



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

Desarrollo de un modelo teórico para una planta de trigeneración híbrida. Validación con datos experimentales.

Development of a theoretical model for a hybrid trigeneration plant. Validation by means of experimental data.

Autor

Andrés Muzás Rodríguez

Director

Francisco Javier Uche Marcuello

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2019

Agradecimientos:

Como no puede ser de otra manera, me gustaría comenzar dando las gracias a mi tutor y director en este trabajo, Javier Uche. Desde un primer momento se mostró amable y dispuesto a buscar un tema apto para mi Trabajo Fin de Máster y sin su ayuda no habría resultado tan sencillo sacarlo adelante. Sé que acostumbra a dedicar tiempo y esfuerzo a sus alumnos, y en mi caso no ha sido una excepción.

Creo que es también el momento para poner en valor el trabajo que realizan todos los docentes del Máster de EERR. Gracias a ellos he aprendido una infinidad de cosas nuevas, muchas de ellas no sólo útiles para el mundo académico o profesional. Agradecer especialmente el interés de Amaya Martínez, quien no dudó en echarme un mano al comienzo del trabajo.

Por último, mencionar la inigualable aportación de mi novia, Sara. Siempre encuentro en ella una persona con la que consultar cualquier tema que me ronde la cabeza. Sus ánimos consiguen apaciguar toda clase de problemas y, sin duda, me ayudan a alcanzar mis objetivos.

DESARROLLO DE UN MODELO TEÓRICO PARA UNA PLANTA DE TRIGENERACIÓN HÍBRIDA. VALIDACIÓN CON DATOS EXPERIMENTALES.

RESUMEN

Las problemáticas de índole energética son algunas de las cuestiones más tratadas en los últimos años. Se está tratando de hacer frente al agotamiento de los recursos fósiles y a la degradación del medioambiente a través del desarrollo de nuevas propuestas de aprovechamiento energético. Además, se busca conseguir que el suministro llegue a todas las regiones del mundo. Dentro de este contexto, se está llevando a cabo un proyecto en el Campus Río Ebro de la Universidad de Zaragoza en el que se estudia el funcionamiento de una planta piloto de trigeneración híbrida.

La instalación de pruebas está diseñada para satisfacer los consumos energéticos de una vivienda unifamiliar aislada. Se genera agua caliente sanitaria, corriente eléctrica y agua potable mediante el aprovechamiento del viento y de la radiación solar en una pequeña turbina eólica y una serie de paneles solares.

Este Trabajo Fin de Máster se engloba dentro del proyecto de la planta piloto y toma como información de partida los resultados de las tareas de investigación anteriores. El objetivo principal es la construcción de un modelo teórico que sea capaz de reproducir el comportamiento de la instalación de pruebas. Para ello, se ha seguido una metodología de trabajo que comienza con el estudio de la documentación relacionada con el proyecto y con el análisis del esquema de operación de la planta. El siguiente paso ha sido el diseño del modelo, llevado a cabo en el programa informático TRNSYS. Este software ha permitido no sólo construir el esquema sino también ajustarlo y realizar su simulación. Por último, se han comparado los resultados experimentales con los teóricos con el fin de poder estudiar la validez de la propuesta y analizar el efecto de las diferentes modificaciones que se han ido añadiendo sobre el modelo inicial. La mayor parte de los esfuerzos dedicados al trabajo han sido destinados al proceso de ajuste y repetición de las simulaciones para poder encontrar un modelo final adecuado.

La validación del modelo ha consistido en comprobar su funcionamiento ante distintas condiciones ambientales y consignas de trabajo. Por lo tanto, se han tomado los datos de las pruebas experimentales realizadas durante varios días de diferentes épocas del año. Debido a la complejidad del sistema y a la existencia de una gran cantidad de subsistemas y equipos, las tareas de investigación se han centrado en validar, principalmente, los resultados de los tres productos de la planta. Finalmente, hay que añadir que el estudio comparativo se ha llevado a cabo tanto gráfica como numéricamente, realizando el cálculo de algunos parámetros estadísticos como el error medio o la desviación típica de cada variable analizada. En los anexos de la memoria se describen de manera más completa algunos aspectos como el detalle del diseño del modelo en el programa informático, las tareas de ajuste de ciertos parámetros o las soluciones propuestas para solventar los problemas que han surgido durante el trabajo.



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

TRABAJOS DE FIN DE GRADO / FIN DE MÁSTER

D./D^a. ANDRÉS MUZÁS RODRÍGUEZ,

con nº de DNI 77218039-R en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
MÁSTER, (Título del Trabajo)

DESARROLLO DE UN MODELO TEÓRICO PARA UNA PLANTA DE
TRIGENERACIÓN HÍBRIDA. VALIDACIÓN CON DATOS EXPERIMENTALES.

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 28 de enero de 2019

Fdo: ANDRÉS MUZÁS RODRÍGUEZ

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	4
1.2. Descripción de la memoria	5
2. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN	6
2.1. Sistema de captación solar	7
2.2. Sistema de agua caliente sanitaria	7
2.3. Desalinización por ósmosis inversa	8
2.4. Desalinización por destilación con membranas	9
2.5. Sistema eléctrico.....	10
3. MATERIAL Y MÉTODOS.....	12
3.1. Estudio previo e información de partida	12
3.2. Diseño del modelo teórico.....	13
3.2.1. Trabajo con TRNSYS	13
3.2.2. Esquema del modelo.....	15
3.3. Simulación y obtención de resultados.....	16
3.3.1. Preparación	16
3.3.2. Presentación de resultados.....	17
3.4. Comparación de resultados	18
3.5. Ajuste y validación	19
3.6. Resumen de la metodología	21
4. RESULTADOS.....	22
4.1. 8 de septiembre de 2017	23
4.2. 7 de marzo de 2018	27
4.3. 10 de agosto de 2017	30
4.4. 2 de octubre de 2017.....	33
4.5. 6 de marzo de 2018	35
5. DISCUSIÓN Y VALIDACIÓN	37
6. CONCLUSIONES	40

BIBLIOGRAFÍA	41
ANEXO A: MODELO EN TRNSYS.....	44
A.1. Esquema completo	44
A.2. Lista de <i>types</i>	48
ANEXO B: AJUSTES MODELO	51
ANEXO C: RESULTADOS COMPLETOS.....	56
ANEXO D: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	77
ANEXO E: RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS.....	81

NOMENCLATURA

ACS	Agua caliente sanitaria
Cp	Calor específico
ETC	Colector de tubos de vacío
MD	Destilación por membranas
OI	Ósmosis inversa
PGMD	Destilación por membranas de capa líquida
PV	Panel fotovoltaico
PVT	Panel fotovoltaico-térmico
TFM	Trabajo Fin de Máster
UA	Coefficiente de intercambio de calor

1. INTRODUCCIÓN

Tanto la producción como el suministro de energía se han convertido en una problemática global y, sin duda, en un tema muy recurrente en el ámbito político, social y económico. El agotamiento de los recursos fósiles, la degradación del medio ambiente, el desarrollo de las tecnologías renovables o la reducción de la pobreza energética son algunas de las cuestiones que se plantean habitualmente. Por lo tanto, resulta de vital importancia la investigación en soluciones innovadoras y sostenibles que consigan asegurar el acceso de toda la población a recursos básicos como la energía eléctrica o el agua potable [1].

El aprovechamiento de las energías renovables está demostrando ser una alternativa perfectamente viable a las tecnologías fósiles en las regiones más desarrolladas. Como se puede observar en la figura 1, el crecimiento de la energía solar fotovoltaica en los últimos años es enorme. De acuerdo con las estimaciones de la asociación de la industria solar fotovoltaica europea (*SolarPower Europe*), el parque global ha crecido en el año 2018 en torno a 100 GW de potencia total instalada [2]. Este hecho ha estado favorecido no sólo por la necesaria apuesta por las energías sostenibles y la conservación del medio ambiente, sino también por el más que notable abaratamiento y progreso de la tecnología solar [3]. La producción energética mediante otros recursos renovables tales como el viento, las corrientes de agua o la temperatura del interior de la Tierra sigue una evolución similar.

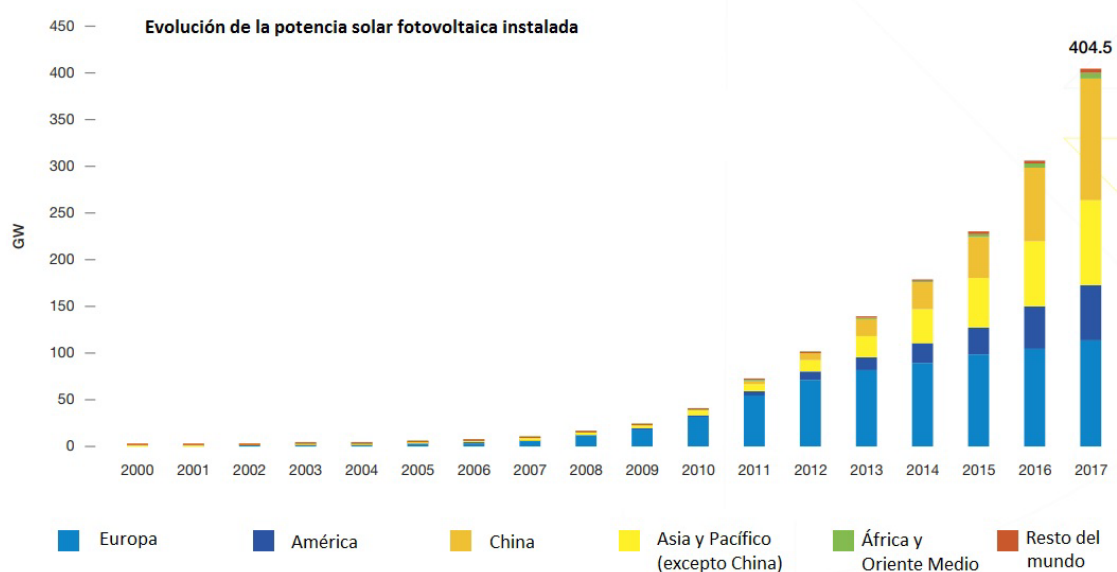


Figura 1. Evolución del parque solar fotovoltaico en el mundo, en GW [2].

Si bien estas nuevas tecnologías se contemplan en muchas zonas como un recambio para las fundamentadas en recursos fósiles, en las regiones más pobres o en lugares aislados resultan ser prácticamente la única opción. En una ubicación en la que no exista una red eléctrica adecuada o no se disponga de una conexión cercana, o en la que no se pueda acceder al suministro de agua potable, los sistemas basados en energías renovables pueden llegar a solventar las carencias existentes.

Son muchos los proyectos que proponen utilizar la energía proveniente del Sol para satisfacer diferentes demandas térmicas y eléctricas, e incluso otro tipo de consumos como, por ejemplo, las necesidades de agua dulce [4] [5]. De la misma manera que existen demandas

simultáneas de distinta naturaleza, también se pueden encontrar sistemas que aprovechan varios recursos renovables al mismo tiempo. Estas tecnologías son las que se conocen como *hibridación*. Las instalaciones híbridas más comunes son las que mezclan la energía solar con la energía del viento o eólica, aunque también se han desarrollado proyectos que utilizan como fuente de energía otra clase de recursos sostenibles (geotermia, hidrógeno, etc.) [6] [7].

En consecuencia, la situación es la siguiente: hay muchos lugares en el mundo en los que escasea la disponibilidad de aspectos básicos para la calidad de vida (agua, calor, electricidad), recursos renovables abundantes en cualquier ubicación, y una potencial conversión de estas fuentes de energía para lograr satisfacer las necesidades de las personas.

Dentro de este contexto, en el *Campus Río Ebro* de la *Universidad de Zaragoza* (UNIZAR) se está llevando a cabo un gran proyecto que trata de estudiar las posibilidades de un sistema de trigeneración híbrida, basándose en el aprovechamiento de las energías renovables. El desarrollo de este ha conllevado la construcción y puesta en marcha de una planta piloto utilizada para la realización de todo tipo de pruebas. La instalación simula el abastecimiento de los recursos básicos para una vivienda de tamaño unifamiliar. Como indica su propia denominación, el sistema estudiado es capaz de proporcionar tres productos: electricidad, agua caliente sanitaria (ACS) y agua potable. Además, existe una combinación de tecnología para el aprovechamiento solar y eólico. Por consiguiente, se trata de una instalación de generación híbrida.

Cómo se muestra en el gráfico de la Figura 2, el sistema obtiene energía en forma eléctrica y térmica (en otras palabras, electricidad y calor). La corriente eléctrica se produce tanto a través de unos paneles fotovoltaicos como mediante una turbina eólica. Por su parte, la energía térmica procede en su totalidad de los colectores solares. Debido a que la planta cuenta con paneles solares híbridos, la producción de electricidad y de calor se puede llevar a cabo en un mismo equipo. Los consumos eléctricos de la vivienda se abastecen directamente de este sistema, mientras que la energía térmica sirve para satisfacer la demanda de ACS. En cuanto a la potabilización de agua, la instalación contiene dos tecnologías capaces de desalinizar agua salada. La primera de ellas, la *ósmosis inversa* (OI), opera básicamente mediante un suministro eléctrico. En cambio, el equipo de *destilación por membranas* (MD) se compone de una serie de intercambiadores de calor (energía térmica) [8].

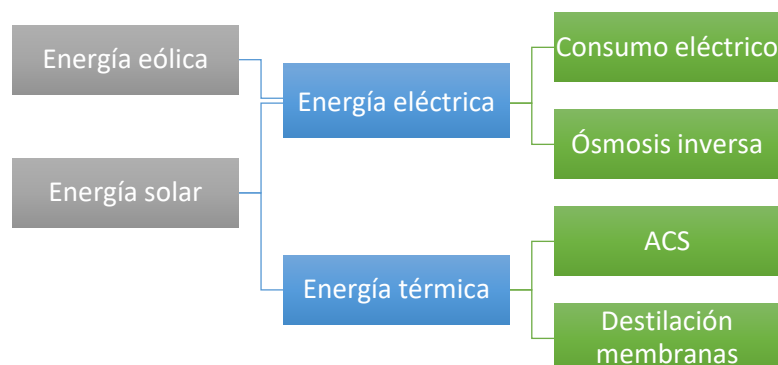


Figura 2. Esquemización de la operación de la planta de trigeneración híbrida.

A pesar de la existencia de una pequeña turbina eólica en la planta de trigeneración, la mayor parte de la energía eléctrica es producida a través de los paneles fotovoltaico-térmicos, comúnmente conocidos como paneles híbridos (PVT). Por lo tanto, estos paneles PVT

combinan las características de los paneles fotovoltaicos y de los colectores solares térmicos. Es decir, contienen materiales capaces de producir electricidad gracias al efecto fotovoltaico (PV) y además aprovechan la radiación solar para calentar el fluido que circula a través de ellos [9]. La principal ventaja que presentan los paneles híbridos es el mayor porcentaje de conversión de la energía solar en energía útil, ya sea en forma de electricidad o de calor. A grandes rasgos, se puede afirmar que la eficiencia global se corresponde con la suma de la eficiencia de conversión típica de un panel PV y de la conversión térmica de un colector solar. Por consiguiente, poder obtener unos resultados similares, pero en un mismo equipo, acarrea notables beneficios. Merece la pena comentar la relación existente entre la producción térmica y eléctrica de los paneles PVT. A mayor generación eléctrica, menor radiación solar alcanza la placa absorbidora del colector y, lógicamente, se obtiene una menor producción térmica. Inversamente si sucede lo contrario [10] [11].

Además de los paneles híbridos mencionados, la instalación de trigeneración cuenta con un colector solar de tubos de vacío. La tecnología de diseño de estos colectores permite que estos presenten unas características avanzadas con respecto a los clásicos colectores planos. La principal virtud de los tubos de vacío es la reducción de las pérdidas térmicas relacionadas con los procesos de transferencia de calor. En el interior de los tubos se aplica el vacío para eliminar las pérdidas hacia el exterior debidas a mecanismos de convección. Estos colectores pueden mantener un rendimiento considerablemente alto incluso cuando el Sol se encuentra en una posición baja o el cielo está parcialmente nublado, ya que aprovechan mejor la componente difusa de la radiación [12] [13].

El proyecto de la Universidad de Zaragoza incluye la desalinización de agua debido a que es muy posible que se encuentren zonas aisladas a las que no llega ninguna canalización de agua corriente. Si no se tiene acceso a agua potable, pero si a agua salada (por ejemplo, agua de mar), existen diversas técnicas que cumplen con el objetivo de eliminar, casi por completo, la sal presente en el fluido. En la planta piloto de trigeneración se encuentran instalados dos sistemas de desalinización de agua [8]. El primero de ellos es la ósmosis inversa. La OI es una tecnología basada en el movimiento de partículas a través de una membrana porosa. A ambos lados de esta membrana, situada en el interior de un recipiente, se reparte la disolución. Cuando la concentración del soluto a cada lado de la membrana alcanza un equilibrio, se dice que el sistema se encuentra a la presión osmótica. Si se obliga, mediante una fuerza externa, a que se supere el valor de la presión osmótica, se consigue el efecto deseado: las moléculas del soluto (en este caso, la sal) se sitúan casi por completo a uno de los lados de la membrana, mientras que en el otro se tiene un fluido prácticamente puro (agua dulce). El equipo de OI precisa de un consumo eléctrico para llevar a cabo el aumento de presión [14].

La segunda tecnología de potabilización de agua es la destilación por membranas. El sistema de la MD es algo más complejo ya que consta de un conjunto de intercambiadores de calor, conductos y bombas de impulsión. No obstante, el elemento principal es un equipo en el que se producen fenómenos de transferencia de calor y de materia (a través de la membrana). Este intercambiador está dividido en dos zonas principales: el condensador y el evaporador. El agua salada se introduce en primer lugar por el condensador, después se calienta en un intercambiador externo mediante una corriente caliente de agua (demanda térmica) y por último circula a través del evaporador, en donde parte del caudal de agua salada se evapora y posteriormente se recoge para obtener el agua dulce [15].

La instalación de pruebas la completan el resto de los elementos necesarios para la correcta operación del sistema. En el sistema eléctrico, se encuentran el inversor y la batería de almacenamiento. En el sistema de captación solar, las tuberías, las bombas o el aerotermo. Y en el sistema de agua caliente destacan las válvulas de reparto y control, y el tanque de acumulación para el ACS.

La investigación relacionada con la planta de trigeneración híbrida es muy extensa y está compuesta por numerosos trabajos y proyectos enfocados en tan distintos aspectos. El esfuerzo llevado a cabo abarca desde la concepción y construcción de la planta de pruebas, hasta simulaciones informáticas y mejoras y optimizaciones de la operación. Los resultados del tiempo y los recursos dedicados a esta investigación han dado pie a la publicación de varios artículos científicos, de entre los cuales destacan los centrados en los siguientes temas:

- Creación y simulación informática de un esquema de la planta de trigeneración [8]
- Análisis de datos experimentales de la planta [16]
- Mejora de la predicción de agua desalada en el equipo de destilación con membranas a través de la creación de una red neuronal [17]
- Análisis exergético de la planta [18]

Además de profesores e investigadores de UNIZAR, también han participado activamente en el proyecto alumnos de la escuela. De esta manera, se han desarrollado trabajos finales de estudios en los que se trataban distintos aspectos de la operación de la planta de pruebas [19-22].

En consecuencia, el presente Trabajo Fin de Máster se convierte en una pieza más dentro de este gran proyecto. El trabajo aquí expuesto se centra en la validación de los datos experimentales obtenidos a través de las pruebas realizadas con la planta piloto. Para ello, se ha tenido que diseñar y optimizar un modelo informático del esquema de la instalación, en el software *Trnsys*. Tomando como datos de entrada al sistema los mismos que se habían medido al realizar las pruebas experimentales, la labor de investigación busca comparar los resultados de la simulación informática y de los test reales con el objetivo de encontrar un modelo virtual que represente de la manera más exacta posible a la planta de trigeneración. Por lo tanto, la tarea principal ha sido la de modificar y ajustar el esquema en *Trnsys* hasta obtener unos resultados adecuados.

Al formar parte de un proyecto de investigación al que ya se le habían dedicado muchos recursos, este TFM cuenta con una gran información de partida. Todos los datos, tanto de entrada como de salida, de las pruebas experimentales, se han utilizado a la hora de estudiar y comparar el funcionamiento del modelo informático. La red neuronal anteriormente desarrollada se ha incluido también en el esquema de *Trnsys*. Prácticamente la totalidad de las características y parámetros de operación de los equipos implicados eran previamente conocidos. Además, también se ha contado con versiones anteriores de modelos de la planta, los cuales han ayudado al desarrollo actual.

1.1. Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Máster, cómo su título indica, es la validación de los datos experimentales obtenidos a través del periodo de pruebas previo con la

operación de la planta. Por lo tanto, el trabajo realizado se puede dividir en otro dos grandes pasos u objetivos. En primer lugar, la construcción de un modelo teórico de la planta doméstica de trigeneración híbrida. Y, en segundo lugar, el ajuste de este modelo informático mediante la comparación de los resultados experimentales y de la simulación, con el fin de “aceptar” la información obtenida a través de los instrumentos de medida de la planta de pruebas.

El proceso de trabajo consta, principalmente, de los siguientes puntos: estudio y análisis previo del funcionamiento de la planta piloto, diseño y desarrollo del modelo en el programa informático Trnsys, simulación del sistema y obtención de resultados, comparación de los datos experimentales con los obtenidos mediante la simulación y, finalmente, el ajuste y la validación del modelo. Además, se ha llevado a cabo un pequeño análisis de sensibilidad con respecto a algunas variables clave en la construcción del modelo teórico.

1.2. Descripción de la memoria

La presente memoria comprende los siguientes capítulos:

En este primer capítulo se realiza una introducción al desarrollo del trabajo, justificando el porqué de su realización. Además, se establecen los objetivos y el alcance del mismo.

En el segundo capítulo se lleva a cabo una descripción de la planta de trigeneración híbrida, explicando con detalle alguna de sus partes e incluyendo un esquema general.

En el tercer capítulo se presenta la metodología de trabajo, exponiendo y analizando el trabajo realizado en Trnsys junto con el procedimiento seguido en las labores de investigación. También se incluye el esquema de la planta construido en el software.

En el cuarto capítulo se lleva a cabo la presentación y el comentario de los resultados obtenidos más significativos. Se aportan una gran cantidad de gráficos y datos numéricos, y se analiza el proceso de validación.

En el quinto capítulo se exponen las conclusiones y la valoración general del Trabajo Fin de Máster.

Por último, aparece la bibliografía consultada durante la realización del trabajo.

2. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN

La planta piloto del proyecto se encuentra ubicada en las instalaciones del Campus Río Ebro de la Universidad de Zaragoza. La planta está diseñada para simular el abastecimiento de electricidad, ACS y agua potable a una vivienda aislada de tamaño unifamiliar. La energía necesaria se obtiene mediante la hibridación de los sistemas de aprovechamiento solar y eólico. Los equipos incluidos en la instalación se encargan de transformar estos recursos naturales en energía eléctrica y energía térmica, que posteriormente se necesitan para satisfacer los consumos de la vivienda.

La planta de trigeneración híbrida se puede considerar que está formada por los siguientes cinco subsistemas:

- Sistema de captación solar
- Sistema de agua caliente sanitaria (ACS)
- Módulo de desalinización por ósmosis inversa (OI)
- Módulo de desalinización por destilación con membranas (MD)
- Sistema eléctrico

En la Figura 3 se presenta el esquema general de la instalación. Todos los subsistemas están representados en él:

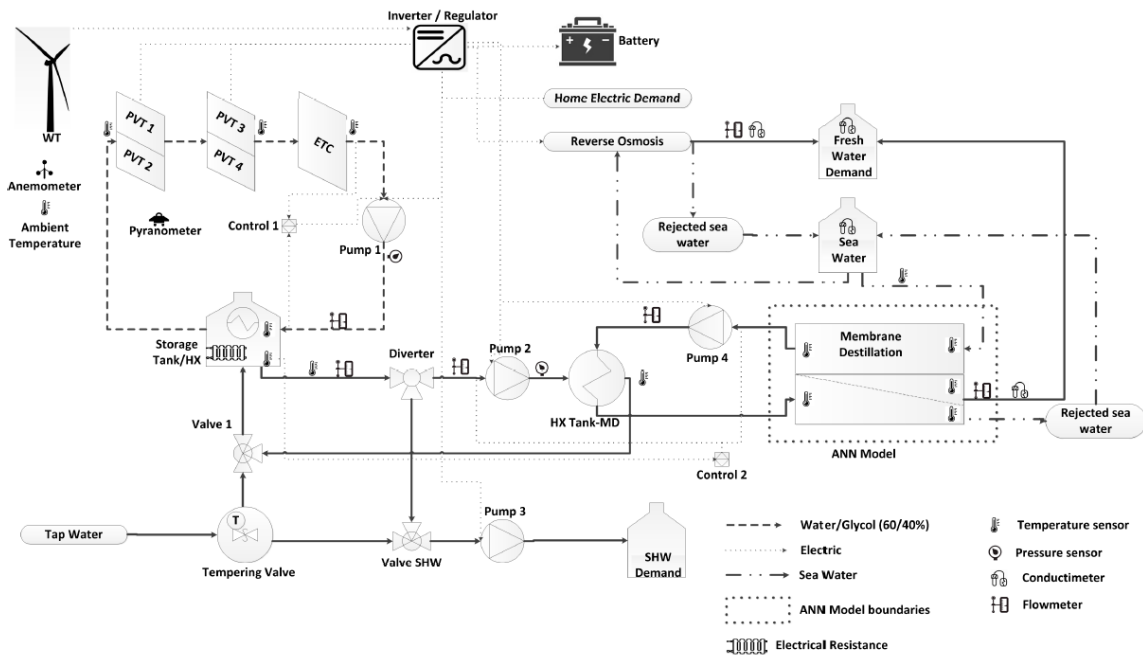


Figura 3. Descripción de la planta de trigeneración híbrida [17].

Se puede observar cómo, además de aparecer los principales equipos de la instalación, las relaciones entre estos se representan con diferentes trazos en función de las características de la conexión. De esta manera, se tienen conductos del fluido caloportador en la zona de captación solar, conductos por los que circula agua dulce y agua salada, y el cableado que conecta los elementos presentes en el sistema eléctrico. A continuación, se explican con mayor detalle cada uno de los subsistemas de la planta de trigeneración híbrida.

2.1. Sistema de captación solar

El sistema de aprovechamiento de la energía solar presenta como equipos principales a los paneles híbridos fotovoltaico-térmicos (PVT) y al colector de tubos de vacío. En total, se cuenta con cuatro paneles híbridos conectados dos a dos. Es decir, se conecta un par de paneles en paralelo, y una pareja con otra en serie. Cada panel PVT tiene un área efectiva de captación de 1.63 m². Están ubicados orientados hacia el sur, con una inclinación de 40°. Además de los tubos internos por los que circula el fluido caloportador, el panel contiene las conexiones eléctricas necesarias para la corriente producida en la parte fotovoltaica. La potencia pico de estos paneles es de 240 W. Tras atravesar los paneles PVT, el fluido caloportador (compuesto por una mezcla de 60% de agua y 40% de glicol) se dirige hacia el colector de tubos de vacío (ETC). La superficie de captación alcanza los 3 m². La disposición de este colector es similar a la de los paneles híbridos. Se pueden observar en la Figura 4.



Figura 4. Disposición de los paneles solares de la planta piloto [16].

Por otro lado, el sistema de captación incluye todos los elementos necesarios para su correcto funcionamiento. Es decir, los conductos por los que circula la mezcla de agua y glicol, las válvulas de regulación y control, la bomba de impulsión del fluido, el disipador de seguridad (aerotermino) y el resto de la instrumentación. Una vez el fluido se ha calentado tras pasar a través de los colectores solares, se dirige al tanque de almacenamiento para, mediante un intercambio de calor, aumentar la temperatura del agua caliente sanitaria.

La regulación de este sistema se lleva a cabo a través del control de la temperatura del fluido en el punto de salida del colector de tubos de vacío. La bomba de impulsión se activa cuando esta temperatura supera en torno a 7°C a la del agua caliente del tanque. También existe otro sistema de control para la operación el aerotermino.

2.2. Sistema de agua caliente sanitaria

La red de ACS de la planta de trigeneración es la encargada de abastecer al sistema el agua fría de la red y de calentarla hasta la temperatura óptima para su consumo como agua caliente. El equipo en donde se consigue elevar la temperatura del agua de red es el tanque de almacenamiento. El tanque instalado presenta un volumen total de 325 litros y permite extraer agua de su parte superior a una temperatura de unos 70-80°C. Debido a que la temperatura de servicio para ACS se encuentra en torno a los 45°C, el sistema incluye una válvula de atemperamiento en la que se regula la temperatura mediante la mezcla de agua

caliente con agua fría de la red. El sistema de control se encarga de llevar a cabo el vaciado del tanque si el agua acumulada en este supera un nivel de temperatura muy elevado.

A pesar de la existencia de un consumo de ACS para la vivienda, la mayor parte del agua caliente que sale del tanque de almacenamiento se deriva al sistema de intercambiadores de la zona de desalinización por destilación con membranas. A la hora de definir el consumo de ACS, se ha tenido en cuenta el perfil de demanda típico de una vivienda unifamiliar a lo largo del año. La planta piloto presenta el resto de los elementos necesarios para el control de la instalación, como válvulas, sensores de presión y temperatura, etc.

2.3. Desalinización por ósmosis inversa

Este primer método de potabilización de agua salada basa su funcionamiento en el traspaso de moléculas de un lado a otro de una membrana divisora. Como se ha comentado anteriormente, para superar el valor crítico de la presión osmótica el equipo precisa de un suministro de energía eléctrica. Por lo tanto, el sistema de ósmosis inversa se conecta directamente con el sistema eléctrico de la planta de trigeneración.

En la Tabla 1 se muestran las características principales del equipo de OI instalado en la planta. Se estima que consume 110 W de potencia y que es capaz de producir hasta 35 L/h de agua dulce. En la Figura 5 se puede observar un despiece de un equipo de ósmosis inversa de tipo membrana en espiral.

<i>Descripción</i>	<i>Valor</i>
<i>Temperatura de operación</i>	25 °C
<i>Producción de agua dulce</i>	35 l/h
<i>Salinidad agua dulce</i>	300 ppm
<i>Eliminación salinidad</i>	99,14 %
<i>Consumo eléctrico</i>	110 W

Tabla 1. Características técnicas del equipo de OI [23].

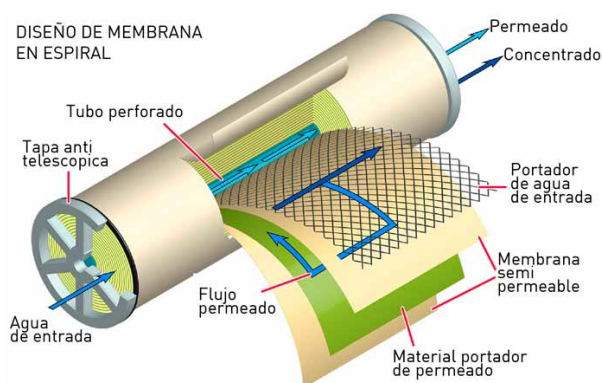


Figura 5. Esquema de un equipo de OI de membrana en espiral [24].

2.4. Desalinización por destilación con membranas

La segunda tecnología de potabilización instalada en la planta piloto es la destilación por membranas (MD). Actualmente, los equipos de membranas disponibles presentan varias opciones que dependen de la configuración interna y del método de transferencia de calor y/o materia. En el caso de planta de trigeneración aquí tratada, la tecnología seleccionada es la destilación con membranas de capa líquida, cuyas siglas en inglés son PGMD (*Permeated Gas Membrane Distillation*). Su principal ventaja con respecto al resto de configuraciones es su alta eficiencia energética, que posibilita un intercambio de calor eficaz [25].

El sistema PGMD está compuesto por dos intercambiadores de calor (ver Figura 6). El primero de ellos es un intercambiador a contracorriente, dentro del cual se lleva a cabo la separación de la sal presente en el agua. Este equipo está dividido en dos zonas: por el lado llamado *condensador* entra el agua salada, a una temperatura baja, que enfría a la corriente caliente que llega desde la otra zona, el *evaporador*. Cuando la corriente de agua salada circula a través del evaporador, parte del caudal consigue pasar a estado gas. Las moléculas gaseosas son capaces de atravesar la membrana que hay en el interior del equipo. La fracción evaporada es posteriormente condensada y recuperada para obtener agua dulce. El otro equipo intercambiador es necesario para precalentar la corriente de agua salada que, tras salir del condensador, tiene que elevar su temperatura antes de entrar al evaporador. En este segundo intercambiador, la corriente caliente es agua que proviene del tanque acumulador del sistema ACS, la cual retorna a una temperatura unos 10 puntos inferior tras pasar por el intercambiador. Como se ha comentado, cuando la desalinización por MD está activa, prácticamente todo el caudal de agua del tanque se deriva hacia este intercambiador, siendo muy pequeña la fracción del agua que se destina al consumo de ACS de la vivienda [26-28].

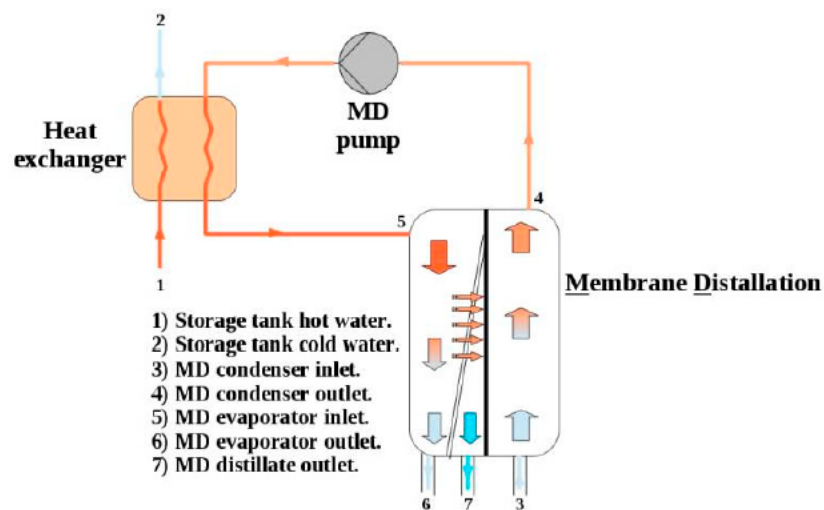


Figura 6. Principio de operación del sistema MD [8].

La producción de agua dulce con el sistema MD depende de varios factores, como las temperaturas a las que entran las diferentes corrientes al intercambiador o el caudal alimentado de agua salada. Experimentalmente, se ha comprobado que la unidad instalada en la planta piloto (10 m² de superficie de intercambio) es capaz de producir entre 5 y 10 l/h de agua dulce. Precisamente, parte de las labores de investigación anteriormente realizadas se han centrado en el diseño de una red neuronal que sea capaz de predecir la operación de la MD a partir de los datos de entrada mencionados (caudales, temperaturas, etc.).

2.5. Sistema eléctrico

Por último, se encuentra el sistema eléctrico de la planta de trigeneración. La parte eléctrica engloba a la generación, la distribución, la adecuación, el almacenamiento y el consumo. Los paneles PVT tienen una potencia pico total de 960 W (4 x 240 Wp), y están conectados en paralelo a la microturbina eólica de 400 W de potencia nominal. La energía eléctrica generada en estos equipos se conecta a un seguidor de máxima potencia (MPPT) y a un conjunto de dos baterías. Estos elementos de almacenamiento se encuentran conectados en serie y presentan una capacidad de 250 Ah y una tensión de funcionamiento de 12 V cada uno. También se haya instalado un inversor/regulador de 1 kW de potencia, encargado de adecuar las características de la corriente eléctrica generada para adaptarla a las necesidades de los consumos y de controlar su circulación hacia cada equipo.

Estos consumos eléctricos se pueden clasificar en tres grupos:

- Perfil de consumo de la vivienda (representado en la planta por una resistencia y un potenciómetro)
- Alimentación del sistema de ósmosis inversa
- Funcionamiento de las bombas de impulsión presentes en la planta

La instalación eléctrica se haya también conectada a la red para solventar posibles problemas como, por ejemplo, un exceso de descarga en las baterías de plomo-ácido.

Para resumir la información expuesta en este capítulo, en la Tabla 2 se exponen los equipos más importantes de cada uno de los cinco subsistemas de la planta piloto de trigeneración híbrida:

<i>Subsistema</i>	Equipo
<i>Sistema de captación solar</i>	Paneles PVT -- 4 x 240 Wp -- 1.63 m ²
	Colector ETC -- 3 m ²
	Bomba impulsión – 50 W
<i>Sistema ACS</i>	Tanque almacenam. – 325 L
	Válvulas atemperación y reparto
<i>Desalinización MD</i>	PGMD equipos intercambio
	Bombas – CC x 50 W – CA x 50 W
<i>Desalinización OI</i>	Equipo membrana – 110 W
<i>Sistema eléctrico</i>	Turbina eólica – 400 Wp
	Baterías – 250 Ah – 12 V
	Inversor – 1 kW

Tabla 2. Resumen de equipos y subsistemas de la planta estudiada.

Finalmente, en las Figuras 7 y 8 se muestran más fotografías de la planta de pruebas. En ellas se puede observar la estructura en la que se alojan todos los equipos del sistema MD, el sistema eléctrico o el equipo de ósmosis inversa:



Figura 7. Detalle del sistema OI (izq.) y la cabina eléctrica, las baterías y el tanque de acumulación (dcha.) [16].



Figura 8. Detalle del sistema MD (izq.) y de los equipos de control (dcha.) [16].

3. MATERIAL Y MÉTODOS

El objetivo principal de este proyecto es la construcción de un modelo teórico de la planta de trigeneración híbrida y, mediante este modelo, realizar su validación con los datos resultantes de las pruebas experimentales. A lo largo de este capítulo se va a exponer la metodología seguida en las labores de investigación, los materiales utilizados para ello y la información de partida con la que se contaba.

De forma resumida y esquematizada, las tareas llevadas a cabo durante la realización del Trabajo Fin de Máster son las siguientes:

1. Estudio y análisis previo del funcionamiento de la planta piloto.
2. Diseño de un modelo teórico informático.
3. Simulación del sistema y obtención de resultados.
4. Comparación de resultados.
5. Ajuste y validación del modelo.

Con el objetivo de alcanzar estos hitos y de desarrollar el trabajo de la mejor manera posible, se han utilizado diversos materiales. En cuanto al software informático, destaca el uso del programa *TRNSYS* para todo lo relativo a la creación del modelo teórico y las simulaciones de su operación. También se ha trabajado intensamente con las hojas de cálculo de *EXCEL*, las cuales se han utilizado para la comparación de resultados, la creación de representaciones gráficas y la obtención de parámetros estadísticos.

3.1. Estudio previo e información de partida

Al estar englobado dentro de un amplio proyecto de la Universidad de Zaragoza, el primer paso a dar en este TFM ha sido el estudio y el análisis tanto de la instalación de trigeneración como de toda la investigación previamente realizada.

Durante las primeras jornadas de trabajo, se ha visitado la planta piloto para conocerla con detalle. Tras estudiar de manera escrupulosa el esquema de funcionamiento de la instalación, se ha recolectado una gran cantidad de información al respecto. Se han revisado los artículos publicados relacionados con este proyecto y se ha buscado información adicional sobre los aspectos más complejos, novedosos o desconocidos. Toda esta gran cantidad de documentación ha servido para la introducción teórica al trabajo.

Por otro lado, para poder comenzar con la construcción del modelo teórico en *Trnsys* y las pruebas de simulación, se ha tenido que recibir una serie de bases de datos. Esta información numérica comprende, en primer lugar, las características y propiedades de todos los elementos presentes en la planta piloto. Es decir, aspectos como dimensiones, parámetros de funcionamiento o número de elementos. Y, en segundo lugar, todos los datos recogidos en las pruebas experimentales: condiciones ambientales, hora, activación de equipos, temperaturas, caudales, resultados de la operación de los equipos de desalinización, estado de las baterías y demás elementos del sistema eléctrico, etc.

La recolección de toda esta documentación resulta clave en el devenir del resto del trabajo. Sin la información adecuada, sería imposible proseguir adecuadamente.

3.2. Diseño del modelo teórico

La creación de un modelo que sea capaz de reproducir fielmente el funcionamiento de la planta de trigeneración híbrida es el objetivo principal de este trabajo. Por lo tanto, el primer paso a realizar es, precisamente, la construcción de un primer modelo, para su posterior modificación y ajuste.

El programa informático más adecuado para llevar a cabo esta tarea es TRNSYS. Este programa es ideal para trabajar con esquemas de instalaciones con energías renovables, y permite no sólo el diseño de un modelo teórico sino también su simulación. TRNSYS es, de acuerdo con sus creadores [29], una herramienta extremadamente flexible basada en un entorno gráfico y utilizada para llevar a cabo simulaciones de sistemas transitorios. El programa está compuesto principalmente por dos partes: el motor de diseño y simulación, y la extensa biblioteca de componentes.

3.2.1. Trabajo con TRNSYS

Para la realización de este proyecto, se ha trabajado con el programa TRNSYS v17 (versión del año 2017). Como se ha comentado, se trata de un software concebido para la creación de esquemas de instalaciones de energías renovables y la simulación y el estudio de su funcionamiento. A continuación, se expone brevemente la metodología de trabajo con este programa.

En primer lugar, hay que crear un nuevo “proyecto”. Comenzando desde una pantalla en blanco, para ir añadiendo elementos al sistema se debe utilizar la biblioteca que suministra el propio TRNSYS. Se encuentra incluida una enorme cantidad de equipos típicos en esta clase de instalaciones: colectores solares, turbinas eólicas, unidades para el sistema eléctrico, instrumentación de control y regulación, utilidades matemáticas, elementos para la salida y representación de datos, etc. A cada uno de estos equipos o unidades se les denomina con el nombre de *type*. Se entiende por *type* a la definición de un elemento. Por lo tanto, los *types* están programados a través de las ecuaciones de comportamiento del equipo que representan (por ejemplo, una bomba de impulsión incluye el modelo con las ecuaciones relacionadas con la mecánica de fluidos). Así, TRNSYS solicita introducir una serie de datos de entrada en el *type* para poder realizar los cálculos pertinentes y ofrecer una información de salida.

Además de la selección y definición de los elementos presentes en el modelo, hace falta conectarlos. Este proceso es relativamente sencillo. Consiste, simplemente, en elegir los equipos a unir y en indicar qué información de salida de uno va a servir como dato de entrada en el otro. En la Figura 9, a modo de ejemplo, se puede observar un conjunto compuesto por una bomba de impulsión, un colector solar, y la circulación desde la bomba hasta el colector:

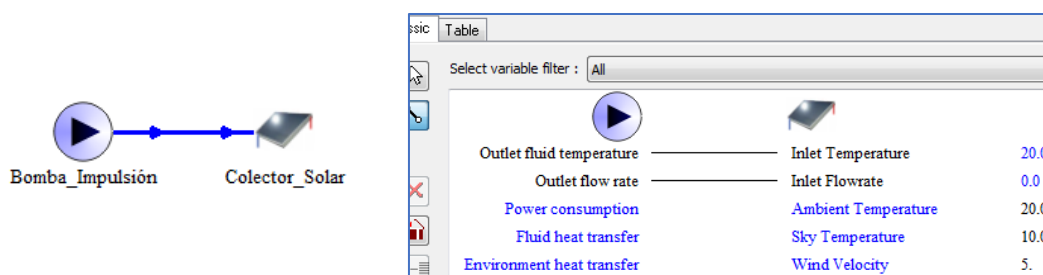


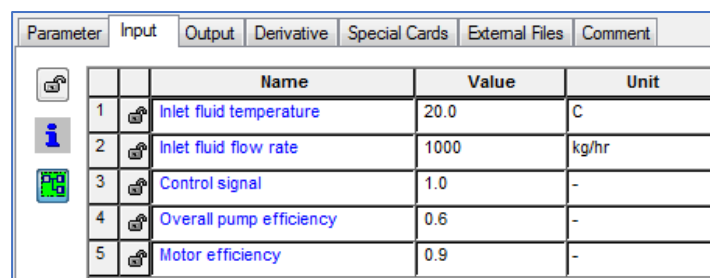
Figura 9. Ejemplo de conexión de *types* en TRNSYSv17.

Siguiendo este procedimiento, se completa todo el esquema de la planta piloto. Las librerías de *types* que proporciona el software son más que suficientes para encontrar el adecuado para cada equipo. En algunos casos, hay que utilizar *types* especiales que permiten hacer llamadas a archivos de otros programas, definir funciones punto a punto, o introducir cálculos y expresiones matemáticas.

Entre estos casos peculiares, se encuentran los *types* necesarios para la definición de los datos de partida. Se puede incluir, por ejemplo, un elemento que permita introducir información a través de un archivo muy simple como los de extensión *.txt*. Para implementar la red neuronal del sistema de destilación con membranas desarrollada previamente en una hoja de cálculo de Excel [17], también existe un *type* adecuado. Además, son muy importantes los *types* necesarios para la representación gráfica de los resultados de las simulaciones y su exportación a hojas de cálculo. La relación de todos los equipos presentes en el modelo teórico junto con sus correspondientes *types* se puede consultar en el *Anexo I: Modelo en TRNSYS*.

Dada la gran cantidad de *types* que ofrece el programa, resulta de vital importancia la selección del elemento más adecuado para representar a cada equipo de la planta de trigeneración. En algunos casos, el optar por un *type* u otro depende tan sólo de cómo está definido este y de las posibilidades que ofrece en cuanto a parámetros de entrada y de salida. Por ejemplo, en la biblioteca de TRNSYS existen diferentes modelos para las baterías de almacenamiento eléctrico, distinguiéndose algunos en sí se le introduce la corriente eléctrica que le llega en valores de intensidad (A) o en valores de potencia (W).

A la hora de definir toda la información asociada a un equipo, el software solicita indicar dos grupos de datos en el *type*: parámetros y valores de entrada. Continuando con el ejemplo anterior, para representar una bomba de impulsión se deben establecer parámetros como la potencia o el rendimiento, y variables de entrada como la temperatura y el caudal del fluido que va a circular a través de la unidad. Los valores de cada uno de estos aspectos se pueden introducir o bien manualmente, o bien que se trate de un resultado de un cálculo realizado en otra parte del modelo, o bien que se introduzcan a través de la conexión con otro *type*. También es muy importante repasar las unidades en las que el programa trabaja, tanto para las variables de entrada como para las de salida. Estas pueden ser modificadas si así se desea. En la Figura 10 se muestra una pantalla de definición de un *type* en TRNSYS:



	Name	Value	Unit
1	Inlet fluid temperature	20.0	C
2	Inlet fluid flow rate	1000	kg/hr
3	Control signal	1.0	-
4	Overall pump efficiency	0.6	-
5	Motor efficiency	0.9	-

Figura 10. Pantalla de introducción de datos en un *type* en TRNSYSv17.

El software permite al usuario las clásicas opciones de personalización de tamaño de los iconos o de tipo, grosor y color de las conexiones. Esta función es de gran ayuda para facilitar la comprensión del modelo en una primera toma de contacto y para agilizar cualquier modificación que hubiera que hacer en él. A continuación, se muestra una versión simplificada del modelo elaborado en TRNSYS. El esquema completamente detallado se puede encontrar en el *Anexo A: Modelo en TRNSYS*.

3.2.2. Esquema del modelo

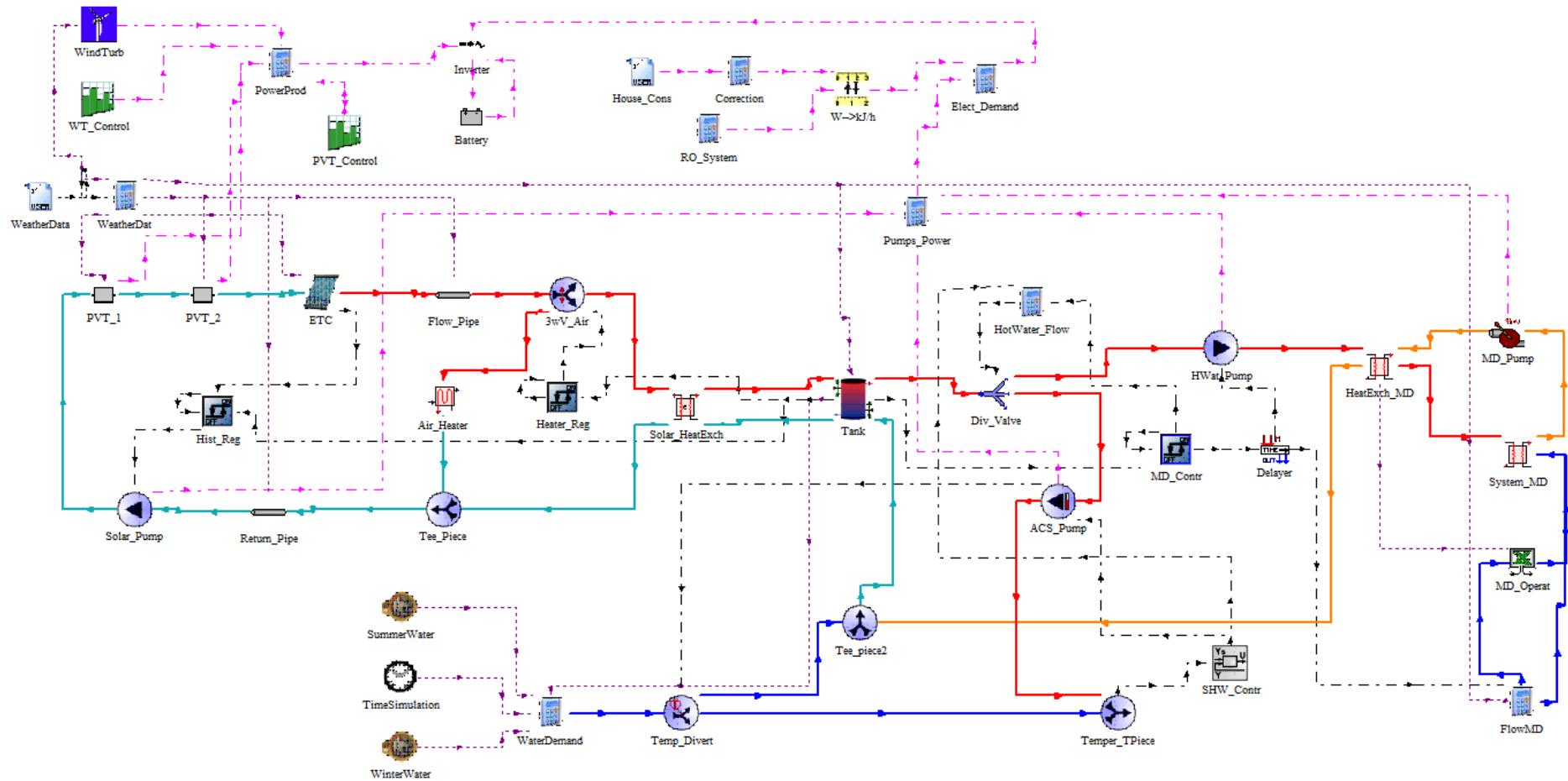


Figura 11. Esquema del modelo de la planta de trigeración en TRNSYSv17.

3.3. Simulación y obtención de resultados

Una vez se tiene completado el modelo de la planta piloto en TRNSYS, el siguiente paso es llevar a cabo la simulación de la operación. El programa informático incluye una herramienta de representación gráfica y también se puede realizar la exportación de los resultados numéricos a una hoja de cálculo si así se desea. El proceso de simulación conlleva una serie de acciones. En primer lugar, hay que establecer algunos parámetros como el tiempo de paso o el momento de inicio y final de los cálculos. Antes de comenzar la simulación, también hay que introducir los datos de entrada del periodo que se va a estudiar. Una vez preparado el sistema, se puede iniciar el mecanismo de trabajo del software. Finalmente, el programa representa gráficamente las variables que se le hayan indicado previamente y se reúnen los datos numéricos en un archivo Excel.

3.3.1. Preparación

Antes de comprobar el funcionamiento del modelo informático, hay que determinar el periodo de tiempo que se quiere analizar y el intervalo entre cada actualización del estado del sistema. En función del objetivo que se tenga, puede interesar hacer una simulación muy extensa (por ejemplo, de un año completo) con un intervalo diario o, por el contrario, reducir el tiempo de paso a horas o minutos para estudiar con mayor detalle un solo día. Este segundo caso es el que se corresponde con el presente proyecto, ya que se llevan a cabo análisis diarios y la información resultante de las pruebas experimentales es minutar.

En consecuencia, la introducción de los datos de entrada necesarios también tiene que ser minuto a minuto. Como se ha comentado en el apartado anterior, la definición de estos parámetros se realiza mediante un archivo de texto en el que se ordenan variables tales como las condiciones ambientales o las temperaturas en algunos puntos de la planta. Este archivo *.txt* es implementado en el programa a través de un *type* diseñado para ello. La relación de los aspectos introducidos en el sistema como información de entrada aparece en la Tabla 3:

Datos experimentales introducidos como entradas del sistema

Variable	Unidad	Variable	Unidad
Velocidad del viento	m/s	Ángulo de incidencia solar	°
Radiación solar	W/m ²	Radiación horizontal	W/m ²
Temperatura ambiental	°C	Temperatura cielo	°C
Temperatura entrada agua al condensador del sistema MD	°C	Caudal entrada agua salada al sistema MD	l/h

Tabla 3. Lista de variables introducidas al modelo teórico en TRNSYSv17.

Por último, antes de llevar a cabo la simulación del sistema hay que definir qué variables se quieren calcular, representar y/o exportar. Para indicar cuales son estos valores a estudiar, TRNSYS ofrece una amplia librería de diferentes “impresoras de datos”. Estos *types* permiten establecer el número de variables a representar y la escala de los ejes de la gráfica. Trasladar la información requerida desde los equipos en los que se encuentra hasta la

impresora de datos es muy sencillo. Tan sólo hay que conectar los *types* en cuestión y nombrar las variables como se desee. Si, además de una representación gráfica, se quiere generar un archivo que recoja todos los datos numéricos generados, hay que definir también las unidades en las que se presentan las variables y el nombre del archivo a construir. En la Figura 12 se muestra, a modo de ejemplo, el *type* de una impresora de datos y su pantalla de ajustes.

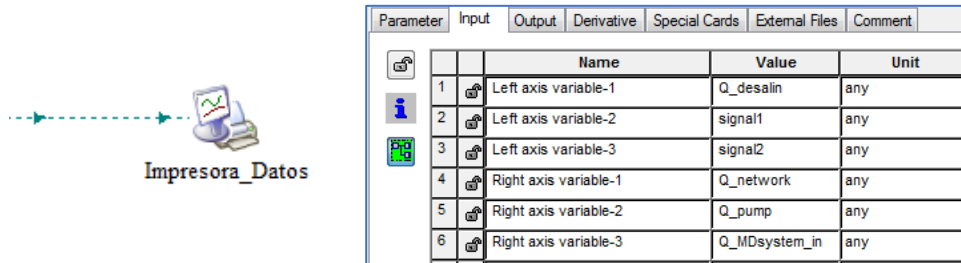


Figura 12. Procedimiento para representar variables en TRNSYSv17.

3.3.2. Presentación de resultados

Si el modelo de la planta está correctamente construido y TRNSYS no detecta errores, la simulación puede seguir adelante. Durante el proceso de cálculo, el programa se encarga de ir actualizando el estado de todo el sistema y de mostrar al usuario los parámetros que se le hayan indicado. Con el fin de facilitar la visualización de los datos, TRNSYS trabaja con una herramienta de representación gráfica (ver Figura 13). Esta herramienta permite comprobar la evolución de la simulación del modelo e incluye algunas opciones interesantes, útiles para analizar en detalle el comportamiento del sistema.

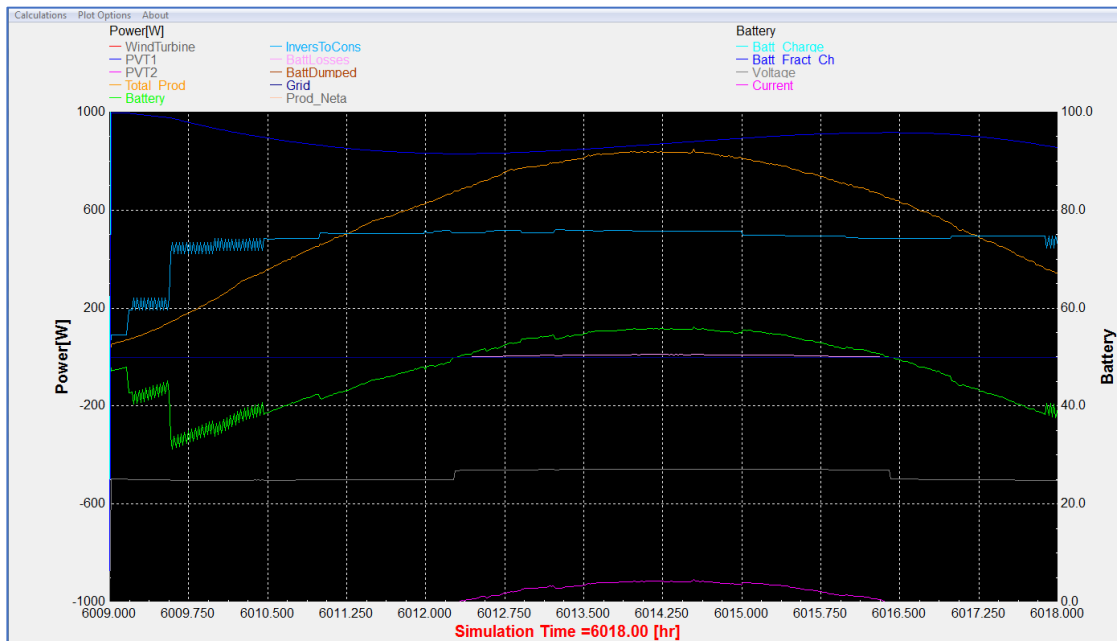


Figura 13. Herramienta de representación gráfica en TRNSYSv17.

Si en el modelo aparecen *types* para la llamada a otros programas, al comenzar el proceso de simulación TRNSYS abre y activa estos archivos para trabajar con ellos. En el caso de que se haya establecido la exportación de los resultados a una hoja de cálculo, cada variable aparece ordenada cronológicamente en una columna de celdas.

3.4. Comparación de resultados

Cuando se ya se cuenta con un modelo virtual representativo de la planta piloto y se ha conseguido llevar a cabo su simulación, hay que comprobar si este modelo se comporta de manera similar al experimental. Con el fin de estudiar la validez del sistema creado en TRNSYS, se debe realizar una comparación de los datos recogidos tanto informática como experimentalmente. El análisis de los resultados se plantea en las hojas de cálculo de Excel, de manera gráfica y numérica.

Para poder llegar a una conclusión de si el modelo teórico es válido para representar a la planta de pruebas, en primer lugar hay que definir qué aspectos son clave y cuáles son, por tanto, las variables que se debe comparar. Ya que se trata de una instalación de trigeneración, lo más lógico es ver si los tres productos de la planta (ACS, agua desalinizada y consumo eléctrico) se satisfacen. De acuerdo con esta idea, los parámetros y aspectos que se ha decidido estudiar para cada uno de los subsistemas de la planta son los siguientes:

- *Sistema de captación solar*: temperaturas del fluido caloportador a la salida de los principales componentes del circuito solar (°C)
- *Sistema de agua caliente sanitaria (ACS)*: temperaturas en el tanque de acumulación (°C) y perfil del suministro de ACS (l/h)
- *Desalinización en sistema MD*: temperaturas en el equipo condensador/evaporador (°C) y producción de agua dulce (l/h)
- *Sistema eléctrico*: producción neta (kW) y estado de carga de las baterías (%)

Para crear en Excel las hojas de cálculo necesarias para comparar el funcionamiento teórico y experimental, hay que trasladar la información obtenida previamente. Los resultados de la simulación del modelo se encuentran en los archivos construidos por TRNSYS durante el proceso de cálculo. Por otro lado, toda la información relativa a las pruebas experimentales ha sido proporcionada inicialmente entre la documentación de partida del proyecto. La representación gráfica resulta de gran ayuda para observar de manera visual y sencilla el comportamiento del modelo y para poder determinar rápidamente la calidad de los resultados. Hay que tener especial cuidado con la ordenación de los datos en la hoja de cálculo (buscar la coincidencia temporal de ambos conjuntos de resultados) con el fin de evitar anomalías. En la Figura 14 se muestra una captura de pantalla del procedimiento en Excel.

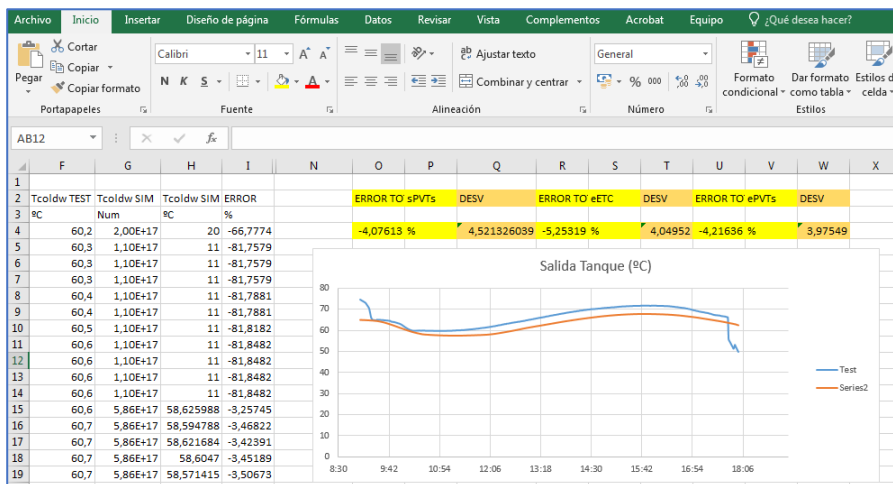


Figura 14. Ejemplo de hoja de cálculo durante el trabajo en EXCEL.

Con el objetivo de complementar al estudio gráfico, se realiza un análisis estadístico en el que se calcula el error medio entre los datos experimentales y los resultados de la simulación. También se incluye el valor de la desviación estándar y de la media de cada distribución, útiles para procedimientos de comparación avanzados. Para calcular el primero de estos indicadores, simplemente se calcula el error de cada dato minutar (según la ecuación 3.1) y se realiza la media de todo el conjunto:

$$error [\%] = \frac{|Valor\ simulación - Valor\ experimental|}{Valor\ experimental} * 100 \quad (ec. 3.1)$$

Las ecuaciones básicas utilizadas para calcular la media y la desviación estándar de un conjunto de datos son las siguientes:

$$media = \frac{\sum X_i}{N} \quad (ec. 3.2)$$

$$desviación = \sqrt{\frac{\sum (X_i - X_m)^2}{N-1}} \quad (ec. 3.3)$$

En estas fórmulas matemáticas, X_i representa al cada uno de los valores minutares de las muestras, X_m es la media de la distribución y N el número de datos disponibles. Se considera que la comparación gráfica y el cálculo del error resulta suficiente para valorar la calidad de los resultados y la validez del caso simulado y ajustado en TRNSYS.

3.5. Ajuste y validación

La última etapa de las labores de investigación es la búsqueda de un modelo que represente de la manera más fiel posible el funcionamiento de la planta de trigeneración híbrida. Para ello, hay que llevar a cabo una serie de modificaciones y ajustes de la propuesta inicial. El procedimiento consiste en identificar los parámetros clave de los que depende la operación del equipo y en repetir las simulaciones el número de veces necesario hasta encontrar una solución adecuada.

En este proyecto se ha planteado la validación del funcionamiento de la planta para varias jornadas de pruebas. Cada día presenta unas condiciones ambientales distintas y un desempeño de los equipos diferente. En consecuencia, los esfuerzos no se pueden centrar en ajustar y corregir el modelo para reproducir casi de manera exacta el comportamiento de la instalación durante un sólo día. El objetivo del trabajo debe ser la optimización del modelo en TRNSYS para que, en la medida de lo posible, opere de modo similar a la planta real ante cualquier situación de partida. De acuerdo con esto, se ha tratado de encontrar los aspectos que más influyen sobre los resultados de las simulaciones para que sean estos, y no otros, los que haya que cambiar en cada nueva prueba.

Durante los ensayos con el modelo, se han clasificado los parámetros sensibles en dos grupos. En primer lugar, se encuentran los aspectos que no pueden verse modificados de un día para otro. A este bloque pertenecen todas las características y propiedades de los equipos instalados. La gran mayoría de estos valores se hallan en la información previa recibida al comenzar el trabajo (catálogos, artículos, fichas de características). Sin embargo, existen varios puntos que no se sabe su valor con exactitud o incluso se desconoce por completo. Un claro ejemplo de esto último son los coeficientes de transferencia de calor de los intercambiadores

del sistema MD. Para estimar su valor se ha tenido que combinar la realización de un conjunto de cálculos con la comprobación mediante la repetición de simulaciones. Este tema aparece desarrollado con mayor detalle en el *Anexo B: Ajustes del modelo*. De todos modos, hasta las características conocidas puede que haya que modificarlas ligeramente para ajustar la operación del modelo, en caso de que las otras modificaciones no sean suficientes.

Por otro lado, hay parámetros que si varían en función del periodo a estudiar. Aquí se incluye, por ejemplo, el estado inicial de algunos equipos. Hace falta ajustar el estado de carga de las baterías al comienzo de la simulación o la temperatura a la que se encuentra el agua almacenada en el tanque. También es importante comprobar, a través de las tablas de datos experimentales, la hora exacta de activación de los subsistemas de la planta. Otro aspecto que puede variar según el periodo de estudio es la consigna de temperatura del ACS. Como se ha comentado en el capítulo anterior, el consumo eléctrico de la vivienda unifamiliar está representado por una resistencia y un potenciómetro. Por lo tanto, este valor también tiene que ser tenido en cuenta a la hora de actualizar el modelo.

Aparte del ajuste de todas las variables mencionadas, en este apartado también merece la pena hablar sobre el conjunto de datos de entrada que se introducen ordenados, como un archivo de texto, en el *type* correspondiente. En algunos casos, estos valores tienen que ser validados debido a pequeños desfases en el registro que se tomó de ellos durante las pruebas experimentales. También conviene repasar las unidades en las que proporcionan al programa.

La validación de un modelo se puede definir como la demostración de su exactitud para una aplicación concreta [30]. Por lo tanto, la finalidad de este proyecto no es otra que la de tratar de encontrar un modelo teórico que pueda reproducir e incluso predecir el comportamiento de la instalación de trigeneración real. Todos los pasos anteriormente expuestos conducen a la obtención de un caso de un modelo de TRNSYS que cumpla con los objetivos mencionados. No obstante, podría darse la circunstancia de que no se consiguiera diseñar un único caso que reprodujera, de una forma más o menos exacta, el comportamiento de la planta. Por todo ello, gran parte de los recursos dedicados a esta investigación se centran en la constante repetición de las pruebas de simulación para cada uno de los días tratados. El ajuste y modificación tanto de la configuración del modelo como de las características de los equipos sólo se considera válido si ayuda a reducir el error en cualquier periodo estudiado. De nada sirve alterar el valor de un parámetro para mejorar el funcionamiento del modelo en un día concreto si empeora el error resultante el resto del tiempo.

En concordancia con lo anterior, la metodología adoptada para llevar a cabo la validación del modelo teórico es la repetición de la secuencia “ajuste – simulación – toma de resultados – comparación”. Dada la situación, uno de los asuntos más complejos es el definir los límites de aceptación de las pruebas, tan necesarios para decidir si los resultados son válidos o no. Ante las grandes diferencias que presentan entre sí los días estudiados, el grado de fiabilidad de los instrumentos de medida de la planta piloto (con una incertidumbre de $\pm 10\%$ aproximadamente) o la falta de información y precisión relacionada con algunas características de los equipos; se ha optado por concentrar los esfuerzos en el comportamiento de la simulación de los productos del sistema: ACS, energía eléctrica y agua desalinizada. Por lo tanto, para realizar la validación del modelo se ha tenido especialmente en cuenta la producción de agua dulce en los sistemas MD y OI, la producción neta de energía eléctrica y el estado de carga de las baterías, y el perfil del consumo de ACS.

3.6. Resumen de la metodología

Para finalizar con el capítulo de *Material y Métodos*, a continuación se presenta una tabla resumen (Tabla 4) con las tareas y acciones más importantes dentro de cada uno de los puntos tratados:

Objetivos	Acciones
<i>Análisis previo</i>	Recepción de la documentación
	Estudio del esquema de funcionamiento de la planta
	Definición del trabajo a realizar
<i>Construcción del modelo</i>	Identificación de equipos
	Selección de <i>types</i>
	Diseño de la planta
<i>Simulación de la operación</i>	Ajustes previos y datos de entrada
	Corrección de errores
	Información representada y exportada
<i>Modelo teórico vs. planta experimental</i>	Creación de hojas de cálculo
	Representaciones gráficas
	Cálculos estadísticos
<i>Validación del modelo</i>	Modificaciones y ajustes
	Repetición de la simulación
	Selección del modelo final

Tabla 4. Resumen de la metodología de trabajo.

4. RESULTADOS

En este cuarto capítulo se presentan los resultados obtenidos a lo largo del proceso de simulación y validación del modelo teórico de la planta piloto. Dada la gran cantidad de información recogida, aquí sólo se tratan los aspectos de mayor relevancia. Los resultados completos se pueden consultar en el *Anexo C: Colección de resultados*.

Cómo se ha explicado en el capítulo anterior, la metodología seguida en las labores de investigación implica el estudio del comportamiento de la planta en diferentes situaciones. En otras palabras, se tiene la necesidad de simular y validar el modelo en TRNSYS para una serie de días con distintas condiciones ambientales. Al tratarse de una instalación híbrida con equipos de generación solar y eólica, se han tomado cinco periodos de pruebas largos (más de 8 horas) en los que se cuenta con variaciones tanto de las características del viento como de la radiación solar incidente. También es muy importante que durante esos días se consiguiera recolectar una cantidad de información suficiente para llevar a cabo el análisis de manera correcta. De acuerdo con estas pautas, las fechas estudiadas han sido las siguientes:

- 10 de agosto de 2017
- 8 de septiembre de 2017
- 10 de octubre de 2017
- 6 de marzo de 2018
- 7 de marzo de 2018

Tras realizar cada una de las simulaciones del modelo en TRNSYS, se tienen que comparar los resultados teóricos con los experimentales para analizar si el funcionamiento del modelo se asemeja a la operación de la planta de pruebas. Por lo tanto, resulta de gran importancia la selección de los aspectos a tener más en cuenta. Cómo se ha comentado durante la exposición de la metodología utilizada, los parámetros que se han considerado más importantes son los relacionados con los tres productos de la planta: agua caliente sanitaria, corriente eléctrica y agua desalinizada. En consecuencia, las variables sobre las que más exhaustivamente se ha trabajado son la producción eléctrica neta y el estado de carga de las baterías, el perfil de consumo de ACS y el caudal de agua dulce generada en la MD.

La comparación de los resultados experimentales y teóricos se ha realizado a través de la representación gráfica conjunta y de la obtención del error medio de los datos resultantes de la simulación con respecto a los tomados en las pruebas de la planta piloto. Toda la información aquí mostrada se corresponde con los datos obtenidos en las simulaciones definitivas. Estos datos finales se han alcanzado tras la realización de múltiples ajustes en el modelo de TRNSYS y la repetición del procedimiento de simulación y comparación, con el fin de encontrar unos ajustes aptos para todos los días. Por lo tanto, son estos resultados los que se toman como referencia para analizar la validación del modelo teórico.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada uno de los cinco días estudiados. Se tratan en el orden cronológico en el que se han llevado a cabo las simulaciones. La decisión de comenzar a trabajar con una jornada de pruebas u otra no ha sido producto del azar. Se ha tratado de iniciar las labores de investigación con uno de los periodos más completos en lo que se refiere a condiciones ambientales y operación de los equipos. Actuando de esta manera se buscaba la simplificación de las tareas de ajuste del modelo.

Antes de proceder con la exposición de los resultados, hay que aclarar que cualquier problema relacionado con los cálculos de las simulaciones o la validación con las pruebas experimentales se explica de manera detallada en el *Anexo E: Resolución de problemas*.

4.1. 8 de septiembre de 2017

La jornada de pruebas elegida para comprobar por primera vez el funcionamiento del modelo teórico ha sido la del día 8 de septiembre de 2017. La razón que ha llevado a tomar esta decisión es que se produce la combinación de unas condiciones ambientales favorables junto con una operación completa de la planta y bajo diferentes consignas de trabajo.

La radiación solar presenta una evolución continua y uniforme, en la que la nubosidad es mínima y los colectores pueden recibir sin problemas la energía proveniente del Sol a lo largo de todo el día. Además, la velocidad del viento no supera prácticamente en ningún momento los 3 m/s, por lo que la turbina eólica no entra en funcionamiento. En la Figura 15, junto con estas dos variables, se puede observar también la temperatura ambiente existente. Los valores de la radiación solar se representan en el eje derecho de la gráfica.

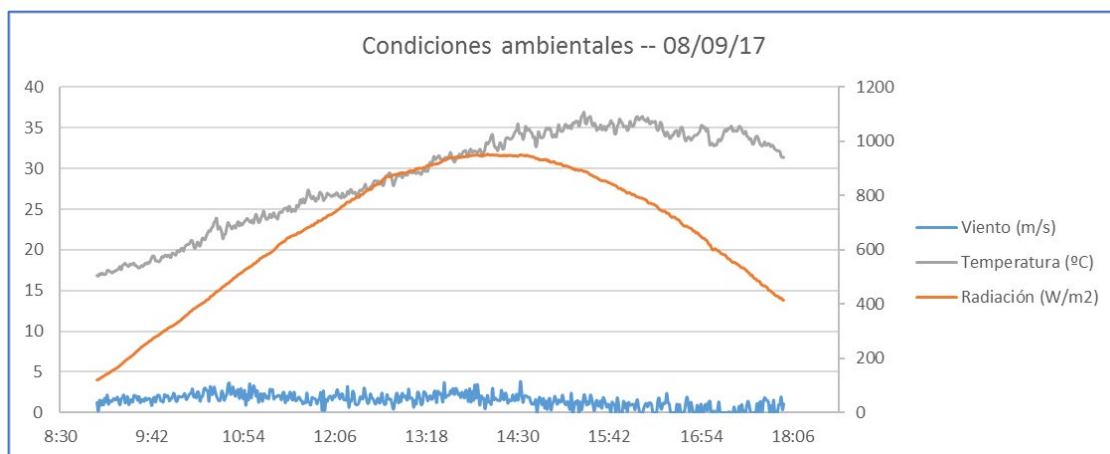


Figura 15. Condiciones ambientales durante las pruebas del 8 de septiembre.

Por otro lado, los parámetros de operación de la planta son adecuados para evaluar muchos aspectos del modelo teórico. La temperatura del agua caliente acumulada en el interior del tanque al comienzo de la simulación es suficientemente alta (65 °C) como para que los subsistemas térmicos de la instalación se activen de manera instantánea. El caudal de agua que circula por el lazo del equipo de desalinización por destilación con membranas (MD) se puede ajustar a diferentes niveles. En este caso, resulta muy interesante la reducción manual del caudal desde 350 hasta 300 l/h que ocurre cerca del mediodía.

Comenzando por el sistema de captación solar, en la Figura 16 se puede comprobar como los resultados de la simulación se alejan de los experimentales. La temperatura del fluido caloportador a la salida del colector de tubos de vacío se sitúa entre 5 y 7 grados superior a la medida en las pruebas reales. Además, comentar la inestabilidad del modelo en los momentos de activación y desactivación del circuito solar (consultar *Anexo V*). Durante estos instantes, la temperatura mostrada por el sistema sufre unos elevados altibajos. Si se avanza por el sistema, el siguiente punto de medida es la temperatura del agua caliente que se extrae del tanque de acumulación. La diferencia entre los resultados teóricos y experimentales

en este caso es considerablemente menor a la anterior (ver Figura 17). De hecho, siguiendo el curso del agua a través del sistema y entrando en la instalación de desalinización de la MD, la medida experimental de las temperaturas de las dos corrientes de agua salada que entran al equipo condensador/evaporador es prácticamente igual a la obtenida en la simulación.

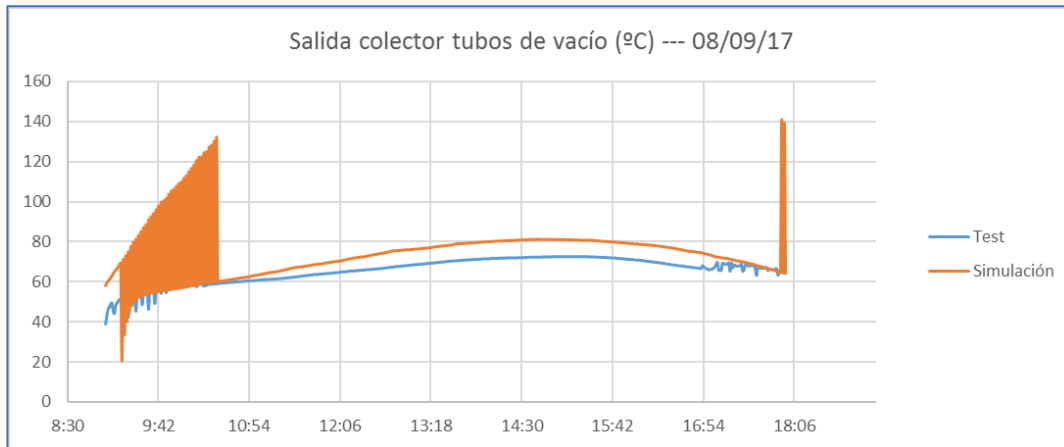


Figura 16. Temperatura del fluido a la salida de los colectores (8 de septiembre).

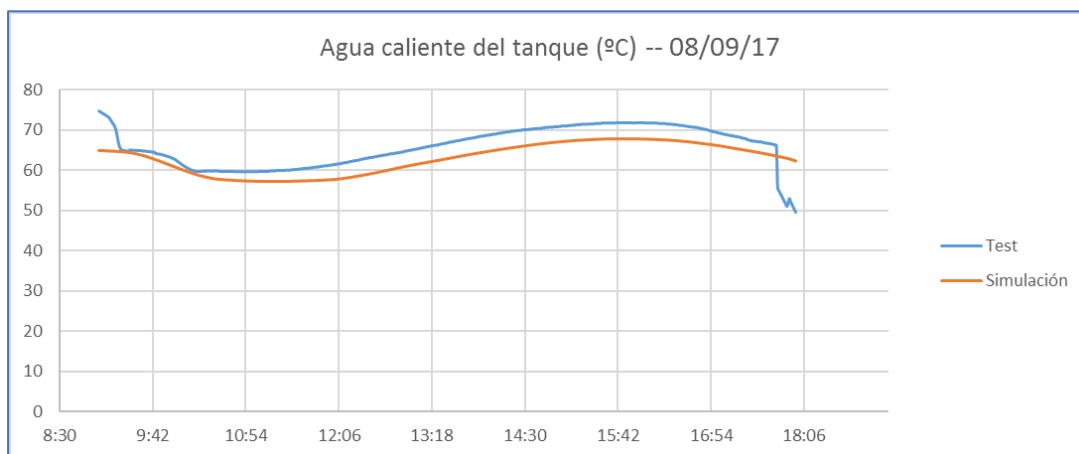


Figura 17. Temperatura del agua caliente extraída del tanque (8 de septiembre).

La producción de agua dulce en la MD está modelizada mediante la red neuronal desarrollada en trabajos previos de este proyecto. La hoja de cálculo en la que se incluye esta red proporciona el valor del caudal de agua tras evaluar tres parámetros: temperatura del agua salada a la entrada del evaporador y del condensador, y caudal que circula por ellos. Dado que los dos últimos son datos de entrada al modelo, directamente tomados de los datos experimentales, se puede afirmar que la simulación de la producción de agua potable depende directamente del resultado de la temperatura del evaporador (ver Figura 18). Por otro lado, como la producción de la ósmosis inversa se considera constante, si se tiene ajustada la operación de la MD, se tiene también la de agua total potabilizada. En la Figura 19 se muestra la comparación de los caudales de agua dulce en la MD.

El consumo de ACS de la vivienda unifamiliar está caracterizado a través de un perfil de referencia. Mientras el modelo teórico de TRNSYS trata de satisfacer este consumo mediante una pequeña extracción continua del agua caliente del tanque, la planta de pruebas toma cada hora de manera instantánea la cantidad necesaria. Este comportamiento tan diferente se muestra en la figura 20. En el *Anexo E* se comenta detalladamente este asunto.

Resultados

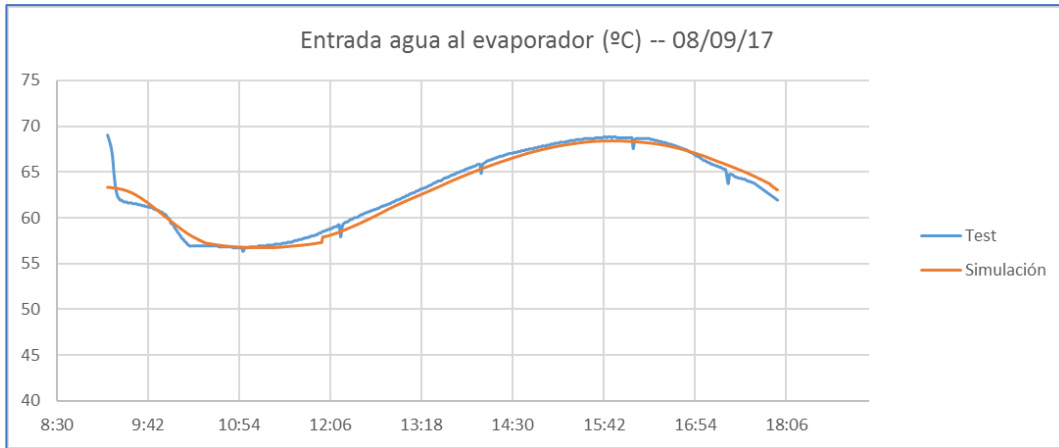


Figura 18. Temperatura del agua salada al entrar al evaporador (8 de septiembre).

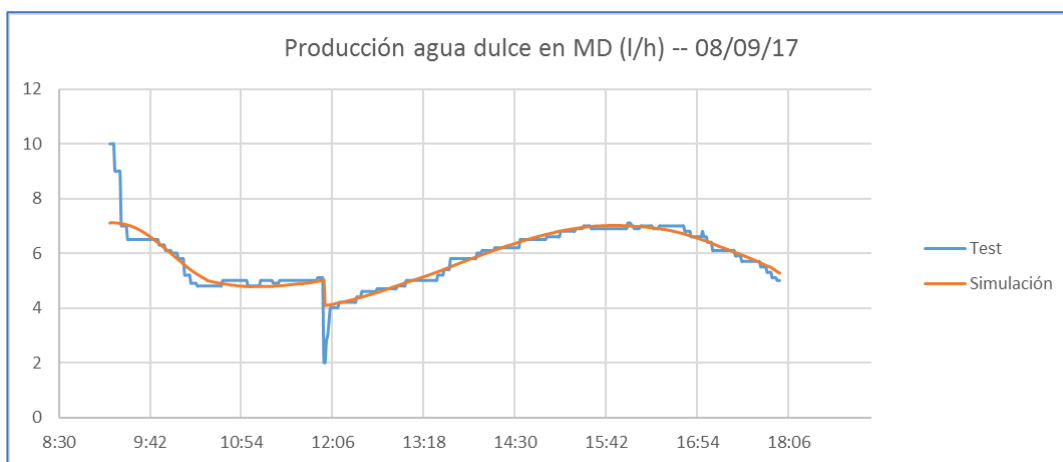


Figura 19. Producción de agua dulce en el sistema MD (8 de septiembre).

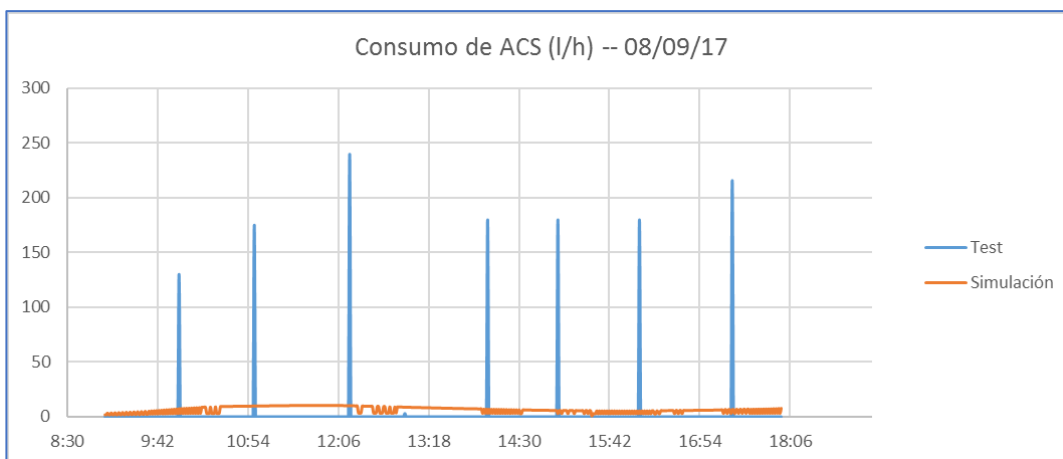


Figura 20. Perfil de consumo de ACS (8 de septiembre).

El sistema eléctrico se caracteriza tanto por la generación híbrida mediante la turbina eólica y los paneles fotovoltaico-térmicos como por el estado de carga de las baterías (SOC). Los consumos de este tipo que existen en la planta piloto incluyen la energía que necesitan las bombas de impulsión para funcionar, la demanda de la vivienda (representada por un potenciómetro) y las necesidades del sistema de la ósmosis inversa. Dado que estos valores

son introducidos en su mayoría en el modelo de TRNSYS como dato, las dos variables mencionadas son la mejor opción para analizar el comportamiento de este sistema. En la figura 21 aparece la producción eléctrica neta. En otras palabras, el gráfico muestra la suma de la energía eléctrica que se destina a los consumos y la que se utiliza para cargar las baterías (o se desaprovecha si estas ya se encuentran completamente cargadas). Por su parte, el estado de carga de los elementos de almacenamiento se puede observar en la figura 22.

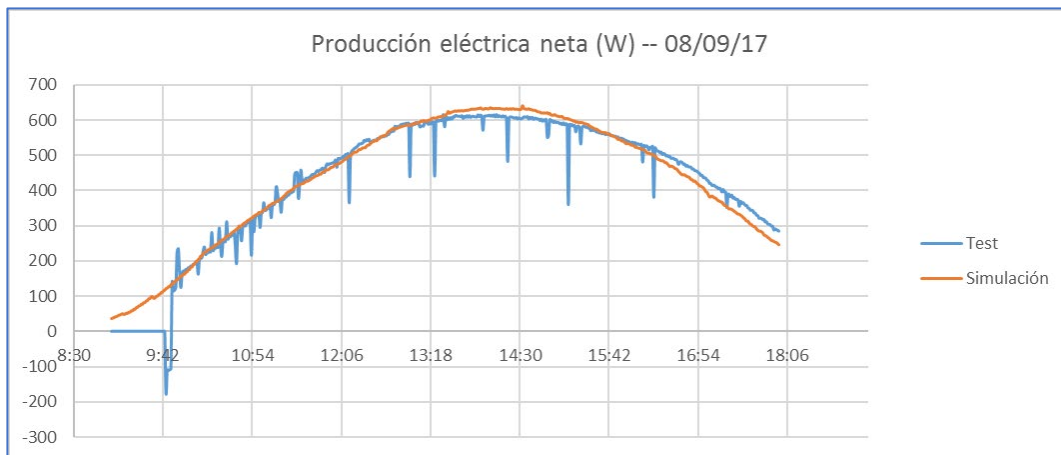


Figura 21. Producción eléctrica neta (8 de septiembre).

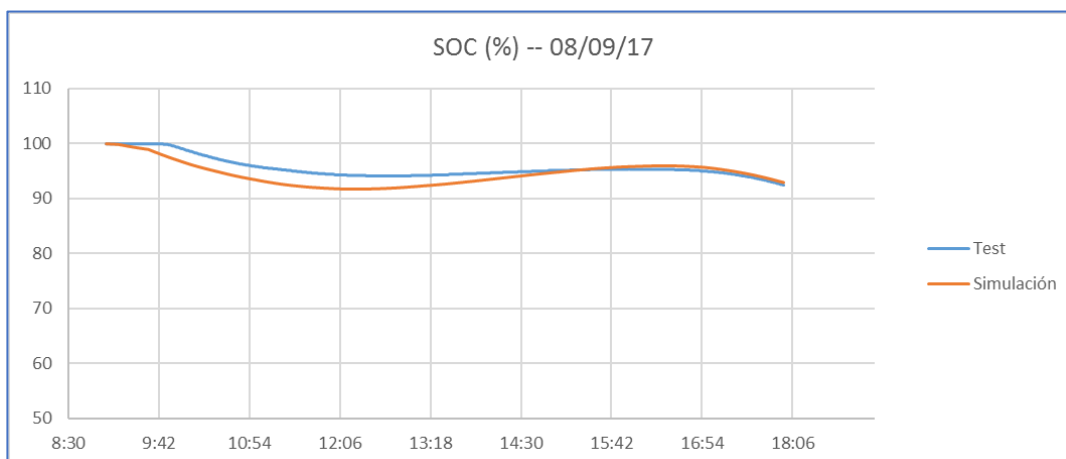


Figura 22. Estado de carga de las baterías (8 de septiembre).

Además de la representación y comparación gráfica de los resultados teóricos y experimentales, se ha llevado a cabo el cálculo del error medio, tomando como referencia los datos de las pruebas reales. Esta información numérica sirve para analizar con mayor detalle el comportamiento del modelo en TRNSYS y ayuda a determinar si los ajustes y modificaciones realizados para cada simulación lo acercan al funcionamiento de la planta piloto. También se ha calculado la media y la desviación típica de cada distribución de datos, debido a que son dos parámetros clave a la hora de emprender estudios comparativos estadísticos de mayor detalle y profundidad. En la Tabla 5 se incluyen los valores de estos parámetros.

Finalizado el estudio de este primer día, se ha pasado a utilizar estos mismos ajustes para el resto de las jornadas analizadas. No obstante, los resultados del resto de días han servido para modificar los detalles del modelo teórico que hicieran falta.

Variable	Error (%)	Media		Desv. Típica	
		Exp.	Sim.	Exp.	Sim.
Temperatura salida colectores	9,08	67,89	74,13	3,91	6,13
Temperatura agua caliente tanque	4,98	65,67	62,97	4,81	3,76
Temperatura entrada evaporador	1,92	63,15	63,01	4,22	4,13
Producción MD	2,85	5,81	5,82	0,93	0,91
Producción eléctrica neta	4,98	468,69	468,26	131,18	139,34
SOC Baterías	1,49	95,55	94,43	1,86	2,13

Tabla 5. Comparación estadística de la operación de la planta (8 de septiembre).

4.2. 7 de marzo de 2018

El segundo día con el que se ha estudiado el modelo teórico también presenta unas condiciones ambientales favorables. Como se puede observar en la Figura 23, la radiación solar sigue una evolución casi perfecta, sin apenas interrupciones relacionadas con algún tipo de nubosidad. El viento presente esta jornada se puede considerar también despreciable ya que en ningún momento alcanza valores suficientemente altos como para que la turbina eólica pueda comenzar a funcionar. La principal diferencia con respecto al día 8 de septiembre es que la temperatura ambiental se encuentra bastante por debajo. De hecho, durante la salida del Sol apenas se superan los valores negativos. Esta situación provoca que la temperatura del agua del tanque de acumulación se encuentre a tan solo 45°C (20 grados inferior a la de septiembre). El mecanismo de control y regulación del sistema MD activa la circulación de agua caliente hacia el intercambiador de calor cuando la temperatura del agua del tanque supera en 8 puntos a los 50°C. Por lo tanto, la generación de agua desalinizada con esta tecnología no comienza a funcionar hasta varias horas después.

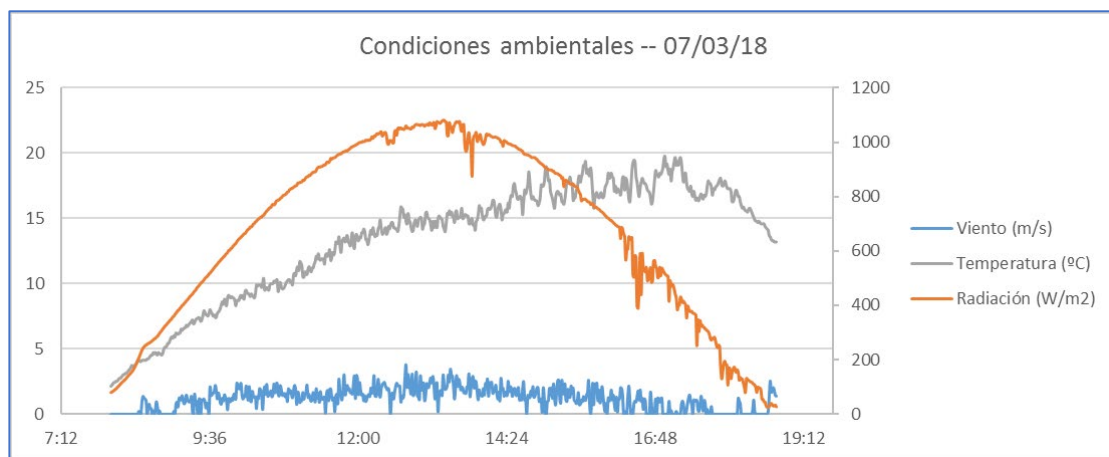


Figura 23. Condiciones ambientales durante las pruebas del 7 de marzo.

En la Figura 24 se muestra la evolución de la temperatura del agua caliente que sale del tanque hacia el intercambiador del sistema MD. Se puede comprobar como el agua aumenta su temperatura paulatinamente hasta que sobre las 12:30 se estabiliza. Es en ese momento cuando se comienza a extraer.

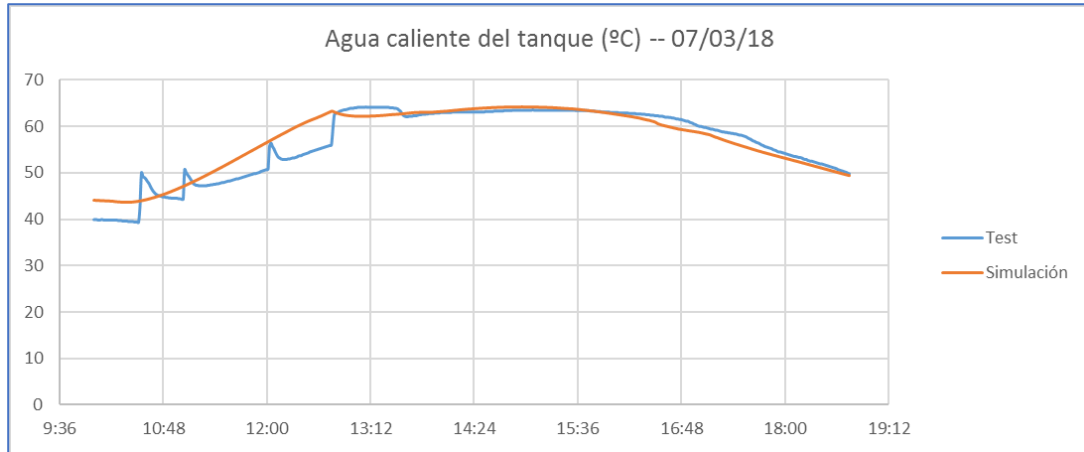


Figura 24. Temperatura del agua caliente extraída del tanque (7 de marzo).

Cómo se ha mencionado, el sistema de desalinización por MD está regulado por el sistema de control de la planta. Esta regulación también se encuentra diseñada en el modelo teórico de TRNSYS. Hasta que la temperatura del agua caliente acumulada en el tanque no supera en un margen preestablecido los 50°C, el sistema no se pone en marcha. Cuando se envía la señal de encendido, las bombas del circuito de agua caliente y de agua salada comienzan a impulsar los fluidos a través de la instalación.

La simulación de la temperatura del agua salada que entra al evaporador del intercambiador es prácticamente exacta a la evolución medida durante las pruebas experimentales (ver Figura 25). En ambos casos, el sistema MD se activa en el mismo instante y sigue un perfil muy similar. De acuerdo con lo comentado anteriormente, la producción de agua desalinizada depende directamente de este factor (valor calculado mediante la red neuronal). Por lo tanto, el caudal de agua dulce simulado debería comportarse también de forma similar al experimental. Sin embargo, en la Figura 26 se observa que no es así. La capacidad de cálculo de la red neuronal desarrollada [17] es la responsable de esta gran diferencia (consultar el *Anexo E: Resolución de problemas*).

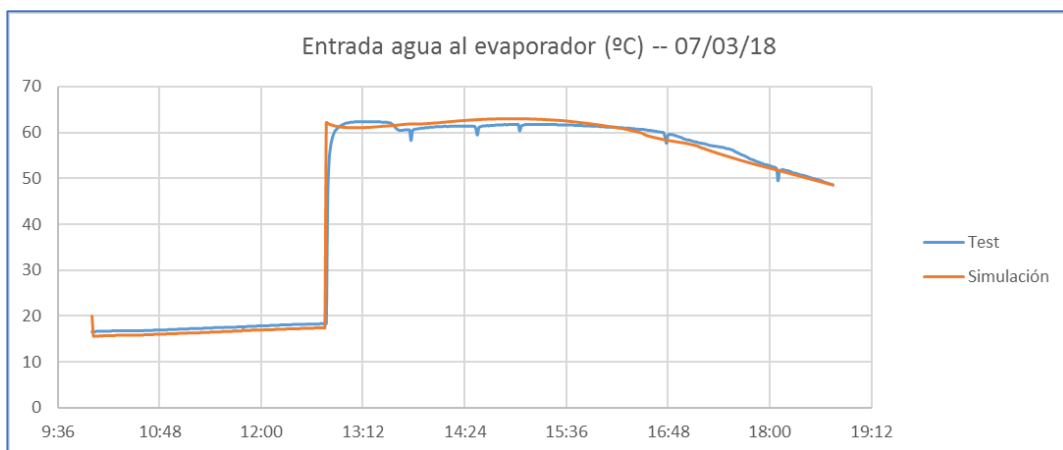


Figura 25. Temperatura del agua salada al entrar al evaporador (7 de marzo).

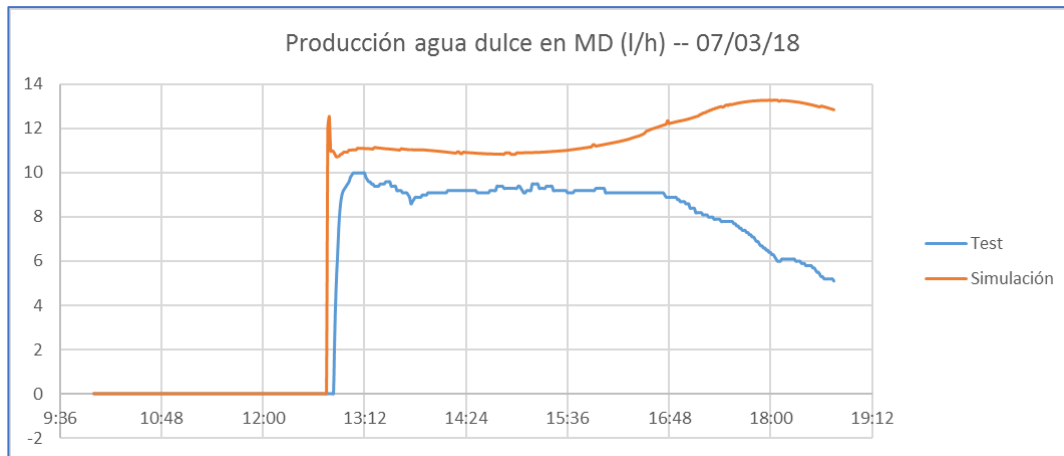


Figura 26. Producción de agua dulce en el sistema MD (7 de marzo).

Con respecto al consumo de ACS de la vivienda, todas las jornadas estudiadas sucede lo mismo: la planta piloto extrae una cantidad de manera instantánea cada cierto periodo de tiempo, y el modelo teórico toma un pequeño caudal constantemente.

La producción eléctrica de los paneles híbridos (la turbina eólica no opera al no haber una velocidad del viento suficiente) que se calcula durante el proceso de simulación resulta ser más elevada que la experimental. Especialmente notable es la diferencia existente en las horas centrales del día (ver Figura 27). Este hecho se repite en todos los días de pruebas analizados. Las razones que pueden justificar este error se exponen en al *Anexo E*.

A pesar de la falta de exactitud en la generación eléctrica, el estado de carga de las baterías del modelo teórico sí que es similar al medido en las pruebas de la planta piloto. Debido a que durante la mayor parte del día la producción neta supera al consumo, las baterías se encuentran completamente cargadas y el exceso de energía se tiene que desaprovechar. Ante esta situación, la diferencia en la generación no influye mucho en los resultados. Tan sólo en el periodo cercano a la puesta del Sol la producción disminuye y las baterías se comienzan a descargar para alimentar a los consumos presentes en la instalación. En la Figura 28 se representa esta variable.

Para finalizar con la presentación de resultados de esta jornada, en la Tabla 6 aparecen los valores del error, la media y la desviación típica de los parámetros comentados.

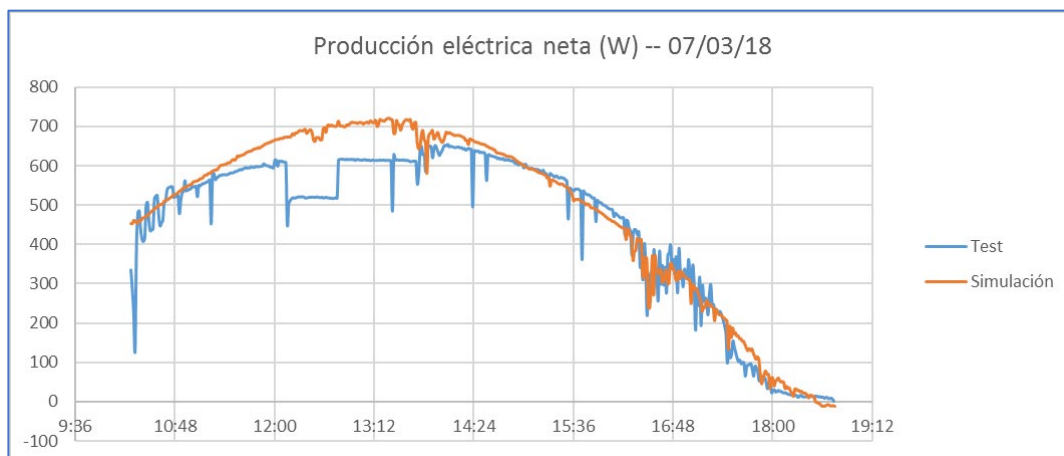


Figura 27. Producción eléctrica neta (7 de marzo).

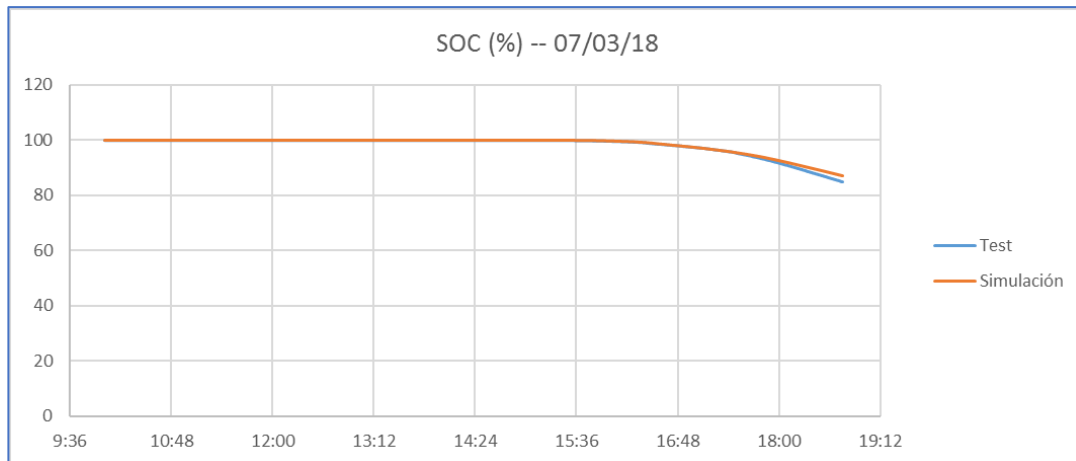


Figura 28. Estado de carga de las baterías (7 de marzo).

Variable	Error (%)	Media		Desv. Típica	
		Exp.	Sim.	Exp.	Sim.
Temperatura agua caliente tanque	3,05	56,70	57,31	7,4	6,6
Temperatura entrada evaporador	3,28	42,26	42,59	15,82	17,42
Producción MD	44,42	8,47	11,72	1,30	0,93
Producción eléctrica neta	25,35	450,58	485,36	203,70	222,5
SOC Baterías	0,21	98,22	98,41	3,58	3,14

Tabla 6. Comparación estadística de la operación de la planta (7 de marzo).

4.3. 10 de agosto de 2017

La situación que se presenta en esta tercera jornada es bastante parecida a la del día 7 de marzo de 2018. Por tanto, para evitar que resulte repetitivo, se van a exponer solamente los aspectos más peculiares encontrados durante el análisis este periodo de pruebas.

A pesar de que se trata de un día veraniego, en la Figura 29 se puede observar como las temperaturas no son excesivamente elevadas (valores de hasta 26°C). La radiación solar es constante y sí que presenta máximos altos, de casi 1000 W/m². No obstante, lo que más destaca es la presencia de un viento considerable y algo racheado. En consecuencia, la turbina eólica puede operar en algunos momentos del día y la generación eléctrica no se limita tan sólo a la producción de los paneles solares. La temperatura a la que se encuentra el agua del tanque de acumulación al comienzo de las pruebas vuelve a ser de 45°C, así que el comportamiento del sistema térmico es similar al del día 7 de marzo: el agua que sale del tanque hacia el intercambiador del sistema MD va aumentando su temperatura con el paso del tiempo y el mecanismo de control activa los equipos de desalinización cerca del mediodía.

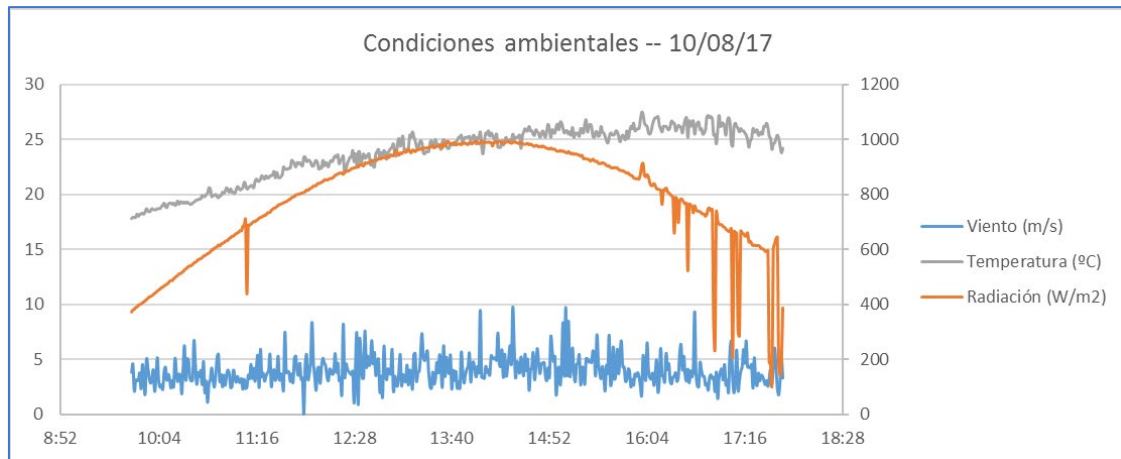


Figura 29. Condiciones ambientales durante las pruebas del 10 de agosto.

En este caso, los tres parámetros de los que depende el proceso de cálculo de la red neuronal están dentro de los rangos probados, de modo que la similitud que se consigue en la temperatura del agua salada a la entrada del evaporador se traduce también en una correcta simulación del caudal de agua dulce producido en la MD. Como muestra la Figura 30, la diferencia entre los datos experimentales y los teóricos es mucho más pequeña que en los resultados obtenidos para el día 7 de marzo.

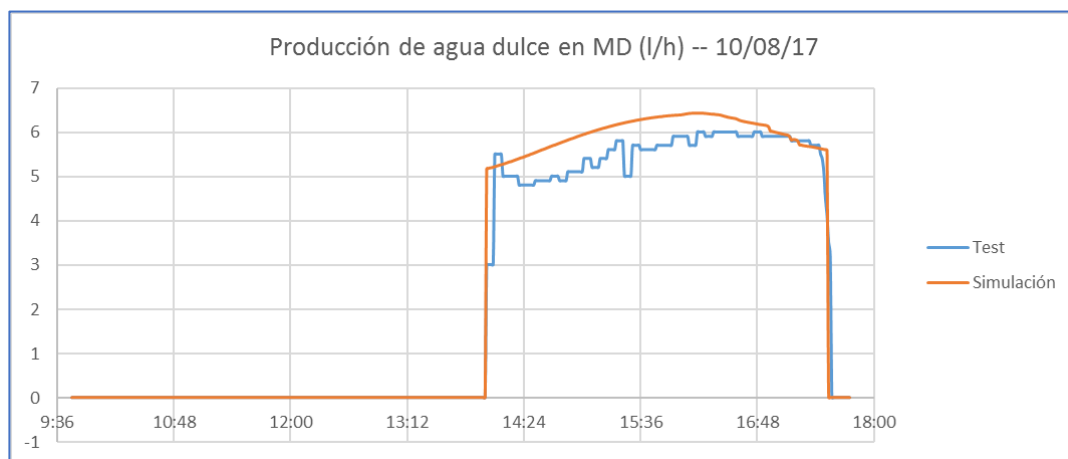


Figura 30. Producción de agua dulce en el sistema MD (10 de agosto).

El funcionamiento de la planta de trigeneración este día también se caracteriza por el momento de activación de alguno de sus sistemas. Por ejemplo, los paneles híbridos no se conectan a la red eléctrica hasta las 13:30. Este hecho se puede identificar fácilmente al analizar la representación gráfica de la producción eléctrica neta (ver Figura 31). En este perfil se pueden observar otros dos aspectos importantes. En primer lugar, se comprueba que de nuevo los resultados teóricos que proporciona el modelo de TRNSYS presentan valores superiores a los registrados en las pruebas experimentales. Por otro lado, los picos positivos que aparecen a lo largo de toda la serie de datos se corresponden con la aportación eléctrica llevada a cabo en la turbina eólica.

En la Figura 32 se muestra también el estado de carga de las baterías. Debido a que al comienzo de las pruebas los paneles fotovoltaicos no se encuentran operando, las baterías se descargan durante un periodo de tiempo. Cuando estos sistemas se activan, se frena este

proceso de pérdida de energía almacenada. Para finalizar, siguiendo con el mismo patrón utilizado para los dos días anteriores, los datos comparativos se recogen en la Tabla 7:

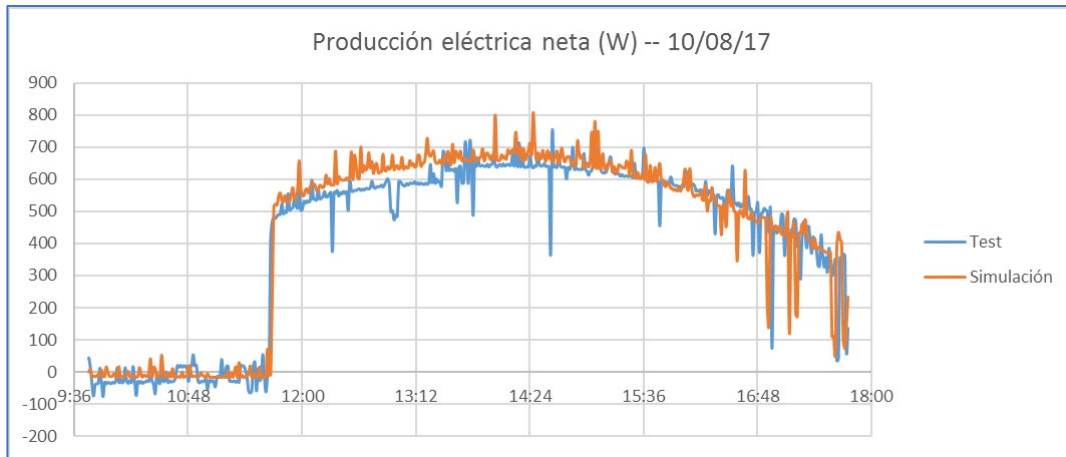


Figura 31. Producción eléctrica neta (10 de agosto).

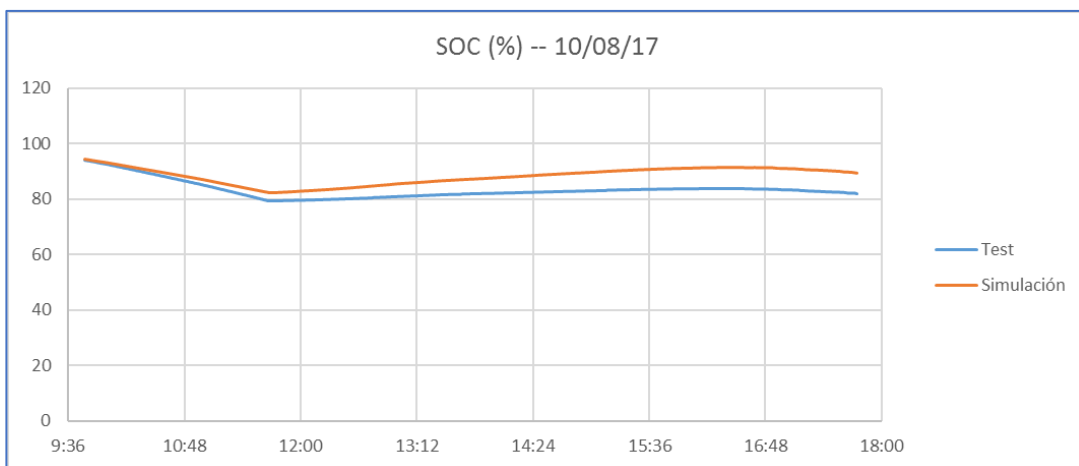


Figura 32. Estado de carga de las baterías (10 de agosto).

Variable	Error (%)	Media		Desv. Típica	
		Exp.	Sim.	Exp.	Sim.
Temperatura entrada evaporador	4,55	44,39	43,91	20,63	21,70
Producción MD	9,19	5,53	6,03	0,426	0,334
Producción eléctrica neta	36,58	420,26	439,16	261,32	272,47
SOC Baterías	6,00	83,35	88,30	3,24	2,98

Tabla 7. Comparación estadística de la operación de la planta (10 de agosto).

4.4. 2 de octubre de 2017

Los últimos dos días analizados presentan unas condiciones ambientales complicadas, con una radiación solar incidente variable debido a la presencia de nubosidad. Además, en el caso de la jornada de pruebas del 2 de octubre los datos recogidos tan sólo muestran el comportamiento de la planta desde las 13:00 hasta las 17:00. Como se puede observar en la Figura 33, se trata de un día muy caluroso en el que la temperatura apenas desciende de los 30°C. También la velocidad del viento supera en ciertos momentos el valor necesario para que la turbina eólica pueda generar electricidad.

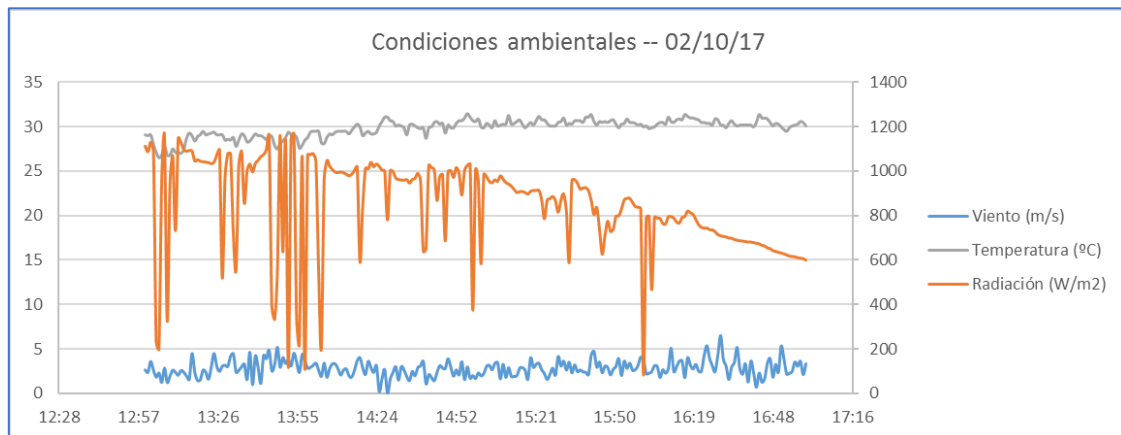


Figura 33. Condiciones ambientales durante las pruebas del 2 de octubre.

A pesar de que la radiación que alcanza los paneles desciende bruscamente en algunos instantes, el sistema térmico de la planta consigue mantenerse activo de forma continuada. El seguimiento que hace el modelo teórico de la temperatura del agua salada en el evaporador se acerca mucho a las mediciones experimentales, por lo que la producción de agua dulce en el equipo de la MD también es similar. En el gráfico de la Figura 34 se aprecia que en las últimas horas del periodo de pruebas el error cometido por el modelo teórico es algo mayor. Algo parecido ocurre con la evolución de la temperatura del evaporador, así que se puede observar claramente lo sensible que son los cálculos de la red neuronal con respecto a este parámetro. El efecto que tiene la modificación de algunos aspectos del modelo en TRNSYS se trata con más detalle en el *Anexo D: Análisis de sensibilidad*.

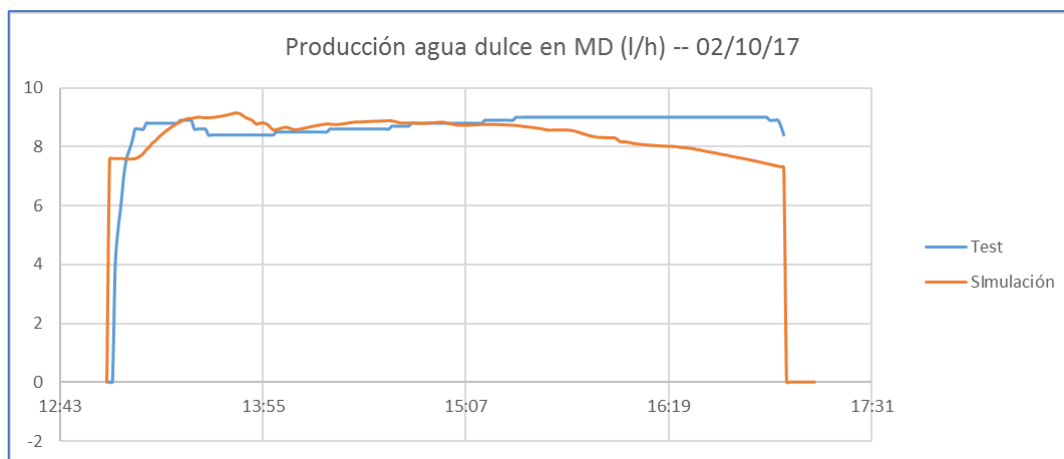


Figura 34. Producción de agua dulce en el sistema MD (2 de octubre).

La simulación del sistema eléctrico (Figuras 35 y 36) muestra unos resultados muy cercanos a los tomados en las pruebas experimentales. En este caso, la batería se mantiene completamente cargada a lo largo de toda la jornada. En la Tabla 8 se resumen la comparación entre los resultados teóricos y los reales.

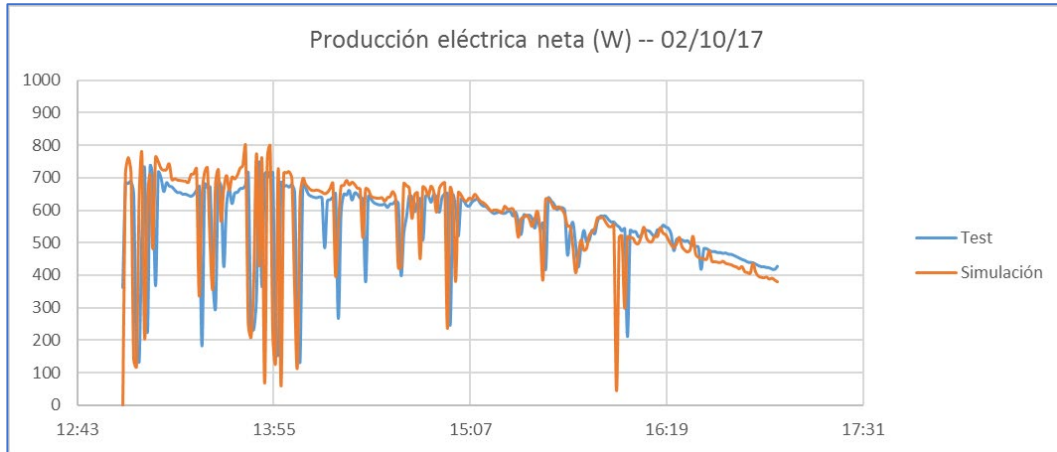


Figura 35. Producción eléctrica neta (2 de octubre).

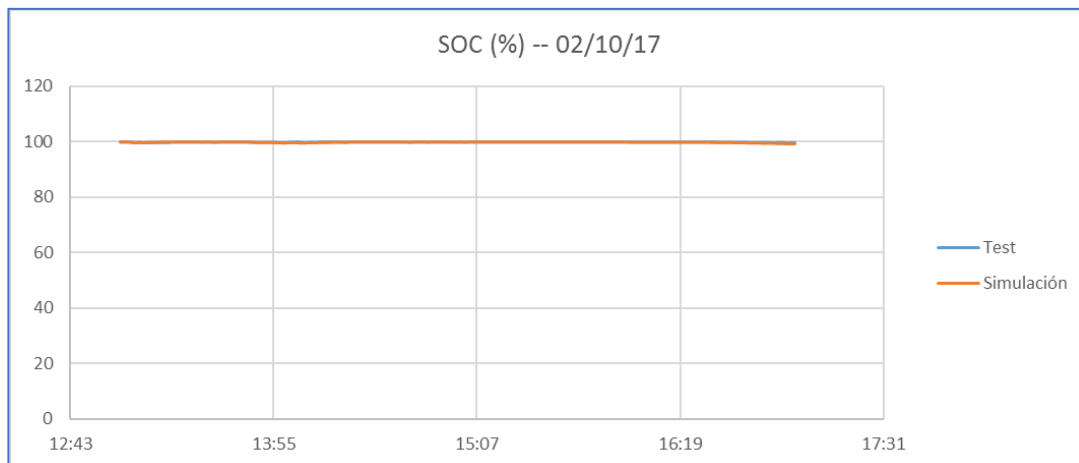


Figura 36. Estado de carga de las baterías (2 de octubre).

Variable	Error (%)	Media		Desv. Típica	
		Exp.	Sim.	Exp.	Sim.
Temperatura entrada evaporador	2,25	67,04	67,74	0,64	1,32
Producción MD	5,95	8,79	8,48	0,22	0,47
Producción eléctrica neta	20,61	559,08	561,89	114,65	137,61
SOC Baterías	0,09	99,95	99,88	0,10	0,18

Tabla 8. Comparación estadística de la operación de la planta (2 de octubre).

4.5. 6 de marzo de 2018

Las pruebas de la planta piloto llevadas a cabo durante el segundo día conflictivo abarcan un periodo de tiempo más extenso. Sin embargo, las condiciones ambientales son bastante más inestables. La nubosidad presente en esta jornada impide que la radiación solar alcance los colectores durante la mayor parte del tiempo. La temperatura exterior también varía mucho a lo largo del día y el viento es más fuerte y racheado (ver Figura 37).

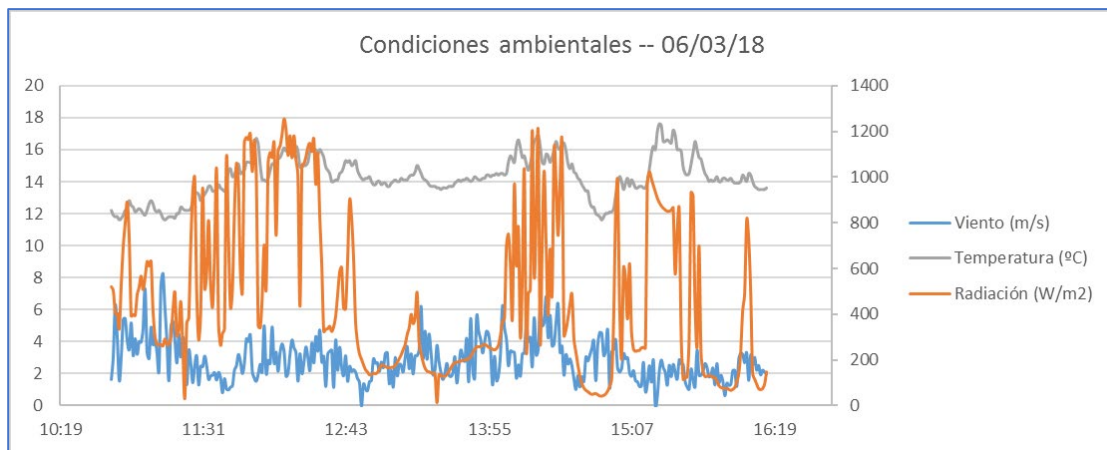


Figura 37. Condiciones ambientales durante las pruebas del 6 de marzo.

La escasa radiación solar provoca que todo el sistema térmico de la planta no consiga operar de forma continuada, de modo que la temperatura del agua no se eleva y los equipos de desalinización de la MD no se activan en ningún momento. Por lo tanto, la producción de agua dulce se limita a la obtenida en el sistema de ósmosis inversa. En la Figura 38 se puede observar como el comportamiento del modelo teórico es muy inestable. La simulación en TRNSYS se encuentra con una situación en la que trata de activar las bombas del circuito solar, pero no alcanza la temperatura suficiente y eso conlleva este estado de ajuste casi ininterrumpido.

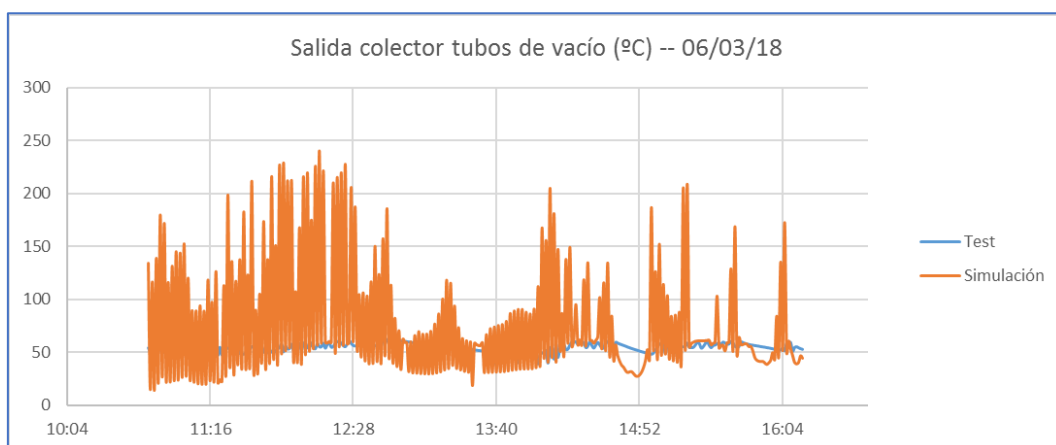


Figura 38. Temperatura del fluido a la salida de los colectores (6 de marzo).

La simulación del sistema eléctrico no presenta tantos problemas. Como la producción de los paneles híbridos es un valor instantáneo que depende de la radiación incidente en ese momento, la evolución es similar a la registrada en las pruebas experimentales. Del mismo modo ocurre con la operación de la turbina eólica y la velocidad del viento (Figura 39).

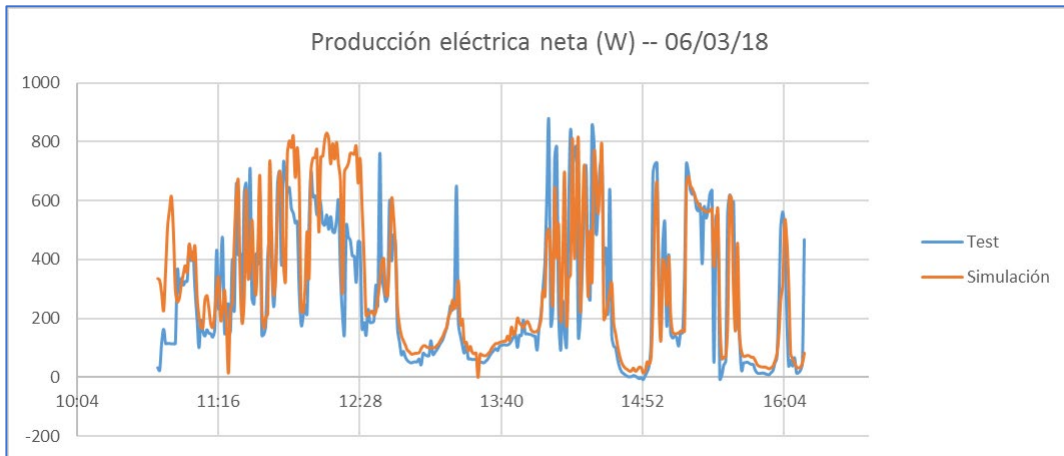


Figura 39. Producción eléctrica neta (6 de marzo).

El estado de carga de las baterías simulado también es muy similar al experimental. Tan sólo se aprecia una diferencia notable en las últimas horas del día, pero aparentemente el responsable del error es un problema en los instrumentos de medida de la planta. En la Figura 40 se puede comprobar como en torno a las 15:00 el valor experimental sufre un salto casi instantáneo.

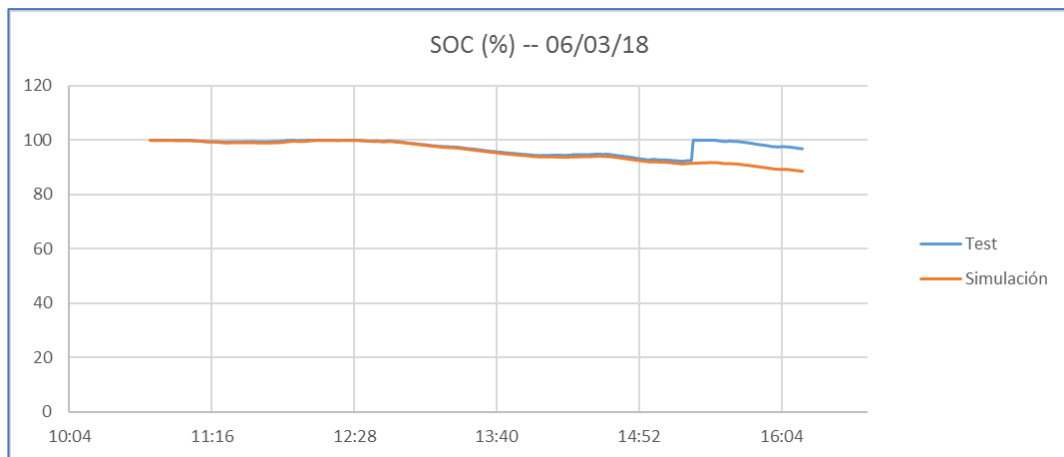


Figura 40. Estado de carga de las baterías (6 de marzo).

Con la muestra de los resultados obtenidos para el día 6 de marzo de 2017 concluye la exposición de la simulación del modelo teórico. En el siguiente capítulo se va a realizar una discusión sobre el comportamiento y utilidad del modelo desarrollado y se van a comentar los resultados obtenidos. Este proceso de reflexión es clave para estudiar la validación de la propuesta.

5. DISCUSIÓN Y VALIDACIÓN

Una vez finalizado el proceso de simulación y comparación de resultados, es el momento de analizar la validez del modelo teórico desarrollado. A la hora de plantear este trabajo dentro del amplio proyecto de la instalación de trigeneración, el objetivo principal era la reproducción del esquema de operación de la planta piloto en un programa informático. El modelo propuesto en TRNSYS tenía que ser capaz de mostrar un comportamiento similar al de los equipos de pruebas.

Para poder afirmar que el modelo cumple con su cometido, se ha tenido que estudiar su funcionamiento ante diferentes consignas y condiciones de trabajo. Para ello, se han tomado los datos medidos durante cinco jornadas de pruebas diferentes. Como se puede comprobar en el capítulo anterior, los días analizados presentan distintas características. Por un lado, se cuenta con pruebas llevadas a cabo en jornadas calurosas y con un cielo completamente despejado; mientras que otros test han sido realizados en días con condiciones ambientales mucho más inestables. La velocidad del viento, el estado inicial de los subsistemas de la planta o el momento de activación de algunos equipos también son aspectos que varían entre una prueba y otra.

La comparación entre los resultados teóricos y experimentales se ha llevado a cabo tanto gráfica como numéricamente. Este doble análisis ayuda a obtener conclusiones y a comprobar si las modificaciones realizadas entre una simulación y otra consiguen mejorar el modelo. Calcular el error medio de los datos de la simulación con respecto a los registrados en las pruebas reales resulta de gran utilidad en el proceso de optimización. No obstante, en algunas situaciones no es un parámetro que se deba tener muy en cuenta. Por ejemplo, hay factores que varían mucho de un instante para otro. Si los cálculos de la simulación en TRNSYS no coinciden completamente en el tiempo con los datos de los instrumentos de medida, puede ser que exista un pequeño desfase entre ellos y que, a la hora de calcular el error, este valor sea muy elevado. Además, se ha detectado otra posible situación en la que el valor del error cometido resulta mucho más exagerado que la diferencia real. Cuando se calcula la producción neta de energía eléctrica, se realiza una suma de corrientes (entrada desde los equipos de generación, desvío a baterías, consumos...) que puede dar lugar a valores positivos o negativos. Si, por ejemplo, en cierto momento la medición experimental muestra un valor cercano a cero, pero el resultado teórico se sitúa 20 o 30 puntos por encima, la diferencia no es muy grande y sin embargo el valor del error es enorme. Por estas razones, observar la evolución de la variable en cuestión gráficamente o incluso comparar el valor de sus medias y desviaciones típicas puede ayudar a obtener mejores conclusiones.

Otro aspecto muy importante es la definición de los parámetros a los que se da mayor prioridad en el proceso de comparación y análisis. Como se ha comentado a la hora de exponer la metodología seguida, se ha intentado optimizar todo lo relacionado con los productos de la planta de trigeneración: agua caliente sanitaria, corriente eléctrica y agua desalinizada. En consecuencia, el modelo en TRNSYS se ha ido ajustando para que, en la simulación de variables como el estado de carga de las baterías, la generación de electricidad o la producción de agua dulce, se cometa el menor error posible. Los mayores problemas han surgido con la demanda de ACS. Este valor está definido de acuerdo con bases de datos existentes en las que se establecen los consumos típicos para una vivienda unifamiliar. Al tratarse de una instalación en la que la mayor parte del agua caliente generada se deriva al

intercambiador de calor del subsistema de la MD, la planta de pruebas es capaz de extraer de manera instantánea todo el caudal de agua necesario para satisfacer la demanda de un periodo de aproximadamente una hora. Sin embargo, al introducir este mismo perfil de consumo en el modelo teórico, TRNSYS intenta seguirlo de manera fiel a lo largo del tiempo. En consecuencia, al representar el caudal de ACS se encuentran grandes picos experimentales repartidos cada cierto intervalo de tiempo y un pequeño valor constante correspondiente a la simulación, que varía de acuerdo con la evolución de la demanda.

El modelo diseñado cuenta con algunas otras limitaciones. Tal y como está planteado, la temperatura del agua acumulada en el tanque al inicio de la simulación es un factor clave en la obtención de los resultados. Lamentablemente, se trata de un parámetro que no está claramente determinado en las mediciones de las pruebas experimentales y que, por tanto, hay que ajustar mediante la repetición de los cálculos. También existen varios errores en la definición de las características internas de algunos *types*, los cuales han sido posteriormente corregidos. Al contar con datos minutares, no ha sido posible estudiar si cambiando el intervalo de cálculo de TRNSYS se podría haber mejorado la oscilación que ocurre en los momentos de activación o pausa de las bombas de impulsión. En los anexos se aporta información más detallada sobre esta y otras cuestiones y problemas surgidos durante el trabajo con el modelo teórico.

Con respecto al sistema eléctrico, la comparación del comportamiento teórico y experimental muestra que la producción alcanza siempre valores algo superiores en los resultados de la simulación. Se desconoce la razón exacta de porqué sucede esto, pero se cree que puede estar relacionado con la ausencia de una caracterización del rendimiento del seguidor de máxima potencia y de algún otro elemento asociado al sistema fotovoltaico de los paneles híbridos. A partir de las gráficas de cualquiera de los días analizados, se puede ver como la diferencia se maximiza en los momentos centrales del día, cuando la radiación solar incidente es mayor.

En resumen, en base a los resultados se puede afirmar que el modelo teórico reproduce de una manera más que acertada el sistema eléctrico. Tanto la producción neta como el estado de las baterías presentan valores muy cercanos a los medidos experimentalmente. En cuanto a la desalinización de agua, el comportamiento del modelo también se considera correcto. La cantidad de agua dulce obtenida en el equipo de ósmosis inversa es un valor directo y en el que no puede existir error, mientras que el caudal generado en el sistema MD se calcula a partir de tres variables. Aunque las limitaciones de la red neuronal provocan una diferencia en los resultados en algunos casos, el comportamiento de estas tres variables sí se reproduce de manera casi exacta y, por tanto, se puede aceptar su validez. No obstante, el sistema de agua caliente presenta mayores problemas. La demanda de ACS se satisface de distinta forma en el modelo teórico y en las pruebas experimentales. Además, los niveles de temperatura en el circuito de captación solar también presentan un error elevado en comparación con el funcionamiento de las otras zonas de la planta.

A pesar de todo este conjunto de problemas, desajustes e inconvenientes, se considera que el modelo aquí propuesto cumple con los objetivos marcados. Es capaz de reproducir los parámetros de operación de la planta, y puede ser también utilizado para simular situaciones todavía desconocidas. Se ha trabajado con el modelo en TRNSYS ante diferentes condiciones ambientales y datos de entrada, y los resultados siguen una evolución similar a los tomados durante las pruebas experimentales. Es cierto que en algunas de las variables analizadas se comete un error más grande que en otras, pero las relacionadas con los

productos finales de la planta se comportan de una manera muy parecida tanto en el modelo teórico como en las pruebas reales. También es importante comentar la dependencia que existe con respecto a otros factores como la red neuronal, la cual no es fiable para valores fuera de los rangos estudiados.

Para dar validez a este diseño, se da especial importancia a las representaciones gráficas de los resultados. Comprobar que el perfil dibujado, la evolución de una variable simulada es prácticamente igual a la registrada en las pruebas experimentales es un buen síntoma. No se ha buscado una perfección en la comparación de los datos, sino que el objetivo marcado desde un primer momento ha sido el de encontrar un modelo que consiga reproducir la operación de la planta en cualquier estado y ante cualquier situación. De todos modos, la principal razón para huir de la optimización máxima es incertidumbre de los instrumentos de medida presentes en la planta piloto. Como suele ocurrir en multitud de casos, existen elementos que se conoce que trabajan correctamente y que muestran unos datos sin apenas error con respecto al valor real; pero otros no merecen tanta confianza.

Por lo tanto, en base al estudio comparativo de los resultados de la simulación del modelo teórico construido en TRNSYS, se da el visto bueno a su validación. No obstante, la propuesta es claramente mejorable y quedan abiertas muchas líneas de trabajo para seguir optimizando el diseño. Una posibilidad es el estudio y ajuste de la producción eléctrica en los paneles solares híbridos. También se podría trabajar en un análisis detallado de algunas características de los equipos desconocidas, como el coeficiente de intercambio de calor de los sistemas de la desalinización por destilación con membranas. La reducción de las limitaciones de cálculo de la red neuronal son otra propuesta interesante. Y, por supuesto, en el caso de mejorar la precisión de la simulación del modelo, se podrían llevar a cabo análisis estadísticos de mayor nivel para comparar los datos teóricos y experimentales y poder así seleccionar los ajustes más adecuados.

6. CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo, se ha llevado a cabo el diseño y validación de un modelo teórico de una planta de trigeneración híbrida, dimensionada para satisfacer las necesidades energéticas de una vivienda unifamiliar aislada. Las tareas realizadas forman parte de un proyecto mucho más amplio relacionado con la planta piloto, ubicada en las instalaciones del Campus Río Ebro de la Universidad de Zaragoza. El objetivo principal del trabajo es la construcción de un esquema de la planta en un programa informático y la búsqueda de una propuesta que se pueda validar a partir de los resultados de las pruebas experimentales.

Las labores de investigación han comenzado por la recopilación de un conjunto de documentos y artículos sobre la planta de trigeneración y la recepción de los datos relativos a las pruebas experimentales realizadas previamente. Una vez conocido el funcionamiento de la instalación, se ha llevado a cabo la construcción de una primera versión del modelo teórico. Para ello se ha trabajado con el software TRNSYSv17. Este programa ha permitido no sólo el desarrollo del esquema de la planta sino también la simulación de su funcionamiento. El proceso de validación del modelo ha comenzado por la comparación de los resultados experimentales y de los calculados por TRNSYS. Trabajando con varias jornadas de pruebas que presentaban diferentes condiciones, y ajustando el modelo en función del comportamiento del sistema para cada periodo, se ha modificado la propuesta inicial hasta encontrar un diseño que cumpliera con los requisitos establecidos.

Gran parte de los esfuerzos dedicados a este trabajo se han dedicado a la repetición de las simulaciones para comprobar la mejora de los resultados tras haber modificado algún aspecto del modelo. Especialmente costosa ha sido la definición de algunos parámetros inicialmente desconocidos. También ha resultado complicada la construcción del primer modelo, debido a la complejidad del esquema de la planta y a la existencia de numerosos errores que impedían el inicio del procedimiento de simulación en el programa. Una vez solucionados estos fallos, el trabajo ha avanzado mucho más rápido.

Debido a la falta de confianza en algunos de los datos recogidos en las pruebas experimentales de la planta piloto, al estudio de días con características muy diferentes y a las propias limitaciones con las que se contaba a la hora de desarrollar el modelo teórico, se le ha dado una mayor importancia a la comparación gráfica de los resultados y, por el contrario, el análisis estadístico realizado no ha sido de gran profundidad. La validación del modelo se ha basado en comprobar que la evolución de las variables seleccionadas seguía un mismo patrón tanto experimental como teóricamente. Estos valores considerados de mayor importancia son los relacionados con los tres productos obtenidos en la planta: agua caliente sanitaria, energía eléctrica y agua desalinizada. A pesar de que los resultados de este trabajo se consideran un éxito, existe la posibilidad de seguir mejorando el modelo aquí propuesto si se continúan las labores de investigación de este amplio proyecto.

Personalmente, la posibilidad de aportar mi granito de arena a un proyecto de mayor envergadura me ha parecido una oportunidad fantástica. También agradezco el hecho de haber trabajado con un software que durante el recorrido del Máster me resultó interesante, pero del que se dispuso durante un tiempo reducido para conocerlo. Confío en haber aprovechado adecuadamente todo el trabajo anterior y en que mis avances sirvan para investigaciones futuras.

BIBLIOGRAFÍA

Referencias bibliográficas:

- [1] **Brandoni, C., Bosnjakovic, B. (2017)**. HOMER analysis of the water and renewable energy nexus for water-stressed urban areas in Sub-Saharan Africa. *Journal of Cleaner Production*. Volumen 155, 1. (pp. 105-118).
- [2] **Barrero, A. (21 de junio de 2018)**. La fotovoltaica crecerá en Europa un 45% en 2018 y un 58% en 2019. *Energías Renovables*. Recuperado el 8 de enero de 2019 en <https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/la-fotovoltaica-crecera-en-europa-un-45-20180621>
- [3] **Instituto de Energía Solar (2017)**. Gráficos significativos energía solar fotovoltaica (actualización enero 2017). *Universidad Politécnica de Madrid*. Recuperado el 8 de enero de 2019 en <http://www.ies.upm.es/sfs/IES/IES-UPM/Portada>
- [4] **Modi, A., Bühler, F., Andreasen, J.G, Haglind, F. (2017)**. A review of solar energy based heat and power generation systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volumen 67, 1. (pp. 1047-1064).
- [5] **Kalogirou, S.A., (2005)**. Seawater desalination using renewable energy sources. *Progress in Energy and Combustion Science*. Volumen 31 (pp. 242–281).
- [6] **Bakic, V.; Pezo, M.; Stevanovic, Z.; et al. (2012)**. Dynamical simulation of PV/wind hybrid energy conversion system. *Energy*. Volumen 45, (pp. 324-328).
- [7] **Huang, Q.; Shi, Y.; Wang, Y.; et al. (2015)**. Multi-turbine wind-solar hybrid system. *Renewable Energy*. Volumen 76, (pp. 401-407).
- [8] **Acevedo, L.; Uche, J.; Del Amo, A.; et al. (2016)**. Dynamic simulation of a trigeneration scheme for domestic purposes based on hybrid techniques. *Energies*. Volumen 9, 12.
- [9] **Joshi, S; Dhoble, A. (2018)**. Photovoltaic -Thermal systems (PVT): Technology review and future trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volumen 92, (pp. 848-882).
- [10] **Astea, N.; Leonforte, F.; Pero, C. (2015)** Design, modeling and performance monitoring of a photovoltaic-thermal (PVT) water collector. *Solar Energy*. Volumen 112, (pp. 85–99).
- [11] **Buonomano, A.; Calise, F.; Vicidomini, M. (2016)** Design, simulation and experimental investigation of a solar system based on PV panels and PVT collectors. *Energies*. Volumen 9, (p 497).
- [12] **Sabiha, M.A; Saidur, R; Mekhilef, S; Mahian, O. (2015)**. Progress and latest developments of evacuated tube solar collectors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volumen 51, (pp. 1038-1054).
- [13] **Martínez, A.; Del Amo, A. (2016)**. *Instalaciones solares térmicas de baja temperatura*. España. Prensas de la Universidad de Zaragoza.

- [14] **Página web de Carbotecnia.** Ósmosis inversa. Recuperado el 8 de enero de 2019 en <https://www.carbotecnia.info/encyclopedia/que-es-la-osmosis-inversa/>
- [15] **Página web de Condorchem Envitech.** Destilación por membranas para tratar aguas residuales. Recuperado el 8 de enero de 2019 en <https://blog.condorchem.com/destilacion-por-membranas/>
- [16] **Uche, J.; Acevedo, L; Círez, F; et al. (2018).** Analysis of a domestic trigeneration scheme with hybrid renewable energy sources and desalting techniques. *Journal of Cleaner Production*. Volumen 212, (pp. 1409-1422).
- [17] **Acevedo, L; Uche, J; Del Amo, A. (2018).** Improving the distillate prediction of a membrane distillation unit in a trigeneration scheme by using artificial neural networks. *Water*. Volumen 10, (pp. 310-).
- [18] **Usón, S; Uche, J; Martínez, A; et al. (2019).** Exergy assessment and exergy cost analysis of a renewable-based and hybrid trigeneration scheme for domestic water and energy supply. *Energy*. Volumen 168, (pp. 662-683).
- [19] **Bermúdez, J. (2014).** Optimización ambiental y de la operación de una planta híbrida de producción de electricidad, calor y agua desalinizada. *Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza*. Trabajo Fin de Máster.
- [20] **Carrillo, H. (2016).** Modelado y análisis de diseño de una planta de desalación mediante destilación por membrana alimentada por energía solar. *Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza*. Trabajo Fin de Máster.
- [21] **Martínez, L. (2012).** Hibridación de energías renovables y desalación. *Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza*. Trabajo Fin de Máster.
- [22] **Jiménez, A. (2016).** Análisis exergético y termoeconómico de una planta de poligeneración alimentada con fuentes renovables. *Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza*. Trabajo Fin de Máster.
- [23] **Schenker Dissalatori Watermakers (2016).** Operation and Maintenance Manual for Modular 30 Electron. Italia.
- [24] **Página web de la empresa Osmofilter.** Membranas industriales. Recuperado el 9 de enero de 2019 en http://www.osmofilter.com/es/industrial_membranas
- [25] **Khayet, M. (2011).** Membranes and theoretical modelling of membrane distillation: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*. Volumen 164. (pp. 56-88).
- [26] **Winter, D; Koschikowski, J; Ripperger, S. (2012).** Desalination using membrane distillation: Flux enhancement by feed water deaeration on spiral-wound modules. *Journal of Membrane Science*. Volumen 423-424. (pp. 215-224).
- [27] **Mahmoudi, F; Sidiiquei, H; Pishbin, M; et al. (2017).** Sustainable seawater desalination by permeate gap membrane distillation technology. *Energy Procedia*. Volumen 150. (pp. 346-351).

- [28] **Orfi, J; Oussif, N; Davies, P. (2016)**. Heat and mass transfer in membrane distillation used for desalination with slip flow. *Desalination*. Volumen 381. (pp. 135-142).
- [29] **Página web de la empresa Trnsys** What is TRNSYS?. Recuperado el 10 de enero de 2019 en <http://www.trnsys.com/>
- [30] **Página web de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura**. Validación de los modelos de relación dosis-respuesta. Recuperado el 11 de enero de 2019 en <http://www.fao.org/docrep/009/y4666s/y4666s0c.htm>

Otra bibliografía consultada:

Ahmadi, P; Dincer, I; Rosen M.A. (2014). Multi-objective optimization of a novel solar-based multigeneration energy system. *Solar Energy*. Volumen 108. (pp. 576-591).

Calise, F; Dentice d'Accadia, M; Piacentino, A. (2014). A novel solar trigeneration system integrating PVT (photovoltaic/thermal collectors) and SW (seawater) desalination: Dynamic simulation and economic assessment. *Energy*. Volumen 67. (pp. 129-148).

Calise, F; Dentice d'Accadia, M; Piacentino, A. (2015). Thermo-economic optimization of a renewable polygeneration system serving a small isolated community. *Energies*. Volumen 8. (pp. 995-1024).

Del Amo, A; Martínez, A; Bayod, A; Antoñanzas, J. (2017). An innovative urban energy system constituted by a photovoltaic/thermal hybrid solar installation: Design, simulation and monitoring. *Applied energy*. Volumen 186, 2. (pp. 140-151).

Di Selva, Emanuele. (2018). Dynamic modelling and experimental analysis of a tri-generation plant for the production of electric, thermal energy and desalinated water located in Zaragoza (Spain). *Escuela de Ingeniería, Universidad Federico II de Nápoles*. Tesis Doctoral.

Jaramillo, O. (2007). Intercambiadores de calor. *Centro de Investigación en Energía, Universidad Autónoma de México*.

Katsaprakakis, D. (2016). Hybrid power plants in non-interconnected insular systems. *Applied energy*. Volumen 164. (pp. 268-283).

Mohan, G; Uday, K; Manoj, K; Martin, A. (2016). Experimental investigation of a novel solar thermal polygeneration plant in United Arab Emirates. *Renewable Energy*. Volumen 91. (pp. 361-373).

Rym, C; Dhaouadi, H; Mhiri, K; Bournit, P.A. (2010). TRNSYS dynamic simulation model for photovoltaic system powering a reverse osmosis desalination unit with solar energy. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*. Volumen 8. (pp. 1-13).