



**MEMORIA CIENTÍFICO-TÉCNICA DE PROYECTOS INDIVIDUALES**  
**Convocatoria 2021 - «Proyectos de Generación de Conocimiento»**

**AVISO IMPORTANTE** - La memoria no podrá exceder de 20 páginas. Para rellenar correctamente esta memoria, lea detenidamente las instrucciones disponibles en la web de la convocatoria. Es obligatorio rellenarla en inglés si se solicita 100.000 € o más (en costes directos).

**IMPORTANT** – The research proposal cannot exceed 20 pages. Instructions to fill this document are available in the website. If the project cost is equal or greater than 100.000 €, this document must be filled in English.

**1. DATOS DE LA PROPUESTA – PROPOSAL DATA**

**IP 1** (Nombre y apellidos): Patricia Palenzuela Ardila

**IP 2** (Nombre y apellidos): Lidia Roca Sobrino

**TÍTULO DEL PROYECTO (ACRÓNIMO):** Soluciones de refrigeración híbrida para ahorro de agua en aplicaciones solares térmicas (SOLHYCOOL)

**TITLE OF THE PROJECT (ACRONYM):** Hybrid cooling solutions for water saving in solar thermal applications (SOLHYCOOL)

**2. ANTECEDENTES, ESTADO ACTUAL Y JUSTIFICACIÓN DE LA PROPUESTA**

La necesidad de reducir el consumo de agua en Aplicaciones Solares Térmicas (AST) es cada vez más evidente, especialmente por el hecho de que dichas aplicaciones tienen un mayor campo de aplicación en áreas con una escasez hídrica significativa. A esto se une el alto precio del agua, que puede llegar a ser de hasta 10 €/m<sup>3</sup> en dichas áreas (incluyendo los costes de transporte), cuestionando en definitiva la rentabilidad de este tipo de aplicaciones y la sostenibilidad para su implementación. Entre las AST para las que la reducción del consumo de agua es crucial, este proyecto se centra en dos de las más relevantes: **la refrigeración del bloque de potencia en plantas termosolares de generación de electricidad** (CSP, de las siglas en inglés Concentrating Solar Power) y **la refrigeración de procesos térmicos de separación en medio acuoso en zonas del interior (alejadas de la costa)**. Por un lado, **la reducción del consumo de agua en plantas CSP** es una línea de investigación con gran potencial a nivel internacional en la actualidad. En Europa, dos de los programas de trabajo del desafío social Horizon 2020 "Energía segura, limpia y eficiente" establecieron las convocatorias **LCE-02-2015** y **LCE-11-2017** en el marco del área prioritaria "Energía competitiva baja en carbono". Uno de los retos específicos de esta área era la mejora del perfil medioambiental de las plantas CSP mediante soluciones innovadoras para reducir el consumo de agua manteniendo su eficiencia global. En dichas plantas, la mayor parte del agua total consumida está destinada a la refrigeración del bloque de potencia (82-94%), por lo que es necesario reducir el consumo de agua en esta parte del proceso. Existen dos métodos principales de refrigeración del bloque de potencia: húmeda o seca. La refrigeración húmeda mediante torre de refrigeración por evaporación (WCT, de las siglas en inglés Wet Cooling Tower) es el método más frecuente en plantas CSP, ya que permite mayores eficiencias por estar basada en la temperatura de bulbo húmedo. Sin embargo, su principal problema es la necesidad de un suministro constante de agua debido a las pérdidas que se producen por evaporación en la torre, lo cual resulta especialmente grave en las zonas con escasez hídrica donde se suelen implementar estas plantas [1]. Un ejemplo del gran consumo de agua en plantas CSP con refrigeración húmeda es el de la planta situada en el Desierto de Mojave, California. Dicha planta tiene un consumo de aproximadamente 3 m<sup>3</sup>/MWh [2], lo que la convierte en insostenible desde un punto de vista medioambiental. Los sistemas de refrigeración seca están basados en la temperatura de bulbo seco y no tienen apenas consumo de agua (entre 0,30 y 0,34 m<sup>3</sup>/MWh [3]). Los sistemas típicos están basados en el uso de aerocondensadores (ACC, de las siglas en inglés Air Cooled Condensers) aunque existe una versión mejorada de los mismos denominados "Air Cooler Heat Exchanger (ACHE)". Estos últimos son capaces de contribuir a producir un 1% más de electricidad al año que en el caso de la misma planta termosolar con un sistema ACC [4]. Sin embargo, en

general, el principal problema de los sistemas de refrigeración seca en comparación con los de refrigeración húmeda, son los altos costes de inversión y la notable reducción en la producción de electricidad debido a las altas temperaturas de condensación requeridas en el bloque de potencia (suponen hasta un 10% de reducción en la potencia producida [2]). Así también lo corroboran varios artículos disponibles en la literatura científica respecto a plantas CSP [5,6]. Por tanto, el uso de sistemas de refrigeración seca permite reducir el consumo de agua, pero puede llevar a importantes reducciones de la eficiencia de planta y pueden no ser una solución eficiente. Los sistemas de refrigeración híbrida se presentan como una posible solución a los métodos de refrigeración convencionales (húmeda y seca). Se prevé que pueden reducir el consumo de agua hasta en un 80% [4] en comparación con plantas CSP con refrigeración húmeda y aumentar la eficiencia global de planta en condiciones de temperatura ambiente elevada si se compara con plantas CSP con un sistema de refrigeración seca [7]. Existen diversos trabajos basados en la integración de refrigeradores híbridos en plantas de potencia convencionales, los cuales han dado resultados prometedores, consiguiendo disminuir el consumo de agua entre un 70% [8] y un 91% [9]. La mayoría de estos trabajos están basados en modelos teóricos y no consideran específicamente su aplicación en plantas CSP. Sólo el trabajo teórico publicado recientemente en la revista *Sustainability* [10] en el que participan ambas IPs del proyecto propuesto, considera la integración de un refrigerador híbrido en una planta CSP. En este artículo se presenta el análisis teórico del consumo de agua y la producción de electricidad en diferentes condiciones ambientales y de operación. Existen también algunos trabajos experimentales al respecto, pero solo a escala de laboratorio [11,12]. Uno de estos trabajos [12] ha proporcionado resultados prometedores en relación al ahorro en el consumo de agua (35% de ahorro), lo que lleva a la necesidad de tener estudios a escala piloto que proporcionen resultados fiables para la industria, ayudando así a impulsar el posible mercado en estos sistemas.

Dentro de la convocatoria **LCE-02-2015 del Programa H2020** de la Unión Europea se desarrolló el proyecto “**Water Saving for Concentrated Solar Power (WASCOP)**” (Ref. 654479), en el que las IPs de la presente propuesta han participado. Uno de los objetivos del Proyecto WASCOP era conseguir una reducción entre 70%-90% en el consumo de agua en plantas CSP mediante el desarrollo y validación de diferentes tecnologías para la refrigeración del bloque de potencia. Entre otras tecnologías de refrigeración se propuso el desarrollo, fabricación y evaluación de un sistema de refrigeración híbrida a escala piloto. El desarrollo y fabricación del prototipo fue liderado por la empresa francesa HAMON D'Hondt, con una participación activa de las IPs del proyecto propuesto y de la Universidad de Cranfield (CU de las siglas en inglés Cranfield University). El objetivo fue minimizar el coste de inversión inicial mediante la compartición de equipos. Una de las principales desventajas de los sistemas de refrigeración híbrida son sus altos costes de inversión en comparación con los convencionales, por lo que este tipo de diseños más económicos puede alentar a los inversores en plantas CSP a implementar estos sistemas híbridos. La instalación y puesta en marcha de una planta piloto para evaluar el sistema de refrigeración híbrida anteriormente mencionado fue liderada por la IP1 del presente proyecto. La instalación se llevó a cabo en junio de 2019 estando la planta piloto constituida por una combinación de una WCT y un ACHE, que comparten un condensador de superficie (SC, de las siglas en inglés Surface Condenser) acoplado a un generador de vapor cuya energía térmica es proporcionada por un campo solar de captadores estáticos ya existente en la PSA (ver más detalles de la instalación en la Sección 3.5). El generador de vapor produce vapor de baja presión con condiciones similares a las del vapor de salida de turbina de una planta CSP, simulando de esta forma la integración de un sistema de refrigeración híbrida a una planta CSP real. El sistema de refrigeración puede operar en diferentes configuraciones: modo híbrido serie y paralelo, modo convencional solo-seco (todo el caudal de agua es enfriado a través de la torre de refrigeración seca) y solo-húmedo (todo el caudal de agua es enfriado a través de la torre de refrigeración húmeda). Un diagrama simplificado del lazo de ensayos puede contemplarse en la Figura 1.

Asimismo, el generador de vapor puede operar a diferentes cargas térmicas, simulando así la operación real de una planta CSP a carga parcial debido a la variabilidad de la radiación solar. La descripción de la instalación fue primeramente presentada en el congreso SolarPaces 2019

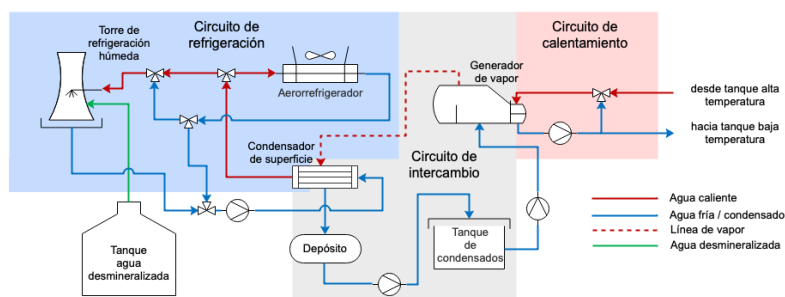


Figura 1. Diagrama simplificado del lazo de ensayos de refrigeradores híbridos de la PSA

[13]. Después de la instalación, se realizó una evaluación preliminar del sistema de refrigeración híbrida en colaboración con la CU, para evaluar las mejores configuraciones que permitieran un menor consumo de agua y electricidad a diferentes temperaturas ambiente y condiciones de operación (cambio en la carga

térmica del SC). Los resultados de dicha evaluación se presentaron primero en el congreso SolarPaces 2020 [14] y posteriormente fueron enviados (agosto de 2021) a la revista Energy. Actualmente, el artículo se encuentra con revisiones menores [15]. Como resultados prometedores de esta evaluación preliminar, se obtuvo que el **máximo ahorro** alcanzable en el **consumo de agua** fue del **67%** cuando el sistema de refrigeración se operaba en modo híbrido con configuración en paralelo en comparación con la operación en modo solo-húmedo. Además, con dicha configuración también se consiguió una **reducción del consumo de electricidad** del **59%** en comparación con la operación del sistema en modo solo-seco, por lo que no se penalizaría de este modo la eficiencia de la planta CSP si se utilizase este sistema de refrigeración. Estos resultados obtenidos a escala piloto resaltan el gran potencial que pueden tener los sistemas de refrigeración híbrida frente a los convencionales y han motivado a seguir la línea de investigación que se inició en el Proyecto WASCOP mediante la presente propuesta de proyecto en la que se propone continuar con la colaboración estrecha que comenzó con uno de los miembros de la Universidad de Cranfield, que actualmente se encuentra en la Universidad de Huddersfield (Reino Unido), mediante su participación en el equipo de trabajo. En ninguno de los trabajos publicados hasta la fecha ni en el trabajo que se realizó en el proyecto WASCOP se aborda la optimización de estos sistemas de refrigeración atendiendo a criterios económicos y de disponibilidad de recursos, y es precisamente uno de los principales frentes a abordar mediante la presente propuesta.

El proyecto WASCOP se enfocó en plantas CSP como caso particular de AST, pero existen otras AST en las que la reducción del consumo de agua es crucial. Este es el caso de los **procesos térmicos de separación en medio acuoso**. Estos procesos térmicos pueden tener su aplicación en: i) desalación térmica, ii) tratamiento de salmueras con objeto de conseguir vertido nulo (ZLD, de las siglas en inglés Zero Liquid Discharge) y iii) recuperación de compuestos de alto valor añadido en efluentes industriales. La tecnología de **Destilación Multifecto** (MED de las siglas en inglés Multi-effect Distillation) es actualmente uno de los procesos con más recorrido a escala comercial en desalación térmica. Además, tiene un alto potencial tanto de aplicación en el tratamiento de salmueras para conseguir ZLD (que lleva a reducir el vertido de salmuera) como en la recuperación de compuestos de alto valor añadido como puede ser el NaCl, contribuyendo con ello a la economía circular [16]. A esto se une el hecho que esta tecnología combinada con energía solar contribuye a la descarbonización del sector [17], lo que está totalmente alineado con el compromiso de la Unión Europea para la acción global del clima (COP 26) de lograr una economía con emisiones cero de gases de efecto invernadero en 2050 [18]. Precisamente la planta piloto MED solar existente en la PSA es objeto de uno de los casos de estudio del Proyecto WATER-MINING del Programa H2020 (convocatoria CE-SC5-04-2019) en el que participa parte del equipo de investigación, y que tiene como objetivo conseguir un proceso de vertido nulo mediante esta tecnología, fomentando el aprovechamiento de productos y subproductos en el sector de la agricultura intensiva. El proyecto cuenta con la creación de una comunidad de práctica constituida por empresas relacionadas con la agricultura e interesadas en implementar esta tecnología. Por

otro lado, en el caso de que las plantas MED solares se sitúen en zonas del interior con escasez hídrica importante, existe un problema aún sin resolver para la refrigeración del condensador final de la planta de destilación. Por todo ello, la presente propuesta considera también este proceso como potencial aplicación para el uso de sistemas de refrigeración híbrida. El método habitual de refrigeración en plantas MED es la de un sólo paso (OT, de las siglas en inglés Once Through), en la que agua de refrigeración circula por el interior del haz tubular de un condensador de carcasa y tubos calentándose cuando el vapor del último efecto de la planta MED le cede su calor latente de condensación. El agua de refrigeración es normalmente la propia agua de alimentación a la planta para lograr así un precalentamiento de dicha agua. El problema es que la relación entre los caudales de agua de refrigeración y de alimentación a planta es de 2 ó 3 veces mayor [19], lo que implica, por un lado, unas altas necesidades de bombeo de agua (y por tanto del consumo eléctrico auxiliar del sistema de destilación) para satisfacer las necesidades de refrigeración [20], y por otro, una gran cantidad de agua de rechazo a mayor temperatura (ineficiencia energética). En el caso que el agua de refrigeración sea agua de mar, el consumo eléctrico debido al bombeo llega a ser muy significativo cuando la planta MED se encuentra a una cierta distancia de la costa [21]. Además, desde el punto de vista medioambiental, el aumento de temperatura del agua a la salida del condensador (el diferencial de temperatura suele ser entre 7-10 °C) puede suponer un riesgo en la vida acuática [22]. El uso de sistemas de refrigeración en seco como los ACC para condensar el vapor final de las plantas MED es una de las alternativas que están siendo considerada en áreas alejadas de la costa. Según un estudio [23], el consumo de agua global en la planta MED se puede reducir en 2 m<sup>3</sup> de agua de mar por cada m<sup>3</sup> de agua de alimentación con el uso de los ACC. Sin embargo, su integración en plantas MED implica un rediseño de la típica planta MED con OT debido a las limitaciones de temperatura mínimo de proceso impuestas por el ACC, lo que llevaría consigo un cambio en el rendimiento y producción con respecto a la planta MED+OT. Como ejemplo se tienen los resultados de un estudio llevado a cabo en Crucero, Chile para una planta MED+ACC integrada en una planta CSP, situada a 100 km de la costa y 1000 m por encima del nivel del mar, en el que ha participado la IP1 del proyecto propuesto [24]. De dicho estudio se obtuvo como resultado un 42% de reducción en la producción de agua de la planta con respecto a una planta MED+OT debido a un menor número de efectos como consecuencia del aumento de la temperatura del último efecto. Sin embargo, el consumo por bombeo fue drásticamente reducido (un 58%). Aparte de dicho estudio, la literatura científica sobre plantas MED+ACC es bastante escasa, y las publicaciones que hay [23,25] son estudios teóricos y ninguno está enfocado en la parte de refrigeración. Como caso de estudio real, se tiene la planta piloto CSP+MED pre-comercial que fue instalada en Egipto bajo el marco del proyecto MATS [26,27]. El uso de ACC en este caso implica que la temperatura del último efecto de la MED sea de 60 °C [28]. Hasta la fecha no hay ningún estudio de la planta publicado en la literatura científica. El uso de sistemas de refrigeración híbrida como alternativa a ACC para reducir el consumo de agua para refrigeración en plantas MED solares situadas lejos de la costa parece a priori una opción con alto potencial. Estos permiten mantener la temperatura del último efecto próxima a la establecida mediante un sistema OT y evitan el alto consumo eléctrico requerido tanto por OT (bombeo de agua) como ACC (ventiladores). Sin embargo, aparte que el número de estudios centrados en la parte de refrigeración de plantas MED es muy escaso, ninguno de ellos considera la integración de sistemas de refrigeración híbrida. En general, existe la necesidad en I+D para hacer del uso de sistemas de refrigeración híbrida en AST una solución para el ahorro de agua que sea rentable, competitiva y atractiva para los potenciales usuarios. Además, de la revisión del estado actual de la tecnología, se percibe que la mayoría de los estudios publicados no incluyen la validación con datos experimentales debido a la falta de existencia de instalaciones reales. En la PSA se dispone de instalaciones a escala piloto, tanto de sistemas de refrigeración híbrida como de plantas MED solares, que permiten cubrir también esta necesidad.

Teniendo esto en cuenta, nuestra **hipótesis de partida** en este proyecto es que **soluciones tecnológicas de refrigeración pueden contribuir notablemente a la sostenibilidad de procesos industriales alimentados con energía solar**. Además, **con la aplicación de métodos del ámbito del control automático es posible alcanzar una gestión óptima de**



**la operación de los sistemas de refrigeración híbrida en términos de consumo de agua sin penalizar la eficiencia de los procesos en los que estos sistemas estén integrados**, para así lograr que esta aplicación sea viable tanto técnica como económicamente. Debido a la falta de resultados existentes en este tema, la metodología y estrategias resultantes del proyecto propuesto serán de gran relevancia en este campo de investigación emergente. Además, ya que los resultados obtenidos podrán ser validados en instalaciones de un entorno de investigación relevante, la transferencia de tecnología resultante de este proyecto podrá ser de gran utilidad para la industria. La prioridad temática de entre las recogidas dentro de la Estrategia Española de Ciencia y Tecnología e Innovación 2021-2027 es la de “Clima, Energía y Movilidad”. Una de las líneas estratégicas de esta prioridad es el Cambio Climático y Descarbonización, que incluye como uno de sus ámbitos de intervención las energías renovables. La presente propuesta se encuentra claramente alineada con este ámbito, ya que se centra en dos aplicaciones que usan el sol como fuente de energía, como son las plantas CSP y las plantas MED solares, contribuyendo así a la descarbonización de ambos sectores. Otra de las líneas estratégicas es las Ciudades y Ecosistemas Sostenibles, que incluye como ámbitos de intervención los sistemas climáticos eficientes y técnicas para la preservación del medio ambiente. La presente propuesta contribuye a estos ámbitos potenciando la investigación en soluciones de refrigeración que permiten reducir el consumo de agua en AST que están localizadas en lugares de escasez hídrica importante, preservando de esta forma el medioambiente de estos lugares. Además, mediante la optimización de dichas soluciones se garantizará la eficiencia energética de AST haciendo que sean lo más sostenibles posible.

La experiencia previa del equipo de investigación en el área de control y optimización de procesos es muy amplia. Prueba de ello es la participación activa en recientes proyectos de investigación, como por ejemplo “Control y gestión óptima de recursos heterogéneos en distritos productivos agroindustriales integrando energías renovables (CHROMAE, DPI2017-85007-R)” finalista de los premios enerTIC Awards 2021 y en el que, desde la disciplina del control automático, se contribuye a una gestión óptima de los recursos para producir un impacto ambiental lo más reducido posible. Dicho proyecto surgió como continuación del proyecto coordinado ENERPRO (DPI2014-56364-C2-1-R) en el que un miembro del equipo de investigación lideró un subproyecto enfocado a desarrollar estrategias de gestión y optimización para sistemas de desalación solar térmica. A nivel europeo, es importante destacar la participación en proyectos tan relevantes como “bio-mimetic and phyto-techNologies Deslgned for low-cost purficAtion and recycling of water (INDIA-H2O)”, en el que se está diseñando un sistema de control óptimo para prototipos de demostración de tratamiento de aguas industriales que se instalarán en zonas áridas de la India. En otro proyecto europeo, “Solar Facilities for the European Research Area - Third Phase (SFERA-III)”, miembros del equipo de investigación trabajan en la mejora de los sistemas de automatización para el caso de sistemas de tratamiento de agua y desalación. En el proyecto “Innovative configuration for a fully renewable hybrid CSP plant (HYSOL)”, la IP2 del proyecto propuesto lideró tanto las tareas de CIEMAT como un paquete de trabajo específico sobre modelado y control. Toda la experiencia obtenida en estos proyectos y en otras actividades relacionadas, se ha puesto de manifiesto en numerosos artículos de investigación, destacando por ejemplo las relacionadas con la optimización y control en plantas de destilación por membranas [29–31], optimización en plantas MED [32–34] y la optimización del mix energético [35]. Para llevar a cabo el control y optimización es necesario previamente el desarrollo de modelos, y en este proyecto se abordará tanto el modelado basado en ecuaciones físicas como el basado en datos experimentales. La experiencia del equipo de investigación en modelado basado en ecuaciones físicas es también muy amplia, tanto en estado estacionario como en dinámico. El equipo ha trabajado especialmente en el desarrollo de modelos de plantas MED, campos solares de placa plana y plantas CSP utilizando diferentes entornos de programación (Matlab/Simulink, Engineering Equation Solver (EES) y Dymola). Un ejemplo concreto es el modelado (tanto en estado estacionario como en dinámico) de una planta MED solar a escala piloto localizada en la PSA cuya validación se ha realizado mediante datos experimentales [36–38]. Otro modelo (en este caso dinámico) basado en una planta MED piloto ha sido el desarrollado en el marco proyecto europeo “Solving Water Issues for CSP Plants (SOLWARIS)” (convocatoria LCE-11-2017 mencionada

anteriormente), cuyo líder en CIEMAT es la IP1 del presente proyecto. El modelo fue desarrollado en colaboración con la Universidad de Almería (UAL) y la empresa INDETEC. Dicho trabajo ha sido enviado a revista recientemente [39] y está actualmente en revisión. En el caso de campos solares con captadores de placa plana, es importante destacar los avances llevados a cabo en el modelado dinámico incluyendo retardos variables [40,41]. En cuanto a plantas CSP, el equipo del proyecto ha trabajado muy activamente en el proyecto H2020 “Scientific and Technological Alliance for Guaranteeing the European Excellence in Concentrating Solar Thermal Energy (STAGE-STE), que fue coordinado por uno de los miembros del equipo de investigación del presente proyecto. Dentro de uno de los paquetes de trabajo del proyecto (Solar Thermal Electric plus Desalination) se llevó a cabo el desarrollo de modelos cuasi-estacionarios de sistemas de cogeneración a escala industrial (CSP+MED, CSP con Ósmosis Inversa) y además se realizó el análisis tecno-económico para elegir la mejor de ellas en diferentes escenarios. Este proyecto ha dado lugar a un gran número de publicaciones en revistas de alto impacto [42–50], lo que ha convertido a la IP1 del proyecto como la segunda autora en Scopus con mayor número de publicaciones en el tema “Concentrating Solar Power” AND “Desalination”. En cuanto a la obtención de modelos basados en datos experimentales, el equipo de investigación posee una dilatada experiencia en sistemas de desalación solar en los siguientes ámbitos: evaluación experimental para identificación de componentes [51–53], obtención de ecuaciones paramétricas siguiendo un Diseño Experimental (DoE, de las siglas en inglés Design of Experiment) [54–56], modelado con redes neuronales [57] y obtención de modelos para su uso en estrategias de control [58,59], todos ellos con el objetivo de optimizar la producción y el consumo específico de energía térmica. Toda la experiencia anteriormente demostrada constituye una base sólida para garantizar el éxito que se pueda alcanzar en las diferentes tareas de investigación que se lleven a cabo en la presente propuesta de proyecto.

### **3. OBJETIVOS, METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO**

#### **3.1. Objetivos Generales y Específicos**

Teniendo en cuenta las consideraciones descritas en la sección anterior, los objetivos generales que se plantean en esta propuesta son: 1) optimizar la operación de una planta piloto de refrigeración híbrida atendiendo a criterios económicos y de disponibilidad de recursos (agua) y 2) analizar la viabilidad tecno-económica de un sistema de refrigeración híbrida para dos casos de estudio a escala comercial: plantas CSP y plantas MED solares alejadas de la costa. Para ello, será necesario alcanzar los siguientes objetivos específicos (entre paréntesis se muestra la IP responsable de cada objetivo):

- Establecer una campaña experimental en el lazo de ensayos de refrigeradores híbridos de la PSA cubriendo los rangos de operación posibles y empleando metodologías de DoE (IP1).
- Caracterizar, modelar y validar los principales componentes de las plantas piloto de la PSA (lazo de ensayos de refrigeradores híbridos y planta MED solar) (IP1).
- Desarrollar, implementar y validar lazos de control de bajo nivel que aseguren la operación de cada uno de los subsistemas en los puntos deseados (IP2).
- Desarrollar, implementar y validar una estrategia de optimización para el sistema híbrido completo, de forma que se optimicen los consumos eléctricos y de agua (IP2).
- Escalar los modelos del sistema de refrigeración híbrida junto con la estrategia de optimización de la operación e integrarlos con modelos de casos de estudio comerciales (CSP y MED) para su evaluación mediante simulaciones anuales (IP2).
- Evaluación de los costes de inversión y de operación de los casos de estudio comerciales en comparación con las tecnologías de refrigeración convencionales empleadas en la actualidad (IP1).

#### **3.2. Metodología y plan de trabajo**

La actividad a desarrollar en el proyecto SOLHYCOOL se distribuye en cinco paquetes de trabajo (WP, del inglés “work package”) que abarcan los objetivos específicos anteriormente mencionados. En la Figura 2 se muestra la relación entre los WP propuestos. Para asegurar la buena ejecución de las actividades se ha definido el WP0 que estará en constante comunicación con el resto de WPs. El modelado de los componentes del sistema de

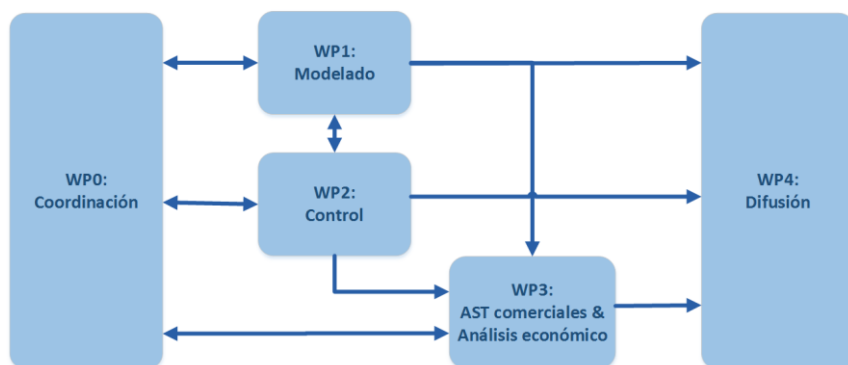


Figura 2. Estructura de paquetes de trabajo en SOLHYCOOL y las relaciones entre ellos.

refrigeración híbrida (WP1) es la base del proyecto, ya que sus resultados son el inicio para el desarrollo de las actividades de control en la planta piloto (WP2) y para el análisis de los casos de estudio comerciales propuestos (WP3). A partir de los resultados obtenidos en el WP3,

en cuanto a consumo anual de recursos, se podrá analizar la viabilidad de este tipo de soluciones tecnológicas desde el punto de vista económico. El WP4 tendrá una visión general del proyecto y su finalidad es asegurar que los resultados obtenidos se difundan tanto a nivel científico (con la publicación de artículos en revistas con índices de impacto relevante y presentaciones en congresos) como a nivel social (mediante la divulgación en redes sociales y en revistas de divulgación) y a nivel industrial (mediante la organización de eventos conjuntos con empresas interesadas).

El proyecto dispone de carácter multidisciplinar, ya que abarca diferentes áreas temáticas. El área temática principal del proyecto es EYT (Energía y transporte), ya que pretende generar conocimiento nuevo en una tecnología necesaria para garantizar un suministro energético eficiente y respetuoso con el medio ambiente, considerando como casos de estudio aplicaciones que utilizan la energía solar como fuente de energía. Además, para alcanzar los objetivos propuestos, se emplearán técnicas conocidas del campo de la Automática enmarcadas en el área temática PIN (Producción industrial, ingeniería civil e ingenierías para la sociedad). Por tanto, para ejecutar de forma satisfactoria el proyecto es necesaria la experiencia de todos los miembros en las diferentes especialidades que abarcan estas áreas temáticas (modelado, control y evaluación experimental de aplicaciones solares térmicas a escala piloto) y este equipo cuenta con un amplio recorrido en sus respectivas áreas de conocimiento, tanto en aplicaciones de desalación solar térmica como en plantas CSP, como así lo indican sus currículums vitae. A continuación, se detallan los WPs y las correspondientes tareas asociadas. Los responsables y participantes se muestran indicados mediante sus siglas (definidas en la Tabla 1).

### WP0. Coordinación y gestión del proyecto (PPA)

Esta tarea estará activa durante la duración del proyecto. La mayoría de los investigadores se encuentran trabajando en el mismo centro de trabajo y además pertenecen a la misma unidad de investigación, lo que facilitará la coordinación y dirección del proyecto. Las IPs se encargarán de garantizar el buen desarrollo de las actividades y su ejecución en los plazos definidos. Se mantendrán reuniones periódicas con todo el equipo con el fin de dar a conocer las actividades que cada investigador o grupo de investigadores estén llevando a cabo en el marco de sus tareas asignadas. Para ello se propone una reunión inicial del proyecto y reuniones anuales. Se mantendrán reuniones bilaterales entre subgrupos que tengan tareas comunes con tanta frecuencia como se necesite con el fin de alcanzar los objetivos marcados.

Participantes: todos

Duración de la tarea: 36 meses

Metas: M0.1: Reunión inicial (mes 1), M0.2: Reunión primera anualidad (mes 13), M0.3: Reunión segunda anualidad (mes 25), M0.4: Reunión final (mes 36).

### WP1. Modelado de componentes (PPA)

El equipo del proyecto desarrollará modelos de simulación de los principales componentes del lazo de ensayos de refrigeradores híbridos de la PSA (ACHE, WCT, SC) empleando distintas metodologías en función de los objetivos marcados. También será importante

caracterizar el condensador de la planta piloto MED solar de la PSA para el desarrollo del caso de estudio comercial incluido en el WP3. Aunque el equipo del proyecto ha desarrollado y validado modelos de MED (tal y como se ha descrito en la Sección 2), la temperatura de salida del condensador final no ha sido hasta el momento una variable de salida de interés. En el trabajo que nos ocupa es fundamental disponer también de un buen modelo del condensador de la MED que nos permita analizar su interacción con el sistema de refrigeración híbrida. Se requerirán datos reales para la identificación, calibración y validación de los modelos y las estrategias de control, que serán aquellos resultantes de las campañas experimentales realizadas en las plantas piloto de la PSA (tanto lazo de ensayos de refrigeradores híbridos como planta piloto MED solar). Para ello será necesario definir previamente las condiciones de operación de cada uno de los experimentos a llevar a cabo.

#### T1.1 Diseño y ejecución de experimentos (PPA)

A lo largo del proyecto será necesario realizar distintas campañas experimentales que serán fundamentales para la identificación y modelado del proceso, validación de modelos y validación de estrategias de control. Es importante destacar que una de las tareas iniciales para realizar ensayos experimentales será el acondicionamiento o puesta a punto, en cuanto a instrumentación, sensores y equipos, del lazo de ensayos de refrigeradores híbridos para poder caracterizar de forma más fiable cada uno de los componentes y poder así realizar actividades de investigación de mayor calidad en el ámbito de modelado y control. El diseño experimental (DoE) a llevar a cabo tiene que ser fruto de una planificación donde se consideren las variables que afectan al proceso a estudiar, los rangos y los niveles de operación. Este DoE dependerá del subsistema a analizar, pero se considerarán principalmente dos metodologías [60]: el diseño Box-Behnken de tres factores y el diseño factorial de dos niveles ( $2^k$ ). Una vez decidido el diseño experimental, se llevarán a cabo los experimentos en las plantas piloto de la PSA. Los resultados obtenidos se emplearán tanto en este WP1 (en las tareas T1.2 y T1.3) como en el WP2 para evaluar los lazos de control de bajo nivel, la optimización de la operación y el control jerárquico completo (T2.3). Para estas validaciones se diseñarán y ejecutarán campañas de experimentación específicas.

Participantes: PPA, LRS, BOD, JMSR, JBC, JDGV, FA

Duración de la tarea: 18 meses

Metas: M1.1: Campaña experimental I. Datos de lazo de ensayos de refrigeradores híbridos y planta MED solar PSA (mes 6). M1.2: Campaña experimental II. Datos con lazos de control de bajo nivel implementados (mes 15). M1.3: Campaña experimental III. Datos con optimizador implementado (mes 24).

#### T1.2. Modelado basado en datos experimentales (LRS)

Para las tareas de optimización de la operación del lazo de ensayos de refrigeradores híbridos de la PSA (T2.2) se hará uso de modelos basados en datos experimentales. Mediante el uso de técnicas de aprendizaje profundo (deep learning) se desarrollarán modelos en estado estacionario de los componentes principales de la instalación. Se analizará la opción de emplear distintas arquitecturas tales como redes neuronales, redes neuronales recurrentes o Long Short Term Memory (LSTM). El objetivo será poder estimar las temperaturas de salida de cada uno de los componentes en función de las variables identificadas como entradas (caudales, temperaturas de entrada, velocidad de los ventiladores, temperatura ambiente y humedad). Para el desarrollo de estos modelos se emplearán como entornos de programación principalmente Matlab/Simulink o Python. Con el fin de obtener modelos que cubran todo el rango de operación, será necesario contar con una base de datos de experimentos obtenida a partir de las campañas experimentales realizadas en la tarea T1.1.

Participantes: PPA, LRS, JBC, JMSR, FA

Duración de la tarea: 6 meses

Metas: M1.4: Modelos en estacionario basados en datos experimentales de los componentes del lazo de ensayos de refrigeradores híbridos de la PSA (mes 12).

#### T1.3. Modelado basado en ecuaciones físicas (PPA)



Con el fin de analizar la viabilidad de la tecnología híbrida de enfriamiento se desarrollarán modelos basados en ecuaciones físicas. Estos modelos serán calibrados y validados con datos experimentales (empleando la misma base de datos que en la T1.1). Para el desarrollo de estos modelos se emplearán como entornos de programación Matlab/Simulink, EES y/o Dymola. La validación de dichos modelos permitirá escalar (en la T1.5) el sistema de refrigeración híbrida completo a tamaño comercial para poder así realizar simulaciones anuales y analizar resultados en los casos de estudio comerciales definidos en esta propuesta.

Participantes: PPA, LRS, DCAP, BOD, JBC, FA

Duración de la tarea: 18 meses

Metas: M1.5: Modelo del condensador de la planta piloto MED solar (mes 6). M1.6: Modelos de los componentes de la planta piloto de refrigeradores híbridos (mes 18).

#### T1.4. Modelado dinámico para control (LRS)

Para diseñar y ajustar los lazos de control de bajo nivel de la T2.1 será necesario disponer de modelos dinámicos. En base a la experiencia con este tipo de procesos, se proponen modelos lineales de primer o segundo orden obtenidos con ensayos experimentales del tipo escalón o PRBS (pseudo random binary sequence), aunque se analizará la posibilidad de incluir distintos grados de complejidad si fuera necesario. Para el desarrollo de estos modelos se empleará como lenguaje de programación Matlab/Simulink.

Participantes: PPA, LRS, JMSR

Duración de la tarea: 6 meses

Metas: M1.7: Modelos para su uso en diseño de controladores (mes 6).

#### T1.5. Formulación/adaptación de modelos para su uso en los casos de estudio comerciales (PPA)

Para la evaluación de los casos de estudio comerciales de las T3.1 y T3.2 será necesario escalar los modelos desarrollados en la T1.3 para adaptar los requisitos de enfriamiento de los procesos comerciales. Además, los modelos de la T1.2 empleados en el proceso de optimización (T2.2) tienen que ser también adaptados a los casos de estudio comerciales. Para esto último, se propone emplear las mismas estrategias experimentales seleccionadas en la T1.1 pero, en este caso, sobre los propios modelos en estado estacionario escalados.

Participantes: PPA, LRS, JMSR, JBC

Duración de la tarea: 9 meses

Metas: M1.8: Modelo del HC para el caso de estudio con CSP (mes 21). M1.9: Modelos del HC para el caso de estudio con MED solar (mes 24). M1.10: Modelos para la optimización de la operación en los casos de estudio (mes 27).

### **WP 2. Desarrollo de un sistema de control jerárquico para la optimización de los recursos (agua y electricidad) en sistemas de refrigeración híbrida (LRS)**

En este paquete de trabajo se diseñará una estructura de control jerárquico de dos capas empleando el software Matlab/Simulink. La capa inferior se encargará del correcto funcionamiento de los actuadores, mientras que la capa superior se encargará de calcular las consignas óptimas. Esta estructura de control se implementará y validará en el lazo de ensayos de refrigeradores híbridos de la PSA.

#### T2.1. Controladores para la capa inferior (LRS)

Actualmente los equipos principales que han de controlarse en la planta piloto de la PSA (ACHE y WCT) tienen implementados controladores del tipo Proporcional Integral Derivativo (PID) que regulan la velocidad de los ventiladores para alcanzar las temperaturas de salida deseadas. Estos controladores de bajo nivel están ajustados en un punto de operación pero, dada la no linealidad que presentan estos equipos, es necesario implementar estrategias de control que se adapten a los distintos puntos de operación (cambios en caudal, temperatura de entrada y temperatura ambiente, principalmente) y que aseguren el correcto

funcionamiento de la operación. Es importante destacar en este punto la complejidad que presenta este sistema desde un punto de vista del control ya que, al no disponer de un sistema de amortiguamiento (como por ejemplo un tanque), los comportamientos oscilatorios de las variables de salida (temperaturas) se transforman en perturbaciones oscilatorias en las temperaturas de entrada, lo que condiciona el ajuste de dichos controladores. Para afrontar esta tarea se propone el diseño de esquemas de control adaptativo o por tabla. Además, se analizará la opción de emplear controladores anticipativos para contrarrestar el efecto de perturbaciones, principalmente debido a variaciones en la temperatura de entrada y caudal. Para el diseño de estas estrategias de control será necesario disponer de los modelos descritos en la T1.4.

Participantes: PPA, LRS, JMSR, JDGV

Duración de la tarea: 6 meses

Metas: M2.1: Controladores de bajo nivel para HC (mes 12)

#### T2.2. Optimización de la operación (LRS)

La capa superior del control jerárquico está formada por un optimizador encargado de encontrar el punto de operación (caudales y temperaturas controlables) que maximice una función objetivo dada. La optimización se realizará empleando los modelos en estacionario obtenidos con técnicas de deep learning desarrollados en T1.2. Se propondrán distintas funciones de coste enfocadas a la optimización de la operación teniendo en cuenta los consumos del sistema (agua y electricidad), que dependerán tanto de las condiciones de operación (potencia térmica requerida) como de las condiciones ambientales (temperatura ambiente y humedad). Dado que los modelos de redes neuronales no garantizan una solución lineal o no lineal suave, se propondrán técnicas de optimización globales como por ejemplo algoritmos genéticos. Una decisión importante también en esta tarea es el valor del tiempo de muestreo adecuado en la capa superior. Se analizará en este caso el posible empleo de estrategias basadas en eventos.

Participantes: PPA, LRS, JBC, JMSR, JDGV

Duración de la tarea: 6 meses

Metas: M2.2. Implementación de algoritmo de optimización en la planta piloto de refrigeradores híbridos (mes 18).

#### T2.3. Validación del sistema de control (LRS)

El sistema de control jerárquico se validará con datos del lazo de ensayos de refrigeradores híbridos de la PSA, obtenidos mediante las campañas experimentales definidas en la T1.1., en distintas condiciones de operación y ambientales. Con el fin de cubrir todo el rango de temperatura ambiente y humedad, la experimentación se llevará a cabo en distintos periodos del año.

Participantes: PPA, LRS, JBC, JMSR, JDGV

Duración de la tarea: 15 meses

Metas: M2.3: Resultados del sistema de control (mes 24).

### **WP 3. Análisis de integración de sistemas de refrigeración híbrida en AST (DCAP)**

Una actividad fundamental de este proyecto es analizar en profundidad la viabilidad de esta tecnología de refrigeración híbrida para el caso de aplicaciones solares térmicas a escala comercial, tomando como base los conocimientos adquiridos con la experimentación y modelado de la planta piloto. Para ello se propone analizar dos casos de estudio: una planta CSP y una planta de destilación multiefecto alimentada con energía solar. Esta fase es fundamental para evaluar las posibilidades comerciales que se pueden llegar a alcanzar con esta tecnología. Se realizarán simulaciones anuales (empleando los softwares Matlab/Simulink, EES y/o Dymola) utilizando años meteorológicos tipo de cada localización generados mediante el software Meteonorm, y considerando tiempos de muestreo de una hora. Se analizará en cada caso la producción de electricidad (caso CSP) y agua (caso MED),

así como los consumos de agua y electricidad requeridos por el sistema de refrigeración del tipo HC con la estrategia de optimización incluida.

#### T3.1. Caso de estudio 1: planta CSP (PPA)

En un principio se tomará como caso de estudio la planta comercial CSP Andasol-I, pero puede ser revisado en función del estudio de mercado resultado de la T3.3. Se emplearán modelos desarrollados previamente por el equipo del proyecto (mencionados en la Sección 2) que se combinarán con los modelos escalados del sistema de refrigeración híbrida en la T1.5.

Participantes: PPA, LRS, BOD, DCAP, JBC, JBG, FA

Duración de la tarea: 9 meses

Metas: M3.1. Resultados de desempeño anual de una planta CSP con sistema de refrigeración híbrida (mes 33).

#### T3.2. Caso de estudio 2: planta MED (DCAP)

El caso de estudio con MED se decidirá en función del análisis de mercados y localizaciones potenciales de la T3.3. Se emplearán modelos desarrollados previamente por el equipo del proyecto que se combinarán con los modelos escalados del sistema de refrigeración híbrida en la T1.5.

Participantes: PPA, LRS, DCAP, JMSR, JBG

Duración de la tarea: 9 meses

Metas: M3.2. Resultados de desempeño anual de una planta MED solar con sistema de refrigeración híbrida (mes 33).

#### T3.3. Análisis económico (JBG)

En primer lugar se analizarán los mercados y localizaciones potenciales para el uso de la tecnología de refrigeración híbrida a nivel regional, nacional y mundial. Como resultado de dicho análisis se definirán las condiciones de contorno para la evaluación de los dos casos de estudio comerciales correspondientes a las tareas T3.1 y T3.2. Además, este análisis se empleará como referencia para invitar a empresas en el primer evento con el sector industrial (WP4). En segundo lugar, se evaluará el impacto económico de la implantación de la tecnología de refrigeración híbrida en los dos casos de estudio propuestos. Esta tarea supone realizar una estimación de los costes de inversión y de operación en comparación con las tecnologías de refrigeración convencionales empleadas en la actualidad.

Participantes: PPA, LRS, DCAP, BOD, JBG, JMSR

Duración de la tarea: 21 meses

Metas: M3.3: Identificación de mercados potenciales y localizaciones de interés para los casos de estudio (mes 12), M3.4: Evaluación de la competitividad económica de la tecnología de refrigeración híbrida frente a las opciones convencionales (mes 36).

#### **WP4. Difusión de resultados (LRS)**

Los resultados obtenidos con el proyecto SOLHYCOOL serán difundidos al resto de la comunidad científica, empresas interesadas y sociedad. Para ello, se realizará una página web del proyecto, se redactarán trabajos científicos para su publicación en revistas de reconocido prestigio con índice de impacto o su presentación en congresos, se organizarán eventos para el sector industrial y se llevarán a cabo actividades de divulgación.

Participantes: todos

Duración de la tarea: 36 meses

Metas: M4.1: Creación de página web (mes 6), M4.2. Evento I con sector industrial (mes 12), M4.3: Evento II con sector industrial (mes 36).

### **3.3. Cronograma**

En la Tabla 1 se muestra el cronograma del plan de trabajo propuesto junto con la lista detallada de los investigadores que estarán involucrados en las diferentes tareas.

	Mes de proyecto																																					
	Año 1												Año 2												Año 3												Investigadores	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
WP0: Coordinación	M0.1												M0.2												M0.3											M0.4	PPA, LRS, DCAP, JBG, BOD, JMSR, JBC, JDGV , FA	
WP1: Modelado																																					PPA	
T1.1 Diseño y ejecución de experimentos						M1.1									M1.2									M1.3													PPA, LRS, BOD, JMSR, JBC, DGV , FA	
T1.2. Modelado basado en datos experimentales												M1.4																									LRS, PPA, JBC, JMSR, FA	
T1.3. Modelado basado en ecuaciones físicas						M1.5												M1.6																			PPA, LRS, DCAP, BOD, JBC, FA	
T1.4. Modelado dinámico para control						M1.7																															LRS, PPA, JMSR	
T1.5. Adaptación de modelos para su uso en los casos de estudio																					M1.8			M1.9			M1.10										PPA, LRS, JMSR, JBC	
WP2: Control																																					LRS	
T2.1. Controladores para la capa inferior												M2.1																									LRS, PPA, JMSR, JDGV	
T2.2 Optimización de la operación																		M2.2																			LRS, PPA, JBC, JMSR, JDGV	
T2.3. Validación del sistema de control																								M2.3													LRS, PPA, JBC, JMSR, JDGV	
WP3: AST																																					DCAP	
T3.1. Caso de estudio 1: planta CSP																																		M3.1			PPA, LRS, BOD, DCAP, JBC, FA	
T3.2. Caso de estudio 2: planta MED																																		M3.2			DCAP, PPA, LRS, JMSR, JBG	
T3.3. Análisis económico													M3.3																							M3.4	JBG, PPA, LRS, DCAP, BOD, JMSR	
WP4: Difusión						M4.1							M4.2																								M4.3	LRS, PPA, DCAP, JBG, BOD, JMSR, JBC, JDGV , FA

Tabla 1. Planificación y cronograma de la propuesta del proyecto. Patricia Palenzuela Ardila (PPA), Lidia Roca Sobrino (LRS), Diego-César Alarcón Padilla (DCAP), Julián Blanco Gálvez (JBG), Javier Bonilla Cruz (JBC), Bartolomé Ortega Delgado (BOD), Juan Miguel Serrano Rodríguez (JMSR), Juan Diego Gil Vergel (JDGV), Faisal Asfand (FA)



### 3.4. Plan de contingencia

Identificación del riesgo	Probabilidad	Impacto	Medidas correctivas
Imposibilidad de llevar a cabo las campañas experimentales establecidas por motivos de pandemia	baja	alto	Se emplearán todos los datos de las plantas piloto almacenados hasta la fecha para realizar las actividades. Se supervisarán los experimentos de forma remota.
Imposibilidad de llevar a cabo las campañas experimentales establecidas por problemas en la instalación	baja	alto	Se dará prioridad a reparar los elementos que imposibiliten la ejecución de las campañas experimentales. Se emplearán todos los datos almacenados hasta la fecha de las plantas piloto para realizar las actividades.
Imposibilidad de llevar a cabo las campañas experimentales establecidas por no alcanzar todas las condiciones ambientales previstas (temperatura ambiente y humedad)	media	medio	Se realizarán ensayos experimentales por la noche, si fuera estrictamente necesario. Se adelantará trabajo con los datos disponibles y se alargarán las campañas experimentales a lo largo de los meses para cubrir todos los rangos de operación posibles y poder ir actualizando los modelos.
Falta de participación del sector industrial provincial en los eventos organizados	baja	alto	Se extenderá el radio de acción a otras provincias, se dará prioridad a la difusión por otras vías de comunicación.
Imposibilidad de organizar los eventos con el sector industrial de forma presencial por motivos de pandemia	alta	medio	Se organizarán eventos online.

### 3.5. Medios materiales, infraestructuras y/o equipamientos singulares

El proyecto será llevado a cabo por personal investigador perteneciente a dos unidades de investigación de la PSA (la Unidad de Aplicaciones Solares Térmicas, UAST, y Dirección), personal investigador de la UAL y de la Universidad de Huddersfield. Para el desarrollo del proyecto se cuenta con las propias instalaciones y laboratorios de la PSA, que es el mayor centro de I+D del mundo para sistemas termosolares de concentración y tratamiento de aguas, reconocida como Gran Instalación Científica Europea y como Infraestructura Científica y Técnica Singular (ICTS), y donde existe ya una amplia experiencia en las diferentes áreas de trabajo que se proponen. A continuación, se detallan las instalaciones experimentales y paquetes de software que se utilizarán para el desarrollo de las actividades de este proyecto.

**El lazo de ensayos de refrigeradores híbridos** (ver Figura 3) consiste en tres circuitos: circuito de refrigeración, circuito de intercambio y circuito de calentamiento. En el circuito de refrigeración (ver Figura 3a), el agua que circula por el interior del haz de tubos de un condensador de superficie es enfriada a través de la WCT (1) y/o del ACHE (2), ambos de 204 kW<sub>t</sub>. En el circuito de intercambio (ver Figura 3b), un generador de vapor saturado (1) de 80 kW<sub>t</sub> produce vapor a diferentes presiones (en el rango entre 82 y 200 mbar), el cual a su vez es condensado en un condensador de superficie (2) de 80 kW<sub>t</sub>, cediendo así el calor latente de cambio de fase al agua de refrigeración, que se calienta. Finalmente, en el circuito de calentamiento, un campo solar de captadores estáticos de 300 kW<sub>t</sub> de potencia térmica

total en punto de diseño proporciona el agua caliente necesaria para llevar a cabo la alimentación energética en el generador de vapor.



Figura 3. Circuitos de refrigeración (a) e intercambio (b) del lazo de ensayos de refrigeradores híbridos de la PSA

**La planta MED solar** de la PSA (ver Figura 4a) está formada por 14 etapas o efectos dispuestos verticalmente, con suministro directo de agua de alimentación en el primer efecto de la planta (configuración de alimentación frontal). Partiendo de un caudal nominal de agua de alimentación de  $8 \text{ m}^3/\text{h}$ , la producción de destilado total de la planta es de  $3 \text{ m}^3/\text{h}$ , con un consumo térmico total de  $190 \text{ kW}_t$ . El gradiente de temperatura entre la primera y última etapa, en condiciones nominales, es de  $40^\circ\text{C}$  con una temperatura máxima de operación en la primera celda de  $70^\circ\text{C}$ . El fluido de transferencia de calor es agua, que es calentada a través del campo solar de captadores estáticos de  $300 \text{ kW}_t$  (ver Figura 4b) mencionado anteriormente.



Figura 4. Planta MED (a) y campo solar de captadores estáticos (b)

Además, se complementará este equipamiento con la adquisición de licencias temporales de paquetes de software para implementación de modelos y algoritmos de control y optimización, tales como Matlab/Simulink, EES, Dymola y Meteonorm.

#### 4. IMPACTO CIENTÍFICO-TÉCNICO

Las actividades incluidas en este proyecto tratan con modelado, control y optimización de sistemas de refrigeración híbrida para ahorro de agua en AST cuya aplicación suele tener lugar en emplazamientos geográficos con una escasez hídrica importante. El tema del proyecto pertenece a la prioridad temática del Plan Estatal de Investigación 2021-2023 "Clima, Energía y Movilidad", cuyas necesidades relacionadas con la presente propuesta son: uso de energías renovables para conseguir la descarbonización y evitar así el cambio climático, y el establecimiento de sistemas climáticos eficientes y de técnicas para la preservación del medio ambiente para conseguir ciudades y ecosistemas sostenibles. De los resultados obtenidos de

este proyecto, se espera poder validar en una planta piloto una estrategia de optimización para sistemas de refrigeración híbrida que permita adaptar la operación de este tipo de tecnologías con el fin de reducir el consumo de agua requerido. Es importante destacar que hasta la fecha no se conoce ningún estudio similar a escala piloto y su validación permitirá analizar de forma más rigurosa el potencial de la tecnología híbrida de enfriamiento a escala comercial. Este estudio es fundamental para el caso de aplicaciones que usan energía solar como fuente principal de energía y que se sitúan en localizaciones con un problema medioambiental grave debido a la falta de agua. Por un lado, los avances llevados a cabo en el marco de este proyecto podrán ser transferibles a la comunidad científica de forma que se promuevan análisis complementarios o innovaciones tecnológicas y se impulse un avance en este tema tan relevante para contribuir a la preservación de un bien escaso como es el agua. Por otro lado, la metodología de optimización aplicada a los dos casos de estudio propuestos (plantas CSP y plantas MED solares situadas lejos de la costa), podrán ser fácilmente adaptables a otros casos de estudio (tales como la climatización solar mediante bombas de calor por absorción y adsorción) y ser transferibles a pymes o grandes empresas que puedan estar interesadas en la implementación de estas soluciones de ahorro de agua.

En definitiva, los resultados obtenidos pueden mejorar el medioambiente y conseguir un mundo más sostenible, ya que además se alinean con algunos de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) creados el 25 de septiembre del 2015 por la Asamblea General de las Naciones Unidas (ONU) para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. En concreto, tanto el objetivo 7 (Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna) como el 9 (Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación) promueven modernizar el sector industrial en general para que adopten tecnologías limpias y ambientalmente racionales. A través de este proyecto y los eventos asociados, aportaremos herramientas y conocimientos a las empresas para alcanzar un consumo responsable del agua, recurso que si no se gestiona adecuadamente tendrá un impacto social grave tal y como se indica en el objetivo 12 (Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles). Es importante promover estilos de vida sostenibles, pero no solo en la sociedad en su día a día, sino también en el sector industrial.

### **Plan de difusión e internacionalización**

Se espera realizar, al menos, un total de seis artículos (dos por año durante los tres años de duración del proyecto) a partir de los resultados obtenidos, que serán publicados en las revistas internacionales más relevantes relacionadas con las temáticas abordadas en el proyecto: Energy, Applied Energy, Applied Thermal Engineering, Desalination, Energy Conversion and Management, International Journal of Refrigeration, Computers and Chemical Engineering, Control Engineering Practice y Journal of Process Control. En todo caso, los resultados se publicarán o bien en la modalidad de acceso abierto de la que dispone n las revistas mencionadas o en el repositorio institucional de CIEMAT (Docu-menta).

Asimismo, se pretender publicar un capítulo de libro que recoja los resultados más relevantes de la línea de investigación de refrigeradores híbridos para ahorro de agua en AST, que podrá ser publicado por editoriales conocidas en las que los miembros de la propuesta han venido publicando hasta ahora, como son Springer o Elsevier.

Se prevé la difusión de resultados del proyecto, por parte de personal que participe en la ejecución del proyecto, en los foros científicos más adecuados. En concreto, asistirán seis personas para la presentación oral en seis congresos internacionales, tales como SolarPACES, EDS (European Desalination Society), European Control Conference o IFAC World Congress. Asimismo, se prevé la participación por parte de tres personas en tres congresos nacionales, tales como Las Jornadas de Automática que se celebran anualmente, y que son organizadas por el comité español de automática, CEA.

Se asistirá además a reuniones nacionales e internacionales de los grupos de trabajo pertinentes creados en el seno de instituciones tales como SolarPACES, EIP Water y WssTP, a las que regularmente acuden los investigadores involucrados en esta propuesta y donde participan instituciones públicas de I+D+i y empresas del sector energético y del sector del agua.



Además, se pretende la realización de una estancia con una duración de tres meses por parte de uno de los miembros del equipo de trabajo (JMSR) que actualmente está realizando su tesis doctoral, que podrá ser en la Universidad Federal de Santa Catarina (Brasil), con el “Grupo de Pesquisa em Energias Renováveis” liderado por el Profesor Julio E. Normey-Rico. Dicho grupo es un referente en el campo de la Automática y el control en diversas aplicaciones industriales alimentadas con energías renovables, empleando principalmente Control Predictivo basado en Modelo (MPC). El profesor Julio E. Normey-Rico cuenta con una demostrada experiencia en esta área que se refleja en su currículum (métricas de Scopus: 220 documentos, 3611 citas, índice-h 31). Durante la estancia prevista se pretende que el doctorando amplíe sus conocimientos en MPC y que diseñe estrategias de control basadas en MPC con el objetivo de optimizar la operación del sistema de refrigeración híbrida en el caso de aplicación de una MED solar. Es importante destacar que, con el grupo de Julio E. Normey-Rico, existe experiencia previa de colaboración que ha sido muy positiva y ha dado lugar a la publicación conjunta de varios trabajos científicos.

### **Plan de transferencia de resultados**

En cuanto a la transferencia de resultados, es necesario reconducir de manera lógica los hitos marcados en algunas de las actividades descritas para dotarlas de mayor visibilidad y favorecer la transferencia de resultados con la industria. Una vía de dicha transferencia es la de contrato de licencia o contrato de prestación de servicios de investigación con la idea de analizar la posibilidad de emplear la tecnología de refrigeración híbrida propuesta junto con la optimización de la operación en casos concretos de aplicación que se demanden. En colaboración con la Oficina de Transferencia de Tecnología de CIEMAT, se evaluará la opción de añadir esta propuesta en el catálogo de Oferta Tecnológica de CIEMAT. Es importante destacar que miembros del equipo de trabajo e investigación de esta propuesta tienen experiencia reciente (2021) en contratos de prestación de servicios donde se emplean herramientas de simulación. Las empresas que pueden estar a priori interesadas en el nuevo proyecto y que serán invitadas a los eventos realizados en el marco del WP4 son aquellas que estén relacionadas con CSP, como son SENER, TSK, ABENGOA, con tratamientos solares térmicos del agua como INDETEC o con sistemas de refrigeración como HAMON d'Hondt y Alfa Laval.

En cuanto al Plan de Gestión de Datos, cada una de las instalaciones experimentales dispone de un sistema de adquisición de datos (SCADA, de las siglas en inglés *Supervisory Control And Data*) que recogerá los datos experimentales (con un paso temporal de hasta un segundo) de cada variable de medida. Dichos datos podrán descargarse en formato .txt y posteriormente podrán ser importados desde el software de modelado o control correspondiente que se quiera utilizar. Los archivos de texto con los datos correspondientes se depositarán en una carpeta compartida a la que tendrá acceso todo el equipo del proyecto (de investigación y trabajo) creada en un entorno de nube colaborativa. Con el fin de que algunos de los datos generados puedan ser empleados por el resto de la comunidad científica, se planteará la posibilidad de poner a disposición pública algunos archivos de datos de referencia en la web del proyecto bajo demanda. Además, ya que la PSA es ICTS, las instalaciones empleadas en el presente proyecto se ofrecen como servicio a toda la comunidad científica y tecnológica nacional e internacional.

## **5. IMPACTO SOCIAL Y ECONÓMICO**

Los resultados obtenidos contribuyen claramente a la mejora del medio ambiente a nivel global ya que están enfocados a alcanzar un consumo responsable del agua en aquellos lugares donde existe un problema de escasez hídrica. Esto se encuentra alineado con políticas europeas que tienen como objetivo preservar y proteger el medio ambiente como fuente de riqueza natural y económica para Europa para así garantizar que sigan sustentándonos en el futuro. Además, la aplicación de herramientas de ahorro de agua en tecnologías solares con gran potencial comercial como son la CSP y la desalación solar térmica, enfatizan aún más el impacto positivo que puedan tener los resultados de este proyecto en el medio ambiente, alineándose perfectamente con las prioridades del ya conocido como Pacto Verde Europeo, que tiene como fin desarrollar un sector energético basado en gran medida en fuentes de



energía renovables para lograr la descarbonización del sistema energético de la Unión Europea. Otro de los principios clave del Pacto Verde Europeo que ayudará a mejorar la calidad de vida de la sociedad, es priorizar la eficiencia energética. Mediante las herramientas aplicadas en este proyecto se garantiza, además de la reducción del consumo de agua, la reducción del consumo de electricidad en comparación con otros sistemas convencionales, por lo que queda así garantizada la eficiencia energética de las aplicaciones comerciales objeto de estudio. Además, cabe destacar el impacto que pueda tener este proyecto en otra de las prioridades del Pacto Verde Europeo como es la de avanzar hacia la economía circular. Como se mencionó en la Sección 1, las tecnologías de evaporación térmica tales como el proceso MED tienen un gran potencial en procesos de vertido nulo y en recuperación de compuestos de valor añadido presentes en salmueras de desalación y efluentes industriales (economía circular), siendo la agricultura intensiva de Almería un ejemplo de uno de los sectores de gran interés para su aplicación. Los resultados del proyecto en cuanto a plantas MED, unidos a los obtenidos en el marco del proyecto WATER-MINING que actualmente se está llevando a cabo por parte de algunos miembros del equipo de investigación, ayudarán en conjunto a promover en el sector industrial la adopción de técnicas sostenibles con el medioambiente en tecnologías cuya implementación suponen un avance hacia una economía circular.

A nivel nacional, los resultados de este proyecto se encuentran alineados con el Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC), que identifica retos y oportunidades en áreas de la descarbonización (incluyendo energías renovables) y de la eficiencia energética. Muestra de ello son los 5 GW<sub>e</sub> adicionales de CSP previstos a instalar antes de 2030. Además, en el propio plan se identifica el agua como un recurso vulnerable en riesgo para la producción solar termoeléctrica. Para la reducción de dicho riesgo, una de las líneas de trabajo que se propone en el PNIEC es el estudio de mejoras tecnológicas de refrigeración para la disipación del calor del ciclo termodinámico. Por tanto, los resultados del proyecto propuesto pueden aportar grandes beneficios para la implementación de estas nuevas plantas CSP.

A nivel regional, es importante también destacar la alineación de las actividades propuestas en este proyecto con las políticas de la Comunidad Autónoma de Andalucía para la transición hacia un nuevo modelo energético establecidas en la Ley 8/2018, de 8 de octubre, de medidas frente al cambio climático y para la transición hacia un nuevo modelo energético en Andalucía. En materia de agua, la mencionada ley fomenta la investigación, el desarrollo y la innovación para la mejora en eficiencia de agua de los procesos productivos y la implantación de técnicas agrícolas más eficientes en el uso de agua. Tomando como base esta ley, la Consejería de Hacienda y Financiación Europea ha elaborado la Estrategia Energética de Andalucía 2030. En concreto, en los ejes de acción energética dos y tres, se promueve una economía descarbonizada y circular y se establecen medidas para una gestión activa y eficiente integrando fuentes de energía renovables, respectivamente.

Si logramos alcanzar los resultados esperados en este proyecto, su aplicación en industrias que utilizan la energía solar como fuente principal de energía, como la CSP y la desalación térmica, su impacto en el medio ambiente será positivo, aportando calidad a la sociedad.

### **Plan de comunicación**

Para dar a conocer a la sociedad las soluciones tecnológicas que se proponen en este proyecto y para mostrar los resultados que se obtengan de las investigaciones llevadas a cabo, se ha propuesto un plan de comunicación en el que los mensajes que queremos transmitir son fundamentalmente dos: es posible reducir los consumos de agua en la industria asociada a la energía solar térmica, cuáles son las líneas de investigación desarrolladas en la PSA y para qué sirve esta investigación. Para lograr este objetivo, el plan diseñado abarca a distintos colectivos sociales empleando distintas vías de comunicación:

- Para establecer posibles oportunidades de mercado en distintos sectores, se organizarán dos eventos en los que participen empresas del sector CSP, desalación térmica u otros, tanto a nivel nacional como internacional. Esta actividad de difusión será una oportunidad única para los participantes (sobre 35 por evento) para visitar la

PSA y conocer de primera mano el funcionamiento de las instalaciones a escala piloto utilizadas en el proyecto propuesto. La UAST tiene ya experiencia en la organización de este tipo de eventos en la PSA, como lo demuestra el workshop organizado en el marco del proyecto WASCOP y la primera reunión de la comunidad de práctica organizada en el marco del proyecto WATER-MINING.

- Para trasladar los resultados obtenidos a la sociedad, se prevé publicar dos artículos en revistas de divulgación como SolarNews y FuturEnergy, dando a conocer el objetivo del nuevo proyecto, así como resultados más relevantes que se vayan obteniendo a lo largo del mismo. Además, se participará en diferentes eventos sociales en las que el equipo del proyecto ya viene interviniendo de manera habitual, como por ejemplo la Noche Europea de los Investigadores. Todos los hitos y progresos que se vayan consiguiendo a lo largo del proyecto, así como eventos celebrados y reuniones realizadas se difundirán a través de la Unidad de Comunicación y Relaciones Públicas del CIEMAT en la web del organismo ([www.ciemat.es](http://www.ciemat.es)). Además, se utilizarán los canales de redes sociales de los que actualmente dispone la Plataforma Solar de Almería (Facebook, Twitter, LinkedIn) así como la página web ([www.psa.es](http://www.psa.es)) para darle una mayor difusión tanto a los objetivos como los resultados del proyecto.
- Se colaborará con actividades propuestas en el marco de un proyecto de cultura social liderado por la IP2 en el que, a través de charlas en centros educativos de secundaria y bachillerato, el propio alumnado será el encargado de elaborar vídeos de divulgación de corta duración.
- También es importante disponer de un soporte digital para que todas aquellas personas que hayamos conseguido interesar (empresas, investigadores, alumnado, profesorado, familias, ...) dispongan de toda la información relacionada con este proyecto, explicaciones más amplias y permanentes. Emplearemos para este fin la página web del proyecto.

## 6. CAPACIDAD FORMATIVA

No aplica

## 7. CONDICIONES ESPECÍFICAS PARA LA EJECUCIÓN DE DETERMINADOS PROYECTOS

No aplica

## Referencias bibliográficas

- [1] M. Martín, M. Martín, Cooling limitations in power plants : Optimal multiperiod design of natural draft cooling towers, *Energy*. 135 (2017) 625–636. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.06.171>.
- [2] K. Damerou, K. Williges, A.G. Patt, P. Gauché, Costs of reducing water use of concentrating solar power to sustainable levels: Scenarios for North Africa, *Energy Policy*. 39 (2011) 4391–4398. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.04.059>.
- [3] C. Turchi, K. Chuck, Water use in concentrating solar power (CSP), (2009). <http://www.swhydro.arizona.edu/renewable/presentations/thursday/turchi.pdf>.
- [4] A. Colmenar-Santos, D. Borge-Diez, C.P. Molina, M. Castro-Gil, Water consumption in solar parabolic trough plants : review and analysis of the southern Spain case, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 34 (2014) 565–577. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.03.042>.
- [5] A. Poulikkas, I. Hadjipaschalis, G. Kourtis, A comparative overview of wet and dry cooling systems for Rankine cycle based CSP plants, *Trends Heat Mass Transf.* 13 (2013) 27–50.
- [6] A.M. Blanco-Marigorta, M. Victoria Sanchez-Henriquez, J.A. Peña-Quintana, Exergetic comparison of two different cooling technologies for the power cycle of a thermal power plant, *Energy*. 36 (2011) 1966–1972. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.09.033>.
- [7] C. Kutscher, D. Costenaro, Assessment of evaporative cooling enhancement methods for air-cooled geothermal power plants, No. NREL/CP-550-32394. Natl. Renew. Energy Lab., Golden, CO.(US). (2002) 1–9. <http://www.nrel.gov/docs/fy02osti/32394.pdf>.
- [8] S. He, H. Gurgenci, Z. Guan, K. Hooman, Z. Zou, Comparative study on the performance of natural draft dry, pre-cooled and wet cooling towers, *Appl. Therm. Eng.* 99 (2016) 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.01.060>.
- [9] H. Zhai, E.S. Rubin, A techno-economic assessment of hybrid cooling systems for coal- and natural-gas-fired power plants with and without carbon capture and storage, *Environ. Sci. Technol.* 50 (2016) 4127–4134. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00008>.
- [10] F. Asfand, P. Palenzuela, L. Roca, A. Caron, C.-A. Lemarié, J. Gillard, P. Turner, K. Patchigolla, Thermodynamic performance and water consumption of hybrid cooling system configurations for concentrated solar power plants, *Sustainability*. 12 (2020) 1–19.

- [11] W. Asvapoositkul, M. Kuansathan, Comparative evaluation of hybrid (dry/wet) cooling tower performance, *Appl. Therm. Eng.* 71 (2014) 83–93. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.06.023>.
- [12] M. Deziani, K. Rahmani, S.J. Mirrezaei Roudaki, M. Kordloo, Feasibility study for reduce water evaporative loss in a power plant cooling tower by using air to air heat exchanger with auxiliary fan, *Desalination*. 406 (2017) 119–124. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.12.007>.
- [13] P. Palenzuela, L. Roca, G. García, J. Liria, A. Caron, F. Asfand, K. Patchigolla, Pilot scale hybrid cooling system for optimizing the water consumption at CSP plants, in: 25th SolarPACES Conf., Daegu (South Korea), 2019.
- [14] P. Palenzuela, L. Roca, F. Asfand, K. Patchigolla, Experimental Assessment of a Pilot Scale Hybrid Cooling System for Water Consumption Reduction in CSP Plants, in: 26th SolarPACES Conf., Online event, 2020.
- [15] P. Palenzuela, L. Roca, F. Asfand, K. Patchigolla, Experimental Assessment of a Pilot Scale Hybrid Cooling System for Water Consumption Reduction in CSP Plants, *Energy (Under Minor Revis.)* (2022).
- [16] McKinsey, Rethinking the water cycle, (2015). <https://www.mckinsey.com/business-functions/sustainability/our-insights/rethinking-the-water-cycle> (accessed November 29, 2021).
- [17] H. Alrobaei, Novel integrated gas turbine solar cogeneration power plant, *Desalination*. 220 (2008) 574–587. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.058>.
- [18] COP26 The Glasgow climate pact, 2021. <https://ukcop26.org/wp-content/uploads/2021/11/COP26-Presidency-Outcomes-The-Climate-Pact.pdf>.
- [19] K. Elsaid, M. Kamil, E.T. Sayed, M.A. Abdelkareem, T. Wilberforce, A. Olabi, Environmental impact of desalination technologies: A review, *Sci. Total Environ.* 748 (2020) 141528. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141528>.
- [20] H.T. El-Dessouky, H.M. Ettouney, Fundamentals of salt water desalination, 2002. <https://doi.org/https://doi:10.1016/B978-044450810-2/50008-7>.
- [21] C. Mata-Torres, A. Zurita, J.M. Cardemil, R.A. Escobar, Exergy cost and thermoeconomic analysis of a Rankine Cycle + Multi-Effect Distillation plant considering time-varying conditions, *Energy Convers. Manag.* 192 (2019) 114–132. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.04.023>.
- [22] S. Manju, N. Sagar, Renewable energy integrated desalination: A sustainable solution to overcome future fresh-water scarcity in India, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 73 (2017) 594–609. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.164>.
- [23] M. Alhaj, A. Mabrouk, S.G. Al-Ghamdi, Energy efficient multi-effect distillation powered by a solar linear Fresnel collector, *Energy Convers. Manag.* 171 (2018) 576–586. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.082>.
- [24] C. Mata-Torres, A. Zurita, P. Palenzuela, D.C. Alarcón-Padilla, R.A. Escobar, Assessment of a concentrating solar power plant coupled to a multi-effect distillation with an air-cooled condenser, *AIP Conf. Proc.* 2303 (2020). <https://doi.org/10.1063/5.0028484>.
- [25] A. Omar, D. Saldivia, Q. Li, R. Barraza, R.A. Taylor, Techno-economic optimization of coupling a cascaded MED system to a CSP-sCO<sub>2</sub> power plant, *Energy Convers. Manag.* 247 (2021) 114725. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114725>.
- [26] ENEA, MATS Project, (n.d.). <http://www.mats.enea.it/CSP.asp> (accessed August 28, 2019).
- [27] D. De Martinis, A. Giaconia, Production and management of Energy; the interdisciplinary approach of ENEA to Concentrated Solar Power, *Renew. Energy Sustain. Dev.* 3 (2017) 277. <https://doi.org/10.21622/resd.2017.03.3.277>.
- [28] G. Iaquaniello, A. Salladini, A. Mari, A.A. Mabrouk, H.E.S. Fath, Concentrating solar power (CSP) system integrated with MED-RO hybrid desalination, *Desalination*. 336 (2014) 121–128. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.12.030>.
- [29] J.D. Gil, L. Roca, A. Ruiz-Aguirre, G. Zaragoza, M. Berenguel, Optimal operation of a Solar Membrane Distillation pilot plant via Nonlinear Model Predictive Control, *Comput. Chem. Eng.* 109 (2018) 151–165. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.11.012>.
- [30] J.D. Gil, P.R.C. Mendes, E. Camponogara, L. Roca, J.D. Alvarez, A General Optimal Operating Strategy for Commercial Membrane Distillation Facilities, *Renew. Energy*. 156 (2020) 220–234. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.074>.
- [31] J.D. Gil, J.D. Álvarez, L. Roca, J.A. Sánchez-molina, M. Berenguel, F. Rodríguez, Optimal thermal energy management of a distributed energy system comprising a solar membrane distillation plant and a greenhouse, *Energy Convers. Manag.* 198 (2019) 111791. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111791>.
- [32] 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, *Desalin. Water Treat.* 69 (2017) 229–235. <https://doi.org/10.5004/dwt.2017.0703>.
- [33] J.A. Carballo, J. Bonilla, L. Roca, A. de la Calle, P. Palenzuela, D.C. Alarcón-Padilla, M. Berenguel, Optimal operation of solar thermal desalination systems coupled to double-effect absorption heat pumps, *Energy Convers. Manag.* 210 (2020) 112705–1–11. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112705>.
- [34] J.A. Carballo, J. Bonilla, L. Roca, A. De, P. Palenzuela, D.C. Alarcón-padilla, Optimal operating conditions analysis for a multi-effect distillation plant according to energetic and exergetic criteria., *Desalination*. 435 (2018) 70–76. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.12.013>.
- [35] J. Bonilla, J. Blanco, E. Zarza, D.C. Alarcón-Padilla, Feasibility and practical limits of full decarbonization of the electricity market with renewable energy: Application to the Spanish power sector, *Energy*. (2021) 122437. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122437>.
- [36] P. Palenzuela, A.S. Hassan, G. Zaragoza, D. Alarcón-padilla, Steady state model for multi-effect distillation case study: Plataforma Solar de Almería MED pilot plant, *Desalination*. 337 (2014) 31–42.

- <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.12.029>.
- [37] A. de la Calle, J. Bonilla, L. Roca, P. Palenzuela, Dynamic modeling and performance of the first cell of a multi-effect distillation plant, *Appl. Therm. Eng.* 70 (2014) 410–420.
  - [38] A. De, J. Bonilla, L. Roca, P. Palenzuela, Dynamic modeling and simulation of a solar-assisted multi-effect distillation plant, *Desalination*. 357 (2015) 65–76. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.11.008>.
  - [39] B. Ortega-Delgado, P. Palenzuela, J. Bonilla, M. Berenguel, L. Roca, D. Alarcón-Padilla, Dynamic Modelling of a Multi-Effect Vertical Falling-Film Evaporator for Water Reuse in CSP Plants, *Desalin.* (Under Rev. (2022)).
  - [40] G. Ampuño, L. Roca, M. Berenguel, J.D. Gil, M. Pérez, J.E. Normey-rico, Modeling and simulation of a solar field based on flat-plate collectors, *Sol. Energy*. 170 (2018) 369–378. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.076>.
  - [41] G. Ampuño, L. Roca, J.D. Gil, M. Berenguel, J.E. Normey-Rico, Apparent delay analysis for a flat-plate solar field model designed for control purposes, *Sol. Energy*. 177 (2019) 241–254. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.11.014>.
  - [42] P. Palenzuela, G. Zaragoza, D. Alarcón, J. Blanco, Simulation and evaluation of the coupling of desalination units to parabolic-trough solar power plants in the Mediterranean region, *Desalination*. 281 (2011) 379–387. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.08.014>.
  - [43] J. Blanco, P. Palenzuela, D. Alarcón-Padilla, G. Zaragoza, M. Ibarra, Preliminary thermoeconomic analysis of combined parabolic trough solar power and desalination plant in Port Safaga (Egypt), *Desalin. Water Treat.* 51 (2013) 1887–1899. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.703388>.
  - [44] 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, *Appl. Therm. Eng.* 50 (2013) 1514–1521. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.11.005>.
  - [45] P. Palenzuela, G. Zaragoza, D.C. Alarcón-Padilla, Characterisation of the coupling of multi-effect distillation plants to concentrating solar power plants, *Energy*. 82 (2015) 986–995. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.109>.
  - [46] P. Palenzuela, D.C. Alarcón-Padilla, G. Zaragoza, Large-scale solar desalination by combination with CSP: Techno-economic analysis of different options for the Mediterranean Sea and the Arabian Gulf, *Desalination*. 366 (2015) 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.12.037>.
  - [47] B. Ortega-Delgado, P. Palenzuela, D.C. Alarcón-Padilla, Parametric study of a multi-effect distillation plant with thermal vapor compression for its integration into a Rankine cycle power block, *Desalination*. 394 (2016) 18–29. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.04.020>.
  - [48] B. Ortega-Delgado, M. Cornali, P. Palenzuela, D.C. Alarcón-Padilla, Operational analysis of the coupling between a multi-effect distillation unit with thermal vapor compression and a Rankine cycle power block using variable nozzle thermocompressors, *Appl. Energy*. 204 (2017) 690–701. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.07.062>.
  - [49] P. Palenzuela, B. Ortega-Delgado, D.C. Alarcón-Padilla, Comparative assessment of the annual electricity and water production by concentrating solar power and desalination plants: A case study, *Appl. Therm. Eng.* 177 (2020) 115485. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115485>.
  - [50] P. Palenzuela, G. Zaragoza, D.C. Alarcón-Padilla, E. Guillén, M. Ibarra, J. Blanco, Assessment of different configurations for combined parabolic-trough (PT) solar power and desalination plants in arid regions, *Energy*. 36 (2011) 4950–4958. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.05.039>.
  - [51] 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. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.09.004>.
  - [52] D.C. Alarcón-Padilla, L. García-Rodríguez, J. Blanco-Gálvez, Assessment of an absorption heat pump coupled to a multi-effect distillation unit within AQUASOL project, *Desalination*. 212 (2007) 303–310.
  - [53] D.C. Alarcón-Padilla, L. García-Rodríguez, J. Blanco-Gálvez, Experimental assessment of connection of an absorption heat pump to a multi-effect distillation unit, *Desalination*. 250 (2010) 500–505.
  - [54] P. Palenzuela, D.C. Alarcón-Padilla, G. Zaragoza, J. Blanco-Gálvez, M. Ibarra, Parametric equations for the variables of a steady-state model of a multi-effect desalination plant, *Desalin Water Treat.* 51 (2013) 1229–1241.
  - [55] A. Chorak, P. Palenzuela, D.C. Alarcón-Padilla, A. Ben Abdellah, Experimental characterization of a multi-effect distillation system coupled to a flat plate solar collector field: Empirical correlations, *Appl. Therm. Eng.* 120 (2017) 298–313. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.03.115>.
  - [56] A. Chorak, P. Palenzuela, D.C. Alarcón-Padilla, A. Ben Abdellah, Energetic evaluation of a double-effect LiBr-H<sub>2</sub>O absorption heat pump coupled to a multi-effect distillation plant at nominal and off-design conditions, *Appl. Therm. Eng.* 142 (2018) 543–554. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.07.014>.
  - [57] J.D. Gil, A. Ruiz-Aguirre, L. Roca, G. Zaragoza, M. Berenguel, Prediction models to analyse the performance of a commercial-scale membrane distillation unit for desalting brines from RO plants, *Desalination*. 445 (2018) 15–28. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.07.022>.
  - [58] J.D. Gil, A. Ruiz-aguirre, L. Roca, G. Zaragoza, M. Berenguel, J.L. Guzmán, Control de plantas de destilación por membranas con apoyo de energía solar - Parte 1: Esquemas, in: *Actas Las XXXVI Jornadas Automática*, Bilbao, 2015: pp. 937–943.
  - [59] A. Tosi, L. Roca, J.D. Gil, A. Visioli, M. Berenguel, Multivariable controller for stationary flat plate solar collectors, in: *Proc. 7th Int. Conf. Syst. Control*, Valencia (Spain), 2018: pp. 7–12.
  - [60] D.C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, John Wiley & Sons, 2001.