

## Modelado y Optimización para una Gestión eficiente de Recursos en Desalación Solar

Jose A. Carballo<sup>a,1,\*</sup>, Javier Bonilla.<sup>b</sup>, Manuel Berenguel<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Universidad de Almería, Ctra. Sacramento, s/n, 04120 La Cañada, Almería, España.

<sup>b</sup> CIESOL Research Centre for Solar Energy, UAL-PSA.CIEMAT Joint Centre, 04120 La Cañada, Almería, España.

<sup>c</sup> CIEMAT- Plataforma Solar de Almería, Ctra. de Senés s/n Tabernas, 04200 Almería, España

### Resumen

El objeto del presente trabajo es exponer las motivaciones y las contribuciones realizadas hasta el momento en el marco de desarrollo de la tesis doctoral titulada *Modelado y Optimización para una Gestión eficiente de Recursos en Desalación Solar*. Se pone de manifiesto, en multitud de trabajos realizados previamente, el gran potencial que muestra la tecnología de desalación por destilación térmica combinada con bombas de calor y energía solar. La mayoría de estos trabajos apuntan a que el rendimiento de estos sistemas puede ser mejorado en gran medida de manera individual y colectiva, debiendo profundizar más en el estudio de las condiciones óptimas de funcionamiento, la relación entre los subsistemas y la respuesta del sistema general para crear así estrategias de operación eficientes.

Así pues, esta tesis doctoral pretende realizar contribuciones en el campo del modelado, control y optimización de sistemas termosolares con aplicaciones industriales, en concreto aplicaciones de desalación mediante energía solar. De manera general se pretende modelar, optimizar y estudiar la viabilidad técnica y económica de un sistema de destilación térmica acoplado a una bomba de calor de doble efecto cuya fuente de energía térmica es un campo solar y una caldera de gas. El modelado, el control automático y la optimización son un factor determinante para reducir los costes económicos y mejorar la eficiencia energética de la operación.

### Palabras Clave:

Modelling, Validation, Global optimization, Genetic algorithms, Solar energy

### 1. Introducción.

Uno de los mayores problemas que debe afrontar la humanidad inminentemente deriva de la escasez de agua dulce (1), provocada principalmente por el cambio climático y la sobreexplotación que esquilma, contamina o salinizan los acuíferos. Las previsiones no son favorables puesto que se espera un aumento de la demanda en las principales fuentes de consumo (2). Con estas previsiones, las Naciones Unidas pronostican que entre 2-7 mil millones de personas deban enfrentarse a escasez de agua a mitad de siglo (4).

Queda patente que es necesario una gestión racional de los recursos naturales como el agua dulce y la promoción de las energías limpias y renovables en sustitución de las energías fósiles que contaminan y esquilman a su vez estos recursos naturales. Este hecho se ha convertido en tema principal para numerosos organismos como la Unión Europea por ejemplo, acaparando gran parte de sus actividades de investigación e innovación en el Programa Marco denominado Horizonte 2020

(H2020). España por su parte hace referencia a este tema en las líneas estratégicas de investigación del Plan Nacional de Investigación (Estrategia Española para la Ciencia, Tecnología e Innovación 2013-2020), en el que se encuadra el proyecto: Estrategias de control y gestión energética en entornos productivos con apoyo de energías renovables (ENERPRO).

ENERPRO es un proyecto coordinado entre la Universidad de Almería y la Plataforma Solar de Almería a través de CIESOL, siendo cada una de las instituciones responsables de su subproyecto. La investigación objeto del presente documento queda enmarcada dentro del subproyecto dirigido por la Plataforma Solar de Almería que tiene como objetivos específicos: Modelado dinámico de una planta híbrida solar-gas de desalación térmica, desarrollo de modelos de predicción de variables de contorno, perturbaciones, fuentes y cargas, análisis y modelado de sistemas de almacenamiento y otros sistemas auxiliares para la reducción de costes, obtención de modelos simplificados para tareas de control, desarrollo de estrategias MPC (jerárquicas, híbridas y económicas) para plantas de desalación, acoplamiento de plantas de desalación como fuentes de agua y energía a invernaderos y edificios, prueba de los algoritmos en simulación y condiciones reales, transferencia tecnológica a com-

<sup>☆</sup> Nota al pie para el título.

\* Autor en correspondencia.

Correos electrónicos: jcarballo@psa.es (Jose A. Carballo), jbonilla@psa.es (Javier Bonilla.), beren@ual.es (Manuel Berenguel)

pañías e instituciones interesadas en el proyecto, diseminación de los resultados en diferentes foros nacionales e internacionales y a diferentes niveles.

Una solución al problema del agua dulce puede ser la desalación de agua de mar o agua salobre, mas aún si se tiene en cuenta que el 50 % de la población reside en zonas cercanas al mar. Entre las diferentes técnicas de desalación, la destilación térmica (5) destaca por ser una tecnología que emplea energía térmica de baja temperatura, las plantas son fáciles de operar y mantener, pueden trabajar con aguas muy salobres incluso contaminadas ofreciendo un destilado de muy alta calidad. Por el contrario, la destilación térmica es considerada energéticamente ineficientes, puesto que en cualquier proceso de destilación el coste energético es al menos el 50 % del coste total. La destilación térmica demanda dos formas diferentes de energía: energía térmica que representa la mayor parte de la energía consumida y que puede provenir de diferentes fuentes (combustibles fósiles, energía residual (6), energía solar (7)), y energía eléctrica consumida principalmente por los actuadores y sistemas de bombeo. Este aspecto negativo de la destilación térmica puede ser minimizado mediante el empleo de energía generada con fuentes renovables puesto que los avances en este campo han convertido este tipo de fuentes de energía en sistemas fiables y competitivos, aunq se debe estudiar bien su uso.

Por todo lo anterior, en esta tesis se va a tratar la aplicación de técnicas de modelado, control y optimización para lograr una gestión eficiente de energía y agua dulce mediante el uso de energía solar.

### 1.1. Objetivos.

De manera general se pretende estudiar, modelar y optimizar, a partir de los estudios previos que muestran el gran potencial, la viabilidad técnica y económica de un sistema de desalación en la configuración formada por la planta de destilación térmica acoplada a una bomba de calor de doble efecto cuya fuente de energía térmica es un campo solar y una caldera de gas.

Como objetivos particulares tenemos: realizar un análisis bibliográfico completo de toda la temática involucrada, modelado de la *MED*, *DEAHP*, campo de colectores cilindro parabólicos y todos los elementos auxiliares que componen el sistema. Desarrollados, ampliados y validados los modelos, implementar un modelo conjunto y estudiar las condiciones más favorables de funcionamiento.

Finalmente el acoplamiento de modelos, requerirá previsiblemente el desarrollo de lazos de control de bajo nivel. Acoplados todos los sistemas se procederá a la validación y la optimización del sistema completo junto con el pertinente análisis económico.

### 1.2. Instalación experimental: Sistema Aquasol.

Todos los trabajos de campo son realizados en la instalación experimental *AQUASOL* (Fig. 1). En el año 1987 una unidad desoladora *MED* fabricada por *ENTROPIE* fue instalada en la Plataforma Solar de Almería, con el fin de probar y desarrollar el proceso de destilación acoplado con energía solar térmica.

Posteriormente esta instalación ha sufrido varias ampliaciones y modificaciones. Destacar la ampliación llevada a cabo en el marco del proyecto *AQUASOL* (8), que finalmente ha dado su nombre a la instalación. Este proyecto tenía como objetivo principal la incorporación eficiente de la energía solar al proceso (9). Se amplió el sistema con un campo solar de 44 captadores de placa plana de gran apertura, almacenamiento térmico, una nueva bomba de calor de absorción de doble efecto, un secador solar avanzado, un generador de vapor y un pequeño campo solar de colectores cilindro parabólicos (campo *NEP*(10)).

Actualmente el sistema *AQUASOL* tiene tres modos de operación (11): Modo solar: El campo de colectores provee toda la energía térmica del sistema. La planta *MED* es alimentada a través de los tanques. Modo fósil: La caldera de gas propano a través de la bomba de calor proporciona toda la energía térmica del sistema. En este modo, la *DEAHP* (Double effect absorption heat pump) puede conectarse directamente a la planta *MED* o indirectamente a través de los tanques (12). Modo híbrido: La energía térmica proviene de ambas fuentes, de la bomba de calor y del campo solar. La *DEAHP* permite la operación a carga parcial que puede variar del 30 % al 100 % estrangulando el flujo de vapor que circula entre la caldera y la bomba. En este modo, la alimentación de la planta *MED* se realiza a través de los tanques.

## 2. Avances y resultados.

### 2.1. Modelado.

En lo referente a tareas de modelado, se han desarrollado trabajos de modelado para el sistema *MED*, *DEAHP*, *NEP* y se está trabajando en el modelo del generador de vapor. Las tareas de modelado de la planta *MED* se iniciaron adaptando un modelo basado en primeros principios, implementado en el lenguaje de modelado *Modelica* (13), previamente desarrollado, calibrado y validado (14). Dicho modelo ha sido modificado y completado con el desarrollo matemático que permite el análisis energético y exergético de la planta.

Para los trabajos de modelado de la *DEAHP*, se partió del modelo propuesto por de la Calle et al (14; 16), basado en primeros principios e implementado en el lenguaje de modelado *Modelica*. Al igual que en el caso anterior, el modelo fue modificado y completado con todo el planteamiento matemático que permite el análisis energético y exergético de la planta. Los datos obtenidos a través del modelo muestran un buen ajuste con los datos reales, resultando un modelo preciso.

A continuación, los modelos de la planta *MED* y la *DEAHP* fueron acoplados (Fig. 2) y validados con datos experimentales medidos en las instalaciones reales. El modelo resultante aun siendo bastante preciso es demasiado complejo e inestable, las simulaciones llevadas a cabo demandan un alto esfuerzo computacional.

Finalmente se ha desarrollado un modelo flexible y dinámico que permite simular el comportamiento térmico transitorio del campo *NEP*, para su uso en tareas de optimización, evaluación del rendimiento y control. Este modelo de la planta *NEP* se basa en los principios físicos detallados descritos en el trabajo R.Forristal (17) Fig. ??, el modelo se ha adaptado, validado

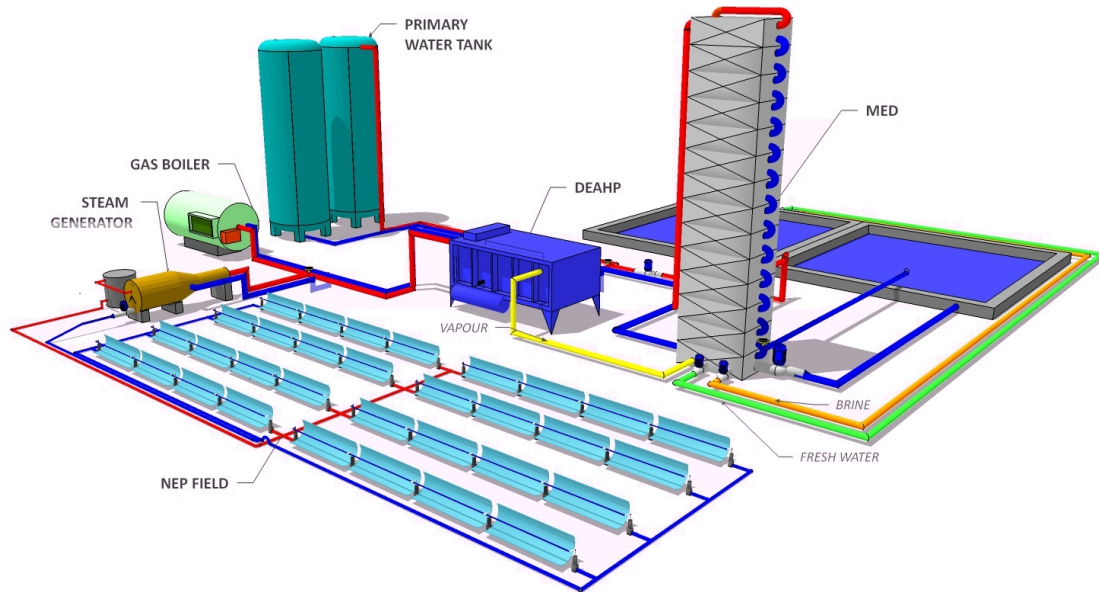


Figura 1: Aquasol

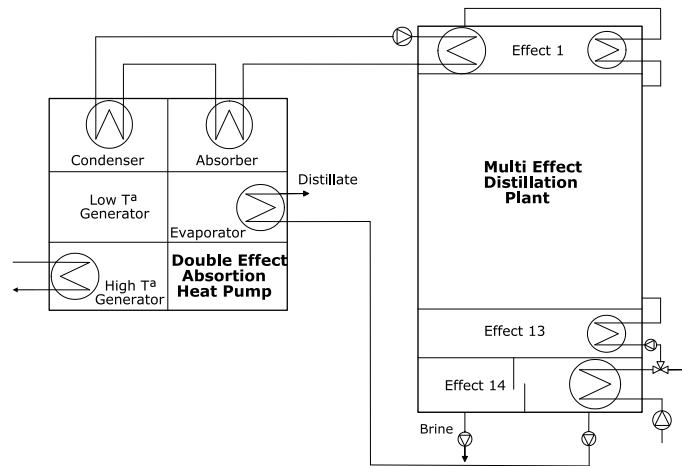


Figura 2: DEAHP-MED

y mejorado con el desarrollo exergético necesario para poder realizar análisis exergéticos, como recomienda el autor.

Este modelo se ha desarrollado utilizando la librería *ThermoCycle* (18; 19) y se ha implementado en el lenguaje de modelado orientado a objetos basado en ecuaciones *Modelica*. El modelo es flexible y altamente configurable, lo que permite adaptarlo fácilmente y le otorga un amplio campo de aplicación. Los resultados de validación del modelo muestran un buen ajuste entre los datos experimentales y los simulados (Fig. 4), incluso durante transitorios provocados por variaciones en la radiación solar directa que alcanza la superficie de apertura de los colectores. Por ejemplo, la Fig. 4 muestra como la temperatura de salida experimental ( $T_{out}^{exp}$ ) y simulada ( $T_{out}^{sim}$ ) casan perfectamente a pesar de que el campo completo es enfocado y desenfocado varias veces (*Focus*).

## 2.2. Optimización.

Como se comenta anteriormente, uno de los objetivos es reducir los costes energéticos y mejorar la operación del proceso de desalación térmica, para ello realizó un estudio (20) sobre la influencia de los parámetros operacionales y las condiciones óptimas de operación de la planta *MED* utilizando el modelo previamente desarrollado, este estudio es la base sobre la que posteriormente desarrollar estrategias de control del sistema completo. El estudio consta de tres partes: análisis energético y exergético de la planta en condiciones nominales, estudio de sobre la influencia de cada uno de los parámetros de operación de la planta y una optimización multicriterio mediante algoritmos genéticos, empleando índices de rendimiento tradicionales (Eq. 1) y proponiendo nuevos criterios de optimización basados en rendimiento exergético (Eq. 2 y Eq. 3). Esta propuesta de nuevos índices se realiza porque los índices tradicionales basados en energía térmica presentan ciertas limitaciones a la

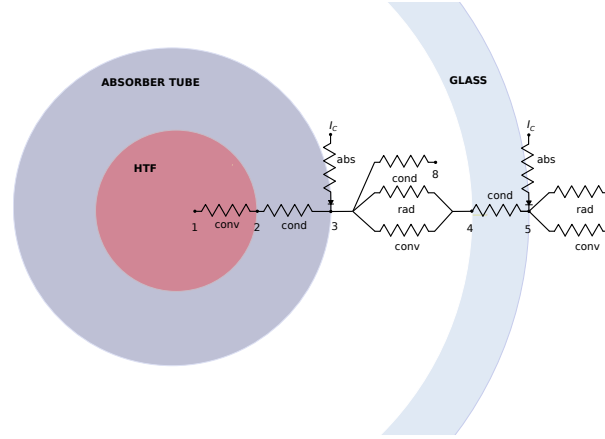


Figura 3: NEP model

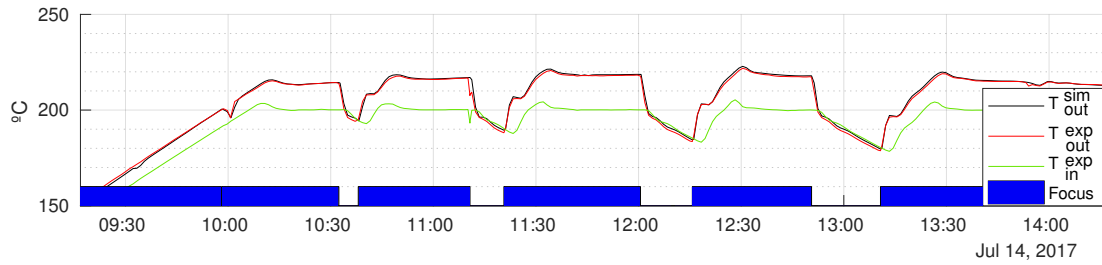


Figura 4: NEP model

hora de emplearse en tareas de optimización, como por ejemplo no tienen en cuenta la temperatura de la energía empleada, tampoco las condiciones ambientales o del agua de alimentación de la planta o que no consideran el consumo eléctrico. Los índices propuestos se basan en balances exergeticos, aunque no muy extendido el análisis exergetico es un método clave para la mejora del rendimiento de este tipo de procesos (15).

$$PR = \frac{\dot{m}_{dis} \cdot 2326}{(h_1 - h_2) \cdot \dot{m}_1}; \quad \bar{E}_{Thermal} = \frac{(h_1 - h_2) \cdot \dot{m}_1}{\dot{m}_{dis}}. \quad (1)$$

$$\eta_{ex1} = \frac{\dot{e}x_{out}}{\dot{e}x_{in}} = 1 - \frac{\dot{S}_g}{(\dot{e}x_1 \cdot \dot{m}_1) + (\dot{e}x_3 \cdot \dot{m}_3) + \dot{W}_{pump}}. \quad (2)$$

$$\eta_{ex2} = \frac{-\dot{e}x_{10}^{ch} \cdot \dot{m}_{10} - \dot{e}x_8^{ch} \cdot \dot{m}_8}{(\dot{e}x_1 - \dot{e}x_2) \cdot \dot{m}_1 + (\dot{e}x_3 \cdot \dot{m}_3) + (\dot{e}x_5^{ch} \cdot \dot{m}_5) + \dot{W}_{pump}}. \quad (3)$$

El primero de los índices tradicionales basados en energía térmica es el índice *Performance Ratio* ( $PR$ ), que nos indica la cantidad de agua desalada ( $\dot{m}_{dis}$ ) por cada 2326 kJ de energía térmica aportados en el evaporador de la planta ( $(h_1 - h_2)m_1$ ). Por otro lado, el consumo térmico específico ( $\bar{E}_{Thermal}$ ), indica la cantidad de energía térmica consumida por cantidad de desalado producido. En este trabajo se proponen dos nuevos índices de rendimiento exergeticos ( $\eta_{ex1}$  y  $\eta_{ex2}$ ), que nos indican la

relación entre la cantidad de exergía empleada y la suministrada y la variación de exergía debida al cambio de salinidad del agua empleada en función de la exergía suministrada respectivamente, lo que se puede interpretar como exergía útil empleada en función de toda la empleada. Estos dos últimos índices de rendimiento vienen a resolver los problemas presentados por los índices tradicionales basados solamente en energía térmica, puesto que toman directamente en consideración la calidad de la energía térmica empleada ( $(\dot{e}x_1 - \dot{e}x_2) \cdot \dot{m}_1$ ), el consumo eléctrico ( $\dot{W}_{pump}$ ) y la salinidad del agua de alimentación ( $-\dot{e}x_{10}^{ch} \cdot \dot{m}_{10} - \dot{e}x_8^{ch} \cdot \dot{m}_8$ ).

La optimización multicriterio se llevó a cabo empleando las herramientas implementadas en la librería de optimización de *DYMOLA* (21), además se creó un pequeño script capaz de generar y representar todo el espacio de decisión y criterios evaluados.

En primer lugar, el tratamiento y estudio de los resultados de optimización reveló que las mayores fuentes de consumo térmico son diferentes a las de consumo exergetico. Por un lado, la energía térmica contenida en los flujos de agua salientes son la principal fuente responsable del alto consumo de energía, por otro lado la generación de entropía y el calor intercambiado con el ambiente son los responsables de la degradación de la exergía. En segundo lugar, el estudio sobre la influencia de los parámetros de operación de la planta, muestra que la producción de la planta real en condiciones nominales está lejos de los valores máximos simulados y que algunos parámetros ope-

rativos no tienen una gran influencia en el proceso con respecto al resto. Finalmente, la optimización multicriterio teniendo en cuenta los diferentes criterios de rendimiento energético y exergéticos, estableció puntos de operación óptimos.

Continuando con los trabajos iniciados en Carballo et al. (22; 20), un nuevo estudio de optimización sobre el acoplamiento de la bomba de absorción de calor de doble efecto (*DEAHP*) con la planta *MED* se llevó a cabo con el objetivo principal de disminuir el consumo de energía de todo el sistema tratando de mantener estable el sistema con los parámetros de operación nominales considerados para la planta *MED* de acuerdo con los criterios energéticos y exergéticos. Igual que en el caso anterior, la optimización se realizó mediante el empleo de algoritmos genéticos de optimización multicriterio y se determinaron dos puntos de funcionamiento. El primero, cuyo objetivo era reducir el esfuerzo de control sobre los niveles de contenedores muestra que se puede lograr un estado estable disminuyendo la presión de vapor y las referencias de nivel de todos los contenedores además del generador de baja temperatura. Aunque este punto de ajuste garantiza la estabilidad del sistema, disminuye el rendimiento térmico y exergético de la *DEAHP*.

El segundo punto de optimización, cuyo objetivo principal es aumentar el rendimiento térmico, muestra que al aumentar la presión del vapor se puede lograr un aumento de rendimiento térmico significativo aunque disminuye el rendimiento exergético. Además, el alcance de un estado estable no está garantizado.

En lo referente a la optimización del campo de colectores solares *NEP*, con el objetivo de encontrar ineficiencias o posibles fuentes de mejora, se realizó un análisis energético y exergético del campo *NEP* a partir del modelo desarrollado previamente. El estudio muestra los principios en que se basa el modelo, la validación y un análisis energético y exergético de la planta basados en el modelo. Del estudio se puede extraer que el modelo predice los valores de las variables configuradas como salida con precisión, tanto en estado estacionario como transitorio. Nótese que la propiedad de acausalidad del lenguaje de modelado hace que todas las variables se pueden configurar como entradas o salidas siempre que se establezca un sistema que se pueda resolver, convirtiendo el modelo en una herramienta flexible y personalizable, que puede emplearse para la optimización, el análisis térmico o exergético, la evaluación de rendimiento en estacionario o transitorio o para tareas de control.

Por otro lado, el análisis energético y exergético muestra que niveles elevados de radiación solar directa (*DNI*) mejoran los índices de rendimiento térmico y exergético del campo *NEP*. Por el contrario, los cambios rápidos en los valores de *DNI* causan una reducción en ambos rendimientos. Los índices de rendimiento térmico muestran valores más altos que los índices de rendimiento exergéticos, aunque muestran un comportamiento muy similar durante la simulación. El análisis térmico revela que las principales pérdidas ocurren en la reflexión y concentración de la radiación solar, mientras que el análisis exergético revela que la destrucción de la exergía en la superficie del tubo absorbente debido a la baja temperatura de la superficie del tubo es la fuente más importante de ineficiencias exergéticas.

### 3. Conclusiones y trabajos futuros.

El estudio realizado sobre la planta *MED* gracias al modelo desarrollado, fue publicado en la revista *Desalination* (20). Como conclusiones principales del trabajo se puede extraer que el modelo es muy preciso y cumple a la perfección con los objetivos de diseño, además el análisis energético se ha revelado como una potente herramienta para detectar ineficiencias, determinar nuevos criterios de rendimiento y puntos óptimos de funcionamiento.

El segundo trabajo de modelado (modelo de la *DEAHP*), ha dado como resultado un estudio sobre el acoplamiento de los sistemas *MED* y *DEAHP*. Los resultados fueron presentados en el congreso *EuroMed 2017, Desalination for Clean Water and Energy*. Como conclusiones principales del trabajo se puede remarcar que aunque el modelo compuesto permitió tanto el análisis como la optimización, no resultó muy operativo debido a la gran complejidad y la inestabilidad por los altos requerimientos computacionales.

De los trabajos desarrollados sobre el campo *NEP*, se ha obtenido un modelo que se ha empleado posteriormente para realizar un estudio de caracterización del comportamiento térmico y exergético del sistema tanto en estado estacionario como transitorio. El estudio se encuentra bajo revisión a la espera de ser publicado. Las conclusiones principales del trabajo son que el modelo se ajusta a los requerimientos de diseño y que el análisis térmico y exergético de la instalación apunta a causas diferentes de ineficiencias.

Actualmente se está trabajando en el desarrollo del modelo del generador de vapor para integrarlo con el modelo del campo *NEP*. Finalizado este trabajo se comenzará con el modelo de la caldera de gas, disponiendo de este modo de todos los modelos necesarios de los subsistemas que conforman el sistema *AQUASOL*. Finalmente se integraran todos los sistemas y se procederá a la validación y la optimización del sistema completo junto con el estudio de las técnicas de control necesarias y el pertinente análisis económico.

### Referencias

- [1] F. Van Weert, J. Van Der Gun, Saline and brackish groundwater at shallow and intermediate depths: genesis and world-wide occurrence, 39th International Association of Hydrologists, Niagara Falls: International Association of Hydrologists.
- [2] U. Water, Managing water under uncertainty and risk, the united nations world water development report 4, un water reports, world water assessment programme (2012).
- [3] D. Le Blanc, R. Roehri, Back to our common future sustainable development in the 21st century (sd21) project summary for policymakers (2012).
- [4] R. Connor, The United Nations world water development report 2015: water for a sustainable world, Vol. 1, UNESCO Publishing, 2015.
- [5] C. Li, Y. Goswami, E. Stefanakos, Solar assisted sea water desalination: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 19 (2013) 136–163. doi : 10. 1016/j. rser. 2012. 04. 059.
- [6] P. Palenzuela, G. Zaragoza, D. C. Alarcón-Padilla, J. Blanco, Evaluation of cooling technologies of concentrated solar power plants and their combination with desalination in the mediterranean area, *Applied Thermal Engineering* 50 (2) (2013) 1514–1521.
- [7] A. Al-Karaghoul, L. L. Kazmerski, Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24 (2013) 343–356. doi : 10. 1016/j. rser. 2012. 12. 064.

- [8] D. C. Alarcon-Padilla, J. Blanco-Galvez, L. Garcia-Rodriguez, W. Gernjak, S. Malato-Rodriguez, First experimental results of a new hybrid solar/gas multi-effect distillation system: the AQUASOL project, *Desalination* 220 (1-3) (2008) 619–625. doi:10.1016/j.desal.2007.05.027.
- [9] D. C. Alarcon-Padilla, L. Garcia-Rodriguez, J. Blanco-Galvez, Assessment of an absorption heat pump coupled to a multi-effect distillation unit within AQUASOL project, *Desalination* 212 (1-3) (2007) 303–310. doi:10.1016/j.desal.2006.10.015.
- [10] M. Ibarra, D. Alarcón-Padilla, J. Blanco-Gálvez, G. Zaragoza, P. Palenzuela, Performance of small parabolic through collector as thermal energy supply to steam generation, in: *Proc. SolarPACES Conference*, Marrakech, Morocco, 2012, p. 24997.
- [11] P. Palenzuela, A. S. Hassan, G. Zaragoza, D.-C. Alarcón-Padilla, Steady state model for multi-effect distillation case study: Plataforma solar de almería med pilot plant, *Desalination* 337 (2014) 31–42.
- [12] P. Fernández-Izquierdo, L. García-Rodríguez, D. C. Alarcón-Padilla, P. Palenzuela, I. Martín-Mateos, Experimental analysis of a multi-effect distillation unit operated out of nominal conditions, *Desalination* 284 (2012) 233–237. doi:10.1016/j.desal.2011.09.004.
- [13] P. Fritzson, *Principles of object-oriented modeling and simulation with Modelica 3.3: a cyber-physical approach*, John Wiley & Sons, 2014.
- [14] A. de la Calle, J. Bonilla, L. Roca, P. Palenzuela, Dynamic modeling and simulation of a solar-assisted multi-effect distillation plant, *Desalination* 357 (2015) 65–76. doi:10.1016/j.desal.2014.11.008.
- [15] R. Gomri, Energy and exergy analyses of seawater desalination system integrated in a solar heat transformer, *Desalination* 249 (1) (2009) 188–196. doi:10.1016/j.desal.2009.01.021.
- URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2009.01.021>
- [16] A. de la Calle, L. Roca, J. Bonilla, P. Palenzuela, Dynamic modeling and simulation of a double-effect absorption heat pump, *International Journal of Refrigeration* 72 (2016) 171–191.
- [17] F. Russell, 27–Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver, *National Renewable Energy Laboratory* (October) (2003) 164. doi: NREL/TP-550-34169.
- [18] S. Quoilin, A. Desideri, J. Wronski, I. Bell, V. Lemort, *ThermoCycle: A Modelica library for the simulation of thermodynamic systems* (2014) 683–692 doi:10.3384/ecp14096683.
- [19] A. Desideri, A. Hernandez, S. Gusev, M. van den Broek, V. Lemort, S. Quoilin, Steady-state and dynamic validation of a small-scale waste heat recovery system using the thermocycle modelica library, *Energy* 115 (2016) 684–696.
- [20] J. A. Carballo, J. Bonilla, L. Roca, A. De la Calle, P. Palenzuela, D. C. Alarcón-Padilla, Optimal operating conditions analysis for a multi-effect distillation plant according to energetic and exergetic criteria., *Desalination*.
- [21] A. Pfeiffer, *Optimization Library for Interactive Multi-Criteria Optimization Tasks*, in: *Proc. 9th International Modelica Conference*, Munich, Germany, 2012, pp. 669–680.
- [22] J. A. Carballo, J. Bonilla, L. Roca, A. de la Calle, P. Palenzuela, M. Berenguel, Optimal operating conditions analysis of a multi-effect distillation plant, *Desalination and Water Treatment* 69 (2017) 229–235. doi:10.5004/dwt.2017.0703.