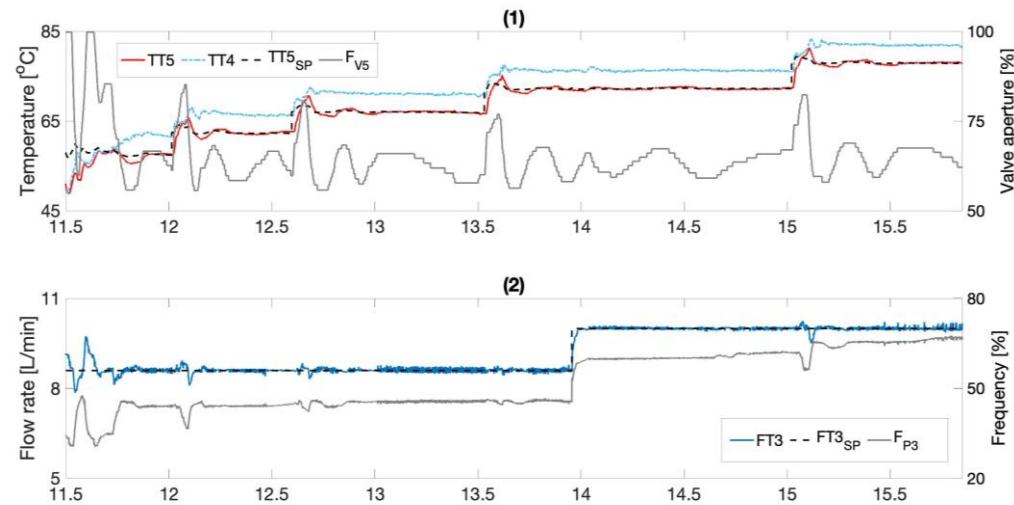
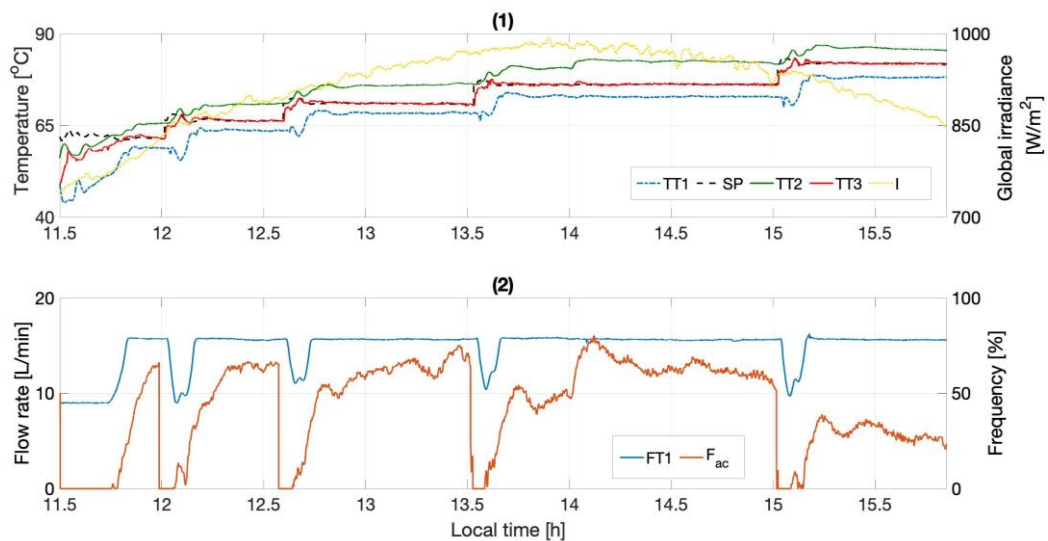


Overview of the control architecture



Solar field control scheme

Modelado y control del circuito de generación de calor



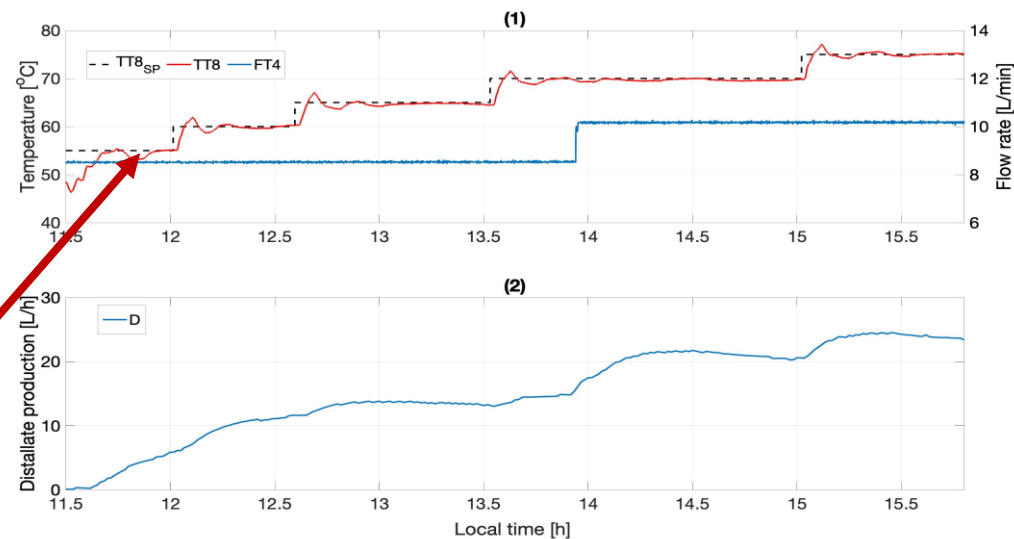
Tuning parameters

Controller	Tuning parameters
Loop 1- Slave controller	$K_p = 2.84 \text{ \%}\cdot\text{min}/\text{L}$ and $T_i = 0.082 \text{ min}$ (AMIGO)
Loop 1-Outer controller	$K_p = -0.42 \text{ L}/\text{min}/^\circ\text{C}$ and $T_i = 1.21 \text{ min}$ (Improved SIMC)
Loop 2	$K_p = -7.48 \text{ \%}\cdot\text{min}/^\circ\text{C}$ and $T_i = 0.233 \text{ min}$ (Improved SIMC)
Loop 3	$K_p = 2.22 \text{ \%}\cdot\text{min}/^\circ\text{C}$ and $T_i = 0.5 \text{ min}$ (Improved SIMC)
Loop 4	$K_p = 4.12 \text{ \%}\cdot\text{min}/\text{L}$ and $T_i = 0.1505 \text{ min}$ (Improved SIMC)

Controller performance

Metric	Value
Settling time	<20 min
Overshoot	< 25 %
Steady state error	< 0.5 °C

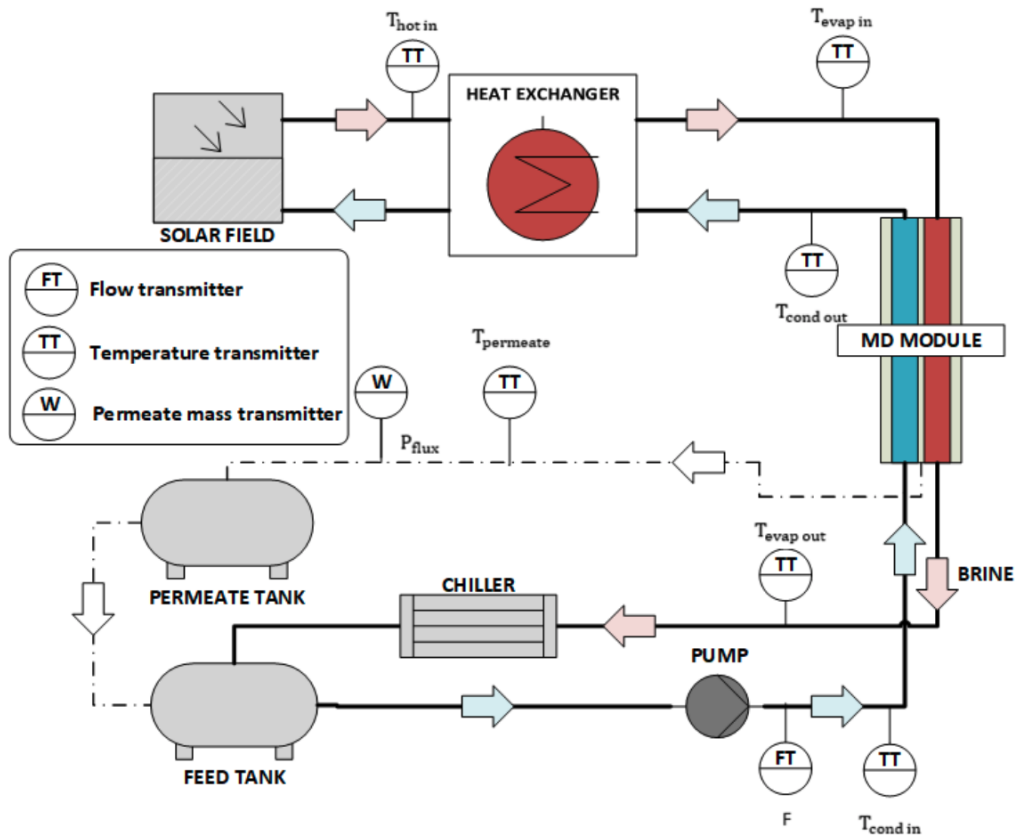
Improvements: **50 %**
 Settling time



Experimental results

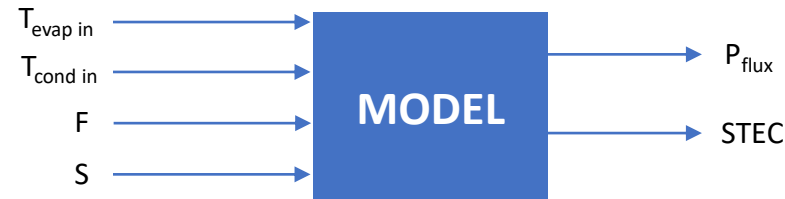
Modelado del módulo MD: ¿qué interesa optimizar?

- **Consumo Específico de Energía Térmica** (*Specific Thermal Energy Consumption, STEC*): cantidad de energía necesaria para producir una unidad de volumen de destilado (kWh/m^3)
- **Flujo de Permeado** (*Permeate Flux, P_{flux}*): producción de destilado por área de membrana $\text{L}/(\text{hm}^2)$. D es el destilado total (L/h).



$$\text{STEC} (\text{kWh/m}^3) = \frac{F \cdot \rho_{\text{feed}} \cdot c_p \cdot (T_{\text{evap in}} - T_{\text{cond out}})}{c \cdot D}$$

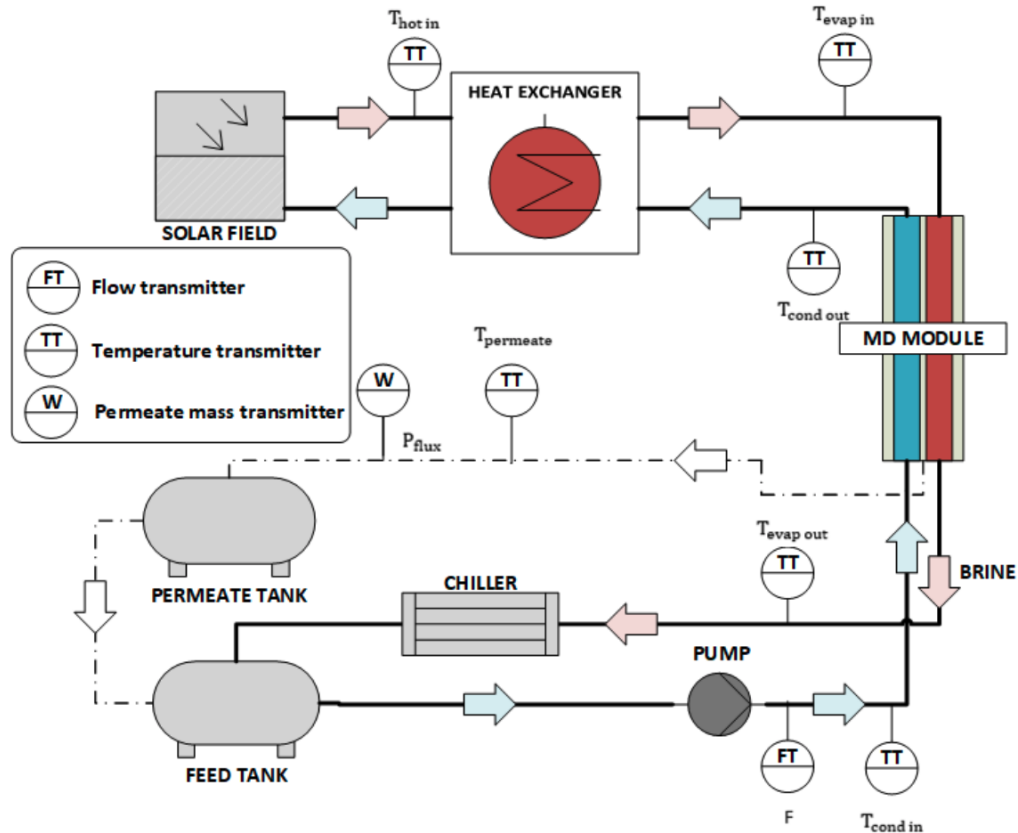
➤ Estructura del modelo



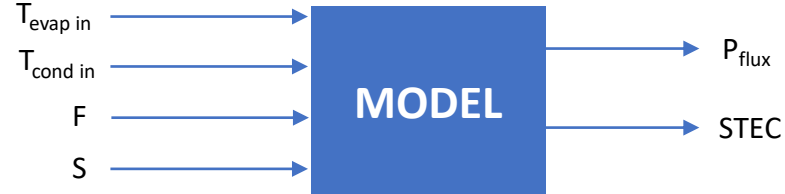
Entradas:

- $T_{\text{evap in}}$: Temperatura de entrada al evaporador
- $T_{\text{cond in}}$: Temperatura de entrada al condensador
- F : Caudal de alimentación
- S : Concentración de sal en agua de alimentación

Modelado del modulo MD



Estructura del modelo



Metodologías de modelado

Response surface methodology (RSM)

$$q = w_0 + \sum_{i=1}^m w_i \cdot z_i + \sum_{i=1}^m w_{ii} \cdot z_i^2 + \sum_{1 \leq i < k} w_{ik} \cdot z_i \cdot z_k,$$

Artificial Neural Network (ANN)

Neural

$$a = z_1 \cdot w_{1,1} + z_2 \cdot w_{1,2} + \dots + z_m \cdot w_{1,m} + b.$$

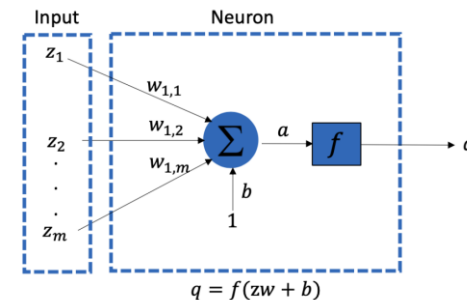


Diagrama esquemático de una neurona

Modelado del modulo MD

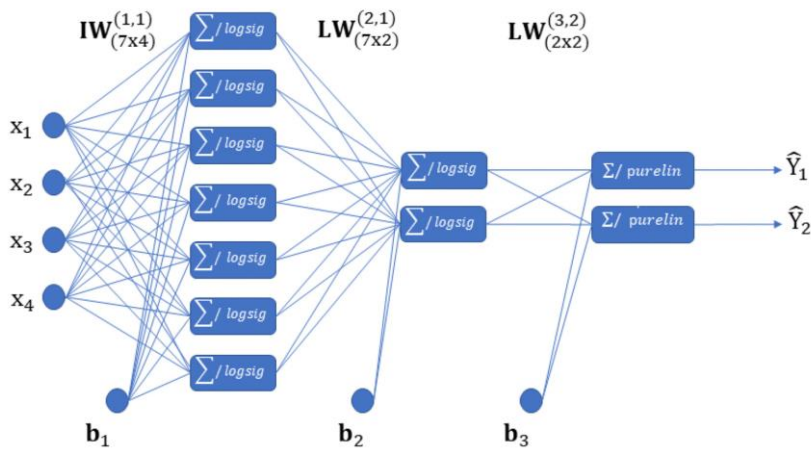
➤ RSM model (ANOVA analysis)

$$P_{\text{flux}} = -0.8868 + 0.0291 \cdot T_{\text{evap}} - 0.0104 \cdot T_{\text{cond}} - 0.0008 \cdot F - 0.0087 \cdot S + 0.000061 \cdot T_{\text{evap}} \cdot F - 0.0002 \cdot T_{\text{evap}} \cdot S - 0.0001 \cdot T_{\text{cond}} \cdot S - 0.000009 \cdot F \cdot S + 0.0001 \cdot S^2$$

$$\text{STEC} = -317.712 + 5.874 \cdot T_{\text{evap}} + 24.296 \cdot S - 0.273 \cdot T_{\text{evap}} \cdot S$$

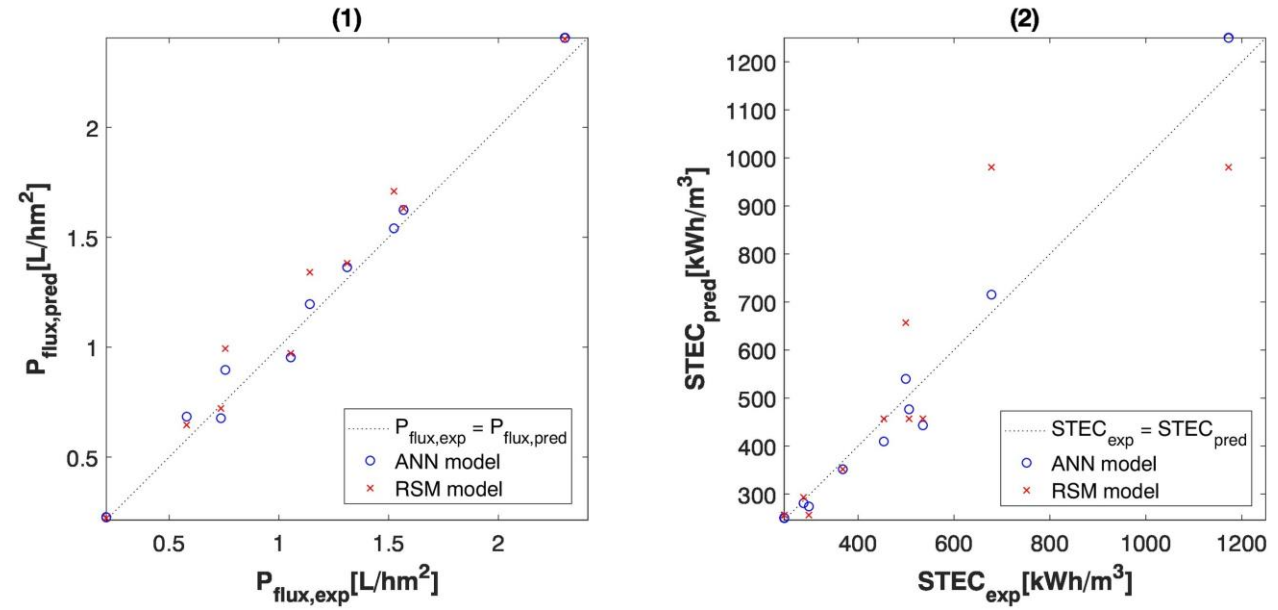
➤ ANN model – MLP (4:7:2:2)

$$\hat{Y} = \Phi^{(3)}(\mathbf{LW}^{(3,2)}\Phi^{(2)}(\mathbf{LW}^{(2,1)}\Phi^{(1)}(\mathbf{IW}^{(1,1)}\mathbf{x} + \mathbf{b}^{(1)}) + \mathbf{b}^{(2)}) + \mathbf{b}^{(3)}),$$



ANN model architecture

➤ Validation of the models



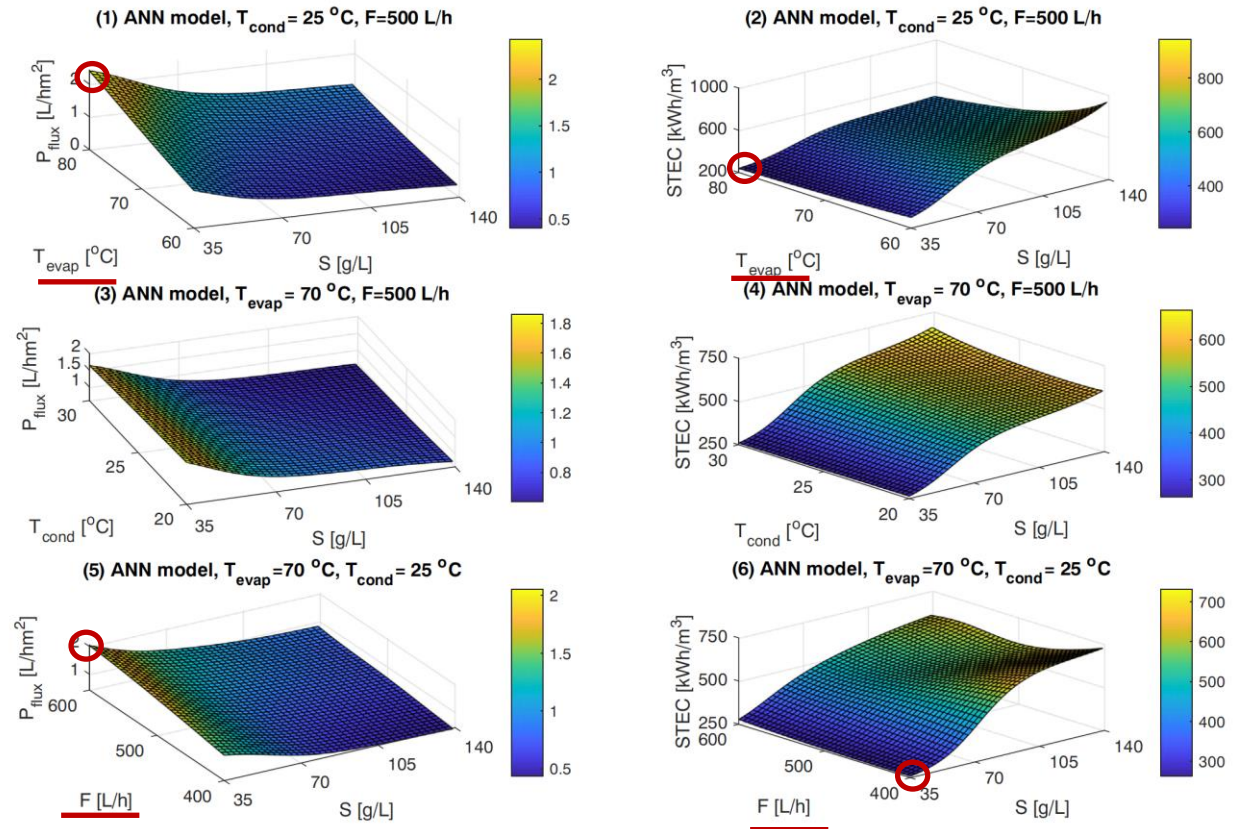
Comparison between predicted values of both models and experimental data

	RSM		ANN	
	STEC	P_{flux}	STEC	P_{flux}
RMSE	85.70	0.10	27.01	0.06
R^2	0.770	0.985	0.982	0.988
Adjusted- R^2	0.742	0.984	0.981	0.987

Modelado del modulo MD: Condiciones óptimas de operación

➤ Visualization of the operating range of the MD module

➤ Multi-objective optimization



$S = 70\text{ g/L}$

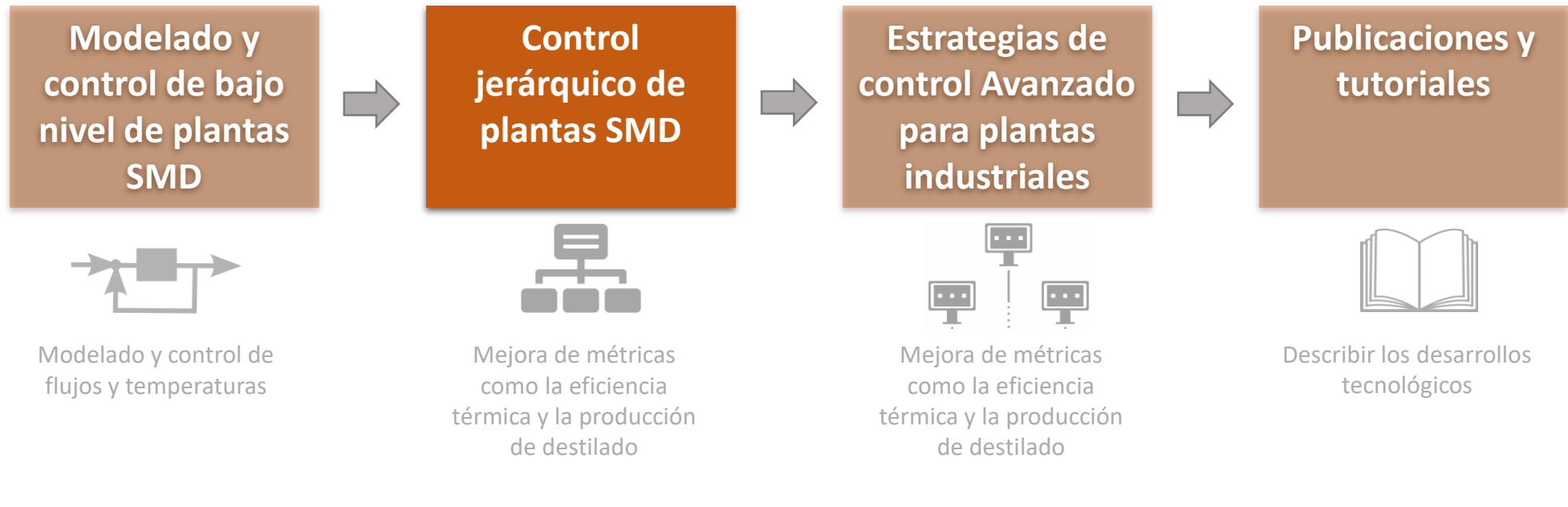
$S = 105\text{ g/L}$

Run	$T_{cond} (^{\circ}\text{C})$	$T_{evap} (^{\circ}\text{C})$	F(L/h)	STEC _{pred} (kWh/m ³)	$P_{flux,pred}$ (L/(h·m ²))
<i>Pareto front values of optimization problem 1</i>					
1	20.00	80.00	600.00	389.31	<u>1.83</u>
2	20.31	80.00	577.04	381.85	1.82
3	21.09	80.00	557.45	370.53	1.79
4	28.81	80.00	599.86	355.03	1.67
5	30.00	80.00	597.49	353.26	1.64
6	26.64	80.00	436.35	353.26	1.22
7	26.84	80.00	426.97	350.05	1.18
8	26.85	80.00	401.38	341.36	1.10
9	29.67	80.00	412.29	329.42	0.98
10	30.00	80.00	400.00	<u>320.47</u>	0.91
<i>Pareto front values of optimization problem 2</i>					
1	20.00	80.00	600.00	470.67	<u>1.51</u>
2	21.02	80.00	598.73	468.58	1.46
3	21.49	80.00	595.28	467.35	1.44
4	20.62	80.00	556.64	455.28	1.43
5	21.11	80.00	557.07	452.81	1.41
6	21.40	80.00	548.95	446.56	1.40
7	21.33	80.00	532.78	440.51	1.38
8	30.00	80.00	600.00	421.48	1.38
9	29.86	80.00	585.48	416.96	1.36
10	30.00	80.00	580.10	<u>416.20</u>	1.35

3D response surfaces obtained with the ANN model



Pasos seguidos



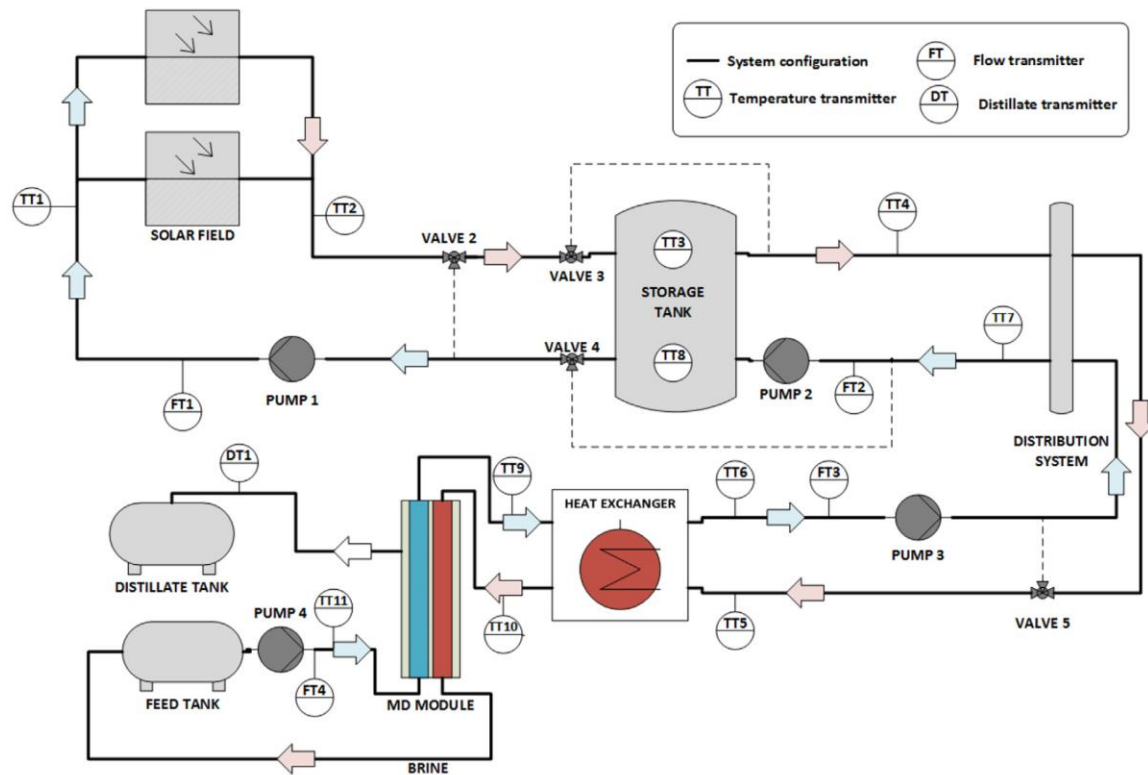
Retos

- Aproximación tradicional: definir mediante optimización **puntos de funcionamiento estáticos**. Estas técnicas no pueden ser adecuadas teniendo en cuenta la **naturaleza intermitente de la energía solar**.
- Las estrategias de control en tiempo real propuestas en la literatura sólo consideran la maximización de la producción de destilado.
- Otro reto comprobado fue la falta de metodologías para el procedimiento de **puesta en marcha** de estas plantas.

Contribución: desarrollo de controladores jerárquicos para plantas SMD destinados a mejorar tanto la **producción de destilado** como la **eficiencia térmica** del módulo MD, así como a **reducir los costes de explotación** de toda la instalación y **detectar mejoras en diseño**.

Control jerárquico de plantas SMD

Desarrollo de una arquitectura de control jerárquico en tiempo real que puede configurarse con diferentes funciones objetivo para optimizar tanto la producción de destilado como la eficiencia térmica del módulo MD y los costes de explotación de toda la instalación.



Configuración con tanque de almacenamiento

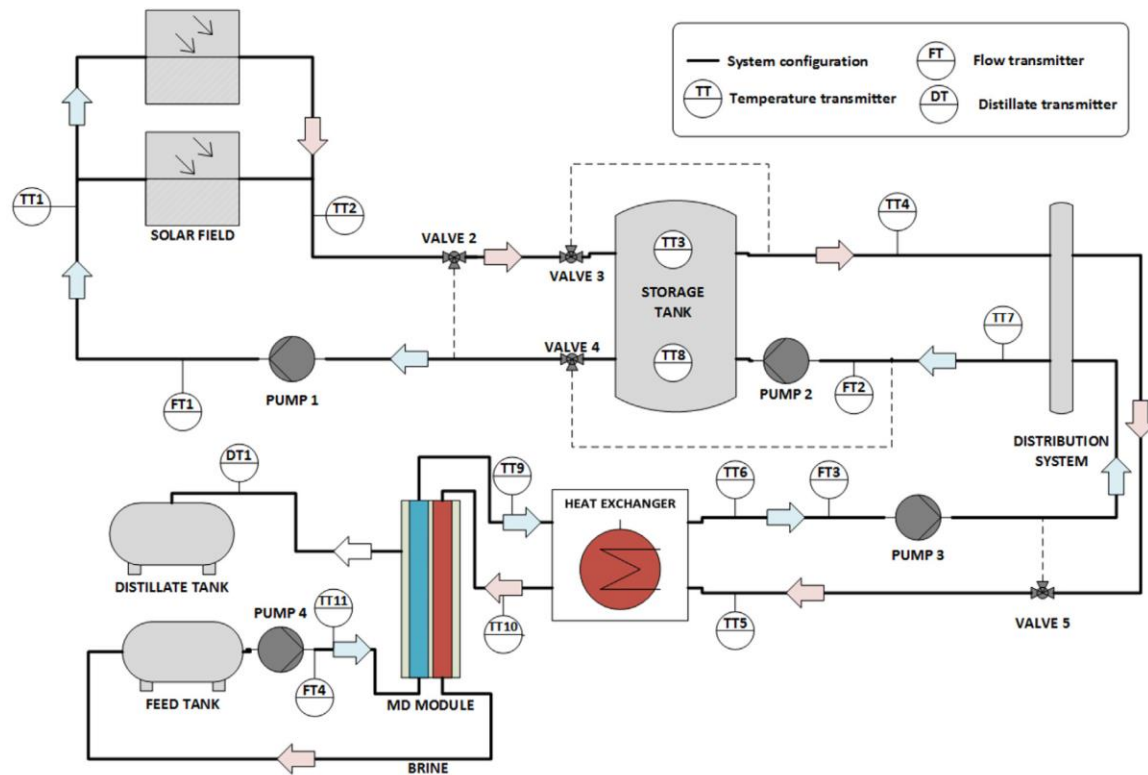
➤ Tank model – Two nodes stratified dynamic model (Duffie and Beckman., 2009).

$$\frac{dTT3(t)}{dt} = \frac{1}{\rho \cdot V} \cdot (\dot{m}_{sf} \cdot TT2(t) + \dot{m}_{ds} \cdot TT8(t) - \dot{m}_{sf} \cdot TT3(t) - \dot{m}_{ds} \cdot TT3(t) - \frac{UA_1 \cdot (TT3(t) - T_a(t))}{c_p}),$$

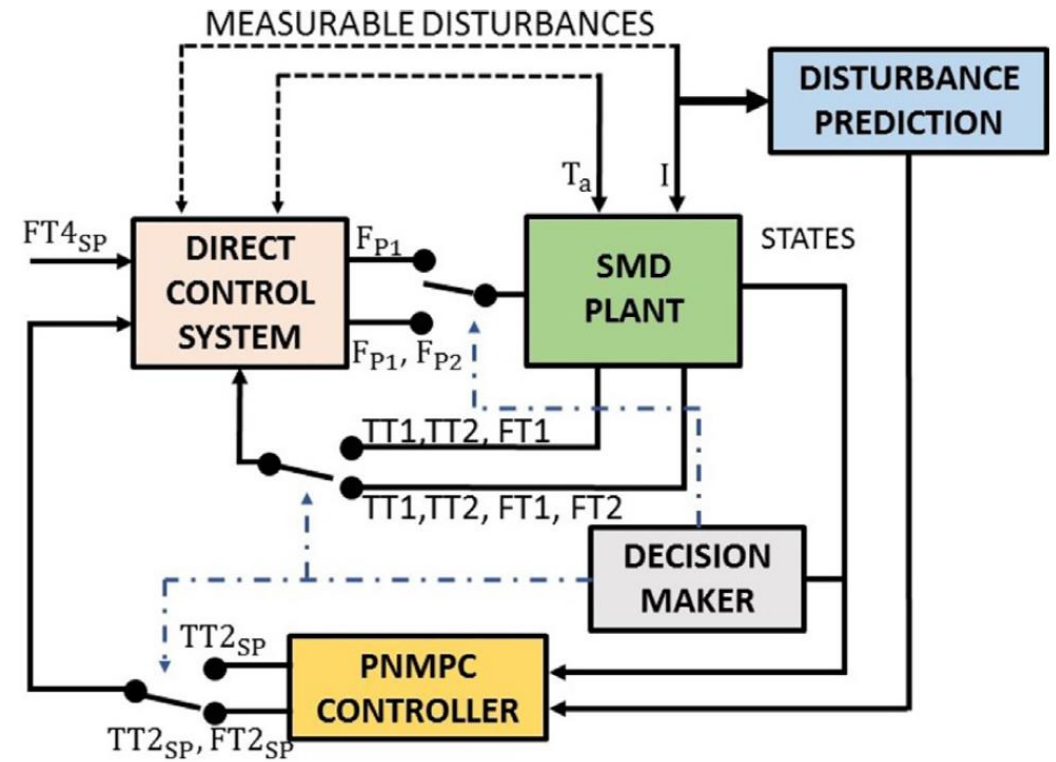
$$\frac{dTT8(t)}{dt} = \frac{1}{\rho \cdot V} \cdot (\dot{m}_{sf} \cdot TT3(t) + \dot{m}_{ds} \cdot TT7(t) - \dot{m}_{sf} \cdot TT8(t) - \dot{m}_{ds} \cdot TT8(t) - \frac{UA_2 \cdot (TT8(t) - T_a(t))}{c_p}).$$

Control jerárquico de plantas SMD

Desarrollo de una arquitectura de control jerárquico en tiempo real que puede configurarse con diferentes funciones objetivo para optimizar tanto la producción de destilado como la eficiencia térmica del módulo MD y los costes de explotación de toda la instalación.



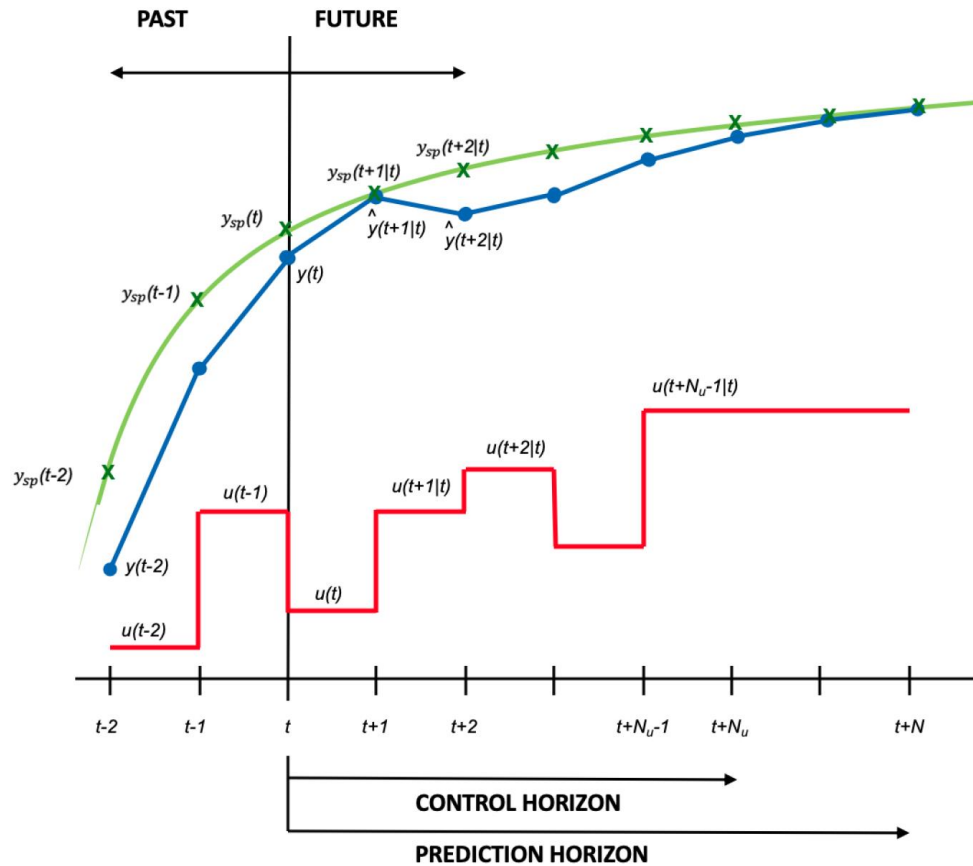
Configuración con tanque de almacenamiento
(FT4 constante)



Esquema de control jerárquico

Control jerárquico de plantas SMD

➤ MPC strategy



MPC strategy

➤ PNMPC strategy (Plucenio et al., 2007).

Calculated with the nonlinear model $\rightarrow \hat{\mathbf{Y}} \approx \mathbf{f} + \mathbf{G}_{\text{PNMPC}} \cdot \Delta \mathbf{u}$,
 $\mathbf{f} = f(\bar{\mathbf{Y}}, \Delta \bar{\mathbf{u}}, \Delta \bar{\mathbf{v}})$,
 $\mathbf{G}_{\text{PNMPC}} = \frac{\partial \hat{\mathbf{Y}}}{\partial \Delta \mathbf{u}}$, ← Jacobian matrix

➤ Objective functions

Tank fast heating mode

$$\min_{\text{TT2}_{\text{SP}}} J1 = - \sum_{j=1}^N \text{TT}\hat{3}(t + j|t)$$

Normal operating mode

$$\min_{\text{TT2}_{\text{SP}}, \text{FT2}_{\text{SP}}} J2 = - \sum_{j=1}^N \text{TT}\hat{10}(t + j|t). \quad \uparrow$$

or

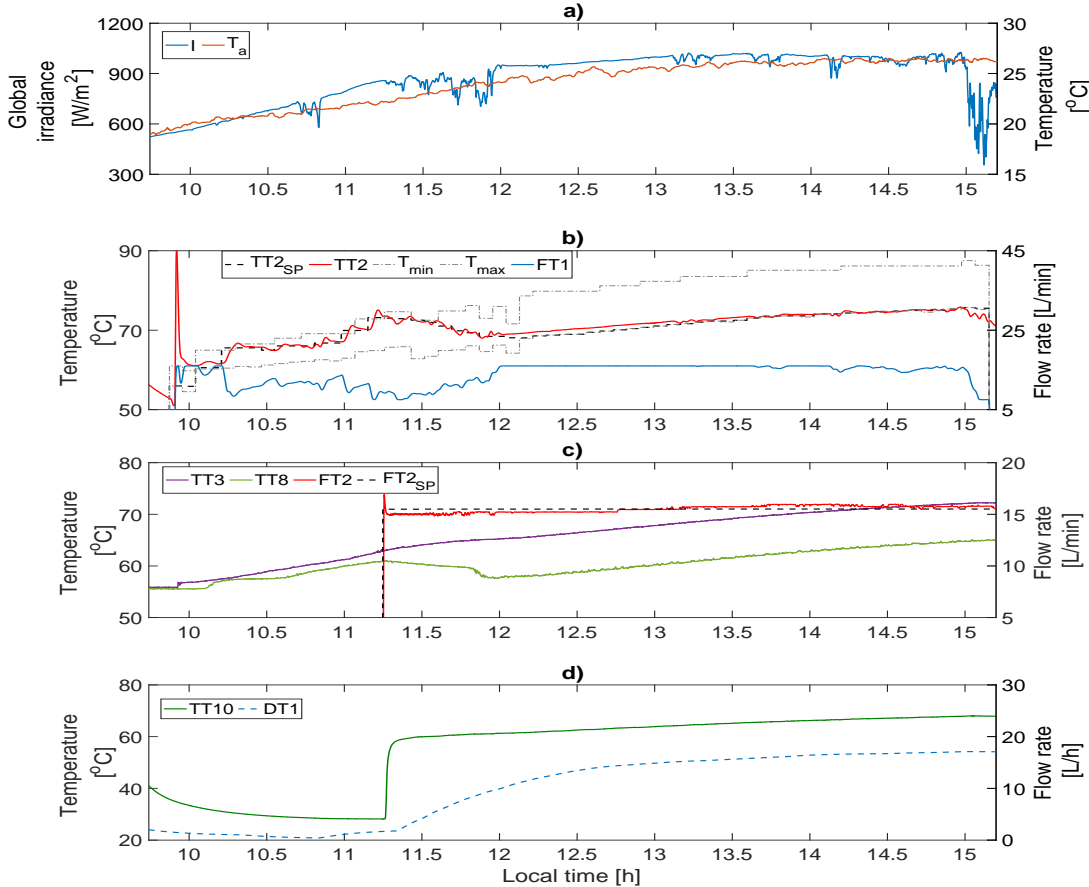
$$\min_{\text{TT2}_{\text{SP}}, \text{FT2}_{\text{SP}}} J3 = \sum_{j=1}^N \frac{\hat{E}_{\text{cost}}(t + j|t)}{\text{D}\hat{1}(t + j|t)} \quad \downarrow$$

➤ Constraints

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{U}_{\min} &\leq \Delta \mathbf{U} \leq \Delta \mathbf{U}_{\max} \\ \text{TT2}_{\min} &\leq \text{TT2} \leq \text{TT2}_{\max} \\ \text{TT10}_{\min} &\leq \text{TT10} \leq \text{TT10}_{\max} \end{aligned}$$

Control jerárquico de plantas SMD

Experimental results – J2



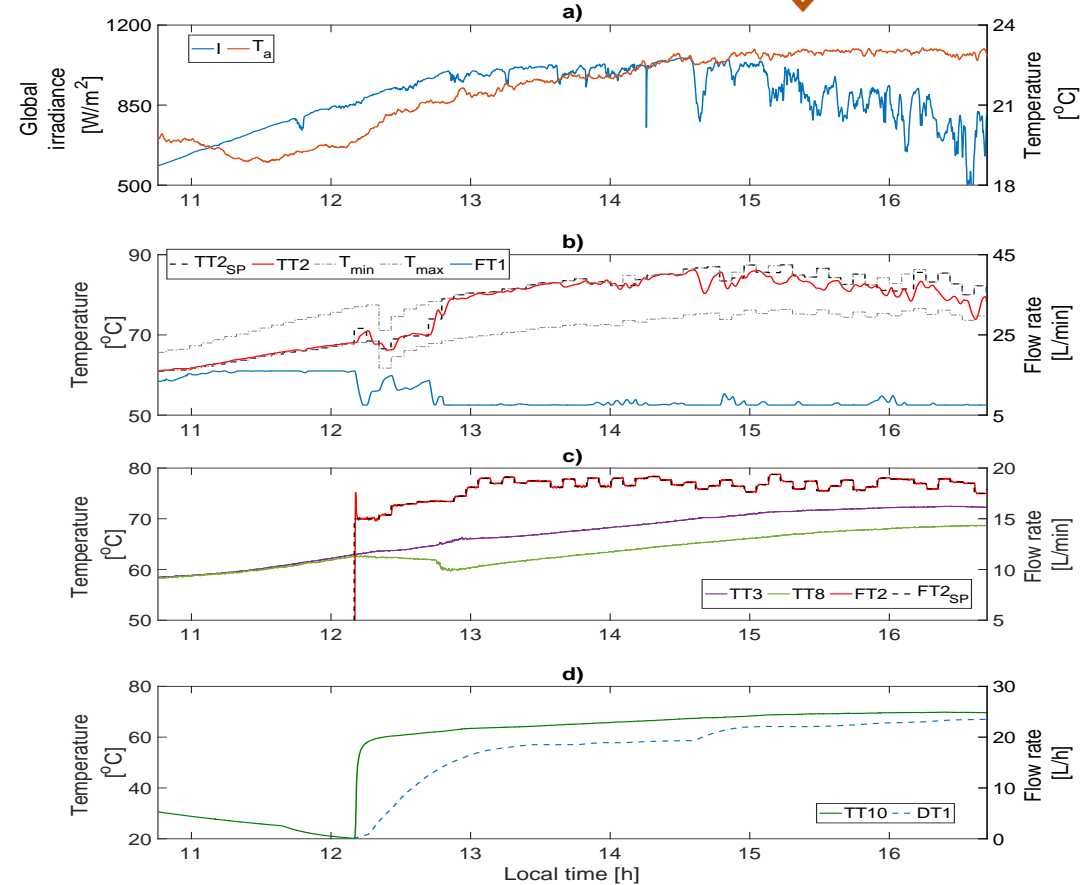
Control system performance with J2

Improvements: 7 % Distillate production
1 % Specific thermal energy consumption

Experimental results – J3



$T_s = 5 \text{ min}$
 $N = N_u = 2$

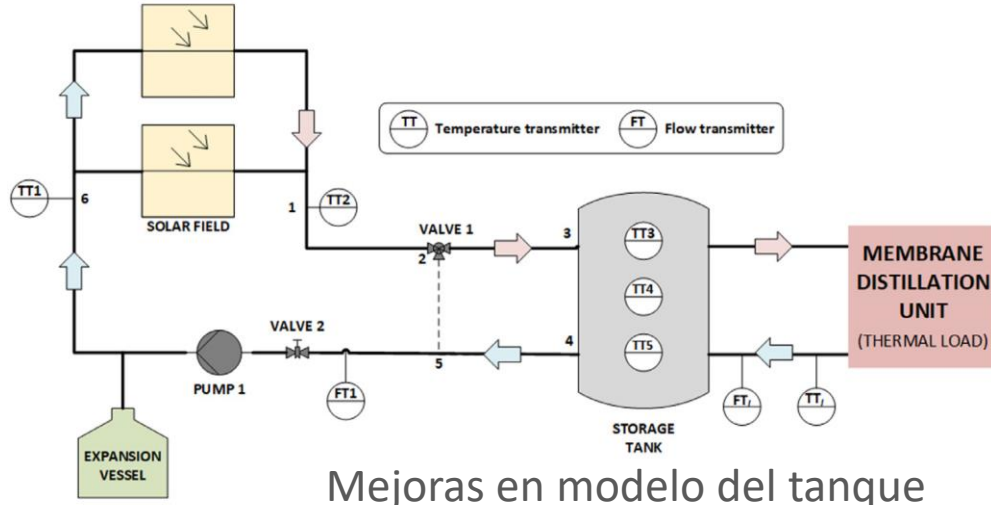


Control system performance with J3

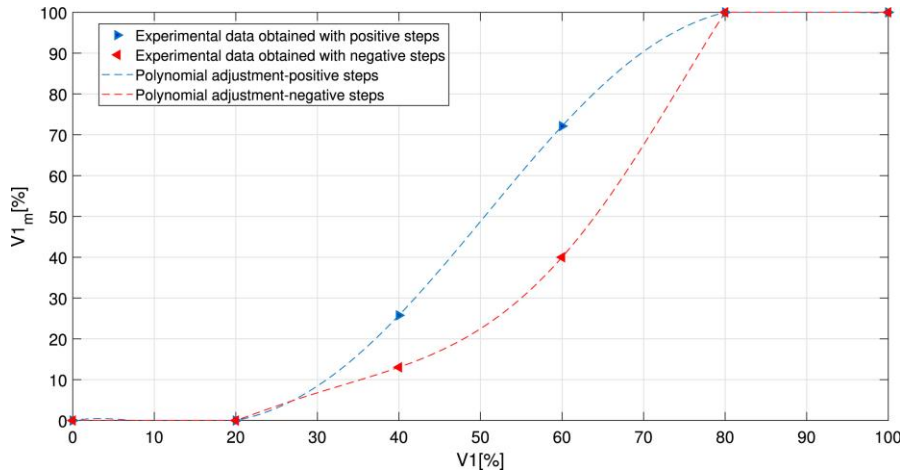
Improvements: 10 % Operating Costs

Optimización de puesta en marcha

Optimal start-up procedure of SMD plants via hierarchical control – Control formulation



Mejoras en modelo del tanque



Característica estática de la válvula

- Tank model – Three nodes stratified dynamic model (Duffie and Beckman., 2009).

$$\frac{dTT3(t)}{dt} = \frac{1}{\rho \cdot V_a} \cdot \left[\dot{m}_{sf}(t) \cdot (TT2(t) - TT3(t)) + \dot{m}_l(t) \cdot (TT4(t) - TT3(t)) - \frac{\alpha_1 \cdot (TT3(t) - T_a(t))}{c_p} \right],$$

$$\frac{dTT4(t)}{dt} = \frac{1}{\rho \cdot V_b} \cdot \left[\dot{m}_{sf}(t) \cdot (TT3(t) - TT4(t)) + \dot{m}_l(t) \cdot (TT5(t) - TT4(t)) - \frac{\alpha_2 \cdot (TT4(t) - T_a(t))}{c_p} \right],$$

$$\frac{dTT5(t)}{dt} = \frac{1}{\rho \cdot V_c} \cdot \left[\dot{m}_{sf}(t) \cdot (TT4(t) - TT5(t)) + \dot{m}_l(t) \cdot (TT_l(t) - TT5(t)) - \frac{\alpha_3 \cdot (TT5(t) - T_a(t))}{c_p} \right].$$

- Valve 1 model – Static mass balance

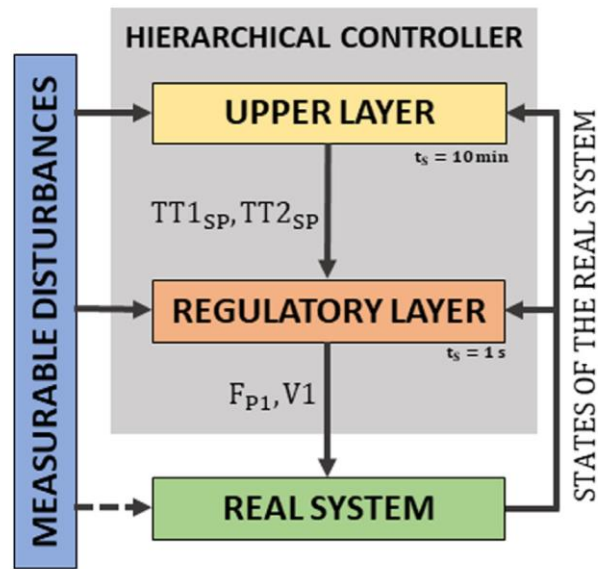
$$TT1(t) = TT2(t) \cdot \frac{V1_m(t)}{100} + TT5(t) \cdot \left(1 - \frac{V1_m(t)}{100}\right),$$

$$V1_m(t) = 1.6562 \cdot 10^{-7} \cdot V1(t)^5 - 4.1953 \cdot 10^{-5} \cdot V1(t)^4 + 0.0033 \cdot V1(t)^3 - 0.0664 \cdot V1(t)^2 + 0.3292 \cdot V1(t),$$

$$V1_m(t) = -3.3958 \cdot 10^{-7} \cdot V1(t)^5 + 7.2667 \cdot 10^{-5} \cdot V1(t)^4 - 0.0053 \cdot V1(t)^3 + 0.1719 \cdot V1(t)^2 - 1.8433 \cdot V1(t).$$

Optimización de puesta en marcha

Optimal start-up procedure of SMD plants via hierarchical control – Control formulation



Upper layer – PNMPC strategy

$$\min_{TT1_{SP}, TT2_{SP}} J2 = - \sum_{j=1}^N \hat{TT}3(t+j|t)$$

Subject to:

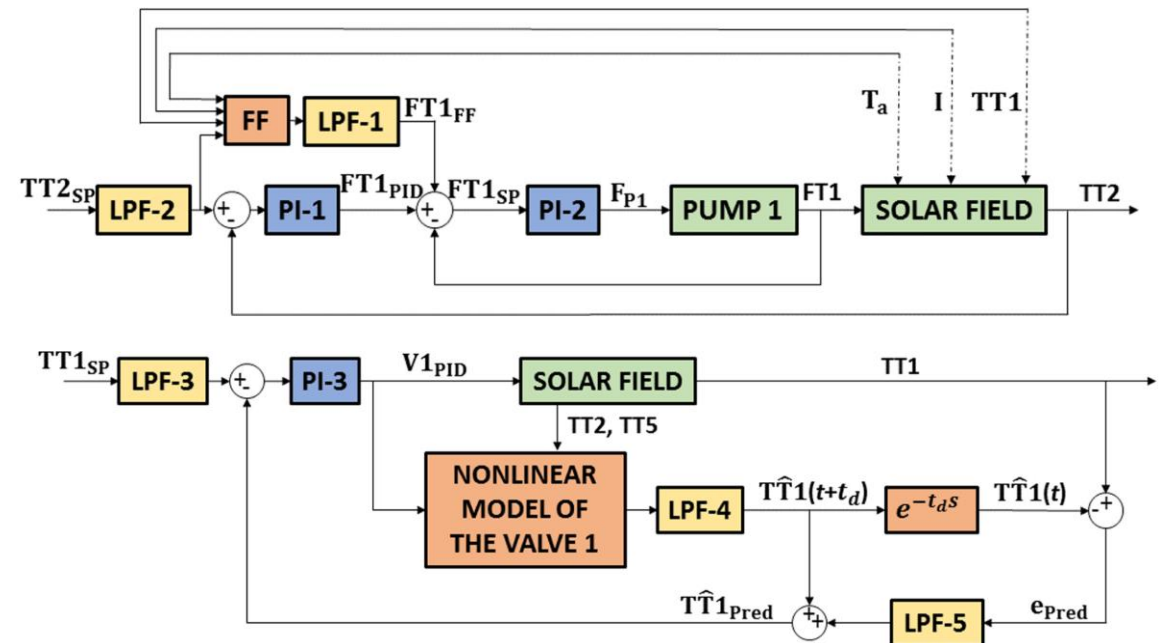
$$TT2(t+j-1) < 100 \quad \forall j \in 1, \dots, N_u$$

$$TT2(t+j-1) > TT1(t+j-1) \quad \forall j \in 1, \dots, N_u$$

$$TT2(t+j-1) > \hat{Y}_{TT3}(t+j|t) \quad \forall j \in 1, \dots, N_u$$

$$TT2_{\min}(t+j-1|t) \leq TT2(t+j-1) \leq TT2_{\max}(t+j-1|t) \quad \forall j \in 1, \dots, N_u$$

Regulatory layer



Regulatory controllers

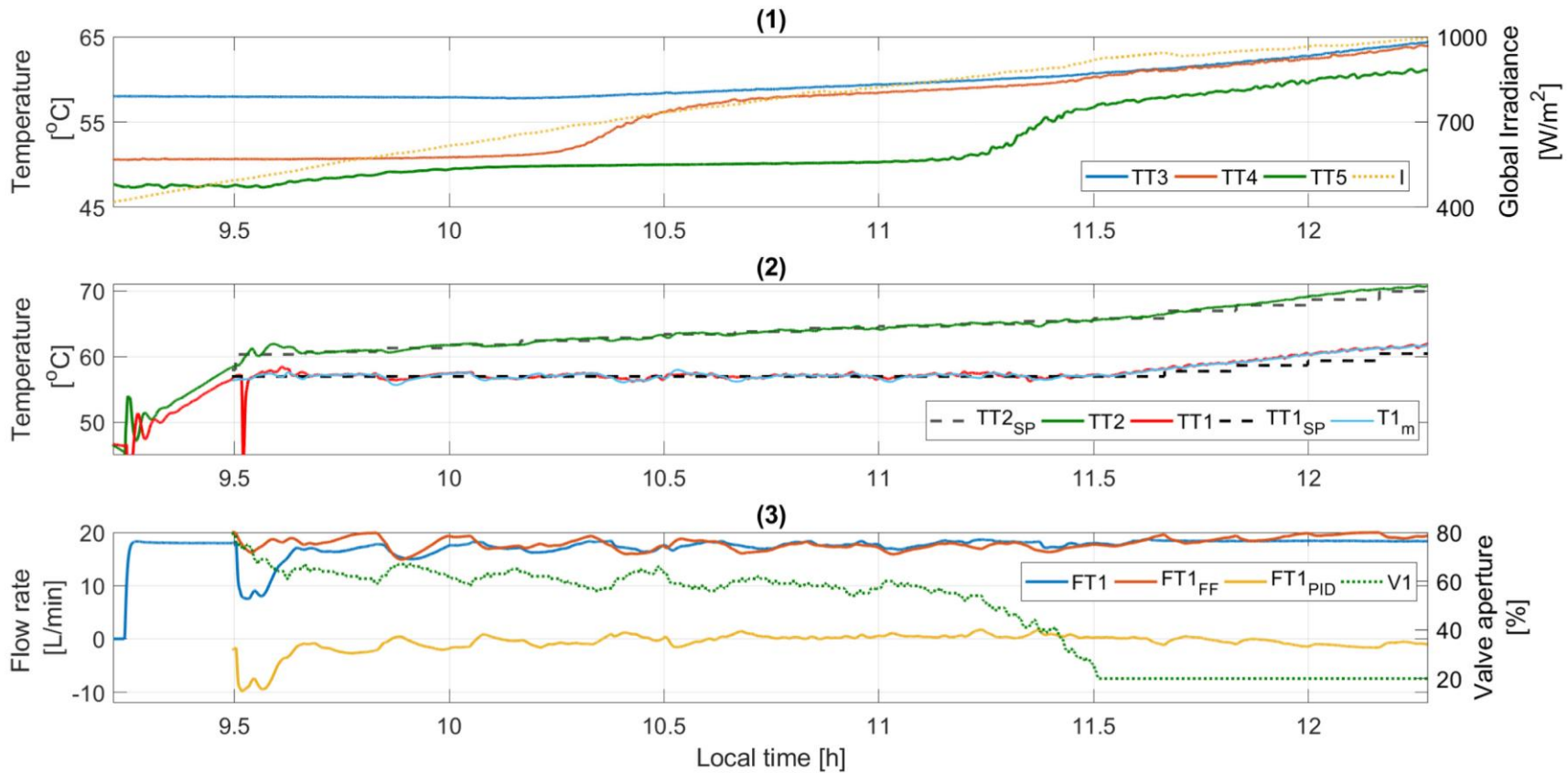
Block	k_c	T_i [s]	τ_F [s]
LPF-1	-	-	75
LPF-2	-	-	60
LPF-3	-	-	40
LPF-4	-	-	43
LPF-5	-	-	39.50
PI-1	-0.42 [L/min °C]	72.60	-
PI-2	2.84 [% min/L]	4.92	-
PI-3	14.01 [% °C]	43	-

Optimización de puesta en marcha

Optimal start-up procedure of SMD plants via hierarchical control – Results

➤ Experimental results

$T_s=10$ min
 $N = 5, N_u=1$



Experimental test

Improvements: The time can be reduced by 11 %

Pasos seguidos



Modelado y control de bajo nivel de plantas SMD



Modelado y control de flujos y temperaturas

Control jerárquico de plantas SMD



Mejora de métricas como la eficiencia térmica y la producción de destilado

Estrategias de control Avanzado para plantas industriales



Mejora de métricas como la eficiencia térmica y la producción de destilado

Publicaciones y tutoriales



Describir los desarrollos tecnológicos

Retos

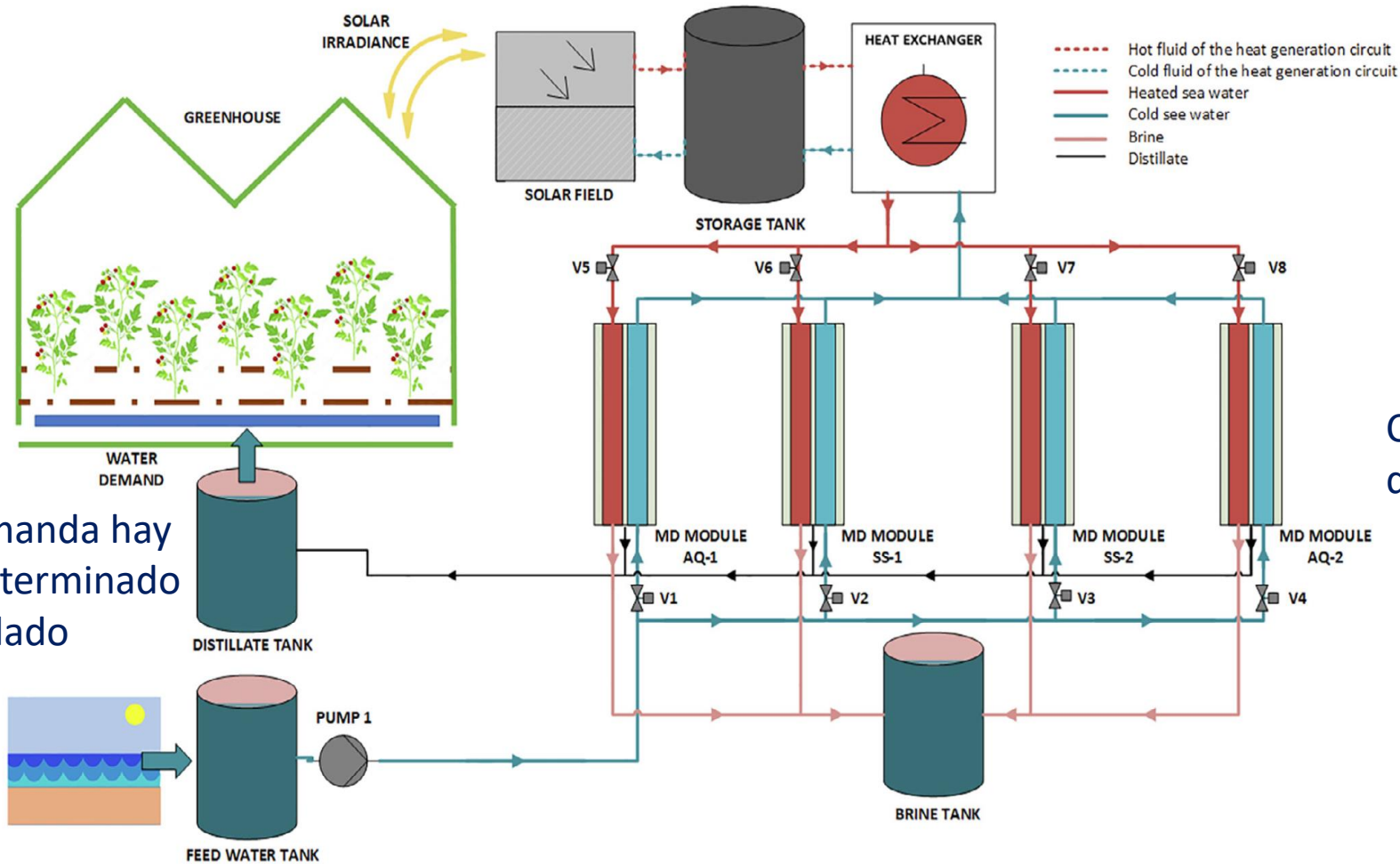
- Una planta SMD a escala industrial debe **incluir múltiples módulos MD** debido a la cantidad relativamente baja de destilado que producen los actuales módulos MD a escala comercial (60 L/h).
- Teniendo en cuenta este hecho, la **gestión del caudal de alimentación** es fundamental, ya que debe adoptarse una solución de compromiso para maximizar tanto la producción de destilado como la eficiencia térmica.
- Faltan trabajos de investigación que aborden la gestión de los múltiples módulos de MD que componen una planta a escala industrial.

Posibles soluciones

- Desarrollo de una estrategia DMPC encargada de calcular el caudal de alimentación para cada uno de los módulos MD incluidos en la planta SMD.
- Desarrollo de una estrategia MPC para gestionar, además del caudal de alimentación, el número de módulos MD encendidos en cada momento de muestreo en función de las necesidades de agua y de las condiciones de funcionamiento.

Control avanzado

Desarrollo de una estrategia DMPC encargada de calcular el caudal de alimentación para cada uno de los módulos MD incluidos en la planta SMD.



Cada módulo tiene diferentes características

Para garantizar la demanda hay que tener un nivel determinado en el tanque de destilado

Desarrollo de una estrategia DMPC encargada de calcular el caudal de alimentación para cada uno de los módulos MD incluidos en la planta SMD.

➤ Centralized MPC approach

$$J = \sum_{j=1}^N \zeta \cdot \hat{y}_{STEC}(t+j|t) + \sum_{j=1}^N \delta \cdot [w_{tank}(t+j) - \hat{y}_{tank}(t+j|t)] + \sum_{j=0}^{N_u-1} \lambda \cdot \Delta u(t+j),$$

where

$$\delta = (1-\zeta)$$

$$\zeta = \begin{cases} 0 & \text{if } x \leq c, \\ d \cdot x + e & \text{if } c < x < f, \\ 1 & \text{if } x \geq f. \end{cases}$$

$$\text{s.to: } u_{min} \leq u(t) \leq u_{max}, \forall t \geq 0,$$

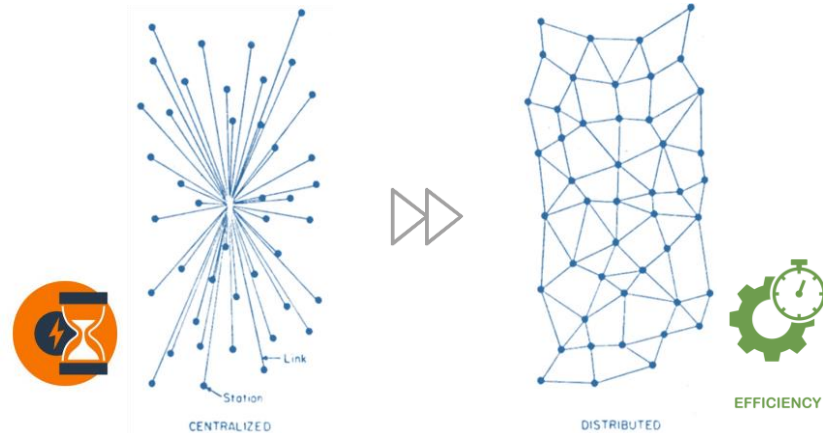
$$\sum_{i=1}^M u_i(t+j) \leq b, \forall j = 0, \dots, N_u - 1, \longrightarrow \text{Coupling}$$

➤ Distributed MPC approach (Scherer et al., 2014)

$$P(t) : \min f(\Delta u_i) = \sum_{j=1}^N \zeta \cdot \hat{y}_{STEC}(t+j|t) + \sum_{i=1}^M \delta \cdot [w_{tank}(t+j) - \hat{y}_{tank}(t+j|t)] + \sum_{i=1}^M \sum_{j=0}^{N_u-1} \lambda_i \cdot \Delta u_i(t+j)$$

$$\text{s.to: } u_{min} \leq u(t) \leq u_{max}, \forall t \geq 0,$$

$$\sum_{i=1}^M u_i(t+j) \leq b, \forall j = 0, \dots, N_u - 1, \longrightarrow \text{Coupling}$$



Algorithm 1: Distributed optimization performed by agent i during the iteration l at sample time t

if agent i cannot revise its decisions in iteration l then

$$\lfloor \Delta u_i(t)^{l+1} = \Delta u_i(t)^l$$

else

- Agent i receives the available feed water flow from the upstream agent $i - 1$ and $\Delta u_{i+1}(t)^l$ from the downstream agent $i + 1$;
- Agent i solves problem $P(t)$ to obtain $\Delta u_i(t)^{l+1}$ and the prediction of available feed water flow;

Desarrollo de una estrategia DMPC encargada de calcular el caudal de alimentación para cada uno de los módulos MD incluidos en la planta SMD.

Controller set-up

Tuning parameters	Value
T_s	10 min
N	6
N_u	2
Limits of the mapping	1520-1620 L
Polynomial	$0.0091 \cdot X + 13.6383$

Controller performance

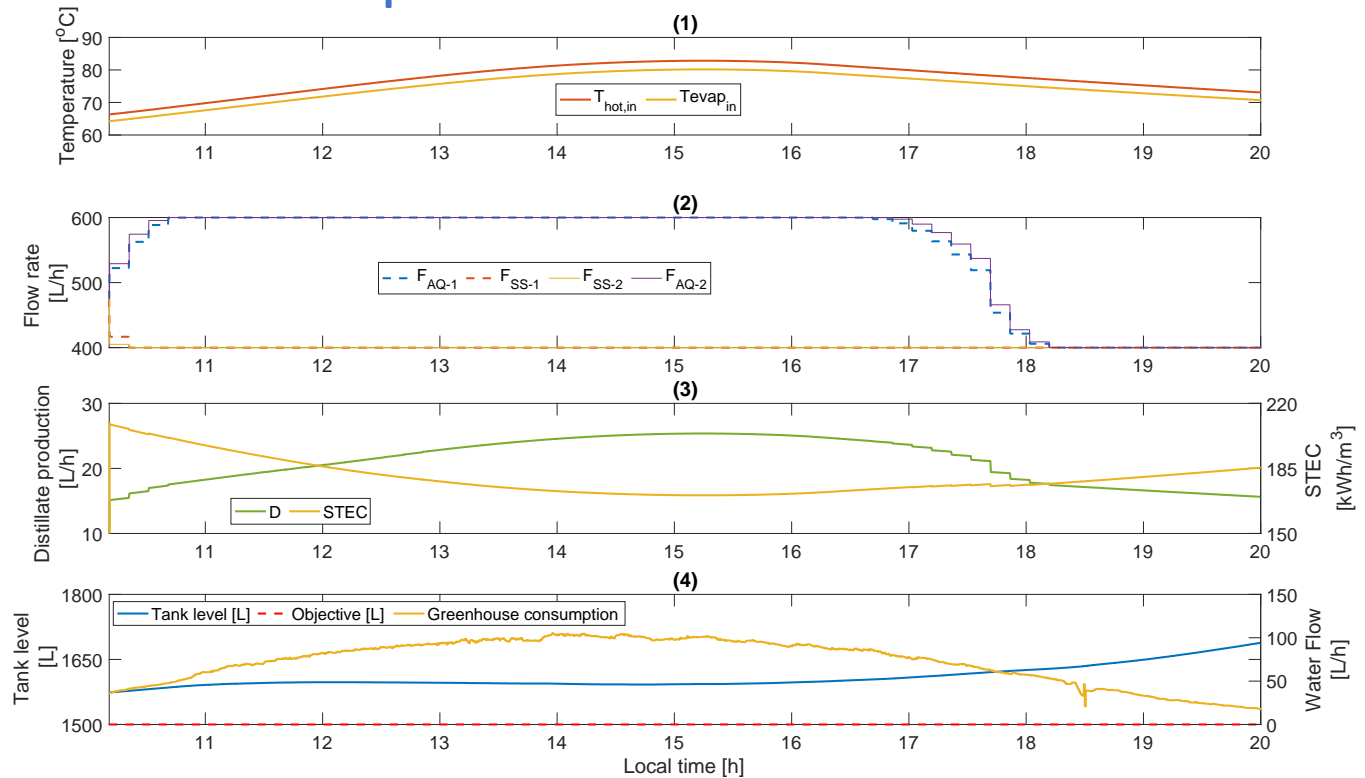
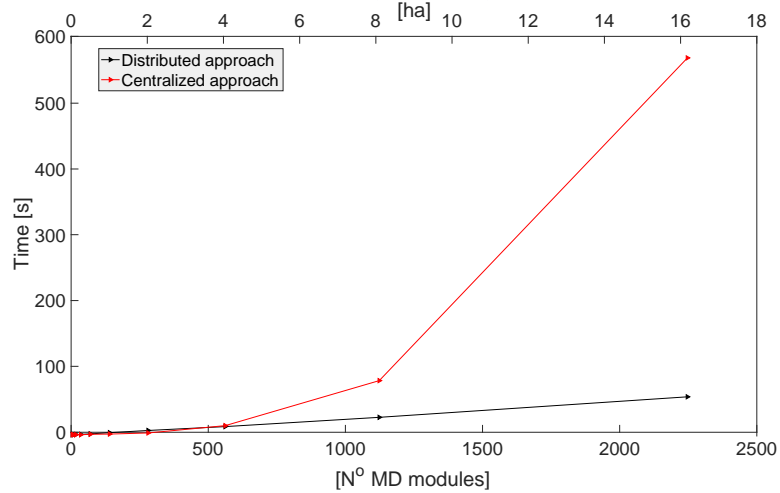


Fig. 28 – Simulation results

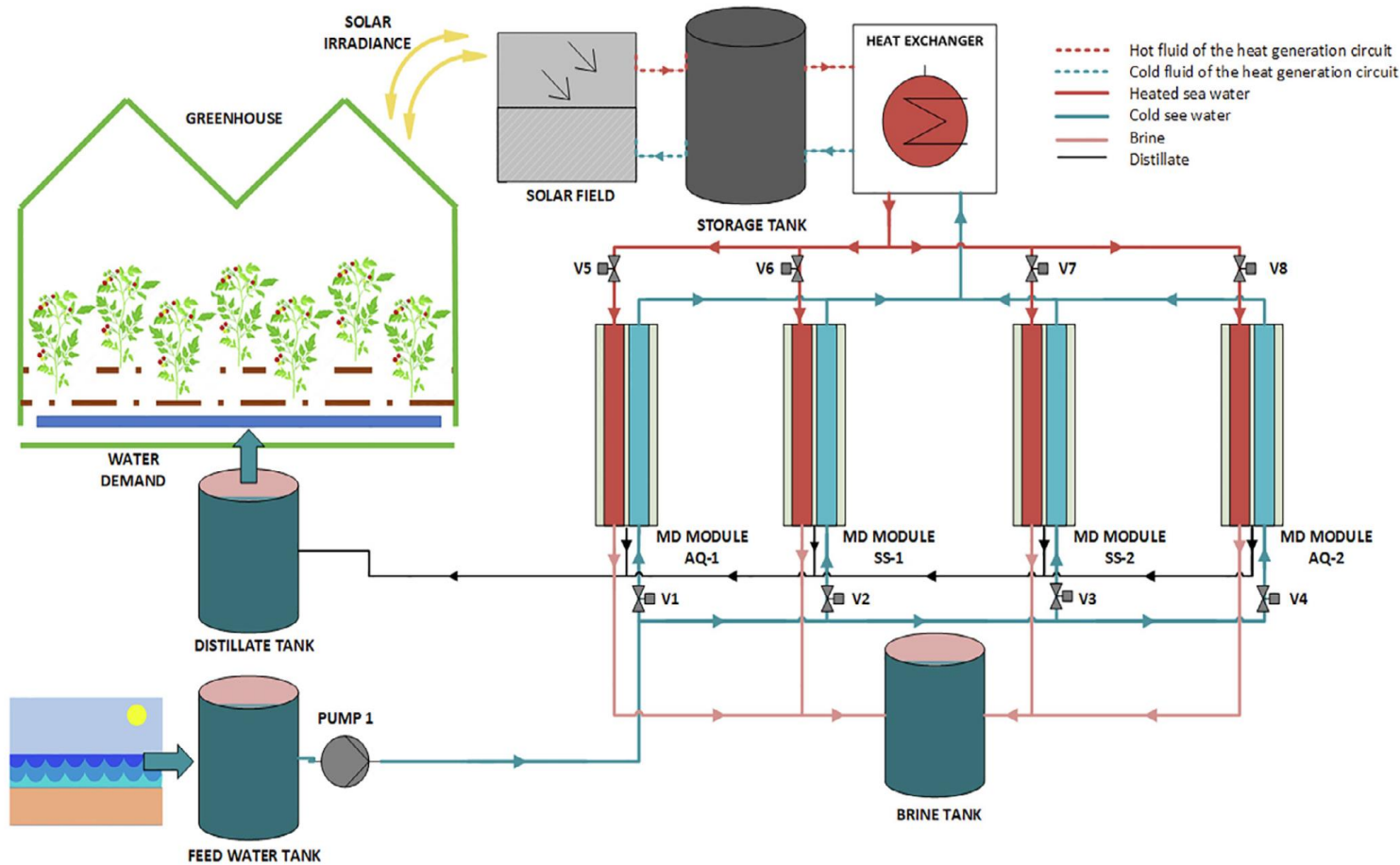
Improvements in computing time



Maximum time spent for each algorithm to solve the problem

Improvements: 5 % Specific thermal energy consumption of the plant

Desarrollo de una estrategia MPC para gestionar, además del caudal de alimentación, el número de módulos MD encendidos en cada momento de muestreo en función de las necesidades de agua y de las condiciones de funcionamiento.



➤ MINLP problem formulation

- **Reproducción en instalaciones Agroconnect del centro IFAPA junto a la UAL.**
- **En serie con ósmosis inversa.**
- **Operando en modo “batch”, cada ciclo aumenta la salinidad y hay que tenerlo en cuenta en la estrategia de control (“model-free controllers” – ESC)**
- **Obtener un producto del que se puedan extraer minerales y tender a residuo cero.**



Modelado y control automático en destilación por membranas solar: fundamentos y propuestas para su desarrollo tecnológico

J. D. Gil

Universidad de Almería

L. Roca

CIEMAT-Plataforma Solar de Almería

M. Berenguel

Universidad de Almería

DOI: <https://doi.org/10.4995/riai.2020.13122>

Palabras clave: Modelado, control, destilación por membranas, desalación, energía solar térmica



Alguna de las empresas fabricantes de módulos están incorporando estas estrategias a sus productos