

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE  
ESCUELA POLITÉCNICA DE ELCHE  
GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA



"MODELIZACIÓN DE UN SISTEMA DE  
REFRIGERACIÓN SOLAR BASADO EN  
CHIMENEA SOLAR FOTOVOLTAICA  
EVAPORATIVA"

TRABAJO FIN DE GRADO

Septiembre-2022

AUTOR: Francisco José Mallebrera Quesada

DIRECTOR: Javier Ruiz Ramírez



## AGRADECIMIENTOS

Querría dar las gracias a mi tutor, Javier Ruiz Ramírez, por ayudarme durante los 7 meses y medio que ha durado este proyecto. Estoy muy agradecido por toda la atención y apoyo que me ha dado durante este periodo, y sobre todo por darme la oportunidad y confiar en mi para poder realizar este trabajo.





## ÍNDICE GENERAL

<b>Capítulo 1. Introducción, antecedentes y objetivos .....</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción.....	1
1.1.1. Eficiencia energética en edificios .....	1
1.1.2. Situación geopolítica .....	3
1.1.3. Refrigeración solar .....	4
1.1.3.1. Energía solar fotovoltaica .....	5
1.1.4. Temperatura del panel solar .....	9
1.1.5. Chimenea solar fotovoltaica evaporativa.....	12
1.1.5.1. Funcionamiento del sistema.....	12
1.2. Antecedentes.....	14
1.3. Objeto del proyecto .....	18
<b>Capítulo 2. Metodología .....</b>	<b>19</b>
2.1. Introducción.....	19
2.2. Sistema de refrigeración solar.....	19
2.2.1. Elementos de la estructura de apoyo.....	19
2.2.2. Orientación e inclinación de los paneles solares.....	20
2.2.3. Componentes del sistema .....	22
2.2.3.1. Circuito de calor .....	23
2.2.3.1.1. Caudalímetro.....	24
2.2.3.1.2. Llave de paso.....	24
2.2.3.1.3. Válvula de equilibrio.....	25
2.2.3.1.4. Sensor de temperaturas RTD.....	25
2.2.3.1.5. Anemómetro de película caliente .....	26
2.2.3.1.6. Termohigrómetro .....	26
2.2.3.1.7. Piranómetro .....	27
2.2.3.1.8. Anemómetro de veleta .....	28

2.2.3.1.9. Rociadores .....	28
2.2.3.1.10. Panel solar y termopares .....	29
2.2.3.1.10.1. Panel solar .....	29
2.2.3.1.10.2. Termopares.....	33
2.2.3.1.11. Corcho .....	34
2.2.3.1.12. Válvula de obturación .....	34
2.2.3.1.13. Depósito de agua .....	35
2.2.3.1.14. Contador .....	35
2.2.3.1.15. Bomba hidráulica y filtro de asiento .....	36
2.2.3.1.15.1. Bomba hidráulica.....	36
2.2.3.1.15.2. Filtro de asiento.....	36
2.2.3.1.16. Válvula antirretorno.....	37
2.2.3.1.17. Inversor de corriente .....	38
2.2.3.2. Bomba de calor.....	39
2.2.3.3. Circuito de frío.....	41
2.2.3.3.1. Calentador.....	42
2.2.3.3.2. Válvula de obturación.....	42
2.2.3.3.3. Vaso de expansión.....	43
2.2.3.3.4. Resistencia eléctrica .....	43
2.2.3.3.5. Filtro de asiento.....	44
2.2.3.3.6. Bomba hidráulica.....	44
2.2.3.3.7. Válvula de equilibrio.....	45
2.2.3.3.8. Caudalímetro.....	45
2.2.3.3.8. Sensor de temperatura RTD.....	45
2.2.3.4. Sistema eléctrico .....	45
2.2.3.4.1. Esquema eléctrico.....	45
2.2.3.4.2. Resistencia disipadora.....	46
2.2.3.4.3. Inhibidor de corriente .....	47
2.2.3.4.4. Armario de sensorización .....	47
2.2.3.4.5. Caja general de protección .....	48
2.2.3.4.6. Caja de interruptores.....	51
2.3. Subsistemas de la instalación .....	52

2.4. Transmisión de calor .....	53
2.4.1. Convección.....	53
2.4.2. Conducción .....	54
2.4.3. Radiación.....	55
2.5. Panel solar fotovoltaico.....	53
2.5.1. Coeficientes de convección del sistema .....	57
2.5.1.1. Velocidad del viento interior.....	59
2.5.2. Rendimiento del panel fotovoltaico .....	60
2.5.2.1. Coeficiente de radiación solar .....	63
2.5.3. Radiación atmosférica.....	64
2.5.4. Óptica del panel fotovoltaico .....	65
2.5.5. Análisis térmico y eléctrico del panel .....	70
2.6. Chimenea solar fotovoltaica evaporativa .....	73
2.6.1. Zona evaporativa .....	74
2.6.1.1. Número de Merkel .....	74
2.7. Enfriadora .....	76
2.7.1. EER de la enfriadora.....	76
2.8. Bomba hidráulica.....	83
2.8.1. Curva de la instalación .....	83
2.8.2. Curva de la bomba hidráulica .....	86
2.8.3. Análisis dimensional .....	89
2.9. Procedimiento de cálculo .....	91
2.9.1. Chimenea solar fotovoltaica evaporativa.....	91
2.9.2. Enfriadora .....	95
2.9.3. Interacción entre modelos.....	97
<b>Capítulo 3. Resultados.....</b>	<b>99</b>
3.1. Introducción.....	99

3.2. Panel solar fotovoltaico.....	99
3.2.1. Errores modelización.....	100
3.3. Chimenea solar fotovoltaica evaporativa .....	103
3.4. Enfriadora .....	105
3.4.1. Expresión EER .....	105
3.5. Bomba hidráulica.....	108
3.6. Interfaz gráfica.....	109
3.7. Estudio de optimización.....	116
3.7.1. Datos climatológicos.....	117
3.7.2. $EER_{grid}$ .....	121
3.7.3. Resultados.....	122
3.8. Análisis de influencia.....	126
3.8.1. Resultados.....	129
3.9. Conclusiones .....	145
<b>Capítulo 4. Conclusiones.....</b>	<b>145</b>
<b>Capítulo 5. Bibliografía .....</b>	<b>149</b>

## ÍNDICE DE IMÁGENES

### Capítulo 1. Introducción, antecedentes y objetivos

#### 1.1. Introducción

Imagen 1.1: Evolución de hogares

Imagen 1.2: Aleros

Imagen 1.3: Energías renovables

Imagen 1.4: Aire acondicionado

Imagen 1.5: Gas natural en UE

Imagen 1.6: Normativa ACS

Imagen 1.7: Tipos de refrigeración solar

Imagen 1.8: Generación electricidad septiembre

Imagen 1.9: Generación electricidad enero

Imagen 1.10: Incremento en 2022

Imagen 1.11: Evolución mundial del precio medio de sistemas fotovoltaicos

Imagen 1.12: Reparto subvenciones autoconsumo 2021

Imagen 1.13: Ubicación instalación en edificio Torrepinet

Imagen 1.14: Funcionamiento del sistema

### Capítulo 2. Metodología

#### 2.2. Sistema de refrigeración solar

Imagen 2.1: Estructura de apoyo de los paneles

Imagen 2.2: Perfil de la estructura con inclinación de 45°

Imagen 2.3: Apartados del sistema de refrigeración solar

Imagen 2.4: Caudalímetro del circuito de calor

Imagen 2.5: Llave de paso

Imagen 2.6: Válvula de equilibrio circuito de calor

Imagen 2.7: Sensores de temperatura en la instalación; entrada y salida de chimenea

Imagen 2.8: Anemómetro de película caliente

Imagen 2.9: Termohigrómetro exterior del circuito de calor

Imagen 2.10: Piranómetro situado en la parte superior de los paneles

Imagen 2.11: Anemómetro de veleta en la instalación

Imagen 2.12: Rociadores del sistema

Imagen 2.13: Capas del panel solar

Imagen 2.14: Funcionamiento panel solar

Imagen 2.15: Ficha técnica PEPV260

Imagen 2.16: Ficha técnica SR-P660255

Imagen 2.17: Termopares del panel

Imagen 2.18: Capas de corcho en el interior de la chimenea evaporativa

Imagen 2.19: Válvula de obturación situada en la aspiración de la bomba hidráulica

Imagen 2.20: Depósito de agua del sistema

Imagen 2.21: Sensor de boya del depósito

Imagen 2.22: Contador de pulsos del sistema

Imagen 2.23: Bomba hidráulica circuito de calor

Imagen 2.24: Especificaciones bomba hidráulica circuito de calor

Imagen 2.25: Filtro de asiento circuito de calor

Imagen 2.26: Válvula de antirretorno del circuito de calor

Imagen 2.27: Inversor de corriente de la instalación

Imagen 2.28: Ficha técnica inversor de corriente

Imagen 2.29: Bomba de calor no instalada

Imagen 2.30: Bomba de calor en la instalación

Imagen 2.31: Ficha técnica modelo bomba de calor

Imagen 2.32: Calentadores sin instalar

Imagen 2.33: Calentadores en la instalación

Imagen 2.34: Especificaciones pareja de calentadores

Imagen 2.35: Vaso de expansión instalado

Imagen 2.36: Resistencia eléctrica circuito de frío

Imagen 2.37: Accionamiento de la resistencia eléctrica

Imagen 2.38: Bomba hidráulica circuito de frío

Imagen 2.39: Esquema multifilar instalación

Imagen 2.40: Resistencia disipadora

Imagen 2.41: Inhibidor de corriente de la instalación

Imagen 2.42: Armario de sensorización

Imagen 2.43: Caja general de protección

Imagen 2.44: Caja de interruptores de la instalación

## 2.4. Transmisión de calor

Imagen 2.45: Transmisión por convección

Imagen 2.46: Transmisión por conducción

Imagen 2.47: Transmisión por radiación

Imagen 2.48: Ley de Kirchhoff

## 2.5. Panel solar fotovoltaico

Imagen 2.49: Convección en el panel

Imagen 2.50: Expresiones Francisco Javier Aguilar Valero

Imagen 2.51: Expresiones Víctor García García

Imagen 2.52: Expresiones rendimiento del panel

Imagen 2.53: Parámetros del rendimiento

Imagen 2.54: Valores del coeficiente de radiación solar

Imagen 2.55: Ley de Snell

Imagen 2.56: Índices de refracción del aire y del cristal frontal del panel

Imagen 2.57: Análisis térmico panel fotovoltaico

Imagen 2.58: Tipos de análisis térmicos

## 2.6. Chimenea solar fotovoltaica evaporativa

Imagen 2.59: Enfriamiento evaporativo

Imagen 2.60: Modelo de Poppe

## 2.7. Enfriadora

Imagen 2.61: Curve Fitting expresión bilineal

Imagen 2.62: Curve Fitting expresión bicuadrática

Imagen 2.63: Función Solver

## 2.9. Procedimiento de cálculo

Imagen 2.64: Interacción entre modelos

# Capítulo 3. Resultados

## 3.2. Panel solar fotovoltaico

Imagen 3.1: Resultados finales

Imagen 3.2: Gráfica de  $\dot{W}_1$

Imagen 3.3: Gráfica de  $\eta_c$

## 3.7. Estudio de optimización

Imagen 3.4: Caudal estudio de optimización

## 3.8. Análisis de influencia

Imagen 3.5: Datos análisis de influencia

Imagen 3.6: Influencia en  $\eta_c$

Imagen 3.7: Influencia en  $\dot{W}_1$

Imagen 3.8: Influencia en  $T_c$

Imagen 3.9: Influencia en  $T_{int}$

Imagen 3.10: Influencia en  $T_{w1}$

Imagen 3.11: Influencia en  $T_{w2}$

Imagen 3.12: Influencia en EER

Imagen 3.13: Influencia en  $Q_{1\text{!}\#\$\}$

Imagen 3.14: Influencia en  $\dot{W}_{\text{comp}}$

Imagen 3.15: Influencia en  $EER_{\text{solar}}$

Imagen 3.16: Influencia en  $EER_{\text{sistema}}$





## ÍNDICE DE TABLAS

### Capítulo 1. Introducción, antecedentes y objetivos

#### 1.1. Introducción

Tabla 1.1: Estudios en refrigeración de paneles solares

Tabla 1.2: Comparación entre técnicas de enfriamiento fotovoltaico

### Capítulo 2. Metodología

#### 2.2. Sistema de refrigeración solar

Tabla 2.1: Elementos de la estructura de apoyo de los paneles solares

Tabla 2.2: Componentes del circuito de calor

Tabla 2.3: Componentes del circuito de frío

Tabla 2.4: Componentes de la C.G.P

#### 2.3. Subsistemas de la instalación

Tabla 2.5: Subsistemas de la instalación

#### 2.4. Transmisión de calor

Tabla 2.6: Componentes de la convección

Tabla 2.7: Componentes de la conducción

Tabla 2.8: Componentes de la radiación

Tabla 2.9: Fenómenos de la radiación

#### 2.5. Panel solar fotovoltaico

Tabla 2.10: Parámetros coeficientes de convección

Tabla 2.11: Parámetros velocidad interior del aire

Tabla 2.12: Rendimiento del panel solar

Tabla 2.13: Radiación atmosférica

Tabla 2.14: Ley de Snell

Tabla 2.15: Ley de Fresnel

Tabla 2.16: Obtención transmitancia del cristal

Tabla 2.17: Análisis térmico del panel

Tabla 2.18: Potencia del panel

## 2.6. Chimenea solar fotovoltaica evaporativa

Tabla 2.19: Número de Me

## 2.7. Enfriadora

Tabla 2.20: EER de la enfriadora

Tabla 2.21: Función Regresión

Tabla 2.22: Expresiones con Curve Fitting

Tabla 2.23: Expresión bicuadrática

## 2.8. Bomba hidráulica

Tabla 2.24: Programa Epanet

Tabla 2.25: Curva de la instalación

Tabla 2.26: Curva Hm Bomba hidráulica

Tabla 2.27: Curva  $\eta$  Bomba hidráulica

Tabla 2.28: Consumo Bomba hidráulica

## 2.9. Interacción entre modelos

Tabla 2.29: Chimenea solar fotovoltaica evaporativa

Tabla 2.30: Sistema de ecuaciones modelo enfriadora

Tabla 2.31: Valores iniciales fsolve

Tabla 2.32:  $EER_{solar}$  y  $EER_{sistema}$

# Capítulo 3. Resultados

## 3.2. Panel solar fotovoltaico

Tabla 3.1: Rendimiento del panel fotovoltaico

Tabla 3.2: Error de la modelización

Tabla 3.3: Resultados de la modelización

## 3.3. Chimenea solar fotovoltaica evaporativa

Tabla 3.4: Resultados modelización chimenea

### 3.4. Enfriadora

Tabla 3.5: Ensayos enfriadora

Tabla 3.6: Expresiones EER

Tabla 3.7: Datos experimentales EER

Tabla 3.8: Errores expresión EER

### 3.5. Bomba hidráulica

Tabla 3.9: Errores validación bomba hidráulica

### 3.6. Interfaz gráfica

Tabla 3.10: Ventana ChimeneaSolar

Tabla 3.11: Subsistemas 1-2

Tabla 3.12: Subsistemas 3-4

Tabla 3.13: Ventana Otros

### 3.7 Estudio de optimización

Tabla 3.14: Influencia del caudal

Tabla 3.15: Día más caluroso

Tabla 3.16: Día normal

Tabla 3.17: Día medio

Tabla 3.18:  $EER_{grid}$

Tabla 3.19: Resultados optimización

Tabla 3.20: Resumen optimización

### 3.8. Análisis de influencia

Tabla 3.21: Permutaciones análisis influencia

Tabla 3.22: Estructura de resultados

Tabla 3.23: Diagramas de influencia

Tabla 3.24: Análisis de resultados de influencia



## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>ANEXO I. Código Matlab modelización final .....</b>	<b>153</b>
<b>ANEXO II. Código Matlab interfaz gráfica .....</b>	<b>175</b>
<b>ANEXO III. Matlab guide .....</b>	<b>224</b>





# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

## 1.1. INTRODUCCIÓN

Los edificios son el segundo sector con mayor consumo de energía final en la UE por detrás del sector automovilístico, y es responsable de más del 30% de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. De la totalidad de energía consumida en edificios de uso residencial, en torno al 48% proviene de sistemas de climatización. Si se tiene en cuenta además la energía consumida por estos sistemas en el sector industrial, la cifra se eleva aún más en la UE. Si a esto se le suma que estamos ante un sector que se encuentra en fase de expansión, que provocará un aumento del consumo de energía a menos que se planteen soluciones alternativas a las actuales. Por ello, la reducción del consumo de energía y el uso de energía procedente de fuentes renovables en el sector de la edificación, constituyen una parte importante de las medidas necesarias para reducir la dependencia energética de la UE, y las emisiones de gases de efecto invernadero.

Con el objetivo de aumentar el número de edificios que cumplan los requisitos mínimos de eficiencia energética actualmente vigentes y sean más eficientes energéticamente, al reducir tanto el consumo energético como las emisiones de CO<sub>2</sub>, la UE fijó 2020 como fecha límite para que todos los edificios fuesen de consumo de energía casi nulo.

### 1.1.1. EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDIFICIOS

Se ha mencionado anteriormente que el sector de la edificación se encuentra en una fase de expansión. Según expertos, en los próximos años se podrá ver un aumento de casos de personas viviendo solas en hogares, lo que supondrá una mayor ocupación de viviendas, y por consecuencia un mayor número de sistemas de climatización en uso, como se puede observar en la Imagen 1.1.

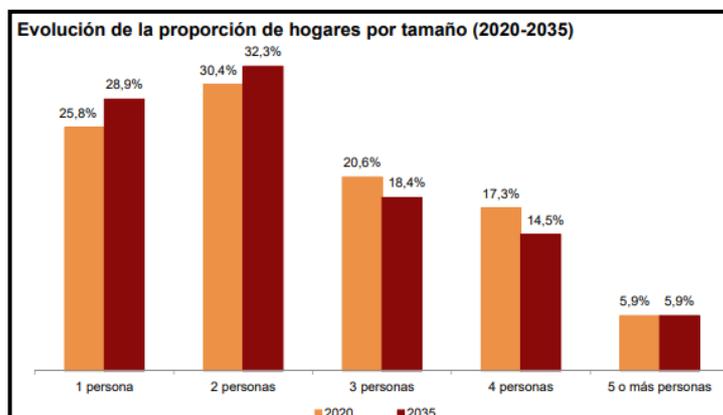


Imagen 1.1: Evolución de hogares

Actualmente, para mejorar la eficiencia energética de un edificio podemos optar, por ejemplo, por una reducción de la demanda energética de la edificación o una implementación de energías renovables, o una mejora en el rendimiento de los equipos de climatización. La primera solución trataría diferentes formas de actuación, como una mejora en las soluciones constructivas de la casa, donde se podría aumentar los espesores de aislamientos de elementos como la fachada, el suelo o la cubierta. También se podría mejorar la selección de las ventanas, con espesores mayores de vidrio, o con mayor número de capas del mismo. Otra opción sería el intentar incluir zonas amplias acristaladas, para aumentar la radiación solar incidente en la casa, acompañándolas de aleros diseñados de tal forma que generen sombra en la época de verano, y en momentos más fríos del año no impida la incidencia de los rayos solares. Estas opciones son conocidos como sistemas pasivos, y ayudan a mejorar el confort en la casa, y así reducir la necesidad de utilizar los sistemas de climatización en el hogar. La otra solución que habíamos comentado trataría en incluir energía procedente de fuentes renovables, producida in situ o en el entorno.

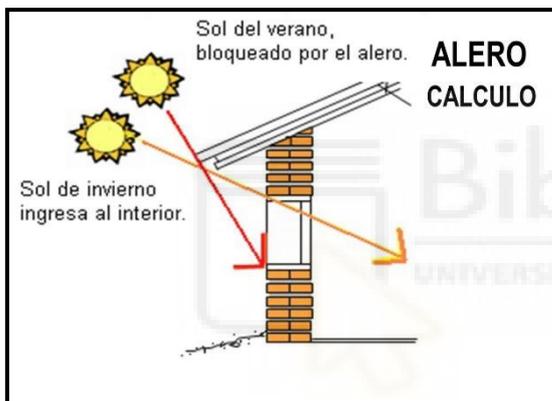


Imagen 1.2: Aleros



Imagen 1.3: Energías renovables

Nos hemos parado a explicar los sistemas pasivos por una situación a la que se puede llegar conocida como 'isla de calor'. La mayoría de los sistemas de climatización funcionan mediante un ciclo de compresión que contiene refrigerante o agua, donde pasan por unas transformaciones termodinámicas mediante un intercambio de calor con otro fluido. En los aires acondicionados de las viviendas, en verano, el condensador se encuentra en el exterior de la vivienda. Este elemento cede calor del fluido del sistema al ambiente, y con ello se genera una corriente de aire más calurosa; todo este proceso se puede ver en la Imagen 1.4. Cuantos más sistemas de climatización estén encendidos, mayor masa de aire caliente se generará, aumentando la temperatura de la zona, y así también la necesidad de aire acondicionado en el hogar. Con esto, podemos ver lo importante que es intentar obtener un confort en la vivienda, sin necesidad de sistemas de climatización.

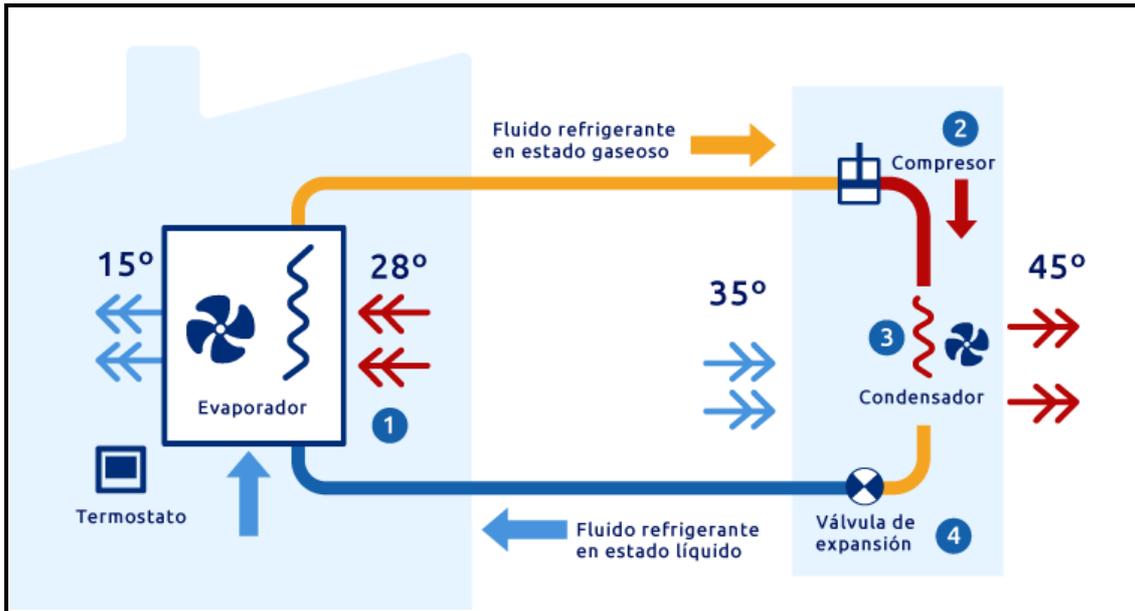


Imagen 1.4: Aire acondicionado

### 1.1.2. SITUACIÓN GEOPOLÍTICA

Las energías renovables son, hoy en día, más importantes que nunca. Debido al conflicto bélico que se está aconteciendo en Ucrania por las tropas rusas, la UE dará prioridad a estas energías para hacer de Europa un continente independiente a los combustibles fósiles de Rusia. Hay que ser conscientes que antes del conflicto, de todo el gas que importaba Europa, un 40% pertenecía a Rusia, como se muestra en la Imagen 1.5.

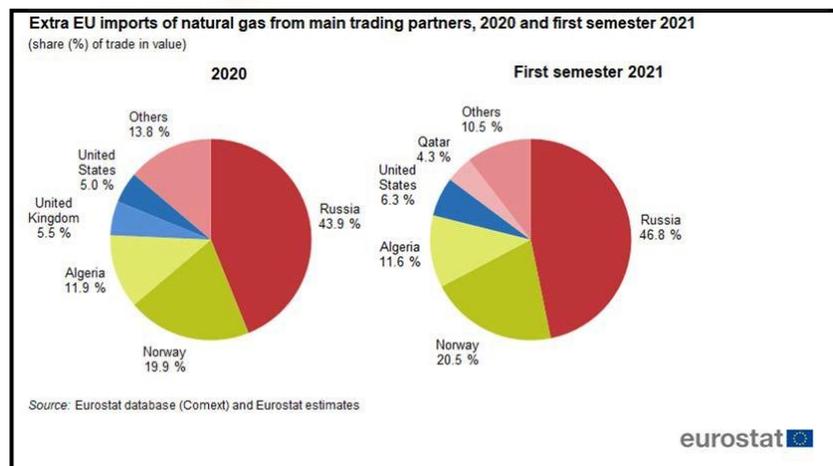


Imagen 1.5: Gas natural en UE

### 1.1.3. REFRIGERACIÓN SOLAR

En un país como España, donde el sol predomina en la mayor parte de la península, la incorporación de energía renovable en los edificios, mediante sistemas que aprovechen la radiación solar, es bastante atractivo. Así, de esta manera, se podría hacer uso de esta energía para satisfacer toda, o una parte, de la demanda de los sistemas de climatización en los hogares.

Hay que tener en cuenta que un edificio no solo podría aprovechar esta energía renovable para los sistemas de climatización. Toda casa tiene una demanda de ACS (agua caliente sanitaria), que se utiliza para actividades tan necesarias como ducharse. Hoy en día, se obliga en edificios de nueva construcción, cuando la demanda de ACS supere los 100 l/d, que una parte de la energía consumida para la generación de ACS provenga de energías renovables, como la energía solar.

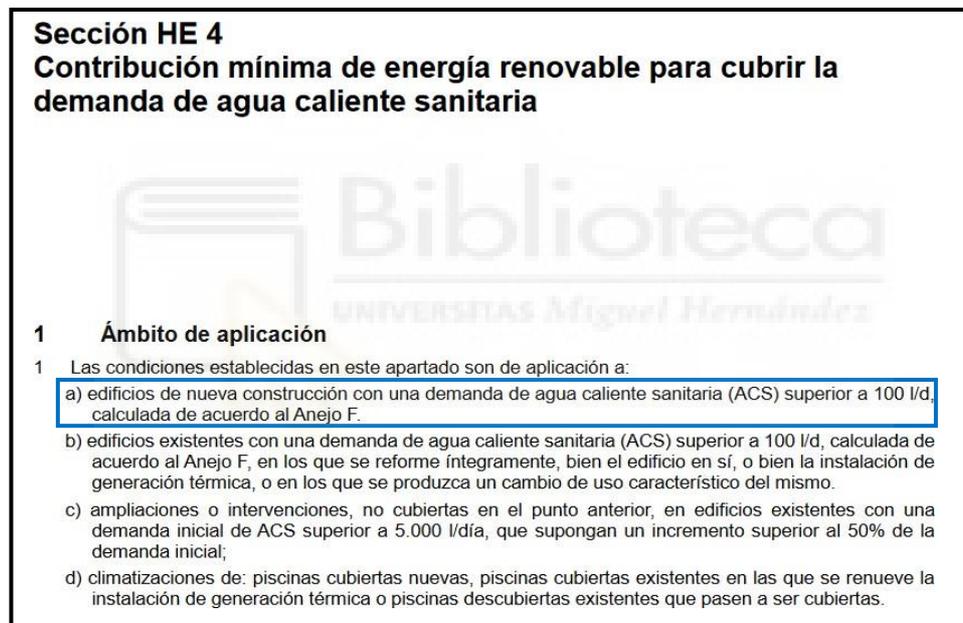


Imagen 1.6: Normativa ACS

Una alternativa para reducir el consumo de energía asociado a la climatización mediante energías renovables es la conocida como refrigeración solar. La refrigeración solar es una idea muy atractiva por la coincidencia cronológica entre la disponibilidad de radiación solar y la demanda de energía para climatización. De entre las alternativas prácticas para convertir la radiación solar en frío, se distinguen los sistemas térmicos y los fotovoltaicos. En los sistemas térmicos, la energía solar es captada mediante colectores solares térmicos, y es convertida en frío por ciclos de adsorción o absorción. Por su parte, en los sistemas de accionamiento fotovoltaico, la energía solar es convertida en electricidad mediante paneles solares fotovoltaicos y ésta se emplea para accionar el compresor de una enfriadora convencional, basada

en un ciclo de compresión de vapor. De acuerdo con la Agencia Internacional de la energía, Mugnier et al. (2015), los sistemas de bomba de calor accionados por paneles fotovoltaicos son la alternativa más prometedora a corto plazo para sistemas de mediana y pequeña potencia (< 50 kW).

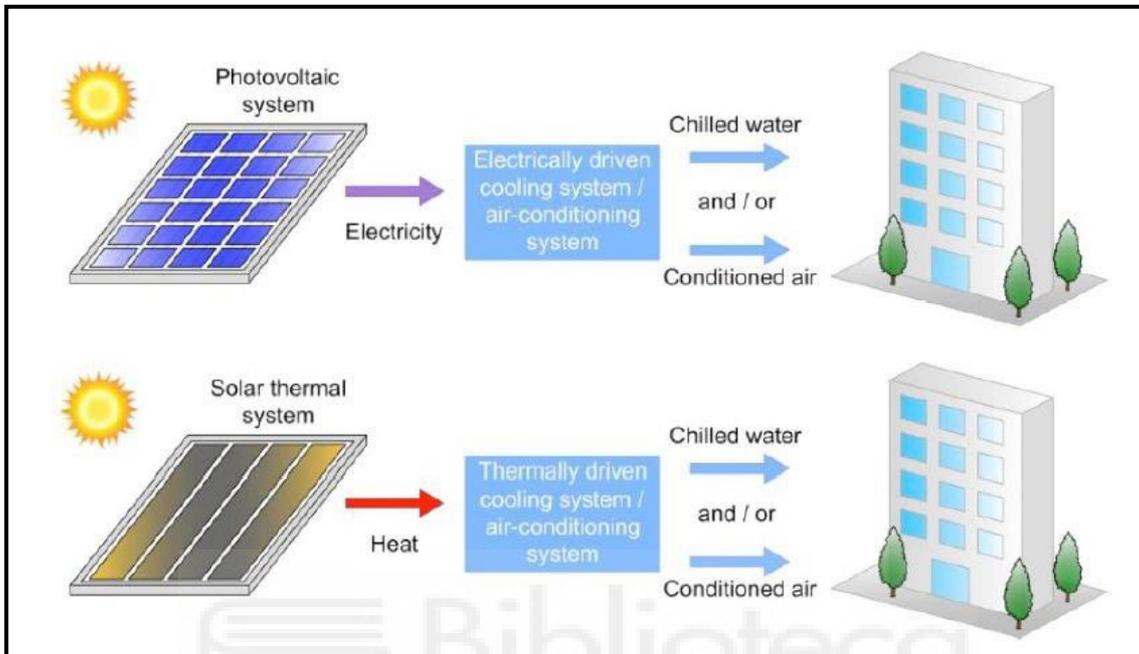


Imagen 1.7: Tipos de refrigeración solar

### 1.1.3.1. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

La energía solar fotovoltaica consiste en la transformación directa de la radiación solar en energía eléctrica. Esta transformación en energía eléctrica se consigue aprovechando las propiedades de los materiales semiconductores, mediante las células fotovoltaicas. El material base para la fabricación de paneles fotovoltaicos suele ser el silicio. Cuando la luz del Sol, fotones, incide en una de las caras de la célula solar se genera una corriente eléctrica. Esta electricidad generada se puede aprovechar como fuente de energía.

Hoy en día, en nuestro país, se está aconteciendo un incremento en el uso de la energía solar fotovoltaica. Como se ve en la Imagen 1.8 y 1.9, en el año 2021, se registró en el mes de enero una generación de energía eléctrica mediante este método del 3,5% de la demanda eléctrica total del país. En los meses más calurosos, este porcentaje se eleva de manera abundante, llegando a un 9,2% en septiembre. Como se puede ver, hoy en día, esta energía ya toma un papel importante en el marco energético del país. Además, en este año 2022 el aumento del uso de este tipo de energía ha sido mucho más drástico por toda la situación actual geopolítica, que ha desembocado en unos precios nunca vistos de la electricidad en las casas; como podemos ver en la Imagen 1.10, ya en febrero tenemos un uso del 7,8%.

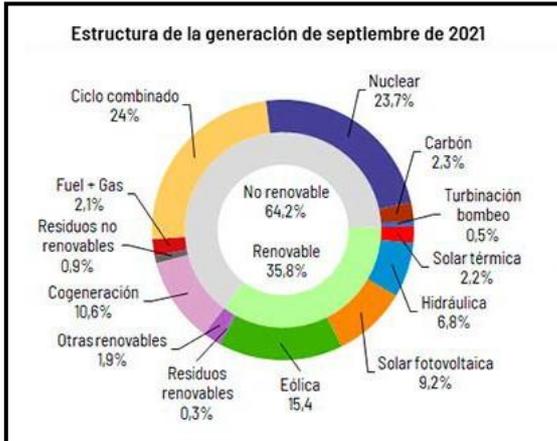


Imagen 1.8: Generación electricidad septiembre

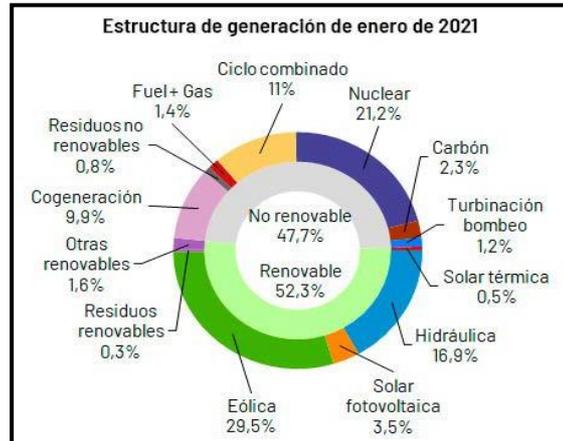


Imagen 1.9: Generación electricidad enero

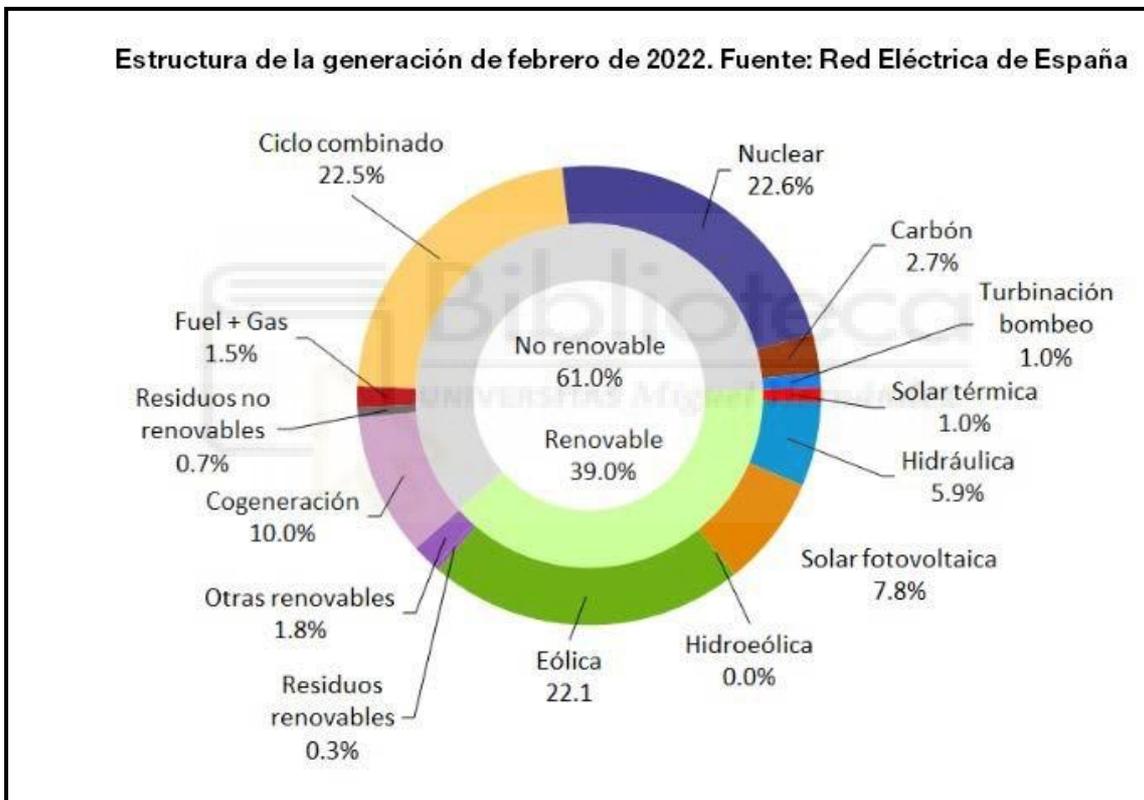


Imagen 1.10: Incremento en 2022

La energía solar fotovoltaica, como se ha comentado anteriormente, supone una alternativa muy prometedora para sistemas de mediana y baja potencia. Vamos a presentar algunas de sus ventajas para su uso en sistemas de climatización en hogares:

- **Ventajas técnicas:** En Eicker et al. (2014) se comparó en distintas ciudades (una de ellas Madrid) la rentabilidad económica de dos sistemas de climatización basados en energía solar: uno eléctrico (de compresión) alimentado por un sistema fotovoltaico, y otro térmico (de absorción) alimentado por un sistema solar térmico. Los resultados muestran que, utilizando el sistema fotovoltaico se puede lograr un ahorro de hasta el 50% en términos de energía primaria, mientras que el ahorro proporcionado por el sistema térmico presenta un máximo del 37%.
- **Ventajas económicas:** Debido a disminución de precios de los sistemas fotovoltaicos, un 60% en los últimos 10 años, y el incremento de precios de la electricidad, se ha modificado sustancialmente la rentabilidad de esta tecnología y, por tanto, su uso en aplicaciones hasta ahora poco consideradas como es el acondicionamiento térmico de los edificios. Además, se está incentivando el uso de estos sistemas mediante subvenciones para el autoconsumo. Éstas permiten un ahorro en las instalaciones de entre un 40% y un 50%. Estas subvenciones, destinadas principalmente para instalaciones en viviendas unifamiliares o comunidades de vecinos, pueden ser solicitadas por cualquier persona que desee instalar placas solares en su vivienda.



Imagen 1.11: Evolución mundial del precio medio de sistemas fotovoltaicos

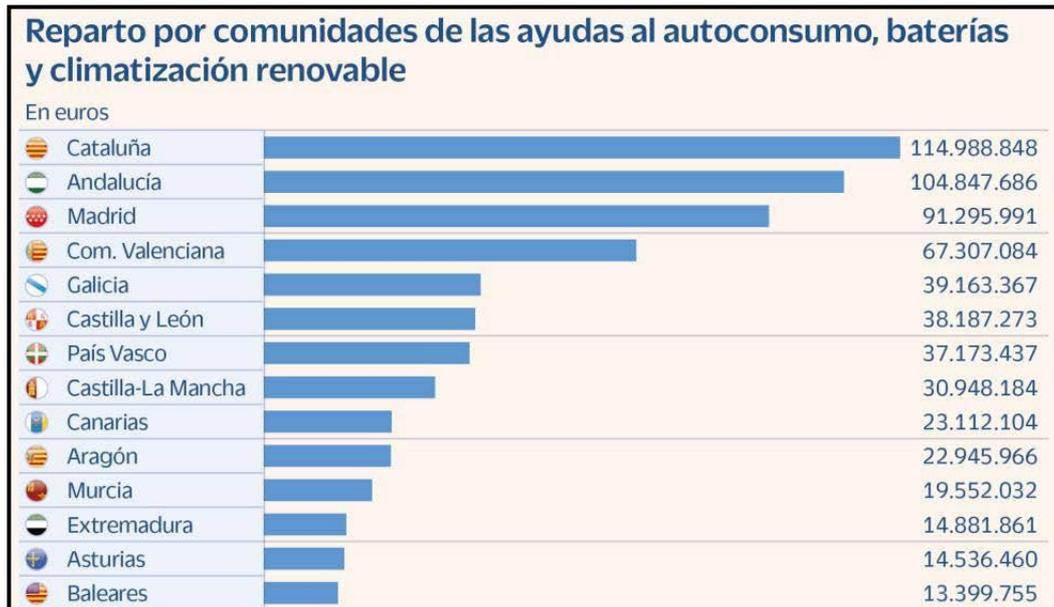


Imagen 1.12: Reparto subvenciones autoconsumo 2021

Al igual que la energía solar fotovoltaica tiene sus ventajas, este método de energía renovable tiene sus desventajas tecnológicas, y que supone uno de los principales problemas que está limitando su desarrollo. La eficiencia de un panel fotovoltaico depende esencialmente de la intensidad de radiación, del tipo de semiconductor empleado y de la temperatura de trabajo. En un panel de silicio tradicional, la eficiencia de conversión ronda el 10-20%; la energía restante se transforma en calor, hecho que repercute en un aumento de la temperatura del panel disminuyendo así su rendimiento. De acuerdo con Biwolé, Groulx (2013), la caída de rendimiento se sitúa en torno a 0,5%/°C. En periodo estival, donde el panel puede alcanzar temperaturas de 40-70 °C, la caída de la potencia producida puede llegar al 7,5-22%.

#### 1.1.4. TEMPERATURA DEL PANEL SOLAR

La temperatura en el panel es clave para su rendimiento, disminuyendo cuanto más caliente esté. En los trabajos de Odeh y Behnia (2009), Teo et al. (2012), Bahaidarah et al. (2013) y Kaiser et al. (2014) se muestran investigaciones relativas al enfriamiento de los paneles por métodos activos. Los autores consiguen una mejora del rendimiento de los paneles haciendo pasar una corriente, de aire o agua, por la cara posterior del panel. De entre los mayores inconvenientes de este tipo de métodos destacan: el uso de una fuente externa de energía para forzar el movimiento del fluido, y el elevado coste inicial del sistema. Por otra parte, en los trabajos de Wang et al. (2009), Liu et al. (2011) y Tina et al. (2012) se muestran investigaciones relativas al enfriamiento de los paneles por métodos pasivos. En este caso, los autores consiguen una mejora del rendimiento de los paneles sumergiéndolos directamente en líquidos como agua, aceite de dimetilsilicio, y etanol polar, entre otros. También constituyen otra alternativa pasiva para el control de la temperatura del panel, los denominados como 'Phase Changing Materials' (PCM), que retrasan el aumento de temperatura del panel sin ningún consumo de electricidad. En el trabajo de Chandel et al. (2017) se presenta una revisión exhaustiva del estado del arte relativo a la combinación de PCMs con paneles fotovoltaicos, donde se dice que los PCM de alto punto de fusión podrían mantener el panel a una temperatura ligeramente más alta pero uniforme, lo que evitaría la creación de puntos calientes, mientras que el PCM de bajo punto de fusión podría mantener el panel a una temperatura baja, proporcionando una máxima eficiencia, pero solo por un tiempo limitado. Los principales inconvenientes citados son la estabilidad cíclica de los materiales y la escasa conductividad térmica.

Todo esto se resume a que, el método más útil para reducir el problema de la temperatura en los paneles solares es la refrigeración por sistema de rocío de agua, al aportar una mejor y más constante refrigeración del panel. En la Tabla 1.1 podemos encontrar un resumen de los estudios mencionados, y alguno más. En la Tabla 1.2 podemos ver una comparación entre los diferentes métodos de enfriamiento fotovoltaico.

**TABLE 1**  
**SUMMARY OF RESEARCH WORKS ON PV MODULE COOLING.**

Sl.no.	Researcher	Technology	Method	PV rating
1	Tripanagnostopoulos et al.	Air based PVT	Active cooling	§
2	Tiwari and Sodha			
3	Garg and Agarwal			
4	Tonui and Tripanagnostopoulos			
5	Huang et al.	Water based PVT	Active cooling	§
6	Kalogirou and Tripanagnostopoulos			
7	Chow et al.			
8	Ji et al.	Refrigerant based PVT	Active cooling	§
9	Zhao et al.			
10	Tang et al.	Heat pipe based PVT	Active/Passive	§
11	Krauter	Water cooled PV	Active cooling	53 Wp
12	Odehand and Behnia	Water trickled PV	Active cooling	60 Wp
13	Abdolzadeh and Ameri	Spraying water over the photovoltaic cells	Active cooling	90 W
14	Royne and Dey	Jet impingement cooling devices	Active cooling	Simulated, 300 W
15	Ceylan et al.	Spiral heat exchanger at the rear side of PV panel	Active cooling	54 W
16	Bahaidarah et al.	Water tubes at the rear side of PV panel	Active cooling	230 W
17	Yang et al.	PV cooling by FGM based water tubes	Active cooling	12 W (approx)
18	Du et al.	Active water cooling	Active cooling	20 W (approx)
19	Maiti et al.	Liquid filter	Active cooling	10 W
20	Teo et al.	Array of ducts designed for uniform airflow	Active cooling	220 W
21	Kerzmann and Schaefer	Active fluid cooling channel	Active cooling	6.2 kW
22	Liu et al.	Immersing the PV cells in a dielectric liquid	Passive cooling	·
23	Tina et al.	Water submerged PV panels	Passive cooling	20 W
24	Wang et al.	Liquid submerged PV panels	Passive cooling	·
25	Brinkworth et al.	Buoyancy driven air flow induced in aduct	Passive cooling	70 W (approx.)
26	Sheyda et al.	Wind driven roof top turbine ventilator	Passive cooling	3 W
27	Solanki et al.	Reflectors acting as heat dissipater	Passive cooling	32 W
28	Maiti et al.	PCM system for thermal regulation of module	Passive cooling	10 W
29	Huang et al.	PCM in combination with internal fins	Passive cooling	Simulated heat
30	Alami	Evaporative cooling with synthetic clay	Passive cooling	10 W
31	Chandrasekar et al.	Moist cotton wicks at the rear side of the panel	Passive cooling	50 W
32	Wu and Xiong	Water spraying	Passive cooling	250 W
33	Royne et al.	Review of various methods that can be employed for cooling of photovoltaic cells	The thermal regulation system must be simple reliable minimum parasitic power consumption using extracted thermal energy	Not applicable

§ Not considered as it was related to PVT system.  
· Not mentioned

Tabla 1.1: Estudios en refrigeración de paneles solares

**TABLE 2**  
**COMPARATIVE SUITABILITY OF VARIOUS PV COOLING TECHNIQUE STUDIES.**

Sr. No.	Cooling techniques	Advantages	Limitations	Achieved PV panel temperature range & Reference
1	Natural ventilation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zero or negligible cost input</li> <li>• No electricity requirement</li> <li>• No maintenance</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Low conductivity and heat transfer rate</li> <li>• High PV panel temperature fluctuations</li> <li>• Very high peak insolation temperatures</li> <li>• Depends on wind direction and ambient air temperature</li> <li>• Heat removed can't be reused effectively</li> </ul>	50-70 °C
2	Forced ventilation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• High heat transfer compared to natural ventilation</li> <li>• Do not depend on ambient conditions</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• High installation cost</li> <li>• Consumes large amount of fan power</li> <li>• System is noisy</li> <li>• Heat removed isn't effective for later use. It is best utilized instantly</li> </ul>	20-30 °C
3	Liquid immersion cooling	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Larger heat dissipation</li> <li>• Better electrical performance</li> <li>• Less reflection losses</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ionization of water is a problem</li> <li>• Liquid ingress due to leakage</li> <li>• Salt deposition is an issue</li> <li>• Corrosion may occur so appropriate care is must</li> <li>• Containment design and its weight</li> <li>• Dust deposition on ducts</li> </ul>	30-40 °C
4	Thermoelectric cooling	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Low initial investment</li> <li>• Low maintenance cost</li> <li>• No noise issues</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cooling performance is a function of ambient air conditions</li> <li>• Electricity consumption</li> <li>• Very effective heat removal is required to ensure reliable cooling</li> </ul>	Not given; here the aim is to enhance electrical efficiency and not the cooling of the PV panels
5	Active water cooling	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Very effective in maintaining PV temperature</li> <li>• Better heat transfer rates compared to ventilation systems</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Installation cost is high</li> <li>• Regular maintenance cost</li> <li>• High pumping power requirement to maintain panel temperature</li> <li>• System is noisy</li> <li>• Instant energy use /heat removed cannot be effectively stored for use at later hours</li> <li>• Corrosion needs to be taken care of</li> </ul>	Upto 22 °C
6	PCM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No maintenance and electricity costs</li> <li>• Can maintain PV panel at constant temperature for long time</li> <li>• Delays panel temperature rise</li> <li>• Heat stored can be effectively reused</li> <li>• No noise issues</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Large initial investment</li> <li>• Cyclic stability of the material is a concern</li> <li>• Containment is a concern</li> <li>• Poor thermal conductivity</li> </ul>	25-30 °C

Tabla 1.2: Comparación entre técnicas de enfriamiento fotovoltaico

### 1.1.5. CHIMENEA SOLAR FOTOVOLTAICA EVAPORATIVA

El grupo de investigación de Ingeniería Energética de la universidad Miguel Hernández de Elche ha diseñado, construido, y patentado un prototipo de sistema de refrigeración solar. Éste consiste en 4 paneles fotovoltaicos, con sus respectivas chimeneas evaporativas, e integrados en un mismo sistema con una bomba de calor y una simulación de carga térmica (calentadores). La planta se encuentra totalmente instrumentada para medir las variables necesarias para su caracterización, y con el sistema de adquisición de datos operativo. La Imagen 1.13 muestra el prototipo construido, ubicado también en la cubierta del edificio Torrepinet de la universidad Miguel Hernández de Elche.

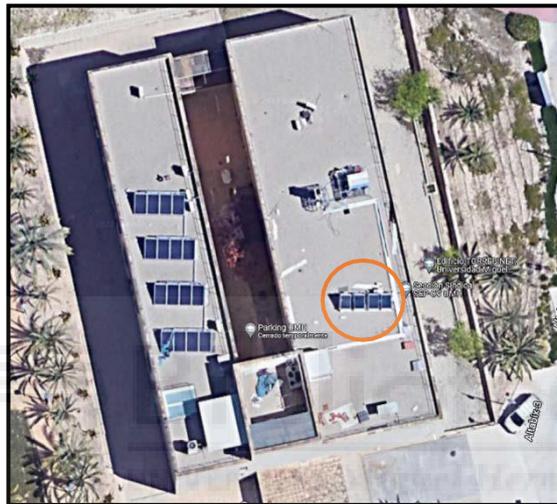


Imagen 1.13: Ubicación instalación en edificio Torrepinet

#### 1.1.5.1. Funcionamiento del sistema

Disponemos de una serie de paneles fotovoltaicos, con sus respectivas chimeneas evaporativas, como hemos comentado anteriormente. Los paneles solares captan la radiación solar incidente, transformándola en electricidad, que se envía a un inversor de corriente. Este elemento transforma la corriente continua generada por el panel en corriente alterna, que se utiliza a su vez para satisfacer parte de la demanda del compresor de la bomba de calor.

Contamos con un circuito de agua conectado a dos calentadores en serie, simulando la carga térmica de un edificio a climatizar mediante un sistema de fan-coils. En estos sistemas de climatización es común trabajar con agua a 7°C, y que ésta retorne a 12°C. Para reducir la temperatura de retorno del agua, el circuito intercambia calor con el evaporador del ciclo de compresión simple. En la Imagen 1.14 podemos encontrar todo el proceso que acontece en la instalación.

El conjunto de paneles solares cuenta con un sistema de refrigeración por rocío de agua, que radica en un enfriamiento evaporativo. Recordar que, al comienzo del apartado concluimos que ésta era la mejor forma de reducir la temperatura del panel. En la parte anterior de la estructura existe un canal donde entra un flujo de aire ambiente, y ahí es donde se dispone del sistema de rociadores, que rocían el agua al flujo de aire entrante; este sistema dispone de varias ventajas:

- **Enfriamiento del agua:** Aún por haber una transferencia de calor del aire al agua, se consigue que el agua que vuelve al circuito esté más fría que la impulsada por los rociadores. A medida que el agua cae, una parte se evapora enfriándose el resto; el agua que no se ha evaporado pasa a un depósito en la parte inferior, y se envía de nuevo al sistema de refrigeración. El funcionamiento, como se puede ver, es muy similar al de una torre de refrigeración.
- **Refrigeración del panel:** El aire, una vez enfriado, entra en contacto con la capa interior del panel, donde empieza a refrigerarlo. Cuando el aire se calienta, su densidad disminuye, y comienza a flotar. Gracias a esto, el aire recorre de abajo a arriba toda la capa interior del panel, refrigerando a su paso, y siendo conducido hasta la salida del canal.

Como hemos comentado, el agua restante de los rociadores retorna al sistema, un circuito de calor. El agua se conduce a la bomba de calor, donde intercambia calor con el condensador del ciclo. Una vez sucedido esto, es de nuevo dirigida a los rociadores.

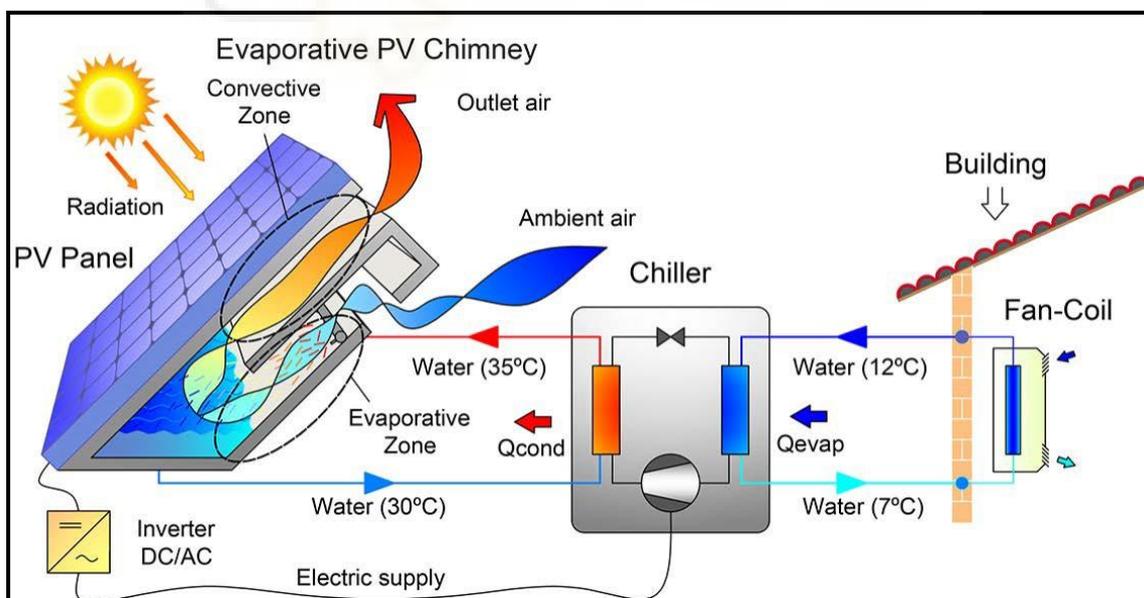


Imagen 1.14: Funcionamiento del sistema

## 1.2. ANTECEDENTES

Para el desarrollo de la instalación en cuestión, se han llevado a cabo una serie de trabajos de fin de grado en los años anteriores. A continuación, se nombrarán cada uno de ellos, describiendo brevemente su contenido:

-En Rodríguez (2015) se describe el diseño y construcción del prototipo de la chimenea solar, con el objetivo de poder realizar los ensayos pertinentes, y conocer su comportamiento.

-Paralelamente al anterior, se obtuvo el comportamiento térmico de la chimenea fotovoltaica, configurando la instrumentación correspondiente para este fin. Todo ello desarrollado en Bernal (2015).

-Como último proyecto para poder disponer de un primer prototipo de la chimenea solar fotovoltaica evaporativa, se realizó en conjunto con los anteriores dos proyectos mencionados, el proyecto de Garcés (2015), donde se hizo énfasis en ensayos eléctricos de la instalación.

-Conjuntamente a los tres que le preceden, en Díez (2015) se analizó un total de 6 ensayos. Se tomo para ellos diferentes valores de caudal, y carga térmica.

Los autores concluyeron que se consiguió bajar la temperatura de la superficie del panel con el sistema de refrigeración instalado, lo que trajo consigo un aumento en el rendimiento de los paneles de un 7,5%; además, éste también aumenta para caudales y potencias más altas.

En García (2015) y Navas (2016) se centraron sus trabajos en la construcción y validación de un modelo matemático de la chimenea solar evaporativa. Se realizaron modelos 2D y 3D de la instalación, con el objetivo de comparar el funcionamiento experimental con el referencial de los modelos, y así certificar su buen comportamiento.

Se concluyó que aumentaba la velocidad y caudal de aire de salida si se eliminaban los ganchos que sostenían la estructura del prototipo, y se aumentaba el ancho del canal de salida, respectivamente.

-En Gálvez (2016), se realizó un estudio sistemático del comportamiento, con parámetros fijos de caudal y potencia disipada de: 500 l/h, y 1500 W. En este proyecto se calibraron los elementos del prototipo que lo requerían; se analizaron ensayos, con y sin el sistema hidráulico funcionando, monitorizando las variables ambientales, y otros parámetros de la instalación, como son las temperaturas de los circuitos de agua y paneles, radiación, humedad, etc. Todo lo anterior se representó en gráficas para su correspondiente evaluación.

-Se prosiguió con Martínez (2016), donde se describió la instalación, y se hizo una prueba de un sistema de deslizamiento para la parte frontal del panel. Se realizaron ensayos, con y sin el sistema en cuestión, con una carga térmica fija de 1500 W, y como

parámetro variable se escogieron diferentes caudales de deslizamiento. Las conclusiones halladas en este año de trabajo fueron las siguientes:

- Es necesario escoger, para el estudio de comportamiento del sistema, los instantes donde la velocidad del viento es menor, ya que ésta influye en cómo se desarrolla la convección natural en el interior de la chimenea.
- Se conoce que el rendimiento depende de la temperatura media de cada captador, y que éste aumenta un 2% con la ayuda de los rociadores, y un 11% cuando se activaba el sistema de deslizamiento, al poder conseguir una refrigeración continua en los paneles.

-En Parreño (2017) se pretendió obtener, a partir de una serie de ensayos, los caudales de rociamiento y deslizamiento óptimos, para conseguir el mayor rendimiento del sistema.

-En Almendro (2017) se marcó como objetivo evaluar la influencia, de las distintas condiciones de entrada, en el enfriamiento del agua de deslizamiento, la potencia del panel y su rendimiento.

-En Sola-Vera (2018) se desarrolló el diseño y construcción de una nueva estructura capaz de alojar dos paneles más, un nuevo sistema hidráulico, y se procedió a la puesta en marcha del prototipo de la instalación. Su objetivo final fue simular el funcionamiento de una posible instalación real, aprovechando el sistema de chimeneas fotovoltaicas evaporativas, tanto para aumentar el rendimiento de los paneles fotovoltaicos, como para funcionar como elemento condensador en un circuito de refrigeración.

-Paralelamente al anterior, en Baeza (2018) se estudió el comportamiento, a partir del diseño y montaje de un nuevo sistema eléctrico, y sensorización. Así pues, se instalaron y calibraron las sondas y sensores necesarios, y se realizaron estudios para determinar el EER del equipo, y el rendimiento de los paneles solares.

-Además, tenemos Villalgorido (2018), donde, paralelamente a los dos trabajos anteriores mencionados, se estudió la eficiencia, y consumo de agua de la instalación, añadiendo una bomba de calor al sistema.

Las conclusiones que se dedujeron a partir de estos últimos proyectos fueron las siguientes:

- La contribución solar (CS) fue del 83,95%, lo que se traduce en un consumo eléctrico, por parte de la instalación, de un 16,05%. Además, el EER solar medio diario llegó a valores en torno a 0,48, es decir, que casi la mitad de energía aportada por el Sol se convierte en energía de refrigeración.
- A partir de las potencias generadas en los paneles, y el consumo total del sistema, la instalación puede llegar a autoabastecerse totalmente en las altas horas de demanda, por lo que podría refrigerar una pequeña vivienda sin costes.
- Con el añadido de la chimenea fotovoltaica, el rendimiento aumentó hasta un 8%, y el EER asciende hasta 6.

Es importante destacar que, todos los ensayos realizados, además de ser insuficientes en número, no se llevaron a cabo en un momento lógico, debido a que fueron realizados en invierno; una época donde el estudio de la instalación no alberga una importancia significativa, puesto que éste no trabajaría en invierno, sino en verano. Así pues, surgió una necesidad de volver a ensayar en régimen estival, y así poder caracterizar el sistema en un período real de uso.

Por otra parte, en ese momento la instalación contaba con un conjunto de sensorización que requería de una revisión. Muchos de los sensores presentes en el sistema llevaban instalados desde la instalación original, y como ésta ha sufrido modificaciones durante los sucesivos años, estos sensores requerían de una modificación en su posición, y así poder otorgar resultados fiables. Teniendo en cuenta todo lo anterior, siguiendo con el estudio del sistema en cuestión, se realizaron otros tres proyectos, siguiendo con el desarrollo de la instalación.

-En Ortega (2019) se desarrolló un proyecto para la puesta a punto de la instalación, y el rediseño del conjunto de sensorización. Además, se acompañó el proyecto con un estudio experimental de la instalación para época estival.

-Paralelamente al proyecto de Patricia, tenemos el de Boix (2019). En este trabajo, a diferencia del anterior, se tiene como objetivo principal la caracterización experimental de la instalación para también época estival.

-Para terminar, tenemos el trabajo de Coves (2019). Al igual que sus compañeros, se dedicó también a la caracterización experimental de la instalación.

De estos últimos tres trabajos se han llegado a unas conclusiones para la última reforma de la instalación:

- Los cuatro paneles fotovoltaicos aportan una potencia aproximada de 750 W, que se emplean para alimentar al sistema. Además, estos trabajan bajo un rendimiento del 14% de manera estable durante todo el ensayo, lo que es bastante elevado, consiguiendo mejoras de más del 8% respecto a paneles sin chimenea fotovoltaica evaporativa.
- Respecto a la bomba de calor, se conoce que trabaja a un EER de 4,5, mostrando una eficiencia razonable entre la potencia frigorífica suministrada y la potencia eléctrica consumida, teniendo una mejora respecto a un sistema de climatización doméstico común, debido a que éstos trabajan con un rendimiento entorno al 3,5-4.
- Se concluye que la instalación estudiada utiliza un 86,5%, de la energía diaria que proviene del Sol, a partir de los paneles fotovoltaicos (contribución solar), mostrando el formidable ahorro energético conseguido, al solo estar consumiendo un 13,5% de energía de red al día.
- Otro parámetro por destacar es el factor de producción (FP), el cual representa que solo para alimentar al compresor, se utiliza un 94,8% de la energía solar que aprovecha la instalación en su totalidad.
- También es importante exponer el EER Solar medio, que se sitúa en un 0,34, lo que significa que más de un tercio de la energía solar incidente sobre los paneles es transformado en energía frigorífica.
- Además, a partir del estudio energético se conoce que el sistema se autoabastece por completo en las horas centrales del día. Esto implica que, en sus condiciones actuales, el equipo global estudiado podría abastecer la climatización total para dos viviendas medianas en la provincia de Alicante, suponiendo un consumo diario medio para cada vivienda.
- Se concluyo también, analizando los resultados de los ensayos, una relación entre varios parámetros de la instalación. A mayor temperatura de los paneles, menos será el rendimiento del panel. A mayor temperatura de bulbo húmedo del aire, menor será el rendimiento del panel, y el EER de la bomba de calor. Para terminar, a mayor temperatura de condensación en el ciclo, menor será el EER de la bomba de calor.

Con todo esto, ya hemos mostrado la progresión que ha tenido el proyecto del sistema de refrigeración basado en chimenea solar fotovoltaica evaporativa, desde su comienzo en 2015.

### **1.3. OBJETO DEL PROYECTO**

Como se ha podido entender por toda la información presentada hasta el momento, la aplicación de refrigeración en una instalación de paneles solares genera un aumento significativo en su rendimiento. Como es entendible, disponer de un modelo que permita analizar el funcionamiento de toda la instalación sería muy útil.

Hasta la fecha, en antiguos proyectos se realizaron experimentos en base a unas condiciones únicas, para poder sacar conclusiones del funcionamiento de la instalación. Se llegó en García (2015) a una modelización de la instalación, donde se podía analizar el sistema para unos datos de entrada, introducidos a mano en el modelo.

El objetivo de este proyecto será la modelización de la instalación que hemos descrito hasta ahora, mediante un conjunto de modelos analíticos individuales acoplados, y validados mediante datos experimentales. A diferencia del trabajo mencionado, esta modelización abarcará toda la instalación, y es que, en García (2015) el objetivo fue modelizar únicamente el funcionamiento de la chimenea solar fotovoltaica evaporativa. En este trabajo, se ha realizado la modelización de esta parte mencionada, además del funcionamiento de la bomba de calor, y el consumo de la bomba hidráulica. Con esto, se contará con la posibilidad de analizar la instalación en cuestión para situaciones climatológicas que no se pueden conseguir de manera experimental, como temperaturas mucho más bajas que las de la zona, o velocidades de viento mucho más altas.

Para terminar, se ha complementado esta modelización con un estudio de optimización, y un análisis de influencia. Con el estudio de optimización se ha buscado encontrar el punto de funcionamiento idóneo para la instalación, es decir, el caudal de agua, trasegado por el sistema, que proporcione las mejores prestaciones en la instalación. Con el análisis de influencia, se ha realizado un estudio exhaustivo para averiguar, de todos los datos de entrada al modelo (radiación solar, temperatura ambiente...), a que parámetros de la instalación influye cada uno, y su magnitud.

## CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA

### 2.1. INTRODUCCIÓN

Una vez puesto en contexto el trabajo en cuestión, pasamos al capítulo de metodología. En éste, se mostrará de manera mucho más profunda la instalación entre manos, es decir, se van a mostrar cada uno de los elementos del sistema y su papel en el mismo.

Para completar el capítulo se describirán y desarrollarán los cuatro subsistemas en los que hemos decidido dividir la instalación, explicando las diferentes formas de cálculo que se han decidido seguir en el trabajo. En este capítulo no se mostrarán los modelos finales de cada subsistema, puesto que esto se explicará más adelante con los resultados.

### 2.2. SISTEMA DE REFRIGERACIÓN SOLAR

En el primer capítulo ya mencionamos el sistema que vamos a tratar en el trabajo. Ahora pasaremos a explicar temas como la orientación de los paneles solares, la estructura de apoyo de éstos, y los subsistemas de los que se encuentra formada la instalación, con una descripción profunda de los elementos que componen cada uno.

#### 2.2.1. Elementos de la estructura de apoyo

Una vez explicado el funcionamiento del sistema, vamos a comentar los diferentes elementos de la estructura de los paneles solares con sus respectivas chimeneas evaporativas; acompañado de una breve descripción de los elementos más importantes. Como se explica en la Tabla 2.1, la estructura está compuesta por:

ELEMENTOS	DESCRIPCIÓN
Base de la estructura	Parte fija que garantiza la estabilidad del conjunto. Contiene una serie de contrapesos que evita la necesidad de anclar la base al murete de la azotea.
Marco para dos captadores	En el marco es donde van apoyados los paneles, y las chimeneas fotovoltaicas evaporativas. Está unido a la base mediante dos tubos laterales que van, desde la parte superior del marco, hasta la parte superior de la base, formando un triángulo rectángulo, y obteniendo así el ángulo de 45º deseado.
Úes de sujeción de captadores	Elementos de acero utilizados para mantener los captadores en su posición, uniendo el marco de estos con la parte superior del marco de la estructura, mediante tornillos.
Contrapesos	Como contrapesos en la estructura contaremos con bloques de hormigón, así como los calentadores, que irán colgados de ésta.

Tornillería
Tubos de sujeción del marco
Paneles fotovoltaicos

Tabla 2.1: Elementos de la estructura de apoyo de los paneles solares

### 2.2.2. Orientación e inclinación de los paneles solares

La orientación solar ha determinado el montaje de la instalación; como se puede ver en la Imagen 2.1, está situada de forma que los captadores solares se encuentren completamente orientados hacia el sur puro ( $0^\circ$  de azimut), y así optimizar las horas en las que el sol incide sobre la cubierta solar. Es importante destacar que el edificio Torrepinet, donde se encuentra nuestra instalación, está aislado. Esto significa que no tiene construcciones en las proximidades, que puedan generar sombras sobre el prototipo que puedan afectar los ensayos. Con todo lo mencionado, conseguimos un gran aprovechamiento de las horas de luz solar para poder efectuar ensayos largos, y sin ningún tipo de pérdidas por sombras.



Imagen 2.1: Estructura de apoyo de los paneles

La estructura anterior está construida para aportar una única inclinación de  $45^\circ$ . Esto es debido a que esta inclinación es la óptima en nuestro caso, ya que consigue un valor medio de captación solar entre las horas centrales del día, y en la mañana y tarde. Además, la inclinación puede influir en la convección del aire que entra por la parte anterior de la estructura. Es de esperar que, con una menor inclinación deberá existir una menor velocidad de aire a la salida del panel, es decir, tendríamos menos caudal de aire. Por el contrario, a mayor inclinación habrá mayor velocidad de salida, y por lo tanto, mayor caudal de aire. Por otra parte, debido a la distribución realizada de los elementos de la instalación, tales como la bomba de calor o el depósito de agua, no sería posible variar la inclinación puesto que la estructura chocaría con éstos.



Imagen 2.2: Perfil de la estructura con inclinación de  $45^\circ$

### 2.2.3. Componentes del sistema

Los componentes del sistema de refrigeración solar, basado en chimenea solar fotovoltaica evaporativa, los vamos a dividir en cuatro apartados: **circuito de calor**, **bomba de calor**, **circuito de frío**, y **componentes eléctricos**. Estos apartados se pueden distinguir fácilmente en la Imagen 2.3. Vamos a ir uno por uno, nombrando y explicando el funcionamiento de cada uno de los elementos de cada apartado.

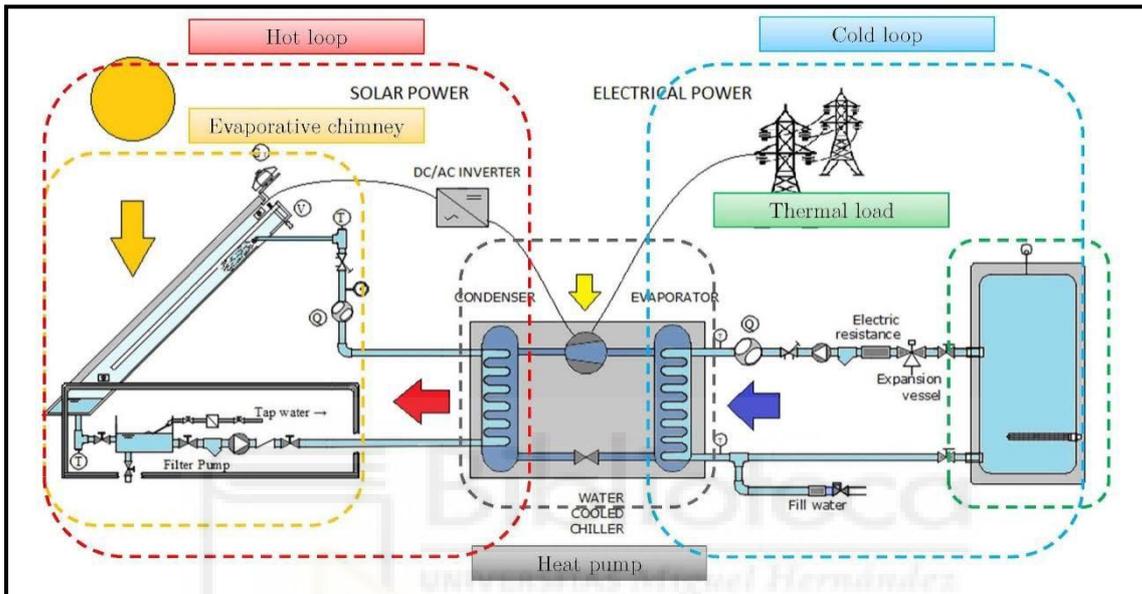


Imagen 2.3: Apartados del sistema de refrigeración solar

2.2.3.1. Circuito de calor

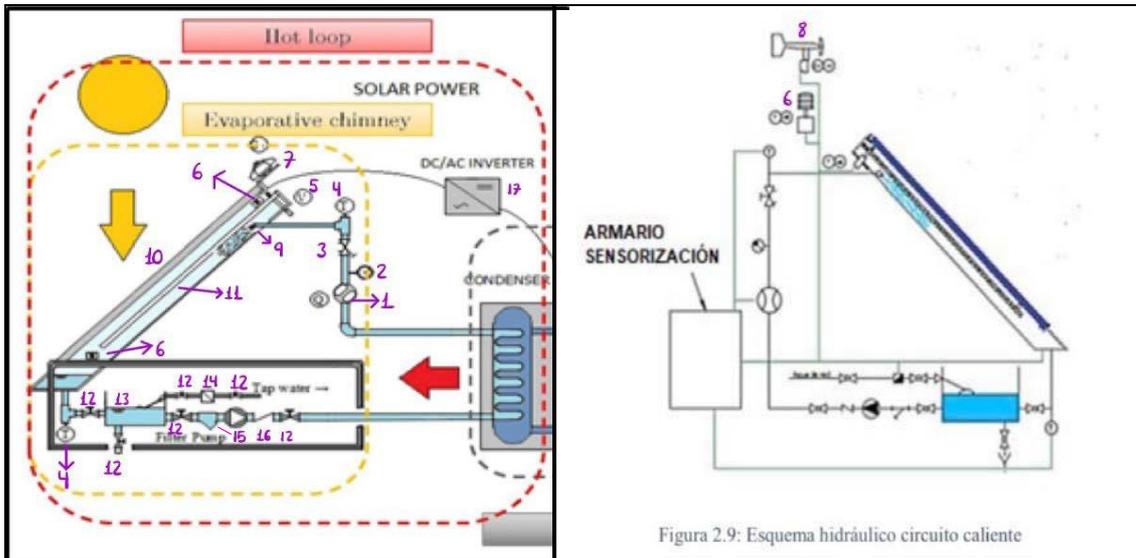


Figura 2.9: Esquema hidráulico circuito caliente

**COMPONENTES**

1. Caudalímetro	2. Llave de paso	3. Válvula de equilibrio	4. Sensor de temperatura RTD
5. Anemómetro de película caliente	6. Termohigrómetro	7. Piranómetro	8. Anemómetro de veleta
9. Rociadores	10. Panel solar y termopares	11. Corcho	12. Válvula de obturación
13. Depósito de agua	14. Contador	15. Bomba hidráulica y filtro de asiento	16. Válvula antirretorno
17. Inversor de corriente			

Tabla 2.2: Componentes del circuito de calor

#### 2.2.3.1.1. Caudalímetro

Elemento utilizado para medir el caudal de agua que se va a rociar en la chimenea. Su funcionamiento se basa en la inducción de un campo magnético a un líquido eléctricamente conductivo presente en su interior. Este líquido circula a través de unas bobinas, y se genera una tensión que es recogida por unos electrodos, y traducida para ser interpretada por la unidad de adquisición de datos. Los caudalímetros usados son de la marca Krohne, modelo 'Optiflux 1100C', compacto con IFC100 y DN20. El IFC100 es el convertidor de señal que se emplea para el caudalímetro.



Imagen 2.4: Caudalímetro del circuito de calor

#### 2.2.3.1.2. Llave de paso

Componente del sistema cuya función es permitir o bloquear el flujo del caudal de agua a los rociadores.



Imagen 2.5: Llave de paso

#### 2.2.3.1.3. Válvula de equilibrio

Regula con precisión el caudal del fluido para garantizar el funcionamiento de la instalación en las condiciones de diseño, con elevado confort térmico, y bajo consumo de energía.



Imagen 2.6: Válvula de equilibrio circuito de calor

#### 2.2.3.1.4. Sensor de temperatura RTD

Son sensores de temperatura resistivos que aprovechan el efecto que tiene la temperatura en la conducción de los electrones para que, ante un aumento de temperatura, haya un aumento de la resistencia eléctrica que presentan. Está asociado a un montaje eléctrico, que responde a la variación de la resistencia por efecto de la temperatura, y así originar una señal analógica que se utiliza en el sistema de control como señal de medida. Encontramos dos en el circuito, uno antes de que el agua pase a los rociadores, y otro en el conducto de salida de la chimenea, en la parte inferior de éste.



Imagen 2.7: Sensores de temperatura en la instalación; entrada y salida de chimenea

#### 2.2.3.1.5. Anemómetro de película caliente

Se utilizaba anteriormente para medir la velocidad del flujo de aire en la salida de la chimenea, detectando los cambios en la transferencia de calor mediante un pequeño sensor calefactado eléctricamente (película delgada), expuesto al flujo de aire; hoy en día no se encuentra este instrumento en la instalación. El sensor es mantenido a una temperatura constante usando un circuito de control electrónico. El efecto del enfriamiento, resultante del paso del fluido a través del sensor, se compensa aumentando el voltaje del sensor. Este aumento, necesario para mantener constante la temperatura, está directamente relacionado con la transferencia de calor, y por lo tanto con la velocidad de flujo. Se ha optado por un anemómetro de la marca E+E Elektronik modelo 'EE65'.



Imagen 2.8: Anemómetro de película caliente

#### 2.2.3.1.6. Termohigrómetro

Con el termohigrómetro podemos obtener la temperatura y humedad relativa del aire. Para obtener la humedad relativa, se aprovecha la propiedad en la cual la constante dieléctrica del aire cambia en función de su humedad relativa. Básicamente, consiste en un condensador eléctrico y un medidor de capacidad que mide las variaciones que se producen en el condensador, y las traduce a una señal de intensidad. Por otro lado, la temperatura ambiente la obtenemos con una precisión muy alta, mediante sondas capacitivas. Por último, cabe aclarar que este aparato es del tipo pasivo, es decir, necesita ser alimentado con una tensión, en nuestro caso de 12 V, transmitida gracias a una fuente de alimentación. En el sistema, como se ha podido observar en la Tabla 2.2, existen tres de estos medidores. Hay uno en el exterior del sistema, otro en la sección de entrada de la zona convectiva, y un último en la sección de salida de esta zona.



Imagen 2.9: Termohigrómetro exterior del circuito de calor

#### 2.2.3.1.7. Piranómetro

El piranómetro es el sensor encargado de registrar la radiación solar que incide sobre la cubierta del edificio en cada instante de tiempo. Mide la radiación solar global, es decir, la suma de la radiación solar directa más la radiación solar difusa, que incide sobre la semiesfera del dispositivo. Funciona valorando las diferencias de temperatura en forma de microvoltios presentes en diferentes superficies, con diferente absorción solar. Se ha empleado el modelo 'CM-6B' de la marca Kipp&Zonen, con rangos de 0 a  $1400 \text{ W/m}^2$ ; un modelo altamente reflectante a la radiación térmica, con el fin de eliminar los efectos térmicos del viento.



Imagen 2.10: Piranómetro situado en la parte superior de los paneles

#### 2.2.3.1.8. Anemómetro de veleta

El anemómetro de veleta es un sencillo sensor que mide la velocidad y dirección del viento. Para ello, transforma en una señal de corriente, mediante un pequeño alternador, el movimiento de las aspas presentes en él, así como la orientación que toma el sensor en función de la dirección en la que el viento sopla. En nuestro caso, se ha optado por la marca Young, ya que ofrece modelos muy ligeros, y con gran resistencia a los golpes, y a la corrosión. Además, es un aparato muy autónomo, al no tener que precisar de excesiva vigilancia ni mantenimiento, y puede ser utilizado durante largas temporadas. Será de vital importancia posicionarlo en una localización óptima, para obtener unas medidas de calidad



Imagen 2.11: Anemómetro de veleta en la instalación

#### 2.2.3.1.9. Rociadores

Los rociadores se utilizan para dispersar el agua dentro de la chimenea evaporativa, aprovechando la presión en la tubería. El mecanismo de funcionamiento de un rociador es simple, consta de una conducción de menor diámetro que la tubería a la que se acopla por un extremo, teniendo en el otro una boquilla con la forma deseada. La boquilla se encuentra abierta en su extremo, y por lo tanto está a presión atmosférica. Debido a la diferencia de presiones entre la tubería y el exterior, el fluido sale por la boquilla adoptando la forma de ésta. Como el canal de entrada de aire, donde se localizan los rociadores, tiene forma prismática rectangular, se considera que el patrón de aspersión más adecuado es el plano. Se ha elegido una boquilla de patrón plano porque es capaz de cubrir el ancho de la chimenea reduciendo el número de rociadores, garantizando que las gotas afectarán a todo el aire de la entrada. La boquilla mencionada dispone de un ángulo de salida de  $110^\circ$ , cubriendo así el ancho de la chimenea, con 1,6 l/min a 3 bar. De esta manera, se reduce la cantidad de rociadores necesarios para garantizar que las gotas influyan sobre todo el caudal de aire de entrada a la chimenea.

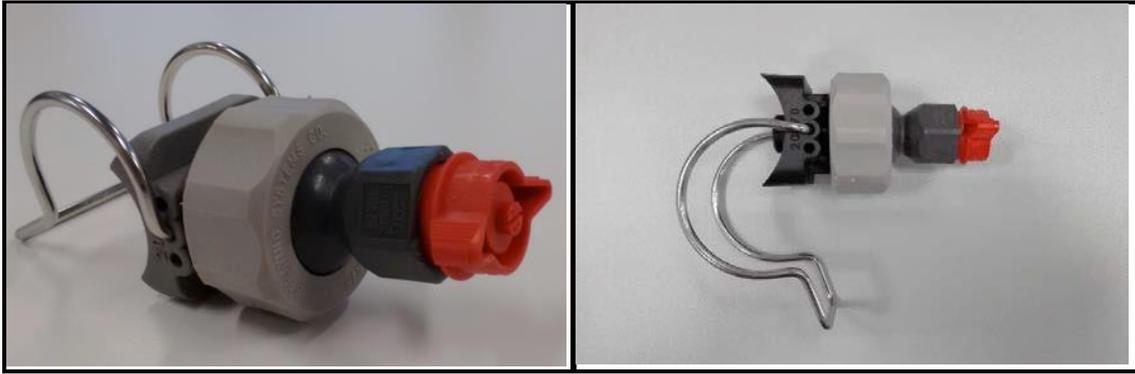


Imagen 2.12: Rociadores del sistema

### 2.2.3.1.10. Panel solar y termopares

#### 2.2.3.1.10.1. Panel solar

Se han empleado, en la instalación, un total de cuatro paneles fotovoltaicos, de los cuales dos son un modelo 'SR-P660255', de la marca Sunrise, de 255 W. Los otros dos paneles del sistema son 'PEPV260', de la marca Euroner, de 260 W; estos dos modelos presentan características muy similares. Serán los encargados de generar electricidad a partir de la radiación incidente sobre ellos. Se han empleado cuatro paneles fotovoltaicos. Estas células, como podemos ver por la Imagen 2.13, están formadas por diversas capas, las cuales vamos a nombrar y describir.

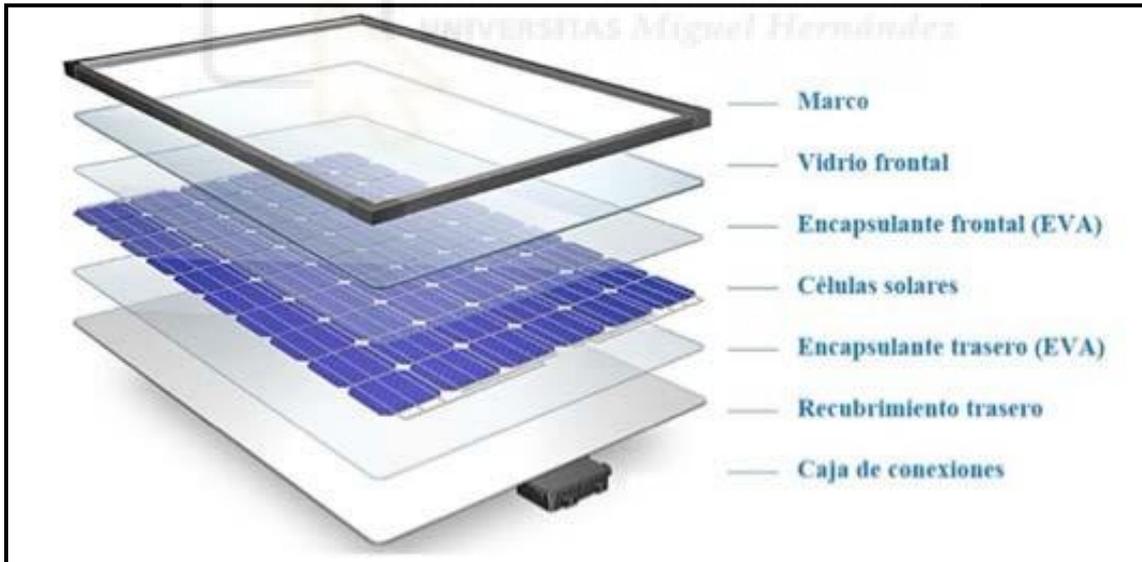


Imagen 2.13: Capas del panel solar

- **Marco:** Marco de aluminio diseñado para ser extremadamente rígido, ligero, y capaz de soportar esfuerzos extremos, y cargas de vientos fuertes. Protege los bordes de la sección laminada que aloja las celdas, y proporciona una estructura sólida para mantener el panel solar en su posición.

- **Vidrio frontal:** Protege las células fotovoltaicas de aspectos como el clima, desechos del aire, o el impacto del granizo. Es de vidrio templado, para que al romperse se rompa en pequeños fragmentos, en lugar de secciones dentadas afiladas. Además, tiene una resistencia mayor que el vidrio normal, al albergar tensiones de compresión que hay que superar en el impacto, para que se produzca la rotura del material.
- **EVA (etileno vinil acetato):** Tiene una buena transmisión a la radiación, y baja degradabilidad bajo la acción de rayos solares. Es un polímero termoplástico, que se usa como agente encapsulante, debido a que, al aplicar calor al conjunto, se forma una película selladora y aislante en torno a las células solares, logrando evitar la entrada de aire o humedad. Esto se hace, debido a que las celdas solares son de silicio, y este material tiene tendencia a formar moléculas con otros átomos, entre sus preferidos el O<sub>2</sub>. Si no hay un buen vacío, la oblea de silicio entrará en contacto con agua u oxígeno y se producirá una oxidación.
- **Celda solar:** Esta capa del panel está formado por unas placas metálicas que sirven de conexiones entre las celdas de silicio, y también por células solares fotovoltaicas que transforman la energía solar directamente en energía eléctrica. Las células son básicamente un sándwich compuesto por dos rebanadas de material semiconductor, generalmente silicio. Para trabajar, las células necesitan establecer un campo eléctrico, que ocurre cuando se separan cargas puntuales. Para conseguirlo, siembran fósforo en la capa superior de silicio, añadiendo electrones adicionales con carga negativa a esa capa. En la capa inferior se pone boro, lo que resulta en una disminución de los electrones, o una carga positiva. Todo esto genera un campo eléctrico entre las capas de silicio. Entonces, cuando un fotón de luz del sol golpea un electrón libre, el campo eléctrico empujará ese electrón fuera de la unión del silicio. Un par de otros componentes de la célula convierten los electrones en energía utilizable. Las placas conductoras metálicas a los lados de la célula recogen los electrones, y los transfieren a los cables. En ese punto, los electrones pueden fluir como una fuente de electricidad.

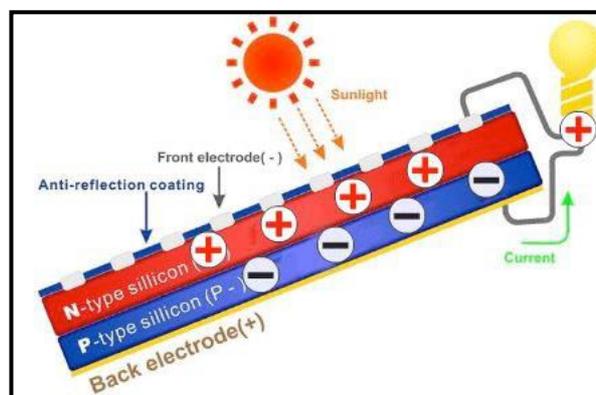


Imagen 2.14: Funcionamiento panel solar

- **Recubrimiento trasero (TPT):** Capa formada por una cara exterior de tedlar, seguido por un núcleo de un polímero, el polietileno tereftalato, y acabamos con otra capa de tedlar en la otra cara exterior. Sirve como protección posterior del panel a radiaciones ultravioletas, humedad, penetración de vapor, sequedad, viento, polvo, arena, productos químicos, rasguños, o variaciones de temperatura. También sirve como protección para los operarios, al ser la única capa de protección contra la corriente continua producida por la célula.

Para acabar con los paneles solares, en la Imagen 2.15 y 2.16, podemos encontrar la ficha técnica de cada modelo:

<b>PEPV260</b>		
<b>Potencia nominal</b>	<b>P<sub>mpp</sub> (W)</b>	260 W
<b>Tolerancia positiva</b>	<b>P<sub>mpp</sub></b>	0 / +3%
<b>Dimensiones del panel</b>	<b>Mm</b>	1640x992x40
<b>Área del panel</b>	<b>m<sup>2</sup></b>	1,62
<b>Peso del panel</b>	<b>Kg</b>	21
<b>Número de células</b>	<b>N</b>	60
<b>Tipo de célula</b>	<b>Mm</b>	156x156 (Silicio policristalino)
<b>Eficiencia del panel</b>	<b>%</b>	16,12
<b>Intensidad de cortocircuito</b>	<b>I<sub>sc</sub> (A)</b>	8,82
<b>Tensión de circuito abierto</b>	<b>U<sub>oc</sub> (V)</b>	38,1
<b>Intensidad nominal</b>	<b>I<sub>mpp</sub> (A)</b>	8,47
<b>Tensión nominal</b>	<b>U<sub>mpp</sub> (V)</b>	30,83
<b>Coef. intensidad por T<sup>2</sup>, α</b>	<b>I<sub>sc</sub> (%/°C)</b>	0,075
<b>Coef. tensión por T<sup>2</sup>, β</b>	<b>U<sub>oc</sub> (%/°C)</b>	-0,312
<b>Coef. potencia por T<sup>2</sup>, γ</b>	<b>P<sub>max</sub> (%/°C)</b>	-0,405

Imagen 2.15: Ficha técnica PEPV260

Características del Producto					
No. de Modelo	SR-P660245	SR-P660250	SR-P660255	SR-P660260	SR-P660265
<b>Garantía</b>					
Garantía de Producto	12 Años				
Garantía de energía	12 años de 90% potencia de salida, 25 años de 80% potencia de salida				
<b>Características Eléctricas en STC</b>					
Potencia Máxima (Pmax)	245 Wp	250 Wp	255 Wp	260 Wp	265 Wp
Tensión en el Punto de Máxima Potencia (Vmax)	29,89 V	30,08 V	30,32 V	30,61 V	30,82 V
Corriente en el punto de máxima potencia (Imax)	8,2 A	8,32 A	8,42 A	8,5 A	8,6 A
Tensión en Circuito Abierto (Voc)	37 V	37,23 V	37,53 V	37,89 V	38,15 V
Corriente de cortocircuito (Isc)	8,76 A	8,89 A	9 A	9,08 A	9,19 A
Eficiencia	15,1 %	15,4 %	15,7 %	16,01 %	16,31 %
Tolerancia de Potencia (+)	+ 3 %	+ 3 %	+ 3 %	+ 3 %	+ 3 %
<i>Condiciones de prueba estándar (STC): Masa de aire AM 1,5, radiación 1000W/m<sup>2</sup>, temperatura de célula 25°C.</i>					
<b>Características Eléctricas en NOCT</b>					
Temperatura	45±2 °C				
<i>Temperatura en condiciones normales de operación (NOCT): 800W/m<sup>2</sup>, AM 1,5, velocidad del viento de 1m/s, temperatura ambiente de 20°C</i>					
<b>Características Térmicas</b>					
Rango de Temperatura	-40-85 °C				
Coefficiente de Temperatura de Pmax	-0,44 %/°C				
Coefficiente de Temperatura de Voc	-0,33 %/°C				
Coefficiente de Temperatura de Isc	0,055 %/°C				
<b>Parámetros del Sistema</b>					
Tensión Máxima del Sistema	1000 V				
Límite de Corriente	15 A				
<b>Características Mecánicas</b>					
Dimensiones (A/A/F) 	1640x992x35 mm				
Peso	18,2 kg				
Tipo de Células	Policristalino				
Tamaño de las Células	156x156 mm				
Numero de Células	60				
Tipo de Vidrio	Templado, Alto Transparente, Bajo Hierro				
No. de Diodos Bypass Incorporados	3				

Imagen 2.16: Ficha técnica SR-P660255

### 2.2.3.1.10.2. Termopares

En la instalación cuenta con 12 termopares tipo 'K'. Ofrecen una amplia variedad de aplicaciones y de sondas, a un bajo precio. Cuentan con un rango de temperatura de  $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $+1372\text{ }^{\circ}\text{C}$ , una sensibilidad de  $41\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$  aproximadamente, y con resistencia a la oxidación y corrosión. Esto es relevante, debido a que, en nuestro caso, van a estar expuestos a una humedad elevada.

Los termopares se han distribuido en cada placa fotovoltaica para la toma de datos, con el objetivo de saber la temperatura que va a tener el panel en toda su superficie, de forma simétrica. En la Imagen 2.17 podemos ver el tipo de termopar utilizado.



Imagen 2.17: Termopares del panel

#### 2.2.3.1.11. Corcho

Pared de poliestireno expandido, utilizado para separar la zona de enfriamiento evaporativo, de la zona convectiva; ambas zonas se explicarán correctamente en el punto 2. Utilizando una capa de corcho, obtenemos un buen aislamiento, y mayor contacto del aire con una superficie húmeda, a un bajo coste.



Imagen 2.18: Capa de corcho en el interior de la chimenea evaporativa

#### 2.2.3.1.12. Válvula de obturación

Su función es impedir o permitir el paso del caudal de agua. En el circuito de calor, como se puede ver en la Tabla 2.2, existen diferentes válvulas para regular diferentes tramos del flujo. Tenemos una justo a la salida de la chimenea, y otra debajo del depósito de agua; estas dos válvulas se usan para permitir realizar el mantenimiento del depósito. Con una se corta el flujo de agua al depósito, y con la otra se vacía el mismo. En la parte superior del depósito, donde se encuentra el contador, encontramos otras dos válvulas de obturación. Este conducto sirve para introducir agua del grifo al depósito por si faltase agua. Para terminar, tenemos otras dos válvulas en el tramo final del circuito, en la zona donde se encuentra la bomba hidráulica.



Imagen 2.19: Válvula de obturación situada en la aspiración de la bomba hidráulica

### 2.2.3.1.13. Depósito de agua

Con el objetivo de evitar interrupciones en el flujo de agua que puedan perjudicar al funcionamiento de la instalación, se coloca, entre la salida de la chimenea y la bomba del circuito caliente, un depósito. El depósito se utiliza para evitar interrupciones en el flujo de agua en la instalación. El depósito dispone de un sensor de boya, como se puede ver en la Imagen 2.21, para avisar cuando el volumen llegue a un valor mínimo, y así abrir y cerrar la entrada de agua de red al depósito, al que está siempre conectado.



Imagen 2.20: Depósito de agua del sistema



Imagen 2.21: Sensor de boya del depósito

### 2.2.3.1.14. Contador

Para medir el consumo de agua durante un determinado periodo de tiempo, se utiliza un contador de pulsos. Su principio de funcionamiento se basa en un movimiento de una turbina en su interior, en la que está determinado el número de vueltas que ésta da, por cada unidad de volumen de fluido que circula a través de él. Esta información se envía, desde un convertidor eléctrico, al sistema de adquisición de datos.



Imagen 2.22: Contador de pulsos del sistema

### 2.2.3.1.15. Bomba hidráulica y filtro de asiento

#### 2.2.3.1.15.1. Bomba hidráulica

La bomba hidráulica presente en el circuito de calor es un modelo 'XKJ-1100S'. Observando las especificaciones de la bomba en la Imagen 2.24, está alimentada a una tensión de 230 V y 50 Hz, y con una potencia nominal de 1100 W. La altura manométrica máxima que es capaz de proporcionar es de 45 metros, y un caudal máximo de 60 l/min. Esta bomba está sobredimensionada, contemplando posibles futuras modificaciones en la instalación, que puedan demandar una altura y caudal más elevado. Para ajustar la bomba a las condiciones de funcionamiento de la instalación, se utiliza la válvula obturadora, que se encuentra después del depósito y antes de la bomba, para regular el caudal a la que ésta debe funcionar.



Imagen 2.23: Bomba hidráulica circuito de calor

Especificaciones de la bomba de chorro de acero inoxidable XKJ-900S		
	MODELO	XKJ-1100S
	Fuerza de abastecimiento	220-240V/50Hz
	Potencia de entrada	1100W
	Max. carga hidráulica	45m
	Max. flujo	3.6m <sup>3</sup> /h
	Max. succión	8m
	Max. día. de partículas	3mm
	Entrada/Salida	25/25mm
	Cable	H07RN-F 1.5m
Límites de funcionamiento: temperatura del fluido hasta 35 °C, temperatura ambiente máxima 40 °C.		

Imagen 2.24: Especificaciones bomba hidráulica circuito de calor

#### 2.2.3.1.15.2. Filtro de asiento

Como se ha podido observar en la Tabla 2.2, se encuentra localizado antes de la bomba hidráulica. Su función es la de filtrar el agua del circuito, antes de entrar a la bomba, de todo tipo de impurezas que pueden afectar negativamente la bomba hidráulica.



Imagen 2.25: Filtro de asiento circuito de calor

#### 2.2.3.1.16. Válvula antirretorno

Con esta válvula se evita que el agua cambie su sentido de circulación. En una situación de mantenimiento, al cerrar la válvula de obturación más cercana al condensador del sistema, con tal de evitar que el agua que se encontraba en el circuito retorne, se hará uso de esta válvula de antirretorno.



Imagen 2.26: Válvula de antirretorno del circuito de calor

### 2.2.3.1.17. Inversor de corriente

La instalación presenta dos inversores, y como ya hemos mencionado en el funcionamiento del sistema; el inversor es el aparato encargado de transformar la corriente continua producida por los paneles en corriente alterna. Los cuatro paneles son conectados individualmente a los inversores mediante cables de 6 mm<sup>2</sup> y conectores 'mc4'.



Imagen 2.27: Inversor de corriente de la instalación

<b>YC 500A/U-EU (2 MPPT)</b>	
<b>ENTADA (DC)</b>	
Potencia de módulo recomendada (STC)	180-310 W
MPPT Rango de voltaje	22-45 VDC
MPPT Rango de voltaje a pot. máx	26-45 VDC
Voltaje de funcionamiento	16-52 VDC
Máximo voltaje de entrada	55 VDC
Voltaje de arranque	22 V
Máxima corriente de entrada	10,5 A x 2
Máxima corriente de cortocircuito	15 A
<b>SALIDA (AC)</b>	
Máxima potencia constante	500 W
Máxima corriente constante	2,17 A
Voltaje de red	230 VAC
Rango de voltaje (abierto por defecto)	184-264,5 VAC <sup>1</sup>
Rango de voltaje extendido	149-278 VAC
Frecuencia	50 Hz
Rango de frecuencia por defecto	47,5-51,5 Hz <sup>1</sup>
Rango de frecuencia extendido	45,1-54,9 Hz
Factor de potencia	>0,99
Total distorsión armónica	<3 %
Máximo n° de inversores en serie	7 (fusible 20 A)
<b>EFICIENCIA</b>	
Máx. Eficiencia	95,5 % (con transformador HF)
<b>DATOS MECÁNICOS</b>	
Temperatura ambiente de funcionamiento	-40 °C to + 65 °C
Temperatura interior de funcionamiento	-40 °C to + 85 °C
Temperatura de almacenamiento	-40 °C to + 65 °C
Dimensiones (Ancho x alto x fondo)	221 mm x 167 mm x 29 mm
Peso	2,5 kg
AC BUS	12 AWG
Protección	IP 65
Refrigeración	Convección natural
Clasificación "Wet Locations"	For wet locations
Clasificación "Pollution Degree"	PD3
Rango de humedad relativa	0-95 %

Imagen 2.28: Ficha técnica inversor de corriente

### 2.2.3.2. Bomba de calor

Como se ha podido ver en la Imagen 2.3, el sistema dispone de una bomba de calor. Es un elemento fundamental para el sistema en cuestión, pues en ella se produce el intercambio de calor entre los dos circuitos ya descritos. El equipo de la instalación ha sido diseñado y fabricado por la empresa Boreali, modelo 'GWx-04i'. El gas refrigerante que utiliza es R-140a.

Esta bomba de calor cuenta con una estructura de perfiles de aluminio anodizado, y paneles de cierre tipo sándwich, de 45 mm de espesor, con aislamiento interior de PIR. La estructura y los paneles cuentan con una rotura de puente térmico, y un tejadillo de chapa galvanizada, lacada al horno para soportar condiciones de exterior. El sistema frigorífico está formado por un compresor rotativo 'inverter', e intercambiadores de placas soldadas. El sistema cuenta con una válvula de expansión electrónica.

Respecto al sistema eléctrico, está dotado de bornero para realizar las conexiones, fusibles de protección y variador de frecuencia integrado. Además, la máquina cuenta con un sistema de regulación y control, dotado de control electrónico DDC programable Oaka/Dixell iPro, con software de control propio, y programable a medida. La comunicación se realiza por medio de protocolos IP (Ethernet) y Modbus, con posibilidad de pasarla a otros lenguajes BMC.



Imagen 2.29: Bomba de calor no instalada



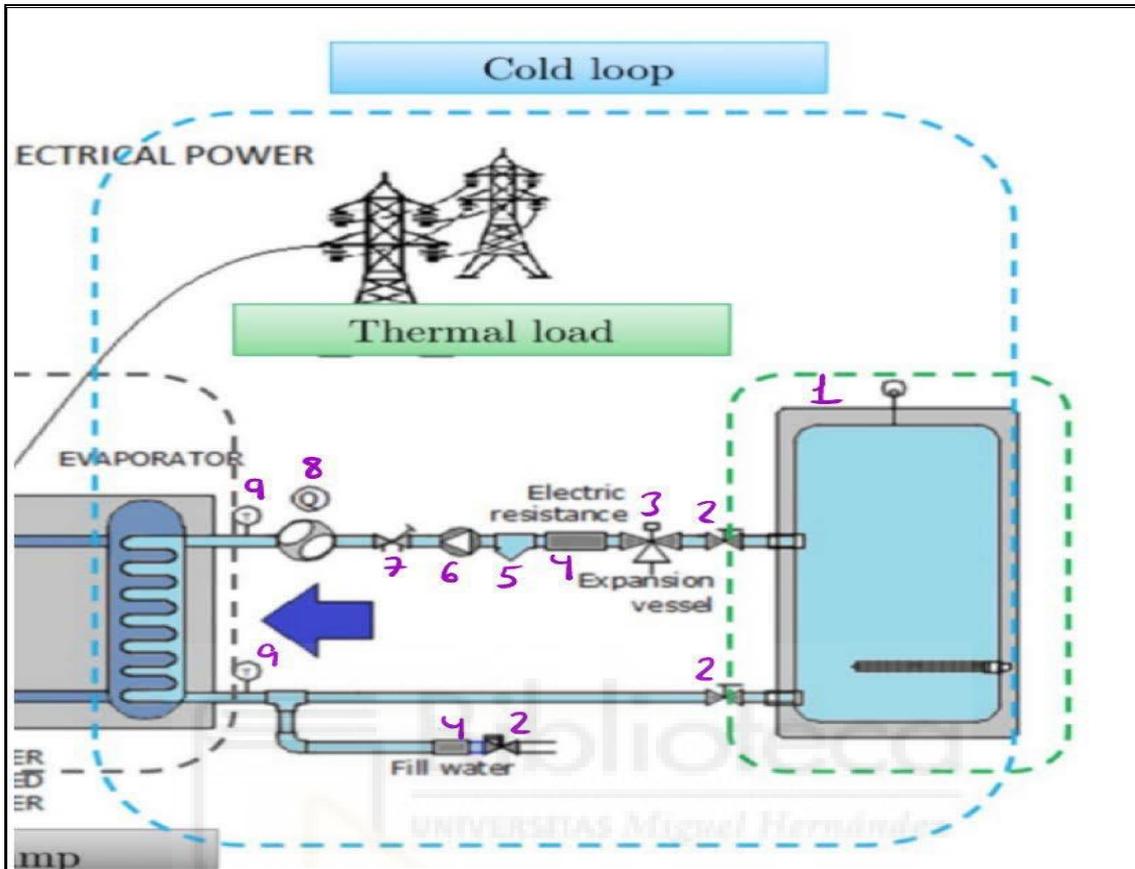
Imagen 2.30: Bomba de calor en la instalación

Además de todo lo explicado de la bomba de calor de la instalación, en la Imagen 2.31 podemos encontrar las características técnicas de nuestro modelo:

<b>Borealis</b> energía térmica		<b>GWx-04i</b>	
Compresores:		1, ROTATIVO	
Potencia frigorífica (kW):		3.8 KW (90 HZ)	
Caudal de agua circuito producción (l/h)		654	
Caudal agua circuito colector (l/h)		860	
Pérdida de carga intercambiador circuito producción (kPa)		5	
Pérdida de carga intercambiador circuito colector (kPa)		6	
Consumo del conjunto (kW):		0,91 (90 Hz)	
Intensidad máxima (A):		9 (90 Hz)	
Dimensiones y peso			
Longitud (mm):		800	
Altura (mm):		900	
Anchura (mm):		800	
Peso (kg):		100	
(Dimensiones y peso aproximados)			

Imagen 2.31: Ficha técnica modelo bomba de calor

2.2.3.3. Circuito de frío



**COMPONENTES**

1. Calentador	2. Válvula de obturación	3. Vaso de expansión	4. Resistencia eléctrica
5. Filtro de asiento	6. Bomba hidráulica	7. Válvula de equilibrio	8. Caudalímetro
9. Sensor de temperatura RTD			

Tabla 2.3: Componentes del circuito de frío

Como se puede ver por la Tabla 2.3, algunos de los elementos del circuito de calor se repiten en éste; no se volverá a explicar el funcionamiento de éstos, solo su función en el circuito de frío.

### 2.2.3.3.1. Calentador

Para el estudio del sistema, se instalaron dos calentadores en serie para simular la carga térmica de un edificio a climatizar; estos dos se puede ver en la Imagen 2.32 y 2.33. En un principio se dispusieron dos calentadores de agua de similares características conectados en serie, sin embargo, hubo problemas a la hora de la instalación de estos, ya que uno de ellos contaba con una derivación a tierra que hacía que el interruptor diferencial actuara. Por ello, finalmente se dispuso un calentador de 50 litros como se proyectó en un principio, y otro de 35 litros.



Imagen 2.32: Calentadores sin instalar



Imagen 2.33: Calentadores en la instalación

MODELO	CAPACIDAD	POTENCIA	PRESIÓN MAX
NECKAR ESN 035-4	35 L	1,5 kW	8 bar
NEGARRA CS-50	50 L	1,6 kW	9 bar

Imagen 2.34: Especificaciones pareja de calentadores

### 2.2.3.3.2. Válvula de obturación

En el circuito de frío disponemos de tres de estas válvulas, como se puede comprobar en la Tabla 2.3. Las válvulas más cercanas a los calentadores impiden o permiten el paso del caudal de agua, del ciclo a los calentadores, y de los calentadores al ciclo. También disponemos de otra de estas válvulas, en la parte inferior del circuito. En el caso de que faltase agua en el sistema se añade agua de la red, regulando su flujo mediante esta válvula.

#### 2.2.3.3.3. Vaso de expansión

El vaso de expansión es un elemento de seguridad que sirve para absorber el aumento de presión del agua originado debido al calentamiento de ésta.

Para realizar esto, su interior se encuentra dividido en dos partes mediante una membrana elástica impermeable. Una de las partes está en contacto con el agua, mientras que la otra está llena de aire, de tal forma que cuando el agua se calienta se expande y presiona la membrana elástica, comprimiendo el aire que contiene la otra parte del vaso. De esta forma, el vaso de expansión absorbe el aumento de presión, logrando que el circuito se mantenga siempre a la presión deseada.

Se instaló este elemento a la salida de los calentadores, como se ve en la Imagen 2.35, para absorber el cambio de presión del agua, al aumentar su temperatura dentro de éstos



Imagen 2.35: Vaso de expansión instalado

#### 2.2.3.3.4. Resistencia eléctrica

Para conseguir alcanzar el rango de temperaturas buscado para los ensayos, además de los calentadores, el circuito de frío contiene una resistencia térmica, que proporciona una potencia de 1000 W.



Imagen 2.36: Resistencia eléctrica circuito de frío

El accionamiento tanto de la resistencia como del sistema de control de temperatura se realizará en dos pequeñas cajas estancas (Imagen 2.37), en la que se han habilitado los elementos necesarios para ello.



Imagen 2.37: Accionamiento de la resistencia eléctrica

#### 2.2.3.3.5. Filtro de asiento

Al igual que en el circuito de calor, disponemos en esta parte de la instalación de un filtro de asiento. La función será la misma, filtrar el caudal de agua del conducto antes de entrar a la bomba hidráulica del circuito frío, para evitar generar averías en ésta.

#### 2.2.3.3.6. Bomba hidráulica

En la Imagen 2.38 podemos ver la bomba hidráulica utilizada para el circuito de frío no coincide con la del circuito de calor. El modelo elegido fue 'PRISMA 15 3M', con una potencia nominal de 600 W, y alimentada con una tensión de 230 V a 50 Hz. Trabaja en un intervalo de caudales entre 20 y 66 l/min, y proporciona una altura manométrica de entre 0 y 34 metros.



Imagen 2.38: Bomba hidráulica circuito de frío

### 2.2.3.3.7. Válvula de equilibrio

La válvula de equilibrio es otro de los elementos que se repite en los dos circuitos. Como hemos comentado anteriormente, regulará con precisión el caudal del fluido para garantizar el funcionamiento de la instalación en las condiciones de diseño, con elevado confort térmico y bajo consumo de energía.

### 2.2.3.3.8. Caudalímetro

Se introduce un caudalímetro en el circuito de frío, para poder medir el caudal de agua que está fluyendo por esta parte de la instalación.

### 2.2.3.3.9. Sensor de temperatura RTD

Al igual que en el circuito de calor, se introduce en este circuito un sensor de temperatura RTD, y así tener constancia de la temperatura del flujo que lo recorre.

## 2.2.3.4. Sistema eléctrico

En este punto se va a detallar el conexionado eléctrico de los elementos del circuito hidráulico, y también se citarán el resto de los elementos necesarios para el correcto funcionamiento del prototipo. Si no se menciona alguno de ellos, es debido a que ya ha sido comentado en los apartados anteriores de la instalación.

### 2.2.3.4.1. Esquema eléctrico

Comenzamos esta explicación mostrando el esquema eléctrico de la instalación completa en la Imagen 2.39. Al no ser objetivo de este proyecto, no se va a realizar énfasis en la descripción del sistema. Solo se ha decidido mostrarlo, y así quede constancia en el proyecto.

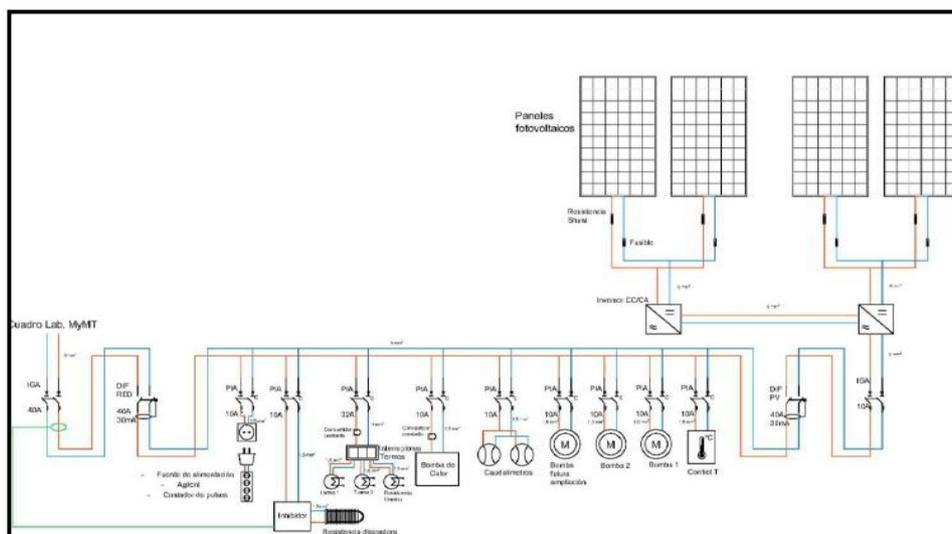


Imagen 2.39: Esquema multifilar instalación

#### 2.2.3.4.2. Resistencia disipadora

Se trata de una resistencia eléctrica instalada en la propia estructura del prototipo, cuyo fin es disipar toda la potencia generada por las placas fotovoltaicas, que no haya sido consumida por ningún elemento de nuestra instalación. La resistencia instalada es de 1334 W; se ha instalado esta resistencia para poder disipar toda la potencia generada por los paneles fotovoltaicos en el caso más desfavorable, es decir, cuando ningún elemento de la instalación esté consumiendo, y todo lo producido se disipe.

Como hemos podido ver en las características anteriormente mostradas, tenemos dos módulos fotovoltaicos capaces de generar una potencia de 255 W, y otros dos capaces de generar una potencia de 260 W; esto hace un mínimo de 1030 W a disipar en la instalación. Por esta razón, es capaz de disipar una potencia de 1334 W; que exista flujo de corriente hasta la resistencia lo determina el inhibidor de corriente.



Imagen 2.40: Resistencia disipadora

#### 2.2.3.4.3. Inhibidor de corriente

El inhibidor de corriente se encarga de leer la dirección del flujo de corriente, y desviar el excedente de potencia que se esté generando en los paneles y que no se aprovecha. El aparato instalado es un inhibidor de vertidos fotovoltaicos a red. La resistencia disipadora va conectada al inhibidor y el inhibidor conectado a red, de forma que toda la potencia disipada pasa a través del inhibidor. Dispone de un microcontrolador, capaz de procesar la información para desviar la corriente a la resistencia disipadora, y evitar así su llegada a la red eléctrica.

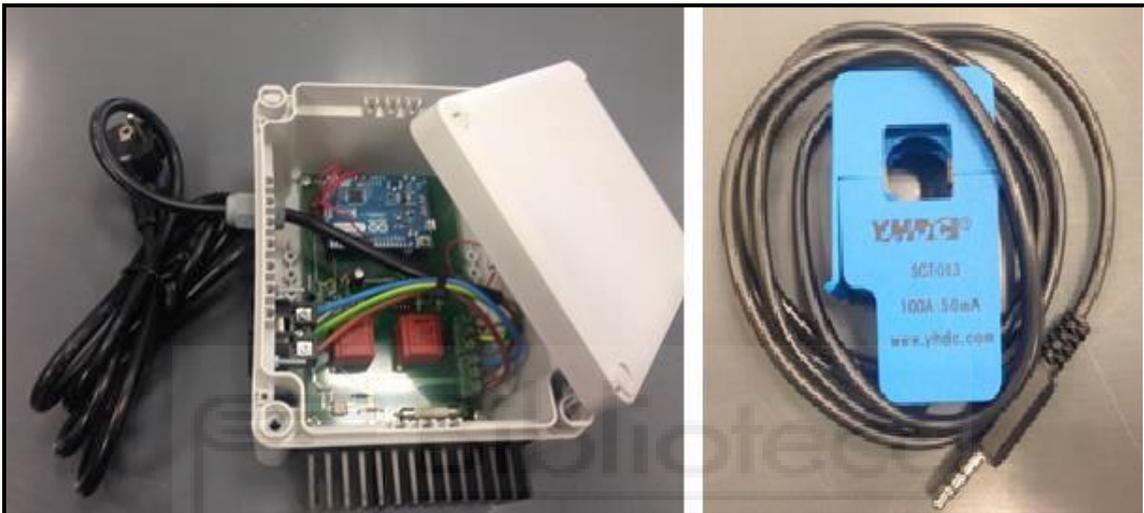


Imagen 2.41: Inhibidor de corriente de la instalación

#### 2.2.3.4.4. Armario de sensorización

Para la distribución de todos los elementos de sensorización, tales como la unidad de adquisición de datos, el convertidor de pulsos, los fusibles, las resistencias shunt y la fuente de alimentación, la instalación se ha provisto de un armario en la espalda de la base de la estructura, como se distingue en la Imagen 2.42. Esto permite dotar de protección a los elementos que en él se integran, además de conseguir una disposición ordenada que facilitará labores técnicas, y de mantenimiento.

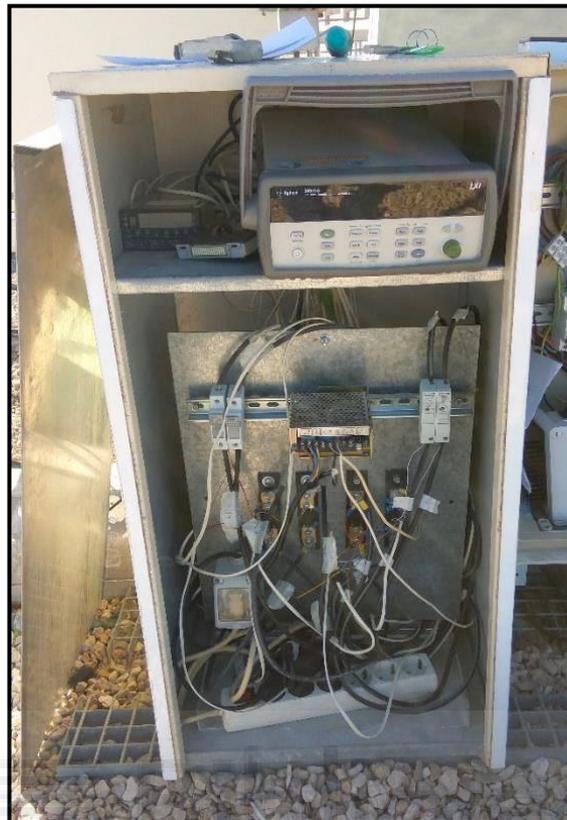


Imagen 2.42: Armario de sensorización

#### 2.2.3.4.5. Caja general de protección

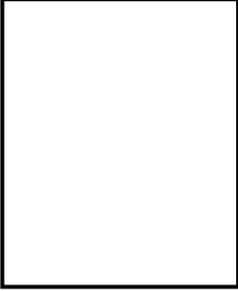
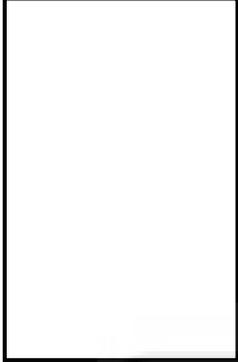
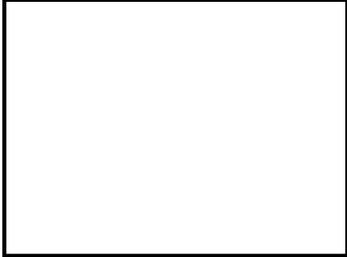
Colindando con el armario de sensorización, tenemos la caja general de protección (C.G.P), en la Imagen 2.43. En ella, encontramos el cuadro eléctrico, el inhibidor de corriente, y convertidores de intensidad, protegidos de agentes externos. Este cuadro eléctrico, es el componente principal electrónico, ya que garantiza la protección tanto de la instalación eléctrica del sistema, como de las personas que trabajan en el desarrollo del proyecto. Éste se encuentra sobre unos carriles DIN atornillados al armario.



Imagen 2.43: Caja general de protección

La caja general de protección está constituida por diversos componentes. Nos disponemos a nombrar y describir cada uno de ellos en la Tabla 2.4:

Componente	Descripción
<p>Interruptores general automáticos (IGA)</p> 	<p>La función que tiene este componente es proteger la instalación de posibles sobrecargas o cortocircuitos que se puedan producir. Al generarse una sobrecarga o cortocircuito, el IGA corta inmediatamente el suministro de luz. En la instalación se han colocado dos interruptores de este tipo: uno a la salida del inversor, y otro conectado directamente al cuadro eléctrico del laboratorio.</p>
<p>Interruptores diferenciales (ID)</p> 	<p>Su función es proteger a las personas de los contactos directos e indirectos, provocados por el contacto con partes activas de la instalación, o con elementos sometidos a potencial; cuando existe una derivación de corriente se corte el suministro de la misma. Estos interruptores están situados aguas abajo de los IGA.</p>
<p>Pequeños interruptores automáticos</p> 	<p>Estos componentes cumplen la misma función que los IGA, pero aplicados a la seguridad de los elementos en la parte inferior del cuadro. Estos interruptores estarán colocados aguas abajo de los interruptores diferenciales y los IGA.</p>
<p>Fusibles y portafusibles</p> 	<p>Los fusibles utilizados en la instalación son de tipo 'gG' de 10 A. Estos componentes eléctricos se encargan de evitar que, debido a cortocircuitos o excesos de carga, el resto de los componentes puedan sufrir daños, interrumpiendo la alimentación de estos. En la instalación, los fusibles están conectados a la salida de las placas fotovoltaicas y antes del inversor, con el fin de proteger la conexión entre estos componentes.</p>

<p>Resistencia shunt</p> 	<p>Mide la intensidad generada por cada panel fotovoltaico, y la transmite a un canal de tensión de la tarjeta de adquisición de datos. Se cuenta con cuatro de estos elementos, donde cada uno está conectada a la salida de los paneles fotovoltaicos, y a la propia unidad de adquisición de datos.</p>
<p>Convertidor de corriente</p> 	<p>Convierten la corriente alterna en corriente continua, y así poder ser procesada por la tarjeta de adquisición de datos para su posterior análisis.</p>
<p>Toma de corriente</p> 	<p>Proporciona corriente a los elementos del armario de sensorización y CGP, que la necesiten.</p>
<p>Fuente de alimentación</p> 	<p>La fuente de alimentación es la encargada de convertir la corriente alterna de la red, en varias corrientes continuas con tensiones de 5 V, 12 V y 24 V, que alimentan a los sensores repartidos por todo el prototipo.</p>

<p>Tomas de tierra</p> 	<p>Aseguran la seguridad en la instalación frente a desviaciones de corriente. Todos los componentes metálicos estarán conexionados a tierra, asegurando así la seguridad en la instalación frente a posibles fallos de aislamiento, y previniendo accidentes. En el cuadro, se dispondrá de una toma de tierra, a la cual llegarán todas las de la instalación.</p>
--	--

Tabla 2.4: Componentes de la C.G.P

#### 2.2.3.4.6. Caja de interruptores

En el lateral de la base de la estructura del prototipo se encuentra la caja de interruptores, cuya función es controlar el funcionamiento de los elementos que simulan la carga térmica, es decir, la resistencia térmica y calentadores.

La caja está preparada para funcionar en condiciones exteriores, al disponer de protección frente a la entrada de agua, y golpes. La caja contiene tres interruptores, los cuales se encuentran correctamente etiquetados para facilitar el manejo de la instalación, y cada uno funciona con una resistencia por separado, permitiendo activar o desactivar cada una de las resistencias, y así establecer tres escalones de carga térmica, donde se podrá analizar distintos comportamientos del prototipo. Se obtiene una mayor flexibilidad a la hora de los análisis.

En la Imagen 2.44 se observan todos los interruptores de la caja. Los dos primeros de la izquierda encienden los dos calentadores, uno y dos, respectivamente. El de la derecha se encarga de la alimentación de la tercera resistencia térmica. Además, en la segunda caja de interruptores, se incluye una pantalla que debe estar en ON para conectar la tercera resistencia mencionada, y un termómetro digital.



Imagen 2.44: Caja de interruptores de la instalación

## 2.3. SUBSISTEMAS DE LA INSTALACIÓN

La instalación del sistema de refrigeración solar basado en chimenea solar fotovoltaica evaporativa se tratará durante el trabajo en cuatro partes diferenciadas, mediante el programa 'Matlab'. En la Tabla 2.5 se muestra los cuatro subapartados en los que se descompondrá el sistema:

SUBAPARTADOS	DESCRIPCIÓN
Panel solar fotovoltaico	En este subapartado nos centraremos en el análisis térmico del panel solar, describiendo los flujos de calor en el mismo. Se tratará con profundidad la expresión que modelice el rendimiento del panel.
Chimenea solar fotovoltaica evaporativa	Nos centraremos en completar el análisis del panel, complementando el análisis térmico con la inclusión del enfriamiento evaporativo, que sucede en la parte anterior del panel.
Enfriadora	Una vez finalizado en el análisis de la chimenea, pasamos a incluir la bomba de calor de la instalación.
Bomba hidráulica	Para terminar, concluimos la modelización con la bomba hidráulica del circuito de calor.

Tabla 2.5: Subsistemas de la instalación

Con independencia de la situación, todos estos subsistemas forman el modelo del sistema de refrigeración. En cambio, el circuito de frío conectado a la bomba de calor será propio de cada instalación. Es por esto por lo que, se ha decidido que lo conveniente sería generar una modelización sin tener en cuenta el lazo frío.

La modelización será realizada para toda la instalación de chimeneas solares fotovoltaicas. Como hemos explicado anteriormente, la instalación cuenta con cuatro chimeneas solares fotovoltaicas, donde tenemos dos tipos de modelo de paneles solares; observando las especificaciones de los dos modelos, se puede ver que contienen características muy similares. La instalación se construyó de manera adecuada, y por ello hemos considerado que las cuatro chimeneas actuarán idénticamente; modelizamos una chimenea, y los resultados los multiplicamos por cuatro, por eso lo de considerarlas idénticas.

## 2.4. TRANSMISIÓN DE CALOR

Antes de pasar con el análisis de los subsistemas de la instalación, se ha considerado necesario realizar una breve explicación sobre los tres tipos de transmisión de calor que podemos encontrar (convección, conducción, y radiación), al ser una parte fundamental para el desarrollo de la modelización del sistema.

### 2.4.1. CONVECCIÓN

La convección es una de las formas de transmisión de calor. Se produce mediante el contacto entre un fluido, en cualquier estado, y un sólido. Hay que recordar que, la transmisión de calor solo se producirá cuando uno de los dos cuerpos esté a mayor temperatura, puesto que el flujo de calor sucede de un cuerpo caliente, a uno más frío.

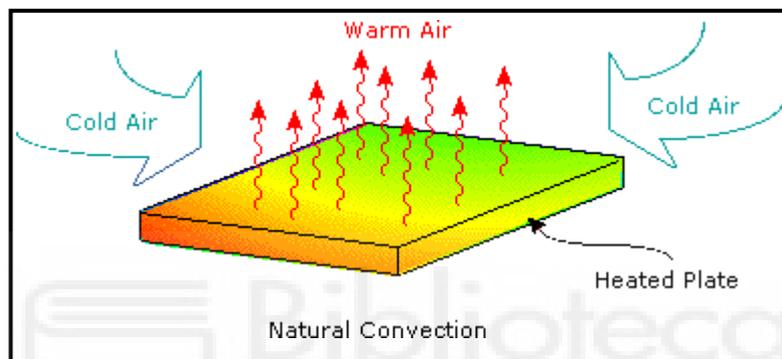


Imagen 2.45: Transmisión por convección

Una vez entendido en que consiste la convección, solo restaría mostrar la fórmula de la transmisión de calor por este método, que utilizaremos para el análisis térmico del panel. En la Tabla 2.6 se muestra la simbología de esta ecuación:

$$Q = h \cdot A \cdot (T_s - T_{ext})$$

h	Coeficiente de convección del fluido en contacto con la superficie [W/(m <sup>2</sup> ·°C)]
A	Área superficial del objeto en contacto con el fluido (m <sup>2</sup> )
T <sub>s</sub>	Temperatura, de la superficie, del objeto en contacto con el fluido (°C)
T <sub>ext</sub>	Temperatura del fluido en cuestión (°C)

-Como está definido, en la fórmula, la diferencia de temperaturas da a entender que la transmisión de calor es del cuerpo sólido al fluido.

Tabla 2.6: Componentes de la convección

## 2.4.2. CONDUCCIÓN

La segunda forma de transmisión de calor sería la conducción; sucede debido al contacto entre dos sólidos, donde uno de ellos sea el cuerpo caliente, y el otro el cuerpo frío.

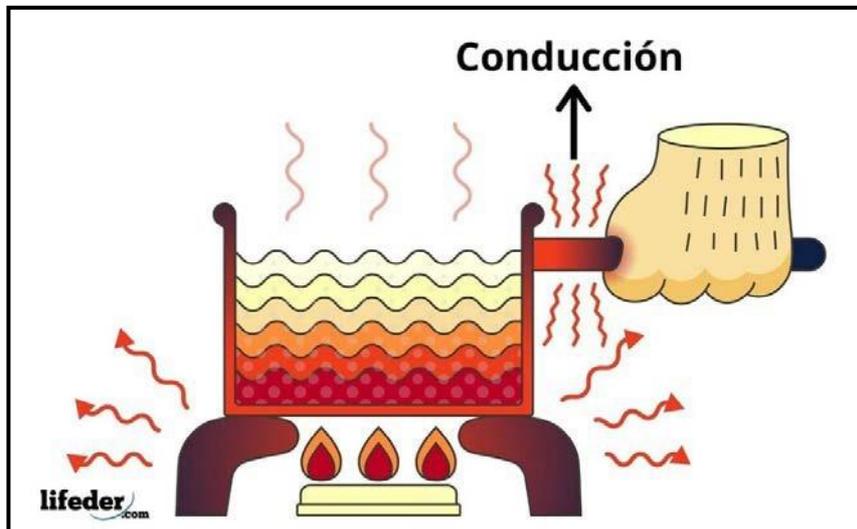


Imagen 2.46: Transmisión por conducción

Al igual que en la convección, solo faltaría mostrar la fórmula pertinente necesaria para el análisis del panel, y su simbología en la Tabla 2.7.

$$Q_{\text{conducción}} = k \cdot A \cdot \frac{(T_2 - T_1)}{e}$$

k	Coeficiente de convección del fluido en contacto con la superficie [W/(m·°C)]
A	Área superficial de contacto entre los dos cuerpos (m <sup>2</sup> )
T <sub>2</sub>	Temperatura, de la superficie, del objeto de mayor temperatura (°C)
T <sub>1</sub>	Temperatura, de la superficie, del objeto de menor temperatura (°C)
e	Espesor entra las dos superficies exteriores, de los cuerpos en contacto (m)

Tabla 2.7: Componentes de la conducción

### 2.4.3. RADIACIÓN

Terminamos las formas de transmisión de calor con la radiación. A diferencia de los otros dos casos, la radiación no requiere de un contacto entre un objeto con un fluido, u otro cuerpo. Esta transmisión es una energía que libera el propio cuerpo, y esta variará en magnitud en función de su temperatura, entre otros factores.

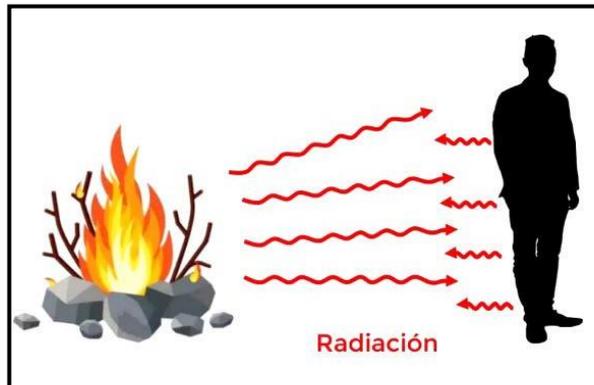


Imagen 2.47: Transmisión por radiación

Para el estudio completo del análisis térmico del panel, también requerimos de la fórmula de esta forma de transmisión y su simbología, que podemos encontrar en la Tabla 2.8.

$$\dot{Q}_{\text{radiación}} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4$$

$\epsilon$	Coeficiente de emisividad
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann: $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ [W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)]$
A	Área superficial del cuerpo a estudiar ( $\text{m}^2$ )
T	Temperatura del cuerpo en cuestión (K)

-El término de  $(A \cdot \sigma \cdot T^4)$  representa la radiación del cuerpo que podría llegar a emitir. El coeficiente de emisividad ( $0 \leq \epsilon \leq 1$ ) marcará cuánto, de todo este calor, se va a emitir en realidad.

Tabla 2.8: Componentes de la radiación

Cabe destacar que, de la radiación total incidente sobre un cuerpo, parte se transmite, otra se absorbe, y el resto se refleja, como se puede ver en la Tabla 2.9. Esto estará reflejado mediante sus respectivos coeficientes.

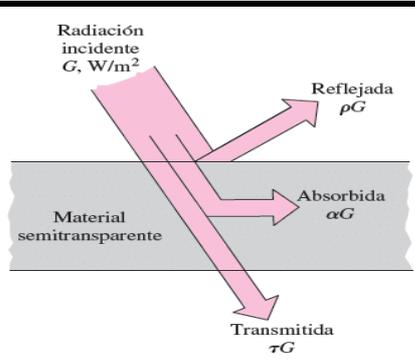
$\rho + \alpha + \tau = 1$		Representación
$\alpha$	Coeficiente de absorptividad	
$\tau$	Coeficiente de transmisividad	
$\rho$	Coeficiente de reflectividad	

Tabla 2.9: Fenómenos de la radiación

La mayoría de los materiales son opacos a la radiación térmica, pero existen algunos materiales como el vidrio o el agua que permiten el paso de algunos tipos de radiación. En nuestro caso, la radiación solar incidente puede atravesar la capa de vidrio del panel fotovoltaico.

Para terminar con este apartado, es necesario tratar la ley de Kirchhoff. En ésta, se dice que cuando una superficie emisiva (objeto), está encerrada por completo en otra mucho mayor (cielo), y separadas por un gas que no interfiere en la radiación (aire); se postula que la radiación absorbida por el objeto se iguala a la radiación emitida por el cielo.

$$\dot{q} = \alpha \cdot T_{\text{cielo}}^4 \cdot \sigma - \epsilon \cdot T_{\text{objeto}}^4 \cdot \sigma = \epsilon \cdot \sigma \cdot (T_{\text{cielo}}^4 - T_{\text{objeto}}^4)$$

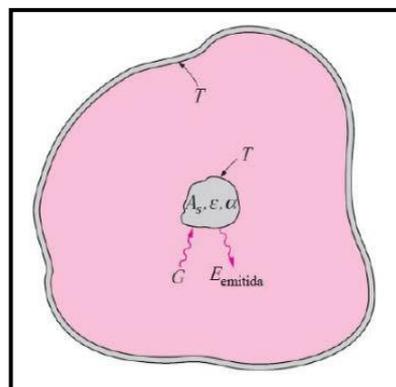


Imagen 2.48: Ley de Kirchhoff

## 2.5. PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO

### 2.5.1. COEFICIENTES DE CONVECCIÓN DEL SISTEMA

Como se ha podido ver durante el anterior apartado, la fórmula existente para la transmisión de calor por convección no supone ninguna dificultad. La verdadera dificultad proviene en el coeficiente de convección. Este valor no se puede obtener mediante mediciones, y se ha de seguir un proceso laborioso para su obtención. En los años anteriores, se ha abordado este tema en dos proyectos; el primero sería Aguilar (2008), y el segundo sería en García (2015). Este trabajo no tiene como uno de sus objetivos la obtención del coeficiente, pero para tener una idea clara, se va a exponer una breve explicación del proceso. Para más información, acudir a los trabajos anteriormente citados.

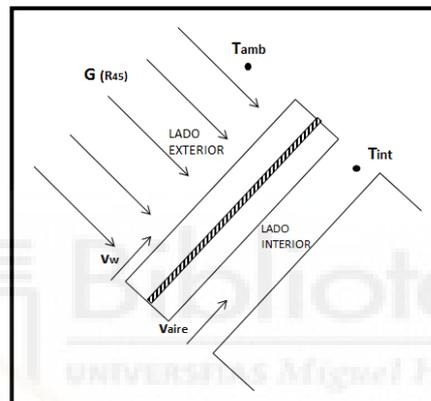


Imagen 2.49: Convección en el panel

Antes de nada, se debe aclarar que contamos con dos zonas de convección en el panel. La primera sería la convección entre el aire exterior y la capa posterior del panel; la segunda sería en la zona anterior, entre la capa del panel que da a ese lado, y el aire que está recorriendo el interior de la chimenea. Por lo tanto, tenemos que obtener el coeficiente de convección externo e interno.

En Aguilar (2008) se ha obtenido unas expresiones iniciales para estos coeficientes. Tanto la convección interna como la externa se han obtenido realizando el análisis en estado transitorio, y además se ha tenido en cuenta el efecto del calentamiento y enfriamiento del panel. Se realizó un análisis térmico del panel, y mediante el programa 'STATISTIX', se ha generado un estudio para observar cuál de las variables del análisis tenía mayor relevancia en los coeficientes de convección. Se realizó una comparativa entre la radiación, la temperatura ambiente, las temperaturas del panel en la capa exterior e interior, y la velocidad del viento exterior; el resultado fue que ésta última era la que afectaba más a los coeficientes. Una conclusión coherente, debido a que los fabricantes de paneles solares siempre recomiendan instalar los sistemas en zonas ventiladas.

Partiendo de esta información, se pasó a generar un modelo matemático para poder estudiar los coeficientes en función de la velocidad del viento exterior. Mediante los resultados de este proceso, se obtuvieron unas expresiones para definir estos coeficientes, en función de la velocidad del viento en el exterior.

$$h_e = 1,69 \cdot V_w + 14,50$$

$$h_i = 1,97 \cdot V_w + 10$$

Imagen 2.50: Expresiones Francisco Javier Aguilar Valero

En García (2015) se buscó ajustar estas expresiones para obtener un error mínimo. Como primer paso, se decidió centrarse en el coeficiente de convección externo, al ver que era el que afectaba más en el modelo. Mediante una serie de valores de la velocidad del viento exterior, se calculó el coeficiente de convección exterior para tres ensayos diferentes, donde se tomaba en cada uno un rendimiento del panel solar distinto. Con el análisis, se pudo obtener unas expresiones más ajustadas a la realidad, donde esta vez el coeficiente de convección interno dependía de la velocidad del viento en el interior de la chimenea.

$$h_s = 0,841 \cdot v^* + 4,61$$

$$h' = 1,97 \cdot v' + 10$$

Imagen 2.51: Expresiones Víctor García García

Las expresiones, que se pueden ver en la imagen 2.51, son las que se han utilizado para el análisis térmico de panel fotovoltaico. El significado de sus variables se puede encontrar en la Tabla 2.10.

$h_e$	Coeficiente de convección del exterior [W/(m <sup>2</sup> ·°C)]
$h_i$	Coeficiente de convección de la zona interior del panel [W/(m <sup>2</sup> ·°C)]
$v_v$	Velocidad del viento exterior (m/s)
$v_i$	Velocidad del viento en la zona interior del panel (m/s)

Tabla 2.10: Parámetros coeficientes de convección

### 2.5.1.1. Velocidad del viento interior

Para terminar con el apartado, cabe destacar las velocidades del aire, de las que dependen los coeficientes de convección. La velocidad del viento exterior no supone ningún problema, puesto que con el anemómetro de veleta se puede cuantificar su valor. Para la velocidad del viento interior se decidió obtener, en García (2015), una expresión para este parámetro en función del caudal de agua rociada en la chimenea, al saber su valor gracias al caudalímetro del circuito de calor.

Para obtener la expresión, se utilizaron unos datos experimentales de caudal de ensayo, y velocidad del viento en el interior de la chimenea, este último conjunto de datos fue gracias al anemómetro de película caliente. Con esta información, se representó la evolución del caudal de agua en función de la velocidad del aire en el interior, y así se llegó a la expresión deseada. Para más información sobre el proceso descrito, acudir a García (2015). La explicación de la simbología la podemos encontrar en la Tabla 2.11.

$$v = -207,32538 \cdot \dot{m}_+ + 67,97833 \cdot m_+ - 2,38035$$

$v_i$	Velocidad del viento en la zona interior del panel (m/s)
$\dot{m}_-$	Gasto másico de agua rociada a la chimenea solar (kg/s)

Tabla 2.11: Parámetros velocidad interior del aire

## 2.5.2. RENDIMIENTO DEL PANEL FOTOVOLTAICO

El rendimiento del panel no tiene una expresión definida absoluta; existen una gran cantidad de estudios donde se ha ido obtenido expresiones de este rendimiento en función de diferentes parámetros: temperatura de la celda solar, temperatura ambiente, radiación solar incidente en el panel, etc.

En nuestro caso hemos decidido apoyarnos en un estudio perteneciente de Skoplaki y Palyvos (2008), que se puede encontrar en la página web de 'ScienceDirect'. A lo largo del documento, se expone información de gran utilidad para obtener una expresión del rendimiento del panel. Al final del estudio se puede encontrar una tabla, donde se expone diferentes expresiones para el rendimiento (Imagen 2.52). Se ha seleccionado para el proyecto tres de esas expresiones, y se ha comparado los resultados obtenidos del rendimiento con estas fórmulas, con los resultados experimentales de los ensayos; y así decidir cuál de las expresiones elegidas modelizaban con más exactitud nuestro sistema.

Correlation	Comments	Ref.
$\eta_T = \eta_{Tref} [1 - \beta_{ref}(T - T_{ref})]$	$T_{ref} = 25\text{ }^\circ\text{C}$ , $\eta_{Tref} = 0.15$ , $\beta_{ref} = 0.0041\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , c-Si, $T$ in $^\circ\text{C}$	Evans and Florschuetz (1977)
$\eta_{PV} = \eta_{ref} - \mu(T_c - T_{ref})$	$\mu$ = overall cell temperature coefficient	Bazilian and Prasad (2002)
$\eta = \eta_a - c(T - T_a)$	$T$ = mean solar cell temp, $\eta_a$ = efficiency at $T_a$ , $c$ = temperature coefficient	Bergene and Lovvik (1995)
$\eta = \eta_{25} + b(T_c - 25)$ $\eta(G_T, T_c) = \eta(G_T, 25\text{ }^\circ\text{C})[1 + c_3(T_c - 25)]$	$b = b(G_T)$ , $T$ in $^\circ\text{C}$ $c_3 = -0.5$ (% loss per $^\circ\text{C}$ ) for c-Si, $-0.02, \dots, -0.41$ for thin film cells	Durisch et al. (1996)
$\eta_T = \eta_0 - K(T^{1/4} - T_0^{1/4})$	$T_0 = 273\text{ K}$ , $K = 22.4$	Mohring et al. (2004)
$\eta_a = \eta_n \times k_\gamma \times k_\theta \times k_\alpha \times k_\lambda$ with $k_j = 1 - \gamma(T_c - 25)/100$	$k_j$ = power temperature coefficient, $k_p, j = \theta, \alpha, \lambda$ optical, absorption, spectrum correction factors	Ravindra and Srivastava (1979/80)
$\eta = \eta_{Tref} \left[ 1 - \beta_{ref} \left( \frac{T_a - T_{ref}}{T_a - T_{ref}} \right) - \frac{\beta_{ref} \ln(G_T)}{nU_L} \right]$	$5\%$ low predictions, $\beta_{ref} \sim 0.004\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , $\eta_{Tref} = 0.15$ , $T_{ref} = 0\text{ }^\circ\text{C}$	Aste et al. (2008)
$\bar{\eta} = \eta_{Tref} \left[ 1 - \beta_{ref} \left( \frac{T_a - T_{ref}}{T_a - T_{ref}} \right) - \frac{\beta_{ref} \ln(V)}{nU_L} \right]$	$\bar{\eta}$ = monthly average efficiency, $V$ = dimensionless, $\beta_{ref} \sim 0.004\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Siegel et al. (1981)
$\eta_i = \eta_{Tref} [1 - \beta_{ref}(T_{c,i} - T_{ref}) + \gamma \log_{10} I_i]$	$\eta_i$ = hourly efficiency, $I_i$ = incident hourly insol, $\beta_{ref} \sim 0.0045\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , $\gamma \sim 0.12$	Siegel et al. (1981)
$\eta = \eta_{Tref} [1 - \beta_{ref}(T_c - T_{ref}) + \gamma \log_{10} G_T]$	$\eta$ = instantaneous efficiency, $\beta_{ref} = 0.0044\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , $\eta_{Tref} = 0.125$ , $T_{ref} = 25\text{ }^\circ\text{C}$	Evans (1981) and Cristofari et al. (2006)
$\bar{\eta} = \eta_{Tref} \{ 1 - \beta_{ref} [(T_c - T_a) - (T_a - \bar{T}_a) - (\bar{T}_a - T_{ref})] + \gamma \log_{10} I \}$	$\bar{\eta}$ = monthly average efficiency, $\beta_{ref} \sim 0.0045\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ , $\gamma \sim 0.12$	Notton et al. (2005)
$\eta = \eta_{ref} [1 - a_1(T_c - T_{ref}) + a_2 \ln(G_T/1000)]$	For Si $a_1 = 0.005$ , $a_2 = 0.052$ , omitting the ln term slightly overestimates $\eta$	Evans (1981)
$\eta(XG_T, T) = \eta(G_T, T_{ref}) [1 - \beta_{ref}(T - T_0)] \left( 1 + \frac{k_a T}{q} \frac{\ln X}{V_{oc}(G_T, T_0)} \right)$	$X$ = concentration factor, for $X = 1$ it reduces to Eq. (2)	Anis et al. (1983)
$\eta = \eta_{ref} \left\{ 1 - \beta \left[ T_a - T_{ref} + (T_{NOCT} - T_a) \frac{G_T}{G_{NOCT}} \right] \right\}$	The $T_c$ expression from Kou et al. (1998) is introduced into the $\eta$ expression in Evans and Florschuetz (1977)	Lasnier and Ang (1990)
$\eta = \eta_{ref} \left\{ 1 - \beta \left[ T_a - T_{ref} + \left( \frac{9.5}{3.7 + 3.8V_w} \right) (T_{NOCT} - T_a) \frac{G_T}{G_{NOCT}} \right] \right\}$	The $T_c$ expression from Duffie and Beckman (2006) is introduced into the $\eta$ expression in Evans and Florschuetz (1977)	-
$\eta = \eta_{ref} \left[ 1 - 0.9\beta \frac{G_T}{G_{NOCT}} (T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}) - \beta(T_a - T_{ref}) \right]$	Assumes $\eta \approx 0.9(\tau\alpha)$	Hove (2000)
$\eta_{nom} = -0.05T_{surface} + 13.75$	$T_{surface} = 1.06T_{back} + 22.6$	Yamaguchi et al. (2003)
$\eta_{meas} = -0.053T_{back} + 12.62$	Nominal vs measured values	Zhu et al. (2004)
$\eta = a_0 + a_1 \frac{T_{(c,d)} - T_\infty}{T_\infty} + a_2 \frac{G_T - G_{ref}}{G_{ref}}$	$A_k, k = 0, 1$ and $2$ are empirical constants, $T_\infty$ is the indoor ambient temperature	-
$\eta_{MPP}(G_T, T) = \eta_{MPP}(G_T, 25\text{ }^\circ\text{C}) (1 + \alpha(T - 25)) \epsilon \eta_{MPP}(G_T, 25\text{ }^\circ\text{C})$ $= a_1 + a_2 G_T + a_3 \ln(G_T)$	$a_1 - a_3$ device specific parameters, MPP tracking system	Beyer et al. (2004)
$\eta = \eta_{NOCT} [1 - MPTC(T_{NOCT} - T_c)]$	$MPTC$ = maximum power temperature coefficient <sup>a</sup>	Perlman et al. (2005)
$\eta = a + b \frac{T_c - T_a}{G_T}$	PV/T collector. PV cover: 100% $\rightarrow a = 0.123$ , $b = -0.464$ 50% $\rightarrow a = 0.121$ , $b = -0.450$	Chow et al. (2006)
$\eta = 0.94 - 0.0043 \left[ \bar{T}_a + \frac{\bar{G}_T}{(22.4 + 8.7T_{c,i})} - 25 \right] \pm 2.6\%$	Overbars denote daily averages. $\bar{G}_T$ = Wh/m <sup>2</sup> received/length of day (h) $T_{c,i}$ in m/s	CLEFS CEA (2004)

Imagen 2.52: Expresiones rendimiento del panel

En la Tabla 2.12 se han escrito todas las expresiones con las que vamos a trabajar y la simbología correspondiente a cada una de ellas:

FÓRMULAS					
$\eta_p = \eta_{ref} \cdot \left[ 1 - \beta_{ref} \cdot (T_c - T_a) \right]$					
$\eta_p = \eta_{ref} \cdot \left[ 1 - \beta_{ref} \cdot (T_c - T_a) + \gamma \cdot \log_{12} \left( \frac{G_{sol}}{G_{NOCT}} \right) \right]$					
$\eta_p = \eta_{ref} \cdot \left[ 1 - \beta_{ref} \cdot (T_c - T_a) + (T_{56.7} - T_a) \cdot \frac{G_{sol}}{G_{56.7}} \right]$					
PARÁMETROS					
$\eta_c$ : Rendimiento de panel (-)		$\eta_{ref}$ : Rendimiento del panel a una $T_{ref}$ (-)			
$T_{ref}$ : Temperatura de referencia (°C)		$\beta_{ref}$ : Coeficiente de temperatura (°C <sup>-1</sup> )			
$T_c$ : Temperatura de la célula solar (°C)		$\gamma$ : Coeficiente de radiación solar (-)			
$G_{sol}$ : Radiación solar incidente (W/m <sup>2</sup> )		$T_{ext}$ : Temperatura exterior (°C)			
$T_{NOCT}$ : Temperatura nominal de célula (°C)		$T_a$ : Temperatura nominal del aire (°C)			
$G_{NOCT}$ : Radiación solar incidente nominal de célula (W/m <sup>2</sup> )					
-El funcionamiento nominal hace referencia, a las condiciones normales de operación para el que fue diseñado el panel, es decir, donde trabaja normalmente.					
VALORES DE LOS PARÁMETROS					
$T_{ref}=25^{\circ}\text{C}$	$\eta_{ref}=0,157$	$\beta_{ref}=0,0044^{\circ}\text{C}^{-1}$	$T_{NOCT}=47^{\circ}\text{C}$	$G_{NOCT}=800\text{ W/m}^2$	$T_a=20^{\circ}\text{C}$
-Todos los valores mostrados se han obtenido del documento mencionado al comienzo del apartado, y de la ficha técnica del fabricante (Imagen 2.53).					
-Tanto $T_{ext}$ , como $G_{sol}$ se obtienen por mediciones en la instalación.					

Tabla 2.12: Rendimiento del panel solar

Hay que recordar que al principio del apartado dos, resaltábamos que la modelización será para una sola chimenea solar fotovoltaica. Al haber dos modelos de paneles solares en la instalación, hemos decidido utilizar el modelo 'SR-P660255', de la marca Sunrise.

Características del Producto					
No. de Modelo	SR-P660245	SR-P660250	SR-P660255	SR-P660260	SR-P660265
<b>Garantía</b>					
Garantía de Producto	12 Años				
Garantía de energía	12 años de 90% potencia de salida, 25 años de 80% potencia de salida				
<b>Características Eléctricas en STC</b>					
Potencia Máxima (Pmax)	245 Wp	250 Wp	255 Wp	260 Wp	265 Wp
Tensión en el Punto de Máxima Potencia (Vmax)	29,89 V	30,08 V	30,32 V	30,61 V	30,82 V
Corriente en el punto de máxima potencia (Imax)	8,2 A	8,32 A	8,42 A	8,5 A	8,6 A
Tensión en Circuito Abierto (Voc)	37 V	37,23 V	37,53 V	37,89 V	38,15 V
Corriente de cortocircuito (Isc)	8,76 A	8,89 A	9 A	9,08 A	9,19 A
Eficiencia	15,1 %	15,4 %	15,7 %	16,01 %	16,31 %
Tolerancia de Potencia (+)	+ 3 %	+ 3 %	+ 3 %	+ 3 %	+ 3 %
<i>Condiciones de prueba estándar (STC): Masa de aire AM 1,5, radiación 1000W/m<sup>2</sup>, temperatura de célula 25°C.</i>					
<b>Características Eléctricas en NOCT</b>					
Temperatura	45±2 °C				
<i>Temperatura en condiciones normales de operación (NOCT): 800W/m<sup>2</sup>, AM 1.5, velocidad del viento de 1m/s, temperatura ambiente de 20°C.</i>					
<b>Características Térmicas</b>					
Rango de Temperatura	-40-85 °C				
Coefficiente de Temperatura de Pmax	-0,44 %/°C				
Coefficiente de Temperatura de Voc	-0,33 %/°C				
Coefficiente de Temperatura de Isc	0,055 %/°C				
<b>Parámetros del Sistema</b>					
Tensión Máxima del Sistema	1000 V				
Límite de Corriente	15 A				
<b>Características Mecánicas</b>					
Dimensiones (A/A/F)	1640x992x35 mm				
Peso	18,2 kg				
Tipo de Células	Policristalino				
Tamaño de las Células	156x156 mm				
Numero de Células	60				
Tipo de Vidrio	Templado, Alto Transparente, Bajo Hierro				
No. de Diodos Bypass Incorporados	3				

Imagen 2.53: Parámetros del rendimiento

### 2.5.2.1. Coeficiente de radiación solar

El coeficiente de radiación solar no se encuentra en el documento de Skoplaki y Palyvos (2008). Debido a esto, se ha realizado una regresión, aprovechando los datos de experimentales de los ensayos, y la expresión del rendimiento donde aparece el coeficiente. Hacemos uso de las mediciones del rendimiento, radiación solar, y la temperatura de la célula en los ensayos. Se han utilizado dos métodos diferentes:

- **Mínimos cuadrados:** Podemos utilizar este método para la obtención de los coeficientes, mediante el programa 'Excel'.
- **Matlab Curve Fitting:** Una aplicación adicional de la aplicación 'Matlab', que permite obtener los parámetros de la expresión que definamos.

En el subsistema de la enfriadora es muy relevante el uso de estas técnicas; se ha decidido posponer la exposición del método hasta alcanzar este subsistema.

Una vez obtenido el valor del coeficiente de radiación solar para los dos métodos, se tendrá en cuenta en la elección del modelo final. Además de comparar las tres fórmulas para el rendimiento del panel, también se comparará la segunda fórmula con cada uno de los valores del coeficiente de radiación solar; estos valores los podemos ver en la Imagen 2.54.



$\gamma=0,035$  (Mínimos cuadrados)  
 $\gamma=0,4122$  (Matlab Curve Fitting)

Imagen 2.54: Valores del coeficiente de radiación solar

### 2.5.3. RADIACIÓN ATMOSFÉRICA

Ya hemos comentado los diferentes tipos de análisis térmicos que tendremos en cuenta en función del rendimiento del panel. Otro factor a tener en cuenta es la radiación atmosférica, es decir, el término que hemos presentado al explicar la ley de Kirchhoff. Nos referimos a este intercambio de calor entre la capa frontal de vidrio, y la atmósfera.

$$\dot{q} = \alpha_{\text{vidrio}} \cdot T_{\text{cielo}}^4 \cdot \sigma - \epsilon_{\text{vidrio}} \cdot \sigma \cdot T_{\text{vidrio}}^4 = \epsilon_{\text{vidrio}} \cdot \sigma \cdot (T_{\text{cielo}}^4 - T_{\text{vidrio}}^4)$$

- $T_{\text{vidrio}}$  (°C): Temperatura de la capa de vidrio frontal del panel solar; este valor lo obtendremos mediante el análisis térmico.
- $T_{\text{cielo}}$  (°C): Temperatura de la capa más cercana, a la tierra, de la atmósfera. Nos estamos refiriendo a la troposfera, donde su temperatura es máxima en la superficie terrestre, y se va reduciendo a medida que aumenta la altura. Suele tener un valor de 15 °C de media.
- $\epsilon_{\text{vidrio}}$ : Emisividad a la radiación de la capa de vidrio frontal del panel solar. Para obtener su valor, al no haber sido proporcionado por el fabricante, nos hemos apoyado en las 'Tablas termodinámicas Cengel', para ser exactos en la tabla A-19 del apéndice 1.

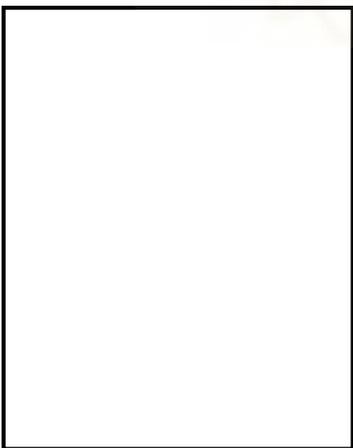
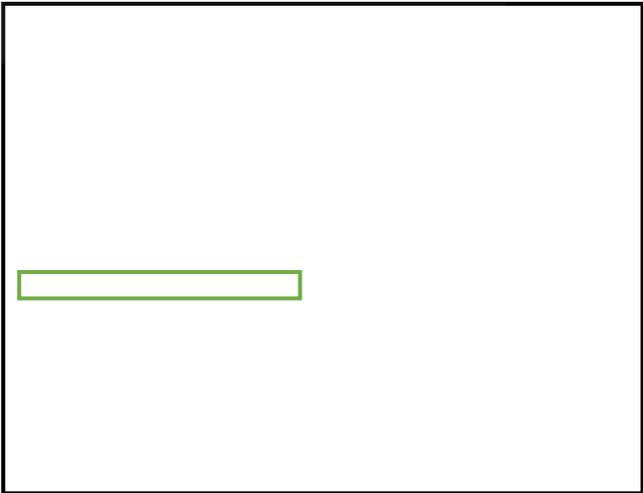
$T_{\text{vidrio}}$	Incógnita para el análisis térmico
$T_{\text{cielo}}$	15 °C
$\epsilon_{\text{vidrio}}$	0,94
	
Temperatura atmósfera	Emisividad de la capa de vidrio frontal del panel

Tabla 2.13: Radiación atmosférica

En esta Tabla 2.13 podemos encontrar los valores que se han utilizado para el análisis.

### 2.5.4. ÓPTICA DEL PANEL FOTOVOLTAICO

La última de las consideraciones que se ha tenido en cuenta para el panel, es la óptica del vidrio frontal respecto a la radiación solar incidente. Como recordaremos, la radiación incidente sobre un objeto se divide en la parte que se refleja, la que se transmite, y la que se absorbe. La parte que se refleja no toma relevancia en el análisis térmico; los vidrios frontales de paneles solares están hechos para absorber la menor cantidad de radiación solar posible, es por esto por lo que despreciamos la parte absorbida de la radiación en el análisis. Para terminar, tenemos la parte transmitida que será clave puesto que será esta la que se aproveche para generar la energía eléctrica.

La transmisividad a la radiación solar, de la capa de vidrio, estará marcada por la óptica. Se ha realizado un análisis de este tipo para poder calcular la transmisividad del cristal. Para poder explicar el cálculo realizado, es necesario introducir unos conceptos previos, que encontramos en la Tabla 2.14 y 2.15.

<b>Ley de Snell</b>	
-Se define el índice de refracción de un medio como la medida, que nos indica cuánto se reduce la velocidad de la luz dentro de un medio, con respecto al vacío.	
$n = \frac{c}{v}$	n: Índice de refracción en el medio
	c: Velocidad de luz en el vacío
	v: Velocidad de la luz en el medio a estudiar
-En la interfase entre dos medios se produce un cambio en la velocidad de la luz. Este cambio provoca que el ángulo del rayo incidente cambie al pasar de un medio al otro, y el rayo refractado tenga un ángulo diferente al incidente.	
-La relación entre el ángulo incidente y el refractado viene dada por la ley de Snell.	
$n_1 \cdot \text{sen}(\theta_i) = n_2 \cdot \text{sen}(\theta_r)$	$n_1$ : Índice de refracción del medio 1
	$n_2$ : Índice de refracción del medio 2
	$\theta_i$ : Ángulo de incidencia respecto al eje y
	$\theta_r$ : Ángulo de refracción respecto al eje y

Tabla 2.14: Ley de Snell

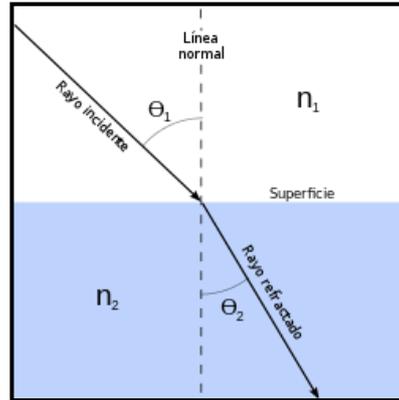


Imagen 2.55: Ley de Snell

<b>Ley de Fresnel</b>	
<p>-Mediante la ley de Fresnel, se consigue obtener una relación entre la fracción de luz reflejada con el ángulo de incidencia.</p> <p>-Podemos diferenciar la relación en función de la orientación, respecto de plano de incidencia, con la que el campo eléctrico de la luz está polarizado.</p>	
<b>Polarización perpendicular al plano (<math>R_s</math>)</b>	<b>Polarización paralela al plano (<math>R_p</math>)</b>
$R_s = \frac{n_1 \cdot \cos(\theta_i) - n_2 \cdot \cos(\theta_t)}{n_1 \cdot \cos(\theta_i) + n_2 \cdot \cos(\theta_t)}^2$	$R_p = \frac{n_1 \cdot \cos(\theta_i) - n_2 \cdot \cos(\theta_t)}{n_1 \cdot \cos(\theta_i) + n_2 \cdot \cos(\theta_t)}^2$
Se conoce como polarización en s	Se conoce como polarización en p
<p>-Lo que nos interesa para el análisis térmico, es el coeficiente de reflexión para la luz no polarizada, que viene dado mediante los dos tipos de polarización mencionados.</p>	
<b>Coefficiente de reflexión para luz no polarizada (R)</b>	$R = \frac{R_s + R_p}{2}$

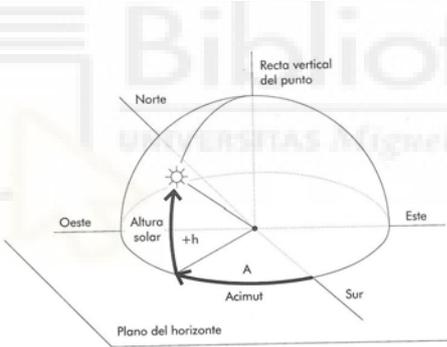
Tabla 2.15: Ley de Fresnel

Como despreciamos la parte absorbida de la radiación por el vidrio, la transmisividad del panel se puede calcular en función del coeficiente R:

$$\tau = 1 - \rho - \alpha \quad \xrightarrow{\quad} \quad \tau = 1 - R$$

$\alpha = 0; \rho = R$

El primer objetivo es obtener el ángulo de incidencia sobre la superficie del cristal. Una vez calculado este ángulo, mediante la ley de Snell y la de Fresnel, podremos calcular la transmisividad del cristal a la radiación solar incidente. Este proceso lo hemos presentado en su totalidad en la Tabla 2.16:

<b>Ángulo de declinación solar(<math>\alpha</math>)</b>	
-El ángulo de declinación solar es el ángulo entre el ecuador, y una línea trazada desde el centro de la Tierra al centro del sol.	
$\delta = 23,45^\circ \cdot \text{sen} G \frac{360}{365} \cdot (n + 284)J$	
n: Número del día del año	
<b>Ángulo solar azimutal (<math>Z_s</math>)</b>	
-El ángulo solar azimutal es el ángulo formado entre el haz solar, y el meridiano. En nuestro caso, para el hemisferio norte donde nos encontramos, tomaremos que una superficie orientada hacia el sur tiene un azimut de $0^\circ$ , y una al norte de $180^\circ$ .	
$Z_3 = 0$	
<b>Ángulo de incidencia sobre la superficie del cristal (<math>\theta_i</math>)</b>	
$\cos(\theta_i) = \text{sen}(L) \cdot \text{sen}(\delta) \cdot \cos(\beta) - \cos(L) \cdot \text{sen}(\delta) \cdot \text{sen}(\beta) \cdot \cos(Z_3) + \cos(L) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(h) \cdot \cos(\beta) + \cos(h) \cdot \text{sen}(\beta) \cdot \cos(Z_3) + \cos(\delta) \cdot \text{sen}(h) \cdot \text{sen}(\beta) \cdot \text{sen}(Z_3)$	
h: Ángulo horario solar	$h = (T - 12) \cdot 15^\circ$
	T: Hora del día
$\beta$ : Inclinación de la superficie a estudiar	$\beta = 45^\circ$

-Como se explicó en el apartado 2.2.2, la instalación de paneles está fijada con una inclinación de 45°.

L: Latitud local de la superficie

L=38,27°

-La latitud local es un valor de las coordenadas geográficas de Elche.

### Coordenadas geográficas de Elche

Elche se encuentra en la latitud 38.26218 y longitud -0.70107. Hace parte del continente de Europa y está ubicado en el hemisferio norte.

Coordenadas decimales

Formato simple

38.26218, -0.70107

Coordenadas GD

Grados decimales

38.2622° N 0.7011° O

Coordenadas GMS

Grados, minutos y segundos

38°15'43.8" N 0°42.064' O

### Ángulo de refracción sobre la superficie del cristal ( $\theta_r$ )

-Una vez calculado  $\theta_i$ , podemos calcular  $\theta_r$  mediante la ley de Snell, y sabiendo los índices de refracción en el aire y cristal.

$$n_1 \cdot \text{sen}(\theta_i) = n_2 \cdot \text{sen}(\theta_r)$$

$n_1$ : Índice de refracción en el aire

$n_1=1,00027417$

$n_2$ : Índice de refracción en el cristal

$n_2=1,5075$

-Para los índices de refracción, hemos utilizado una base de datos de índices de refracción a diferentes longitudes de onda (Imagen 2.56).

### Transmisividad del cristal ( $\tau$ )

-Con  $\theta_r$  calculado, ya podemos calcular  $R_s$  y  $R_p$ , y con eso obtener R. Con este último valor, ya podemos llegar a la transmisividad del cristal.

$$R_s = \frac{n_1 \cdot \cos(\theta_i) - n_2 \cdot \cos(\theta_r)}{n_1 \cdot \cos(\theta_i) + n_2 \cdot \cos(\theta_r)}$$

$$R_p = \frac{n_1 \cdot \cos(\theta_r) - n_2 \cdot \cos(\theta_i)}{n_1 \cdot \cos(\theta_r) + n_2 \cdot \cos(\theta_i)}$$

$$R = \frac{R_s + R_p}{2}$$

$$\tau = 1 - R$$

Tabla 2.16: Obtención transmitancia del cristal

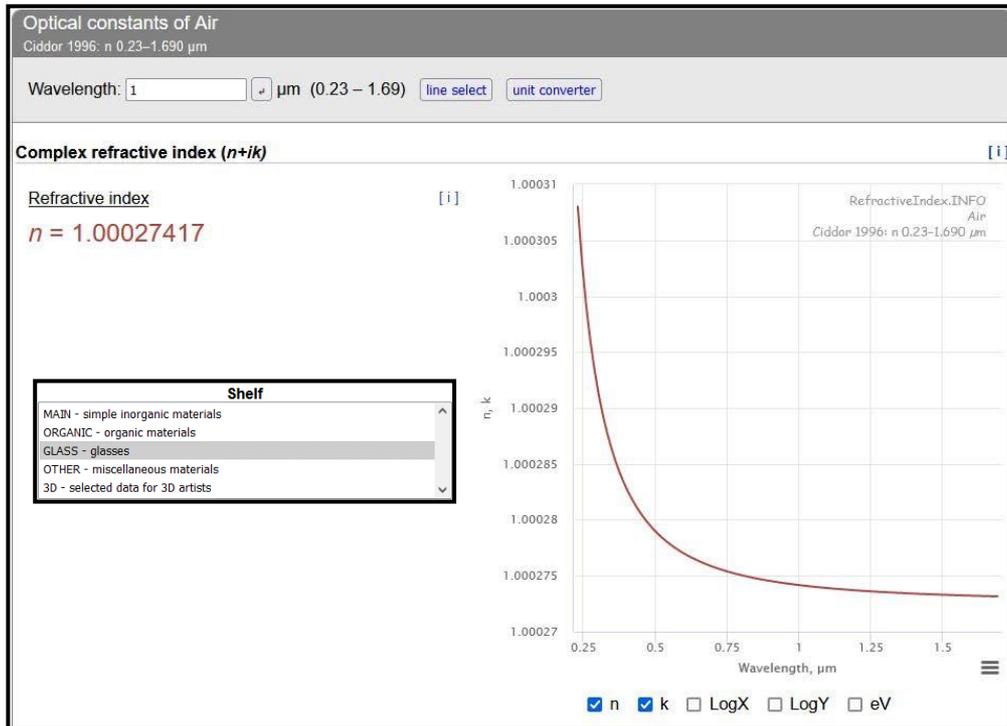


Imagen 2.56: Índices de refracción del aire y del cristal frontal del panel

### 2.5.5. ANÁLISIS TÉRMICO Y ELÉCTRICO DEL PANEL

Una vez explicado todo lo anterior, ya podemos proceder con el análisis térmico unidimensional del panel. Antes de mostrar gráficamente los flujos de calor en la Imagen 2.57, cabe destacar las diferentes opciones de análisis que se van a barajar para este subsistema:

- **Óptica:** La óptica del panel se ha introducido como un complemento del análisis, es decir, en vez de introducir un valor fijo de transmisividad en el cristal, se realiza una programación para, introduciendo el mes, el día y la hora, se pueda obtener la transmisividad del cristal a la radiación solar para ese momento exacto. Es práctica común considerar, para la capa de cristal del panel, una transmisividad de 0,9, y una reflectividad del 0,1, y sin absorptividad. Esta consideración se ha comprobado mediante la programación, calculando para un intervalo de tiempo la transmisividad, y se ha podido observar cómo los resultados fluctuaban entre 0,8-0,9. Por lo tanto, para este subapartado, se han considerado dos opciones respecto a este tema; uno donde la transmisividad sea una variable que calcular, y otro donde se mantenga fija con un valor de 0,9.
- **Radiación atmosférica:** Para el análisis térmico también se han considerado otras dos opciones además de la óptica: el intercambio de calor entre la radiación de la atmósfera y la de la capa frontal del panel solar; en el apartado 2.5.3 se encuentra la explicación de este flujo de calor. Se realizarán dos análisis adicionales con, y sin tener en cuenta este flujo.

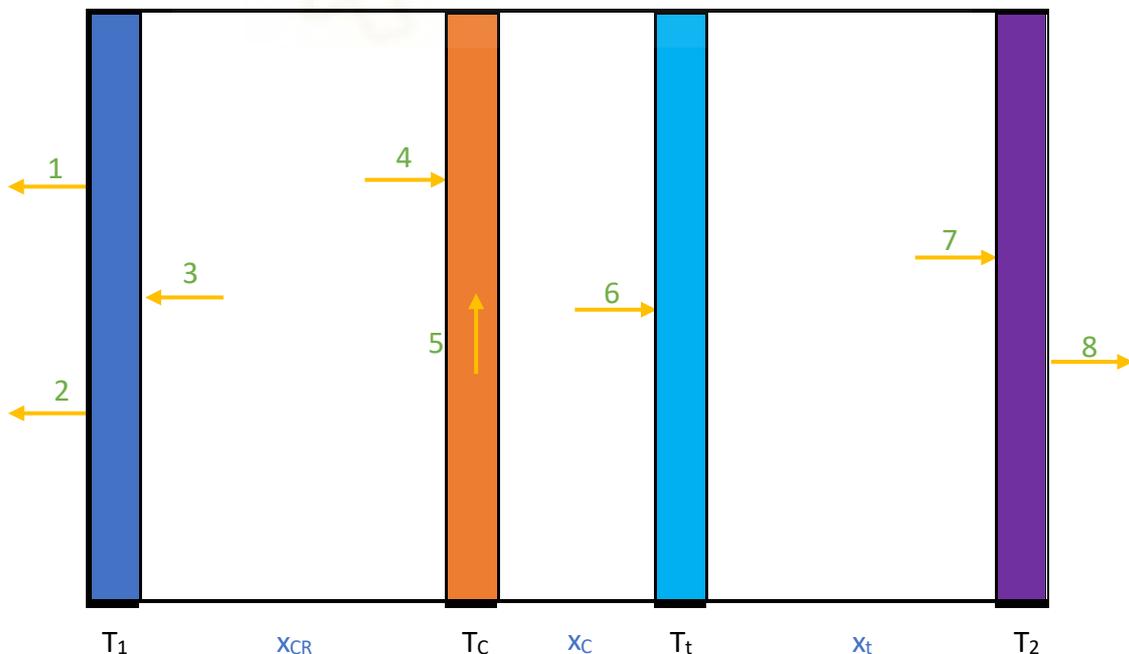


Imagen 2.57: Análisis térmico panel fotovoltaico

<b>ANÁLISIS TÉRMICO PANEL</b>			
<b>Capas del panel</b>			
1: Capa cristal	C: Capa célula	t: Capa tedlar	2: Capa posterior
-La capa de EVA, al tener un espesor tan reducido en comparación con sus capas contiguas, consideremos que el flujo de calor no se ve afectado, y por la tanto despreciamos esta capa.			
<b>Datos</b>			
$x_{CR}$ : Espesor capa de cristal	$x_{CR}=0,004$ m	$k_{CR}$ : Conductividad capa de cristal	$k_{CR}=1$ W/(m·K)
$x_C$ : Espesor capa de célula	$x_C=0,0003$ m	$k_C$ : Conductividad capa de célula	$k_C=148$ W/(m·K)
$x_t$ : Espesor capa de tedlar	$x_t=0,001$ m	$k_t$ : Conductividad capa de tedlar	$k_t=0,08$ W/(m·K)
A: Área de las capas del panel fotovoltaico		$A_1=A_C=A_t=A_2=A=1,623904$ m <sup>2</sup>	
<u>Datos experimentales</u>		$G_{sol}$ : Radiación solar incidente (W/m <sup>2</sup> )	
		$T_{ext}$ : Temperatura exterior (°C)	
		$T_{int}$ : Temperatura zona interior (°C)	
		$v_v$ : Velocidad del viento exterior (m/s)	
		$\dot{m}$ : Gasto másico de agua rociada (kg/s)	
<b>Incógnitas</b>			
$T_1$ : Temperatura capa de cristal		$T_C$ : Temperatura capa de célula	
$T_t$ : Temperatura capa de tedlar		$T_2$ : Temperatura capa posterior	
$\eta_c$ : Rendimiento de la célula fotovoltaica			
<b>Flujos de calor</b>			
1: $\epsilon_{1,2} \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_1 - T_{ext})$		2: $h_{4\%} \cdot A \cdot (T_1 - T_{4\%})$	
3: $\frac{k_{1,2} \cdot (T_{1,2} - T_1) \cdot A}{x_{1,2}}$		4: $G_{3\%}(\tau_{1,2}) \cdot A$	
5: $\eta_c \cdot G_{3\%} \cdot A$		6: $\frac{k_{2,3} \cdot (T_{2,3} - T_2) \cdot A}{x_{2,3}}$	
7: $\frac{k_{3,4} \cdot (T_{3,4} - T_2) \cdot A}{x_{3,4}}$		8: $h'_{< \%} \cdot A \cdot (T_2 - T'_{< \%})$	
<b>Sistema de ecuaciones</b>			
<b>Cristal:</b> $\epsilon_{1,2} \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_1 - T_{ext}) + h_{4\%} \cdot A \cdot (T_1 - T_{4\%}) = \frac{\tau_{1,2} \cdot G_{3\%} \cdot A}{4_{1,2}}$			
<b>Célula:</b> $G_{3\%}(\tau_{1,2}) \cdot A = \frac{\tau_{2,3} \cdot G_{3\%} \cdot A}{4_{2,3}} + \frac{\tau_{3,4} \cdot G_{3\%} \cdot A}{4_{3,4}} + \eta_c \cdot G_{3\%} \cdot A$			
<b>Tedlar:</b> $\frac{\tau_{2,3} \cdot G_{3\%} \cdot A}{4_{2,3}} = \frac{\tau_{3,4} \cdot G_{3\%} \cdot A}{4_{3,4}}$			
<b>Capa posterior:</b> $\frac{\tau_{3,4} \cdot G_{3\%} \cdot A}{4_{3,4}} = h'_{< \%} \cdot A \cdot (T_2 - T'_{< \%})$			
-Además de las temperaturas de las capas, tampoco conocemos el rendimiento del panel; introducimos una quinta ecuación con su fórmula.			

Tabla 2.17: Análisis térmico del panel

En la Tabla 2.17 se encuentra el desarrollo completo del subsistema del panel fotovoltaico. Para finalizar con el subsistema, vamos a realizar una explicación gráfica, que podemos ver en la Imagen 2.58, de los diferentes tipos de análisis térmicos a analizar. En el apartado 3, mostraremos la eficacia de cada uno de los análisis, y el escogido para la modelización final.

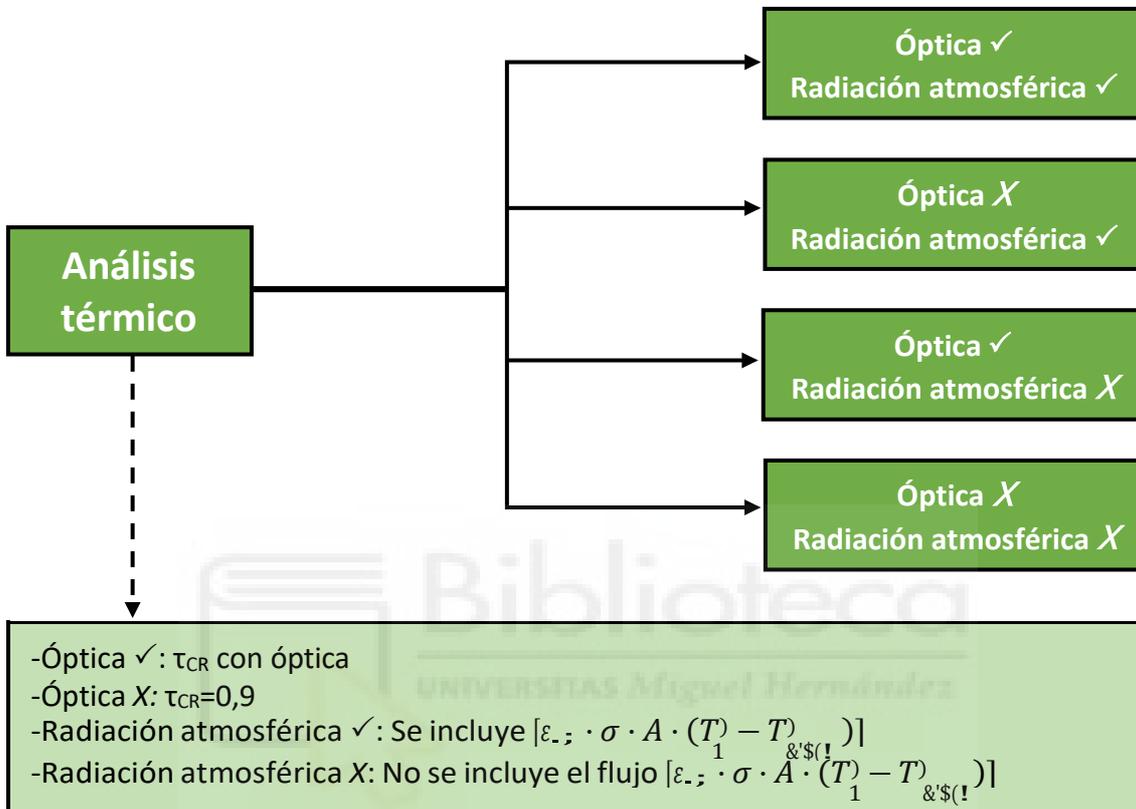


Imagen 2.58: Tipos de análisis térmicos

Además de estos tipos de análisis, recordar que contábamos con tres tipos de fórmulas para el rendimiento del panel fotovoltaico. Como hemos explicado en la Tabla 2.17, esta fórmula forma parte del sistema de ecuaciones. En resumen, en cada una de las cuatro opciones de análisis térmico, tendremos tres opciones, una por cada fórmula del rendimiento del panel.

Para finalizar con el subsistema del panel, faltaría calcular la potencia generada por el panel fotovoltaico. Esta potencia se obtendrá aplicando el rendimiento fotovoltaico del panel por la cantidad de radiación solar incidente al mismo, como se ve en la Tabla 2.18.

Potencia del panel fotovoltaico	
$W_{\&} = A \cdot G_{sol} \cdot \eta_{\&}$	$\dot{W}_G$
	A: m <sup>2</sup>
	G <sub>sol</sub> : W/m <sup>2</sup>
	η <sub>c</sub> : (-)

Tabla 2.18: Potencia del panel

## 2.6. CHIMENEA SOLAR FOTOVOLTAICA EVAPORATIVA

Una vez presentado el análisis térmico del panel, pasamos al siguiente paso de la modelización. En este subsistema, añadimos la zona de enfriamiento evaporativo, donde el aire que se introduce por la parte anterior de la chimenea entrando en contacto con el agua rociada, y sucede el conocido enfriamiento evaporativo. En este proceso el aire acaba reduciendo su temperatura al atravesar la columna de agua, como se observa en la Imagen 2.59.

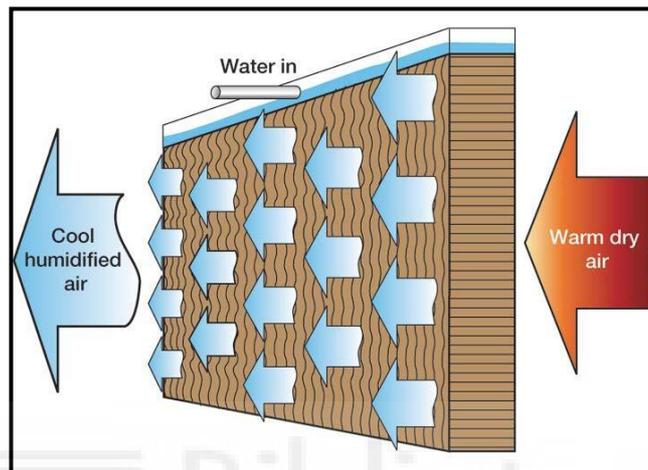


Imagen 2.59: Enfriamiento evaporativo

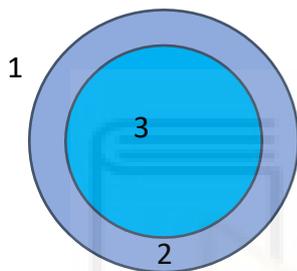
El subsistema del panel solar fotovoltaico se ha tratado de manera aislada, pero en la realidad, tanto éste como el subsistema de la chimenea solar fotovoltaica evaporativa, se han de tratar de manera conjunta. En la modelización del conjunto de la chimenea se aprovechará la teoría de este enfriamiento para obtener la temperatura de la columna de aire a la salida del proceso evaporativo, al igual que las temperaturas de entrada y salida del agua rociada; con el primer dato mencionado podremos realizar el análisis térmico y eléctrico unidimensional del panel. Si recordamos, la temperatura en la zona interior convectiva era un dato experimental de entrada en el primer subsistema; se ha actuado de esta manera para averiguar el error que genera el modelo del panel únicamente. Las temperaturas del agua rociada nos serán necesarias para el desarrollo del modelo de la enfriadora, puesto que el agua de salida de la chimenea retorna al circuito de calor.

## 2.6.1. ZONA EVAPORATIVO

Como se explicó en el funcionamiento de la instalación, la parte de enfriamiento evaporativo se asemeja a una torre de refrigeración en pequeña escala. De la teoría de este proceso, vamos a aprovechar el número de Merkel, que nos permitirá obtener los datos de salida que necesitamos para la modelización. Existen dos teorías principalmente donde se trata este número: la teoría de Merkel y de Poppe.

### 2.6.1.1. Número de Merkel

Se suele considerar el número de Merkel como el rendimiento de una torre de refrigeración. Es un parámetro adimensional que mide la dificultad del proceso evaporativo, al poder evaluar la diferencia de entalpías; para tener una evaporación se necesita de una diferencia de entalpía, que se conoce como entalpía potencial, entre el aire que rodea una gota de agua, y la película de vapor de agua saturado que rodea la gota.



1: Ambiente exterior	$T_1, w_1, h_1$
2: Vapor de agua saturado	$T_2, w_2, h_2$
3: Agua	$T_3, w_3, h_3$
$T_3, w_3, h_3 > T_2, w_2, h_2 > T_1, w_1, h_1$	

Como se puede ver por las temperaturas, se produce un flujo de calor de la gota de agua, hasta el aire ambiente, pasando por la capa de vapor de agua saturado. Esta capa de vapor saturado transfiere al ambiente tanto calor latente como sensible. La cantidad de calor transmitido, de la capa de vapor de agua al ambiente, dependerá de la transferencia de masa resultante de la evaporación del agua.

El presente proyecto no tiene como uno de sus principales objetivos la descripción profunda del enfriamiento evaporativo, debido a que, en anteriores trabajos de la instalación, se trató con mucho ahínco este tema; se ha decidido mostrar una breve explicación del desarrollo de este subsistema. En García (2015) se aborda la obtención del número de Me, con una explicación detallada del mismo. Para nuestro trabajo vamos a aprovechar la teoría de Poppe, puesto que nos permite predecir la temperatura de la columna del aire a la salida del enfriamiento evaporativo.

Mediante la teoría de Poppe para el número de Me, se llega a un sistema de ecuaciones diferenciales (Imagen 2.60), con las que podemos calcular el parámetro en cuestión.

$$\frac{dw}{dT_w} = \frac{c_{p_w} \frac{\dot{m}_w}{\dot{m}_a} (w_{s_w} - w)}{h_{s_w} - h + (Le - 1) [h_{s_w} - h - (w_{s_w} - w) h_v] - (w_{s_w} - w) c_{p_w} T_w}$$

$$\frac{dh}{dT_w} = \frac{\dot{m}_w c_{p_w}}{\dot{m}_a} \left( 1 + \frac{(w_{s_w} - w) c_{p_w} T_w}{h_{s_w} - h + (Le - 1) [h_{s_w} - h - (w_{s_w} - w) h_v] - (w_{s_w} - w) c_{p_w} T_w} \right)$$

$$\frac{dMe_P}{dT_w} = \frac{c_{p_w}}{h_{s_w} - h + (Le - 1) [h_{s_w} - h - (w_{s_w} - w) h_v] - (w_{s_w} - w) c_{p_w} T_w}$$

Imagen 2.60: Modelo de Poppe

Además de todo lo mencionado, el número de Me depende del ratio de flujos entre el agua y el aire. Esta afirmación se comprobó experimentalmente en García (2015), llegando a obtener una correlación del número de Me (Tabla 2.19) con el gasto másico de agua rociada y la columna de aire de entrada.

<b>Número de Me</b>	
$Me = 0,70998846 \cdot H \frac{\dot{m}_+}{\dot{m}_8} \text{ @2,E,F)GHI,}$	$\dot{m}_-$ : Gasto másico de agua rociada (kg/s) $\dot{m}_+$ : Gasto másico de aire (kg/s)
-Disponemos del gasto másico de agua gracias al equipo de medición de la instalación. -El gasto másico de aire se puede expresar en función del gasto másico de agua; en García (2015) se utilizó una serie de valores experimentales para obtener dicha expresión.	
$\dot{m}_8 = -6,1751 \cdot \dot{m}_+ + 2,2469 \cdot \dot{m}_+ - 0,07653$	$\dot{m}_+$ → kg/s $\dot{m}_-$ → kg/s

Tabla 2.19: Número de Me

Como última aclaración, este subsistema no contará con varias formas de modelización, como en el caso del análisis del panel fotovoltaico. En este caso, solo se buscará la validación de todo lo expuesto de este subsistema.

## 2.7. ENFRIADORA

Una vez ya modelizado la chimenea solar fotovoltaica en su totalidad, ya podemos introducir la enfriadora que se encuentra en la instalación. Al igual que con el panel solar fotovoltaico, el subsistema de la chimenea ha sido tratado por si sola, pero en realidad, su modelización implica la implementación de la enfriadora para resolver los cálculos matemáticos; se ha tratado de manera independiente la chimenea para poder, al igual que en panel, tener la posibilidad de comprobar el error generado únicamente por éste. Para este subsistema necesitaremos una expresión que modelice el EER de la enfriadora, la relación entra la potencia frigorífica y el consumo en el compresor; este último se puede expresar en función de la potencia en el evaporador y condensador, pero el único problema de introducir esta nueva ecuación es que el EER de la enfriadora no es conocido, pero sabemos que este parámetro depende de las presiones de condensación y evaporación del ciclo, es decir, las temperaturas de evaporación y condensación. La instalación no está diseñada para medir estas temperaturas, pero si podemos medir las temperaturas a las que entra y sale, del evaporador y condensador, el agua del circuito de frío y calor ( $T_{\text{evap}}$ ,  $T_{\text{cond}}$ ), y éstas se pueden utilizar para expresar también el EER del ciclo.

### 2.7.1. EER DE LA ENFRIADORA

Como hemos dicho, el EER se puede expresar en función de las temperaturas del agua de los circuitos, de calor y frío, cuando entran en contacto con el ciclo. En el 'Manual del usuario de Calener' se introducen unas expresiones que modelizan el EER del ciclo en función de estas temperaturas. El documento utilizado es español, con bases en 'EnergyPlus', y donde se especifica que las expresiones que facilitan ya están totalmente comprobadas. Una vez puntualizado todo, pasamos a mostrar, en la Tabla 2.20, las diferentes expresiones con las que vamos a trabajar.

## Manual de usuario de Calener



-El manual de usuario especifica los diferentes subsistemas que se permite la modificación de sus curvas, donde podemos encontrar el subsistema de plantas enfriadoras, que es el que necesitamos.

-Las expresiones de las que disponen este documento, se pueden clasificar según tengan una, o dos variables independientes.

### 1 variable

Nombre	Código	Ecuación	Variables
Lineal	LI	$f(r) = a + b \cdot r$	r: Adimensional
Cuadrática	QU	$f(r) = a + b \cdot r + c \cdot r^2$	r: Adimensional
Cúbica	CUB	$f(r) = a + b \cdot r + c \cdot r^2 + d \cdot r^3$	r: Adimensional
Cuadrática-T	QUT	$f(T) = a + b \cdot T + c \cdot T^2$	T: Temperatura (°F)
Cúbica-T	CUBT	$f(T) = a + b \cdot T + c \cdot T^2 + d \cdot T^3$	T: Temperatura (°F)
Cuadrática-DT	QUDT	$f(\Delta T) = a + b \cdot \Delta T + c \cdot (\Delta T)^2$	$\Delta T$ : Dif. Temperatura (°F)
Cúbica-DT	CUBDT	$f(\Delta T) = a + b \cdot \Delta T + c \cdot \Delta T^2 + d \cdot (\Delta T)^3$	$\Delta T$ : Dif. Temperatura (°F)

Ecuaciones de una sola variable independiente

### 2 variables

Nombre	Código	Ecuación	Variables
Bi-Lineal	BLI	$f(r_1, r_2) = a + b \cdot r_1 + c \cdot r_2$	$r_1$ : Adimensional $r_2$ : Adimensional
Bi-Cuadrática	BQU	$f(r_1, r_2) = a + b \cdot r_1 + c \cdot (r_1)^2 + d \cdot r_2 + e \cdot (r_2)^2 + f \cdot r_1 \cdot r_2$	$r_1$ : Adimensional $r_2$ : Adimensional
Bi-Lineal-T	BLIT	$f(T_1, T_2) = a + b \cdot T_1 + c \cdot T_2$	$T_1$ : Temperatura (°F) $T_2$ : Temperatura (°F)
Bi-Cuadrática-T	BQUT	$f(T_1, T_2) = a + b \cdot T_1 + c \cdot (T_1)^2 + d \cdot T_2 + e \cdot (T_2)^2 + f \cdot T_1 \cdot T_2$	$T_1$ : Temperatura (°F) $T_2$ : Temperatura (°F)
Bi-Cuadrática-DT_T	BQUDTT	$f(\Delta T_1, T_2) = a + b \cdot T_1 + c \cdot (\Delta T_1)^2 + d \cdot T_2 + e \cdot (T_2)^2 + f \cdot \Delta T_1 \cdot T_2$	$\Delta T_1$ : Dif. Temp. (°F) $T_2$ : Temperatura (°F)
Bi-Cuadrática-Ratio_T	BQURT	$f(r_1, T_2) = a + b \cdot r_1 + c \cdot (r_1)^2 + d \cdot T_2 + e \cdot (T_2)^2 + f \cdot r_1 \cdot T_2$	$r_1$ : Adimensional $T_2$ : Temperatura (°F)
Bi-Cuadrática-T_Ratio	BQUTR	$f(T_1, r_2) = a + b \cdot T_1 + c \cdot (T_1)^2 + d \cdot r_2 + e \cdot (r_2)^2 + f \cdot T_1 \cdot r_2$	$T_1$ : Temperatura (°F) $r_2$ : Adimensional
Bi-Cuadrática-Ratio_DT	BQURDT	$f(r_1, \Delta T_2) = a + b \cdot r_1 + c \cdot (r_1)^2 + d \cdot \Delta T_2 + e \cdot (\Delta T_2)^2 + f \cdot r_1 \cdot \Delta T_2$	$r_1$ : Adimensional $\Delta T_2$ : Dif. Temp. (°F)

Ecuaciones de dos variables independientes

### Plantas enfriadoras

-En el manual se concreta las variables que pueden ser afectadas por las curvas de comportamiento de la enfriadora, y de entre todas ellas nos centramos en el **CoolEIR**.

POT	$POT = POT_{NOM} \cdot POT(T)$
CoolEIR	$CoolEIR = CoolEIR_{NOM} \cdot CoolEIR(T) \cdot CoolEIR(PLR)$
HeatEIR	$HeatEIR = HeatEIR_{NOM} \cdot HeatEIR(T) \cdot HeatEIR(PLR)$
HIR	$HIR = HIR_{NOM} \cdot HIR(T) \cdot HIR(PLR)$
POTCAL	$POTCAL = POTCAL_{NOM} \cdot POTCAL(T)$

- **CoolEIR**, es el ratio de energía eléctrica, definido como el cociente entre el consumo de energía eléctrica de la planta enfriadora y la capacidad de refrigeración. Al ser una propiedad adimensional hay que tener precaución y expresar tanto numerador como denominador en las mismas unidades.

-Como se puede ver en la definición que se muestra de la variable, se corresponde a la inversa del EER. Este hecho no afecta la estructura de la expresión, sino solo los valores de sus coeficientes.

Curva	Comentarios																					
<table border="1"> <tr> <td rowspan="3">EER-ELEC_T (EIR-FT)</td> <td colspan="2">Variación del valor nominal de la relación entre la potencia eléctrica y la frigorífica (EIR) en función de las condiciones de operación. El valor del EIR es el inverso del EER-ELEC definido en CALENER-GT.</td> </tr> <tr> <td><math>f(T_{agua}^{se}, T_{cond})</math></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Bi-Lineal-T, Bi-Cuadrática-T</td> <td></td> </tr> <tr> <td><math>T_{agua}^{se}</math></td> <td>Temperatura del agua a la salida del evaporador.</td> <td>°F</td> </tr> <tr> <td><math>T_{cond}</math></td> <td>Temperatura de condensación.</td> <td>°F</td> </tr> </table> <table border="1"> <tr> <td>Bi-Lineal-T</td> <td>BLIT</td> <td><math>f(T_e, T_c) = a + b \cdot T_e + c \cdot T_c</math></td> <td><math>T_e</math>: Temperatura (°F) <math>T_c</math>: Temperatura (°F)</td> </tr> <tr> <td>Bi-Cuadrática-T</td> <td>BQUT</td> <td><math>f(T_e, T_c) = a + b \cdot T_e + c \cdot (T_e)^2 + d \cdot T_c + e \cdot (T_c)^2 + f \cdot T_e \cdot T_c</math></td> <td><math>T_e</math>: Temperatura (°F) <math>T_c</math>: Temperatura (°F)</td> </tr> </table>	EER-ELEC_T (EIR-FT)	Variación del valor nominal de la relación entre la potencia eléctrica y la frigorífica (EIR) en función de las condiciones de operación. El valor del EIR es el inverso del EER-ELEC definido en CALENER-GT.		$f(T_{agua}^{se}, T_{cond})$		Bi-Lineal-T, Bi-Cuadrática-T		$T_{agua}^{se}$	Temperatura del agua a la salida del evaporador.	°F	$T_{cond}$	Temperatura de condensación.	°F	Bi-Lineal-T	BLIT	$f(T_e, T_c) = a + b \cdot T_e + c \cdot T_c$	$T_e$ : Temperatura (°F) $T_c$ : Temperatura (°F)	Bi-Cuadrática-T	BQUT	$f(T_e, T_c) = a + b \cdot T_e + c \cdot (T_e)^2 + d \cdot T_c + e \cdot (T_c)^2 + f \cdot T_e \cdot T_c$	$T_e$ : Temperatura (°F) $T_c$ : Temperatura (°F)	<p>-En el documento se puede ver como las temperaturas de las que dependerá el EER serán la del agua a la salida del evaporador y la de condensación. La temperatura de condensación no lo podemos medir, así que recurrimos a la de entrada del condensador, que si la conocemos; este cambio solo afectará en los coeficientes de la expresión del EER.</p>
EER-ELEC_T (EIR-FT)		Variación del valor nominal de la relación entre la potencia eléctrica y la frigorífica (EIR) en función de las condiciones de operación. El valor del EIR es el inverso del EER-ELEC definido en CALENER-GT.																				
		$f(T_{agua}^{se}, T_{cond})$																				
	Bi-Lineal-T, Bi-Cuadrática-T																					
$T_{agua}^{se}$	Temperatura del agua a la salida del evaporador.	°F																				
$T_{cond}$	Temperatura de condensación.	°F																				
Bi-Lineal-T	BLIT	$f(T_e, T_c) = a + b \cdot T_e + c \cdot T_c$	$T_e$ : Temperatura (°F) $T_c$ : Temperatura (°F)																			
Bi-Cuadrática-T	BQUT	$f(T_e, T_c) = a + b \cdot T_e + c \cdot (T_e)^2 + d \cdot T_c + e \cdot (T_c)^2 + f \cdot T_e \cdot T_c$	$T_e$ : Temperatura (°F) $T_c$ : Temperatura (°F)																			

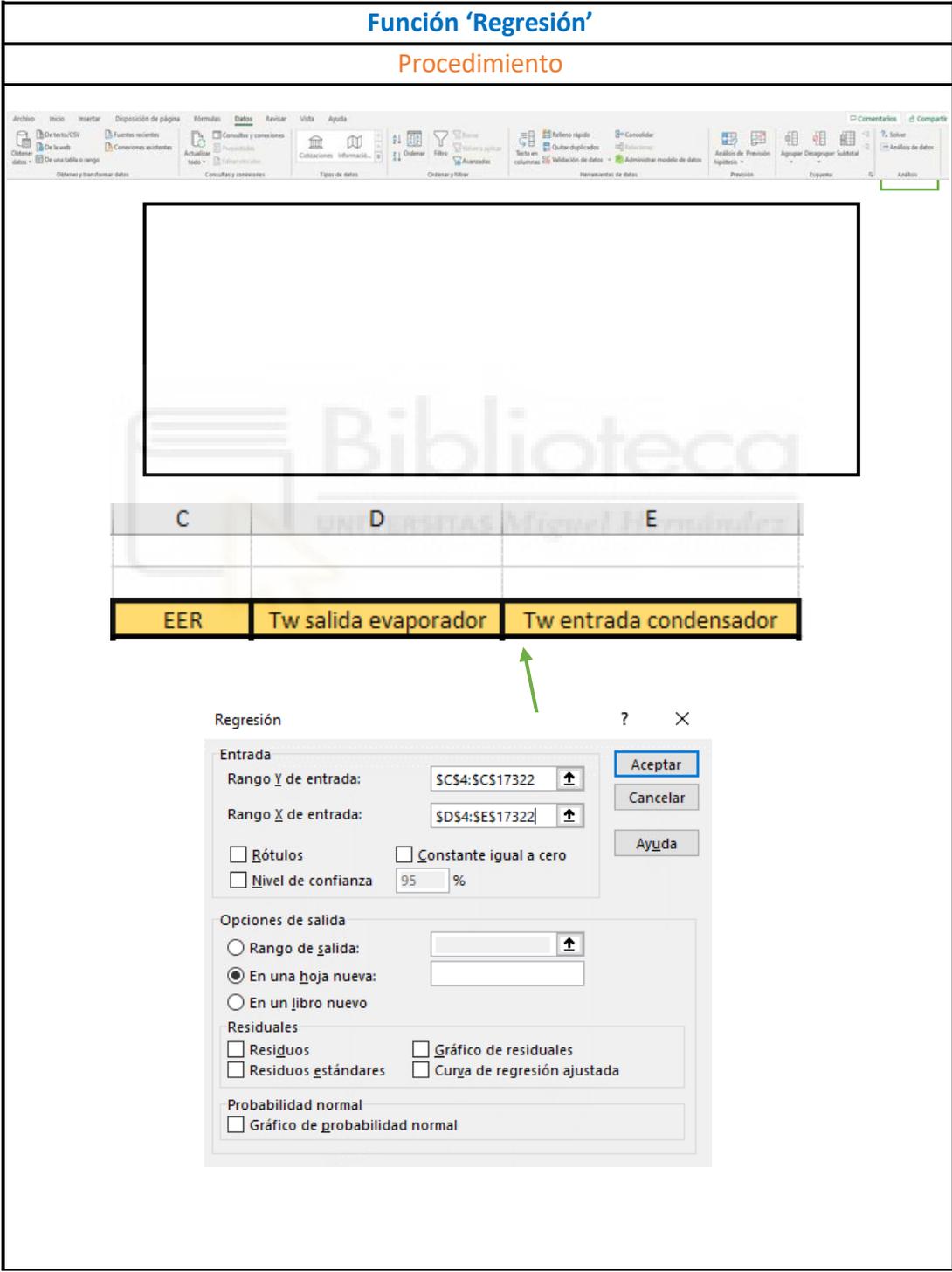
Tabla 2.20: EER de la enfriadora

Una vez obtenido los tipos de expresiones que podrán ser utilizado para modelizar el EER, ya solo resta obtener sus parámetros; utilizaremos una serie de datos experimentales, que explicaremos en profundidad en el apartado de resultados. Estos datos consistirán en tres series correspondientes al EER, la temperatura del agua a la salida del evaporador ( $T_{w_{k,0^*}}$ ), y la temperatura del agua a la entrada del condensador que corresponde con la temperatura del agua rociada ( $T_{w_{i,+,-}} = T_{w_e}$ ). Hemos seguido diferentes métodos para obtener las expresiones del EER, que podemos encontrar en la Tabla 2.21, 2.22, 2.23; en este apartado solo explicaremos el procedimiento a seguir en cada una, y los errores que conllevan cada una de las formas, y la solución final se expondrán en los resultados. Recordar que los métodos que se van a exponer son los que se han utilizado para la obtención del coeficiente de radiación solar ( $\gamma$ ), en el análisis térmico del panel fotovoltaico.

- **Correlación lineal múltiple (expresión bilineal):** Nos apoyamos en la aplicación 'Excel' para realizar este método, donde mediante la función 'Regresión', del 'Análisis de datos', podemos obtener los coeficientes de la expresión; seleccionamos como variable 'y' los datos experimentales del EER, y como variables 'x' los datos de  $T_w K_{0*}$  y  $T_{w_{+,-}}$ . Una vez hecho esto, ejecutamos la opción de cálculo, y obtendremos los coeficientes de la expresión (a, b, c).

**Función 'Regresión'**

Procedimiento



The screenshot shows the 'Regresión' dialog box in Microsoft Excel. The dialog box is titled 'Regresión' and has a close button (X) and a help button (?). It contains the following fields and options:

- Entrada:**
  - Rango Y de entrada:  (with an up arrow icon)
  - Rango X de entrada:  (with an up arrow icon)
  - Rótulos
  - Constante igual a cero
  - Nivel de confianza:  %
- Opciones de salida:**
  - Rango de salida:
  - En una hoja nueva:
  - En un libro nuevo
- Residuales:**
  - Residuos
  - Gráfico de residuales
  - Residuos estándares
  - Curva de regresión ajustada
- Probabilidad normal:**
  - Gráfico de probabilidad normal

Buttons: Aceptar, Cancelar, Ayuda.

Coeficientes

**MÉTODO CORRELACIÓN LINEAL MÚLTIPLE => FUNCIÓN REGRESIÓN**

**Resumen**

Estadísticos de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0,96857021
Coefficiente de determinación R <sup>2</sup>	0,938128251
R <sup>2</sup> ajustada	0,938121105
Error típico	0,113256217
Observaciones	17319

-El coeficiente de correlación múltiple indica la afinidad entre la variable dependiente (EER) y las variables independientes (T<sub>wi\_cond</sub>, T<sub>wi\_evap</sub>).  
-En la ecuación bilineal del EER, el valor del parámetro "a" corresponde con la intercepción, el parámetro "b" con Variable X 1, y el parámetro "c" con Variable X 2.

ANÁLISIS DE VARIANZA					
	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	2	3967,762828	1983,881414	131276,6236	0
Residuos	17316	222,1118226	0,012826971		
Total	17318	3589,874651			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%	Inferior 95,0%	Superior 95,0%
Intercepción	6,330858082	0,013389124	472,8358721	0	6,304614047	6,357102117	6,304614047	6,357102117
Variable x 1	0,221548877	0,001496971	148,0239099	0	0,218615174	0,224482379	0,218615174	0,224482379
Variable x 2	-0,11634056	0,000227464	-511,4691059	0	-0,116786411	-0,115894708	-0,116786411	-0,115894708

-En la parte inferior de la izquierda obtenemos los valores de los coeficientes (a, b, c). Además, se genera el coeficiente de correlación múltiple, que no será lo que determine la expresión final a utilizar, pero es útil tenerla en cuenta, puesto que indica la afinidad (sobre 1) de la variable dependiente (EER) en función de las variables independientes (T<sub>wk,0\*</sub>, T<sub>wi,+,-</sub>).

$$EER = 6,33085802 + 0,221548877 \cdot T w_{o_{evap}} - 0,11634056 \cdot T w_{i_{cond}}$$

Tabla 2.21: Función Regresión

- **Matlab Curve Fitting (expresión bilineal y bicuadrática):** Este método se realiza mediante el programa 'Matlab', gracias a una aplicación de la que dispone denominada 'Curve Fitting'. Al igual que con el anterior método, introducimos los datos experimentales, y seleccionamos en la aplicación 'Custom Equation'; ponemos tanto la expresión bilineal, como la bicuadrática en función de sus parámetros. La variable 'z' será el EER, mientras que las variables 'x' e 'y', corresponden a T<sub>wk,0\*</sub> y T<sub>wi,+,-</sub>, respectivamente para las dos expresiones.

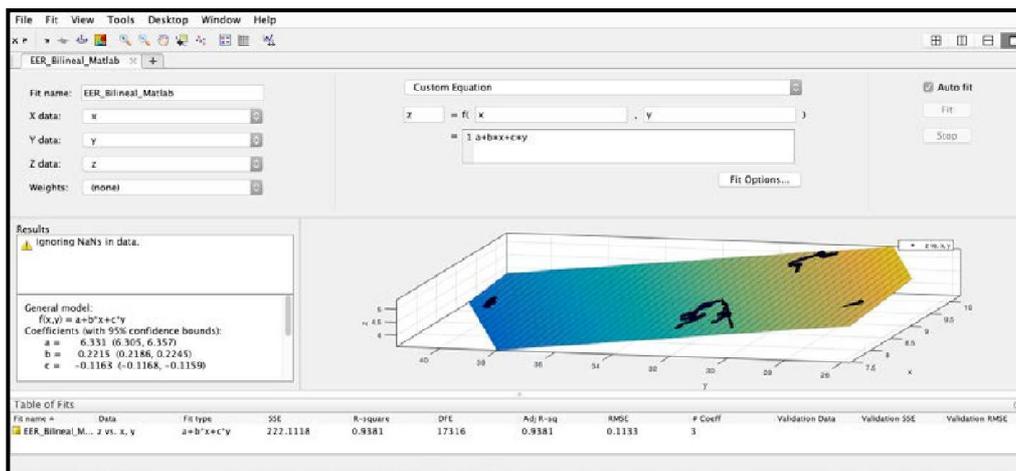


Imagen 2.61: Curve Fitting expresión bilineal

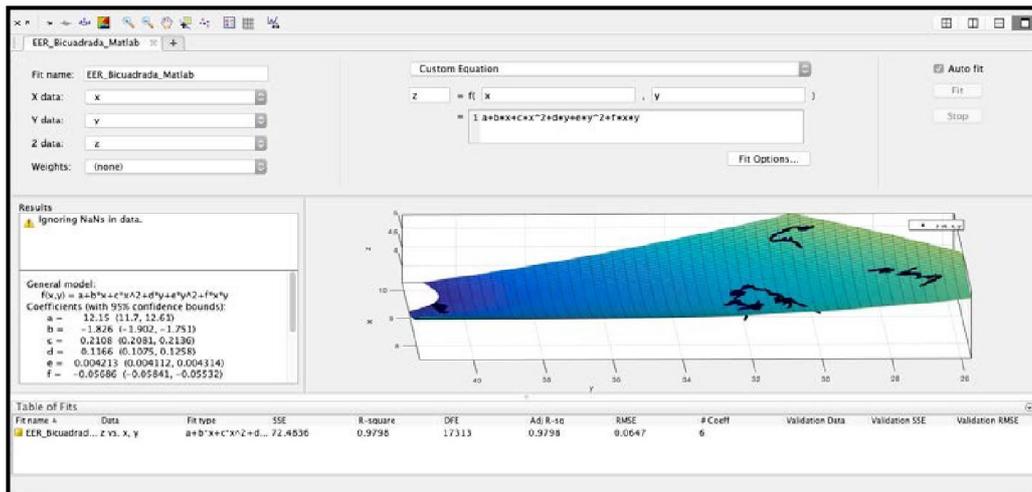


Imagen 2.62: Curve Fitting expresión bicuadrática

<b>Expresión bilineal</b>
$EER = 6,331 + 0,2215 \cdot Tw_{o_{evap}} - 0,1163 \cdot Tw_{i_{cond}}$
<b>Expresión bicuadrática</b>
$EER = 12,15 - 1,826 \cdot Tw_{o_{evap}} + 0,2108 \cdot Tw_{o_{evap}}^2 + 0,1166 \cdot Tw_{i_{cond}} + 0,004213 \cdot Tw_{i_{cond}} - 0,05686 \cdot Tw_{o_{evap}} \cdot Tw_{i_{cond}}$

Tabla 2.22: Expresiones con Curve Fitting

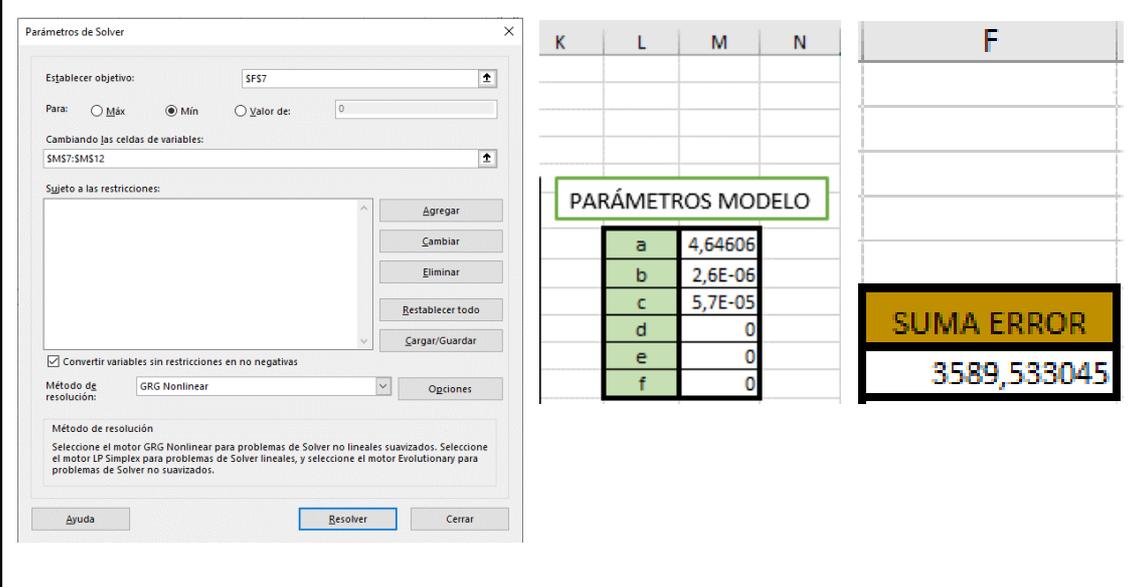
- **Mínimos cuadrados (expresión bicuadrática):** En este método comenzamos dando unos valores iniciales a los parámetros de la expresión (a, b, c, d, e, f), y calculamos el EER con los datos experimentales de temperatura; calculamos la diferencia elevada al cuadrado del EER experimental, y el recién calculado. Con la función 'Solver' de 'Excel', buscamos reducir al máximo la suma total de la diferencia calculada, variando los valores iniciales que habíamos introducido de los coeficientes.



Imagen 2.63: Función Solver

## Función 'Solver'

### Procedimiento



	K	L	M	N	F
<b>PARÁMETROS MODELO</b>					
a		4,64606			
b		2,6E-06			
c		5,7E-05			
d		0			
e		0			
f		0			
					<b>SUMA ERROR</b>
					3589,533045

### Coefficientes

$$EER = 4,64606 - 2,6 \cdot 10^{@6} \cdot Tw_{o_{evap}} + 5,7 \cdot 10^{@5} \cdot Tw_{o_{evap}}^2$$

Tabla 2.23: Expresión bicuadrática

Con todo esto, ya estarían explicados todos los métodos empleados para la obtención de las expresiones del EER.

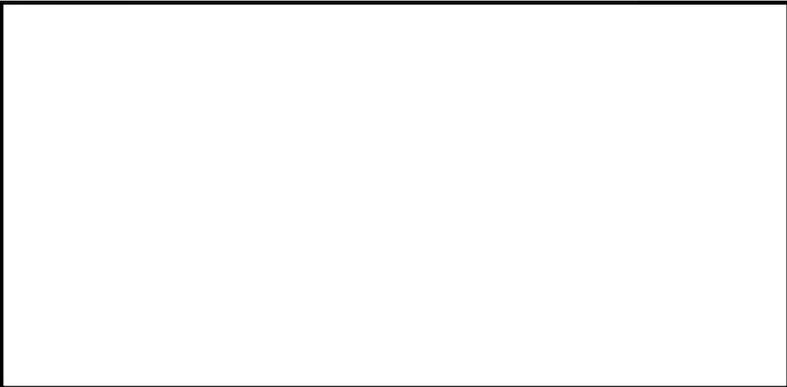
## 2.8. BOMBA HIDRÁULICA

Para finalizar la modelización de la instalación, el último paso es integrar el modelo de la bomba hidráulica. El objetivo es obtener la potencia consumida por la bomba, y así conocer realmente la efectividad del sistema; gracias a la bomba hidráulica mejoramos la eficiencia de los paneles fotovoltaicos rociando agua en su interior, y además ahorramos energía al condensar con agua en el compresor, pero si la doble ganancia que nos aporta es menor que la energía consumida por la bomba entonces no tendría justificación su uso.

Para obtener la potencia que consume la bomba, se utilizarán las curvas de rendimiento y altura manométrica de la bomba hidráulica del circuito de calor, y la curva de la instalación hidráulica. Recordar que el modelo de bomba en el circuito de calor es la 'XKJ-1100S'

### 2.8.1. CURVA DE LA INSTALACIÓN

En el proyecto de Gómez (2018) se trató la selección de la bomba hidráulica del circuito de calor mediante el programa 'Epanet', un programa de análisis de sistemas de distribución de agua potable. Se va a aprovechar el trabajo ya realizado para obtener la información necesaria del sistema hidráulico, y así obtener la expresión de la curva de la instalación, como se puede ver en la Tabla 2.24.

Programa 'Epanet'	Modelo de la instalación
	
<p>-En el modelo se puede observar un objeto encima de la letra A; es el depósito de agua que hay en la instalación. Se pueden editar varias propiedades de este depósito, como sus coordenadas o la altura total (altura geométrica + altura de presión).</p>	

-Los datos que se han utilizado se han obtenido editando el valor de la altura total. Se ha ido variando esta altura, y simulando la instalación en el programa; al simular se obtiene el caudal inducido del sistema. De esta manera se ha obtenido la serie de parejas de valores de altura manométrica y caudal.

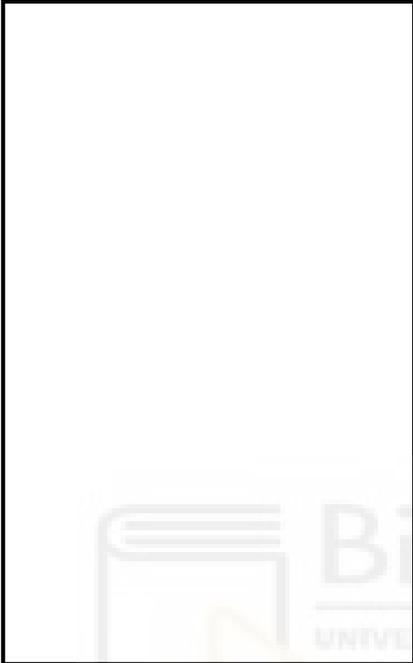
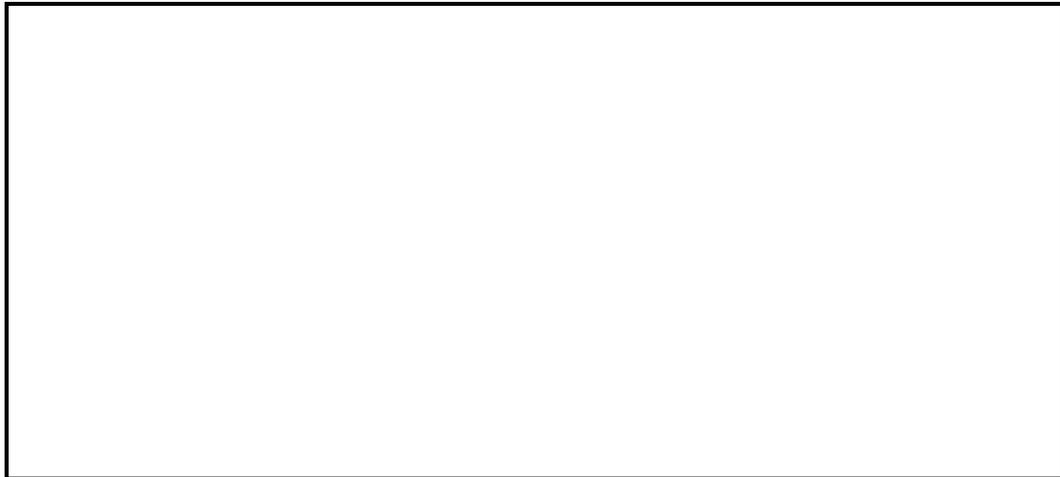
Depósito A	Datos obtenidos
	 <p data-bbox="858 1173 1294 1205">-Nótese que el caudal está en l/s.</p>

Tabla 2.24: Programa Epanet

Una vez ya tenemos a disposición los datos de caudal y altura manométrica, ya podemos obtener la curva de la instalación. Primero explicaremos en la Tabla 2.25 la ecuación característica de la instalación, y ya para terminar la obtención de los valores de sus coeficientes.

### Curva de la instalación

-La altura manométrica de bombas hidráulicas se obtiene mediante la suma de la altura geométrica de la instalación más las perdidas hidráulicas.



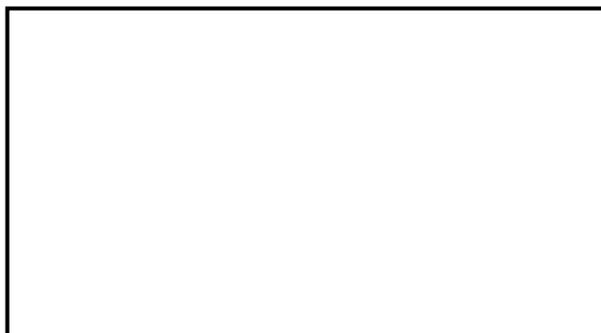
$$Hm = Hg + H_{7\&} = Hg + H\lambda \cdot \frac{L}{D} + \sum k_{10} \cdot I \cdot \frac{8 \cdot v}{\pi \cdot g \cdot D^5} = Hg + C_7 \cdot Q^2$$

$$C_7 = H\lambda \cdot \frac{L}{D} + \sum k_{10} \cdot I \cdot \frac{8}{\pi \cdot g \cdot D^5}$$

-La expresión resaltada es la que se utiliza para representar la curva de la instalación. Ahora, mediante los datos experimentales, obtenemos el valor del coeficiente  $C_7$ .

### Matlab Curve Fitting

-Para obtener la expresión se ha decidido utilizar la aplicación 'Curve Fitting' del programa 'Matlab', al igual que en anteriores apartados.



Datos

Hg=1 m

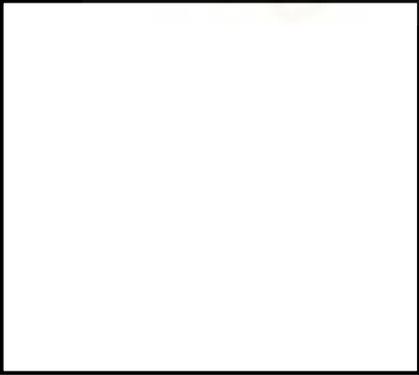
Expresión

$$Hm = Hg + 88,16 \cdot Q^2$$

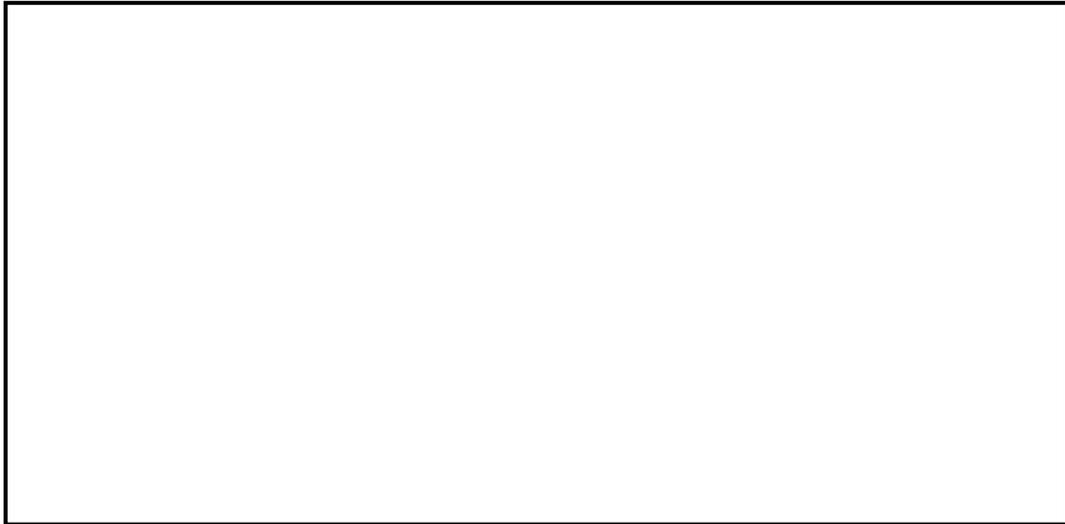
Tabla 2.25: Curva de la instalación

## 2.8.2. CURVA DE LA BOMBA HIDRÁULICA

En el modelo de la instalación que tenemos en el programa, disponemos de la curva de altura manométrica de la bomba hidráulica, gracias a los ensayos que se han realizado en 'Epanet'. Primero de todo, vamos a obtener la expresión de la altura manométrica en la Tabla 2.26, y acto seguido explicaremos la del rendimiento en la Tabla 2.27.

CURVA ALTURA MANOMÉTRICA		
Curva 'Epanet'		
		
Datos ensayo programa		
	<p>-Para obtener la ecuación de la curva de altura manométrica, hemos hecho uso de la expresión genérica de Hm en bombas hidráulicas; hemos utilizado la aplicación 'Curve Fitting' de 'Matlab' otra vez.</p>	
$Hm = H'' \cdot 11 - 3 \frac{Q''}{Q''} 4 5$		
Parámetros	H <sub>o</sub>	Q <sub>o</sub>

Curve Fitting Matlab



Expresión altura manométrica

$$Hm = 45,05 \cdot 11 - 4 \frac{Q^2}{1,308^2}$$

-Los parámetros  $Q_0$  y  $H_0$  tienen un significado más allá de completar la curva característica de la altura manométrica de la bomba;  $H_0$  es la máxima  $Hm$  que puede permitirse nuestra bomba, que será cuando el caudal sea nulo;  $Q_0$  es el máximo  $Q$  que puede impulsar la bomba, que se obtendrá para altura manométrica igual a cero.

-Si observamos los datos obtenidos del ensayo en el programa, para un caudal de 0,0833 l/s tenemos una  $Hm=45$  m;  $H_0$  es 45,05 m así que el resultado tiene sentido. En el caso de  $Q_0$ , para una  $Hm$  de 14m tenemos un caudal de 1,083l l/s;  $Q_0$  es 1,308 l/s por lo tanto tiene también sentido el valor del parámetro.

Tabla 2.26: Curva  $Hm$  Bomba hidráulica

### Curva rendimiento bomba hidráulica

-A diferencia de la altura manométrica, en el programa 'Epanet' no disponemos de ninguna serie de datos con el rendimiento de la bomba. Lo que hemos decidido hacer es ingeniería inversa, considerando un valor de rendimiento máximo de la bomba del 85%, y obteniendo la expresión de la curva a partir de éste.

-Como sabemos que la curva del rendimiento tendrá su valor máximo para  $Q_{max}/2$ , y como  $Q_{max}=Q_0$ , y  $Q_0$  la tenemos de la curva de altura manométrica, ya podemos obtener la curva de rendimiento de la bomba. Para terminar, se ha obtenido la expresión del rendimiento mediante 'Curve Fitting'.



Datos rendimiento	Expresión genérica rendimiento	Expresión rendimiento										
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Caudal (l/s)</th> <th><math>\eta</math> (-)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0,654</td> <td>0,85</td> </tr> <tr> <td>1,308</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table> <p> <math>Q_1 = 1,308 \text{ l/s}</math>  <math>Q_2 = 0,654 \text{ l/s}</math> </p>	Caudal (l/s)	$\eta$ (-)	0	0	0,654	0,85	1,308	0	$\eta = \eta_1 \cdot M \frac{Q}{Q_1} - H \frac{Q}{Q_1}^2$ <p style="text-align: center;"><b>Parámetros</b></p> <table border="1"> <tr> <td><math>\eta_0</math></td> <td><math>Q_0</math></td> </tr> </table>	$\eta_0$	$Q_0$	$\eta = 3,4 \cdot M \frac{Q}{1,308} - H \frac{Q}{1,308}^2$
Caudal (l/s)	$\eta$ (-)											
0	0											
0,654	0,85											
1,308	0											
$\eta_0$	$Q_0$											

-En la curva del rendimiento  $Q_0$  volverá a ser el caudal máximo trasegado por la bomba hidráulica, cuando  $H_m=0$ . En el caso de  $\eta_0$ , no coincidirá con el rendimiento máximo de la bomba; recordar que el  $\eta_{max}$  estará para  $Q_0/2$ .

$$Q = \frac{Q_{R84}}{2} : \eta_{R84} = 0,25 \cdot \eta_2 \quad ; \quad 3,4 \cdot 0,25 = 0,85$$

Tabla 2.27: Curva  $\eta$  Bomba hidráulica

### 2.8.3. ANÁLISIS DIMENSIONAL

La bomba hidráulica del circuito de calor está regulada mediante variador de frecuencia, y esto nos obliga a generar un cálculo de semejanza de bombas para averiguar en todo momento el consumo eléctrico del elemento. Una vez aclarado esto, para finalizar con este subsistema, vamos a mostrar el proceso para obtener la fórmula que nos calculará el consumo de la bomba hidráulica en la Tabla 2.28.

Proceso de cálculo	
1. Comenzamos calculando Hm con el caudal de entrada total de la instalación (Q), mediante su curva de altura manométrica: $Hm(m) = Hg + 88,16 \cdot Q^5 ; Hg=1 \text{ m}$ Q: l/s	
2. Mediante de la Hm obtenida mediante la curva de la instalación, aplicamos semejanza de bombas en la expresión de Hm de la bomba, y así obtenemos la relación de velocidades angulares (k):	
Semejanza de bombas	Altura manométrica bomba con variador de frecuencia
$k = \frac{\Omega_1}{\Omega_2}$ $Hm_1 = Hm_2 \cdot k^5$ $Q = Q_1 = Q_2 \cdot k$ $W_{n1} = W_{n2} \cdot k^E$	$Hm_2 = 45,05 \cdot 11 - 3 \frac{Q_2^5}{1,308^4}$ $45,05 \cdot 11 - ? \frac{Q_2 \cdot k^5}{1,308^4}$ $Hm_2(m) = \frac{45,05 \cdot 11 - ? \frac{Q_2 \cdot k^5}{1,308^4}}{k^5} = Hm_1$ Q <sub>2</sub> : l/s
3. Conociendo las relaciones de la semejanza de bombas, calculamos el rendimiento de la bomba:	
Semejanza de bombas	Rendimiento con variador de frecuencia
$k = \frac{\Omega_1}{\Omega_2}$ $Hm_1 = Hm_2 \cdot k^5$ $Q = Q_1 = Q_2 \cdot k$ $W_{n1} = W_{n2} \cdot k^E$	$\eta_2 = 3,4 \cdot 1 \frac{Q_2}{1,308} - 3 \frac{Q_2^5}{1,308^4}$ $\eta_2(-) = 3,4 \cdot 1 \frac{Q_2 \cdot k}{1,308} - 3 \frac{Q_2 \cdot k^5}{1,308^4}$ Q <sub>2</sub> : l/s

4. Con la altura manométrica y el rendimiento de la bomba hidráulica calculado, ya podemos obtener el consumo de la bomba:

Semejanza de bombas	Consumo de la bomba con variador de frecuencia		
$k = \frac{\Omega_1}{\Omega_2}$ $Hm_1 = Hm_2 \cdot k$ $Q = Q_1 = Q_2 \cdot k$ $W_{11} = W_{22} \cdot k^E$	$W_{22} = \frac{p \cdot g \cdot Q_2 \cdot Hm_2}{\eta_2}$		
	$W_{21} = W_{22} = \frac{p \cdot g \cdot Q_1 \cdot k^3 \cdot Hm_2}{\eta_2 \cdot k^3}$		
	$\dot{W}_4 \cdot W$	<p>p: Densidad del agua <math>p=1033,3 \text{ kg/m}^3</math></p>	$Q_2: \text{m}^3/\text{s}$
	$\eta_2: (-)$	<p>g: Aceleración de la gravedad <math>g=9,8 \text{ m/s}^2</math></p>	

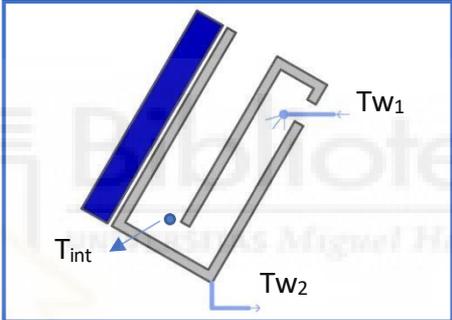
Tabla 2.28: Consumo Bomba hidráulica

Ya incluido el consumo de la bomba hidráulica en la modelización de la instalación, damos por concluido este apartado de explicación del modelo. En el apartado de resultados se irá volviendo a puntualizar cada uno de los subsistemas, con los errores que obtenemos en su modelización, y la solución final que hemos optado para los subsistemas donde habíamos considerado más de una forma de modelización.

## 2.9. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

### 2.9.1. CHIMENEA SOLAR FOTOVOLTAICA EVAPORATIVO

Una vez introducida la teoría del enfriamiento evaporativo, ya podemos proceder con la resolución, y obtención de resultados necesarios de la modelización de este subsistema; todo esto lo hemos introducido en la Tabla 2.29.

<b>ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO</b>	
<p>-El objetivo de la modelización es obtener la pareja de valores <math>T_{w1}</math> y <math>T_{w2}</math>, que satisfaga simultáneamente el número de Me por la teoría de Poppe, y por la correlación de flujos de aire y agua, además del balance de la enfriadora. Una vez encontrado esta pareja de valores, ya solo restaría aplicar la teoría de Poppe, y de esta manera obtener la temperatura del aire a la salida de la zona evaporativa, que coincide con la <math>T_{int}</math> utilizada en el primer subsistema.</p>	
	
<b>Datos de entrada</b>	$G_{sol}$ : Radiación solar incidente ( $W/m^2$ )
	$T_{ext}$ : Temperatura exterior ( $^{\circ}C$ )
	$HR_{ext}$ : Humedad relativa aire de entrada (%)
	$v_v$ : Velocidad del viento exterior (m/s)
	$\dot{m}$ -: Gasto másico de agua rociada (kg/s)
	$Q_{CKST}$ : Potencia del condensador instalación (kW)
<p>-Para poder aislar, de la enfriadora, el cálculo de la chimenea solar fotovoltaica evaporativa, se aprovecha la potencia en el condensador.</p>	

### Diagrama psicrométrico

-Mediante el uso de la temperatura ambiente y la humedad de relativa del aire, obtenemos la temperatura de bulbo húmedo del aire a la entrada de la chimenea ( $T_{wb}$ ) mediante el diagrama psicrométrico, que necesitaremos más adelante.



### Potencia en el condensador

-Como el agua rociada vuelve al circuito de calor, y al estar conectado con el condensador, las temperaturas de entrada y salida del agua en este elemento son las mismas que en la chimenea.

-La potencia en el condensador se puede expresar en función de la diferencia de estas temperaturas, y como la potencia es dato de entrada, podemos calcular  $T_{w1}-T_{w2}$ .

$$Q_{\&l<9} = \dot{m}_+ \cdot C_{p+} \cdot (T_{w1} - T_{w2})$$

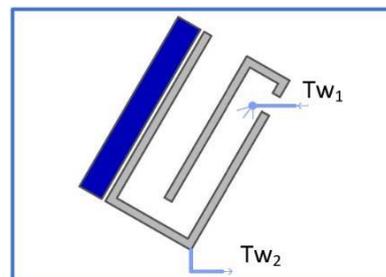
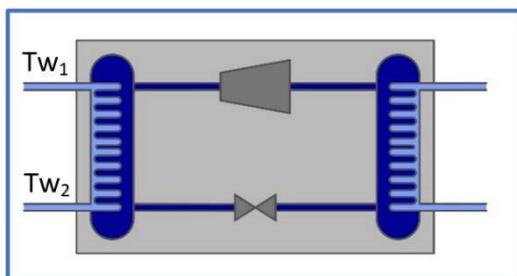
$$\Delta T_+ = \frac{Q_{\&l<9}}{\dot{m}_+ \cdot C_{p+}}$$

$Q_{\&l<9}$ : kW

$\dot{m}_+$ : kg/s

$T_{w1-2}$ : °C

$C_{pw}=3,99175$  kJ/(kg·°C)



-En esta modelización seguimos trabajando con un panel fotovoltaico; el dato de la potencia en el condensador está dividido entre cuatro para referirse a un solo panel. Cuando pasemos al siguiente subsistema, donde la potencia en el condensador será la real sin estar dividida, la expresión mostrada debería ir multiplicada por 4 para referirse a toda la instalación de paneles fotovoltaicos, al estar utilizando como dato el gasto de másico propio de un solo panel. Recordar que, la suposición inicial de la modelización es que los cuatro paneles son idénticos, y por lo tanto, también los gastos másicos de agua rociada.

### Cálculo de parámetros

-Con todo presentado, igualamos el número de Me obtenido de la correlación de flujos, con el de la teoría de Poppe; las expresiones diferenciales se han introducido en una función por separado (Me\_Poppe\_pf). En esta ecuación tendremos como incógnita una de las temperaturas del agua, puesto que la otra la introducimos en función de  $\Delta T$ .

-Debido a la complejidad de resolución al contar con un sistema de ecuaciones diferenciales, se ha optado por utilizar el comando 'fsolve' en el programa 'Matlab'.

-El comando 'fsolve' es un algoritmo de optimización que resuelve un sistema de ecuaciones a partir de un valor inicial, que nosotros introducimos, de las incógnitas. El comando, al ser ejecutado, comienza a resolver el sistema de ecuaciones para este valor inicial; en cada iteración va cambiando este valor, hasta llegar a uno que cumpla los errores mínimos impuestos por el comando. Como es obvio, cuanto mayor sea la precisión del valor inicial, menor serán las iteraciones necesarias.

-El comando, a la hora de iterar el valor inicial, puede tanto incrementarlo como disminuirlo, en función de que variación disminuya más el error. Para nuestra programación, nuestra primera decisión fue que:  $T_{w1}$  tenga un valor inicial superior al que pueda tener en la instalación real, y así el comando solo tenga que disminuir el valor inicial;  $T_{w2}$  tenga un valor inicial inferior al que pueda tener en la instalación real, y así el comando solo tenga que aumentar el valor inicial. De esta manera, nos ahorramos que el comando disminuya y aumente el valor inicial en el mismo cálculo.

### Suposiciones finales de partida para valores iniciales $T_{w1}$ y $T_{w2}$

1.  $T_{w1}$  siempre deberá ser menor a  $T_{ext}$ , pero como sabemos gracias a trabajos anteriores, las mediciones de  $T_{w1}$  siempre mostraban una diferencia no muy notoria con  $T_{ext}$ . Suponiendo que  $T_{ext}$  no llegue a superar los 40 °C en esta zona del país, podemos introducir un valor inicial de 38 °C.

2.  $T_{w2}$  podrá llegar a una temperatura mínima, que corresponde con la de bulbo húmedo del aire que se introduce a la chimenea. Siguiendo la misma forma de proceder que para  $T_{w1}$ , lo lógico sería comenzar para esa  $T_{bh}$ , pero se produciría un problema; la función 'Me\_Poppe\_pf' no está definida para que  $T_{w2}$  llegue a  $T_{wb}$ , llegando a poder generarse situaciones problemáticas de cálculo. Por esto, y sabiendo que  $T_{w2} < T_{w1}$ , hemos decidido como valor inicial una temperatura de 35 °C.

### COMPROBACIÓN RESULTADOS

-Con 'fsolve' obtenemos  $T_{w1}$ , y con  $\Delta T$  obtenemos  $T_{w2}$ . Una vez hecho esto, como ya hemos explicado antes, aplicamos la teoría de Poppe para obtener  $T_{int}$ .

-Se ha decidido resolver la modelización en función de  $T_{w1}$ , y no  $T_{w2}$ ; esto sucede por un problema que genera el comando 'fsolve'. El algoritmo puede generar tanto soluciones matemáticas como físicas, y esto quiere decir, que hay parejas de valores de  $T_{w1-2}$  que cumplen la condición del número de Me, pero que no es una solución correcta, es decir, es una solución matemática. Para poder mostrar bien esto, se muestra a continuación la evolución, de manera gráfica, del número de Me en función de  $T_{w1}$ .



-La solución física que buscamos es la que se encuentra en la zona estable del número de Me; dónde está posicionado el círculo negro. Alrededor de los 31 °C, el Me coincide en valor con la zona estable pero no está ahí, siendo esa una solución matemática.

-Por este motivo se ha realizado el código en función de  $T_{w1}$ , y no  $T_{w2}$ . Si comenzamos por un valor bajo de temperatura, y el 'fsolve' va aumentando el valor en cada iteración, siempre acabaremos obteniendo la solución matemática antes que la física simplemente al estar más próxima al valor inicial introducido. Por esto, siempre debemos comenzar con un valor alto para que el comando itere en esta zona estable, y nos aseguremos que siempre obtengamos la solución física. Si resolvemos el sistema para  $T_{w2}$ , tendríamos que empezar por un valor muy alto en comparación con su solución física, lo que llevaría a un tiempo de cálculo mayor que si lo hacemos respecto  $T_{w1}$ .

Tabla 2.29: Chimenea solar fotovoltaica evaporativa

### 2.9.2. ENFRIADORA

En el modelo de la enfriadora se procede con el acoplamiento de toda la instalación, a excepción de la bomba hidráulica al poder considerarse independiente por solo depender del caudal de impulsión para sus cálculos. Como la instalación estará siempre trabajando a plena carga, entonces la capacidad frigorífica ( $Q_{UVJW}$ ) siempre será la máxima que pueda aportar el evaporador, y por lo tanto, un dato conocido.

Como explicamos en el apartado 2.7, introducimos el EER de la enfriadora para hacer posible la modelización de toda la instalación acoplada. Con esto, tenemos un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas (Tabla 2.30), que resolveríamos de nuevo con la función 'fsolve', obteniendo  $T_{w1}$  y  $T_{w2}$ . Una vez hecho esto, ya podemos calcular  $T_{int}$ , además al tener  $\Delta T$  podemos calcular  $Q_{CKST}$ , y como sabemos el EER por la expresión de la que disponemos, podemos calcular  $Q_{UVJW}$ . Con estas dos últimas, podemos obtener el  $\dot{W}_{CKXW}$ , y ya con eso tenemos modelizada en su totalidad la enfriadora.

<b>Modelo enfriadora</b>			
$Me = 0,70998846 \cdot H \frac{\dot{m}}{\dot{m}_8} \overset{②,EF)GHI}{I} = Me \text{ (Teoría de Poppe)}$ $EER = \frac{\dot{Q}_{*8:}}{W_{*R:}} = \frac{\dot{Q}_{*8:}}{Q_{*9:} - \dot{Q}_{*8:}} = \frac{\dot{Q}_{*8:}}{4 \cdot \dot{m}_+ \cdot Cp_+ \cdot (T_{w1} - T_{w'}) - Q_{*8:}}$ $EER = f(T_{w1}, T_{w'})$ <div style="border: 1px solid orange; padding: 5px; width: fit-content; margin: 0 auto;"> <math>T_{w'} = T_{w_2}</math> </div>			
<b>Datos conocidos</b>	$Q_{UVJW} = 3,8 \text{ kW}$ $T_{w_{K_0}} = 7 \text{ °C}$	<b>Incógnitas</b>	$T_{w1}, T_{w2}$

Tabla 2.30: Sistema de ecuaciones modelo enfriadora

Antes de pasar al último subsistema de la instalación, es necesario volver a comentar el valor inicial que se ha de introducir para el comando 'fsolve' de 'Matlab'. En este caso, al tener dos variables, deberá haber un valor inicial tanto para  $T_{w_1}$  como para  $T_{w_2}$ , y al introducir dos valores iniciales, el comportamiento de estos valores en cada iteración es más difícil de predecir. Para entender mejor el comando, se ha creado una función que muestra los valores que toman las variables en cada una de las iteraciones, hasta llegar a la solución con error mínimo, y se han formulado unas conclusiones sobre estos valores iniciales:

- **Magnitud:** El hecho de comenzar por un valor más alto del que seguramente pueda llegar a alcanzar  $T_{w_{1-2}}$  en la instalación, seguirá siendo una obligación que cumplir para evitar lo más posible las soluciones matemáticas.
- **Diferencia entre  $T_{w_1}$  y  $T_{w_2}$ :** Observando la evolución de estos valores en cada iteración, vemos que se puede llegar a una situación donde una de las variables llegue a un error mínimo pero la otra no, y el 'fsolve' continúe iterando hasta que las dos variables tengan al mismo tiempo un error mínimo, despreciando la solución física y acabando en una de las soluciones matemáticas. La conclusión a la que se ha llegado para evitar esto es que, además de mantener esos valores iniciales altos, los introduzcamos con no mucha diferencia de valor entre cada uno, y así evitar lo más posible que una de las variables llegue a la solución física antes que la otra, y acabar siendo ignorada, y prosiguiendo el bucle iterativo.

En la Tabla 2.31 se han mostrado los valores iniciales que vamos a utilizar para este modelo.

Valores iniciales de $T_{w_1}$ y $T_{w_2}$ :	
$T_{w_1} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$	$T_{w_2} = 45 \text{ }^\circ\text{C}$

Tabla 2.31: Valores iniciales fsolve

### 2.9.3. INTERACCIÓN ENTRE MODELOS

Para facilitar la comprensión de la interacción entre los subsistemas de la instalación, se ha creado un diagrama donde se pueda ver esta relación de una manera clara y concisa (Imagen 2.64). Además, se presentan los últimos dos parámetros del sistema: el  $EER_{solar}$  y  $EER_{sistema}$  (Tabla 2.32); aportan una información muy útil a la hora de mostrar la eficacia de nuestra instalación.

$EER_{sistema}$	$EER_{solar}$
-El $EER_{sistema}$ muestra la relación entre lo producido por nuestra bomba de calor, en comparación con lo que se consume para obtenerlo.	-Mediante el $EER_{solar}$ obtenemos la relación entre la totalidad del calor absorbido por el evaporador, y la totalidad de radiación incidente en el panel fotovoltaico.
$EER_{sistema} = \frac{\dot{Q}_{ref}}{\dot{W}_{comp} + \dot{W}_{pump}}$	$EER_{solar} = \eta_p \cdot EER_{sistema}$

Tabla 2.32:  $EER_{solar}$  y  $EER_{sistema}$

Con todo lo mostrado hasta ahora, ya hemos descrito toda la modelización de la instalación, y las diferentes opciones de análisis con las que disponemos. Como hemos estado diciendo a lo largo de esta explicación, en el siguiente apartado de resultados mostraremos el modelo final con el que nos quedamos, y la validación de cada uno de los subsistemas. Además, se complementará el apartado con una interfaz que se ha creado en el programa 'Matlab' para dotar de mayor interacción la modelización. Para terminar, se ha realizado un estudio de optimización y un análisis de influencia; el estudio se ha realizado para obtener el punto de funcionamiento óptimo de la instalación en función del caudal de agua rociada; el análisis será para averiguar la influencia de diferentes variables de entrada del modelo, con los resultados de este.

INTERACCIÓN ENTRE MODELOS

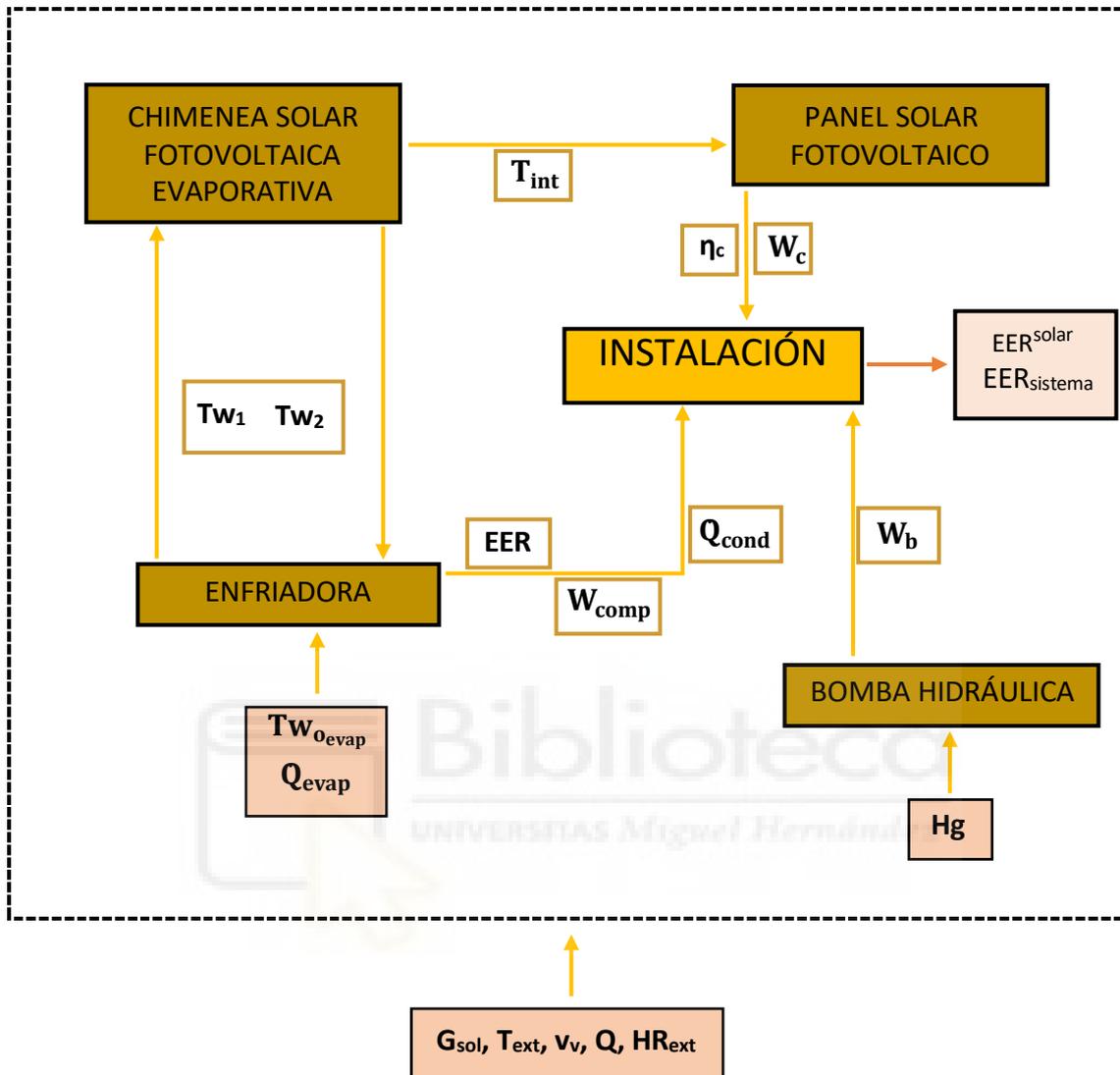


Imagen 2.64: Interacción entre modelos

Toda la información en los laterales de las flechas son la información que nos aporta cada uno de los subsistemas. La información que llega a la bomba hidráulica, y a la enfriadora es información adicional necesaria para completar la modelización de estos dos subsistemas. Recordar que la modelización de la chimenea y enfriadora se realiza de manera conjunta, al mismo tiempo. Las flechas que acaban en el recuadro de la instalación serán los resultados más significativos de la modelización.

Además de toda la información aportada, hay una serie de datos que no se han mostrado pero que ya han sido explicados en todos los anteriores apartados, como  $k_c$ ,  $x_{cr}$ ,  $A$ , etc.

## CAPÍTULO 3. RESULTADOS

### 3.1. INTRODUCCIÓN

Como hemos explicado en la introducción al capítulo 2, y repetido a lo largo de ese apartado, en esta parte del trabajo se va a mostrar la desviación de los resultados que nos genera el modelo matemático con los valores experimentales de los que disponemos gracias a los diferentes ensayos realizados en la instalación. Con estos errores se decidirá el modelo final para nuestra instalación.

### 3.2. PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO

Si recordamos este subsistema, acabamos con cuatro tipos de análisis térmico, con tres subtipos dentro de cada uno. En la Tabla 3.1 podemos ver las fórmulas pertinentes del panel.

- Análisis con óptica y radiación atmosférica.
- Análisis con óptica y sin radiación atmosférica.
- Análisis sin óptica y con radiación atmosférica.
- Análisis sin óptica y radiación atmosférica.

-Recordar que en el análisis térmico teníamos una quinta ecuación que consistía en el rendimiento del panel fotovoltaico; al haber considerado tres fórmulas distintas de este parámetro, habrá tres formas de proceder en cada forma de análisis térmico.

$\eta_p = \eta_{p0} \cdot (1 - \beta_{p0} \cdot (T_{amb} - T_{p0}))$	
$\eta_p = \eta_{p0} \cdot (1 - \beta_{p0} \cdot (T_{amb} - T_{p0}) + Y \cdot \log_{12}(G_{31}/G_{31c}))$	$Y_1 = 0,4122$
	$Y_2 = 0,035$
$\eta_p = \eta_{p0} \cdot F_1 - \beta_{p0} \cdot (T_{amb} - T_{p0}) + (T_{56.7} - T_8) \cdot H \cdot \frac{G_{31c}}{G_{56.7}} \cdot IJK$	

Tabla 3.1: Rendimiento del panel fotovoltaico

Antes de pasar a los resultados de la modelización, cabe puntualizar el ensayo utilizado para la validación del modelo. A lo largo de la metodología de este subsistema, ha habido diferentes datos de entrada que se obtenían de manera experimental, mediante mediciones de la instrumentación. Hemos aprovechado el ensayo de Díez (2015) donde se midieron todos los parámetros del sistema desde las 10:45:05 hasta las 17:30:05, con mediciones cada cinco segundos. Para validar este subsistema, se ha generado una programación que se ejecutará para cada una de las mediciones que se realizaron en ese ensayo, y después se compara los resultados calculados con los experimentales, y si el error no es elevado se da por válida la modelización.

Para obtener el error global de los resultados, hemos seguido dos simples pasos, primero calcular el error de cada una de las mediciones, y con eso calculado, calculamos el error global de cada método, como se puede ver en la Tabla 3.2; este procedimiento lo hemos seguido para todos los subsistemas. **El objetivo es obtener el error global mínimo posible.**

Error de la modelización	
$ERROR_{i,j}(\%) = \frac{abs(Ensayo - Modelización)}{Ensayo} \cdot 100$	
Ensayo: Valor experimental	Modelización: Valor calculado
$ERROR_{global}(\%) = \sqrt{\sum_{i=1}^n ERROR_{i,j}^2} \cdot n^{0.1}$	
n: Número de mediciones del ensayo	

Tabla 3.2: Error de la modelización

### 3.2.1. ERRORES MODELIZACIÓN

A continuación, vamos a mostrar en la Tabla 3.3 los resultados de la modelización del subsistema del panel solar fotovoltaicos para todas las formas de análisis.

ERROR <sub>global</sub> PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO	
Análisis con óptica y radiación atmosférica	

<p>Análisis con óptica y sin radiación atmosférica.</p>	
<p>Análisis sin óptica y con radiación atmosférica.</p>	
<p>Análisis sin óptica y radiación atmosférica.</p>	

Tabla 3.3: Resultados modelización

Primero hay que puntualizar que los errores son referidos al rendimiento del panel fotovoltaico. Una vez dicho esto, como se puede ver en los resultados, a mayor sea la complejidad del modelo, mayor es el error que obtenemos en los resultados; no siempre un modelo más completo modeliza mejor una instalación, y que los errores sean altos en estos casos tampoco quiere decir que sea incorrecta la modelización, lo único que significa es que nuestra instalación se modeliza de manera más precisa con el análisis más simple de todos, solo eso.

Dentro del análisis sin óptica y radiación atmosférica, es la primera fórmula del rendimiento la que modeliza mejor el primer subsistema. Una vez ya encontrado el mejor análisis, se ha añadido también el error en la potencia generada con el panel, además de dos gráficas, donde en cada una se puede observar la evolución del rendimiento y la potencia del panel de la modelización, acompañada de los valores experimentales; todo esto lo encontramos en Imagen 3.1, 3.2, y 3.3.

Para concluir, el **subsistema del panel solar fotovoltaico** está validado para el análisis térmico sin radiación atmosférica y óptica del vidrio frontal, y con la fórmula del rendimiento que desprecia la radiación solar incidente.

ERRORES MODELIZACIÓN	
ERROR_η	3,046408784
ERROR_Wpv	1,896785085

Imagen 3.1: Resultados finales

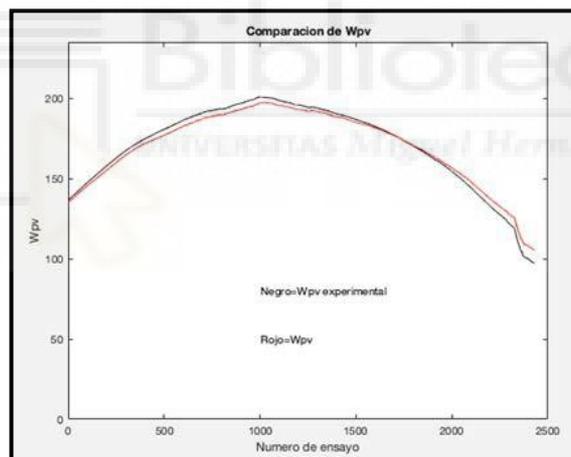


Imagen 3.2: Gráfica de  $W_D$

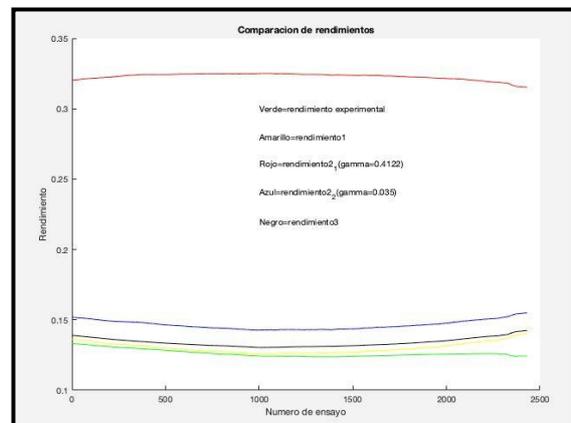


Imagen 3.3: Gráfica de  $\eta_c$

### 3.3. CHIMENEA SOLAR FOTOVOLTAICA EVAPORATIVA

Como hemos explicado, este subsistema no cuenta con diferentes formas de desarrollo. En este caso, solo tenemos una forma de proceder, y se van a mostrar los resultados del modelo en la Tabla 3.4, y así poder validarlo.

Para este subsistema se ha seguido utilizando el ensayo de Díez (2015) para obtener los errores de la modelización. Recordar que se ha decidido comprobar este subsistema sin acoplar la enfriadora para validar su modelización; también se ha querido ver cómo afecta la inclusión del enfriamiento evaporativo al análisis térmico y eléctrico del panel solar fotovoltaico.

Errores (%) modelización chimenea solar fotovoltaica evaporativa			
$T_{w1}$	<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td style="background-color: #f4a460;">ERROR_TW1</td> <td>0,614872427</td> </tr> </table> <div style="border: 2px solid orange; width: 300px; height: 150px; margin: auto; display: flex; align-items: center; justify-content: center;">  </div>	ERROR_TW1	0,614872427
ERROR_TW1	0,614872427		
$T_{w2}$	<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td style="background-color: #f4a460;">ERROR_TW2</td> <td>0,734819928</td> </tr> </table> <div style="border: 2px solid orange; width: 300px; height: 150px; margin: auto;"></div>	ERROR_TW2	0,734819928
ERROR_TW2	0,734819928		

$T_{int}$	<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td style="background-color: #f4a460;">ERROR_ <math>T_{int}</math></td> <td>1,270978269</td> </tr> </table> <div style="border: 2px solid orange; width: 300px; height: 150px; margin: auto;"></div>	ERROR_ $T_{int}$	1,270978269
ERROR_ $T_{int}$	1,270978269		
$W_c$	<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td style="background-color: #f4a460;">ERROR_ <math>W_{pv}</math></td> <td>1,841599704</td> </tr> </table> <div style="border: 2px solid orange; width: 300px; height: 150px; margin: auto; position: relative;">  </div>	ERROR_ $W_{pv}$	1,841599704
ERROR_ $W_{pv}$	1,841599704		
$\eta_c$	<table border="1" style="margin: auto;"> <tr> <td style="background-color: #f4a460;">ERROR_ <math>\eta</math></td> <td>3,078380775</td> </tr> </table> <div style="border: 2px solid orange; width: 300px; height: 150px; margin: auto;"></div>	ERROR_ $\eta$	3,078380775
ERROR_ $\eta$	3,078380775		

Tabla 3.4: Resultados modelización chimenea

### 3.4. ENFRIADORA

Una vez obtenida la modelización de los dos primeros subsistemas, pasamos ya a la enfriadora. Al tener varias opciones de expresiones para el EER de la enfriadora, vamos a mostrar el error que generan cada una de ellas, y decidir con cual nos quedamos para la modelización final.

Para la modelización de la enfriadora se han aprovechado una serie de 9 ensayos diferentes a los de Díez (2015), que encontramos en Ortega (2019), Boix (2019) y Covés (2019); en la Tabla 3.5 se puede ver en que consistieron estos ensayos.

Ensayos
-El ensayo de Díez (2015), que hemos utilizado para los dos primeros subsistemas, se realizó para la instalación cuando todavía no contenía el subsistema de la enfriadora. Como es obvio, para el estudio de la enfriadora no podemos utilizar este ensayo, y hemos tenido que recurrir a otros.
Obtención EER
-Debido a que se ha podido validar el modelo de la chimenea solar fotovoltaica evaporativa y el panel solar fotovoltaico, solo es necesario validar la expresión del EER, puesto que ésta es utilizada para acoplar toda la instalación, sin tener en cuenta datos conocidos como la potencia frigorífica de la enfriadora. Para obtener la expresión del EER hemos utilizado 9 ensayos diferentes donde se midió el EER de la enfriadora, además de las temperaturas del agua de los circuitos de frío y de calor, al entrar y salir por el condensador y evaporador.

Tabla 3.5: Ensayos enfriadora

#### 3.4.1. EXPRESIÓN EER

Si recordamos, teníamos dos tipos de expresiones para el EER, donde aplicábamos dos métodos diferentes para cada una de las expresiones, para obtener sus parámetros. Estas expresiones las podemos encontrar en la Tabla 3.6.

Expresión bilineal	
$EER = a + b \cdot Tw_{\text{evaporador}} + c \cdot Tw_{\text{condensador}}$	
Método de correlación lineal múltiple	Método Matlab Curve Fitting
Expresión bicuadrática	
$EER = a + b \cdot Tw_{\text{evaporador}} + c \cdot Tw_{\text{evaporador}}^2 + d \cdot Tw_{\text{condensador}} + e \cdot Tw_{\text{condensador}}^2 + f \cdot Tw_{\text{evaporador}} \cdot Tw_{\text{condensador}}$	
Método mínimos cuadrados	Método Matlab Curve Fitting

Tabla 3.6: Expresiones EER

Como hemos dicho, hemos aprovechado 9 ensayos diferentes para obtener el EER de todas las formas mostradas. Si combinamos todos los ensayos disponemos de 35.284 mediciones; estos datos nos interesa filtrarlos y solo quedarnos con los valores estacionarios; si la máquina arranca o aumenta su potencia por la demanda, se generarán unos picos de EER que no queremos modelizar. Solo queremos predecir el EER estacionario, y no transitorio. Todo este proceso lo vemos en la Tabla 3.7.

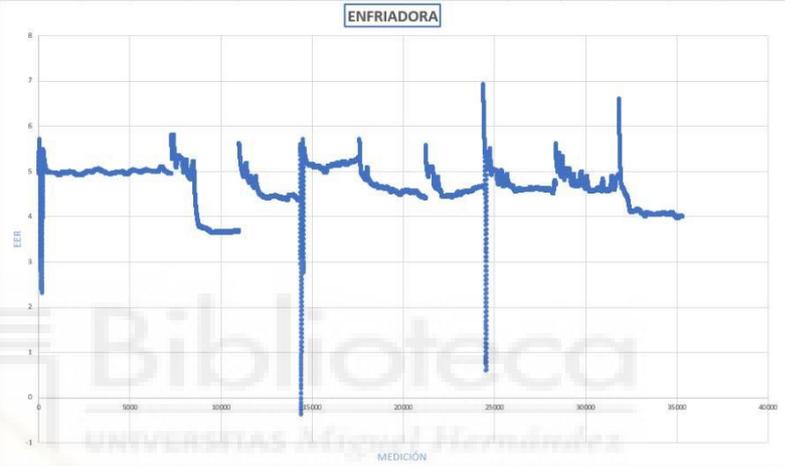
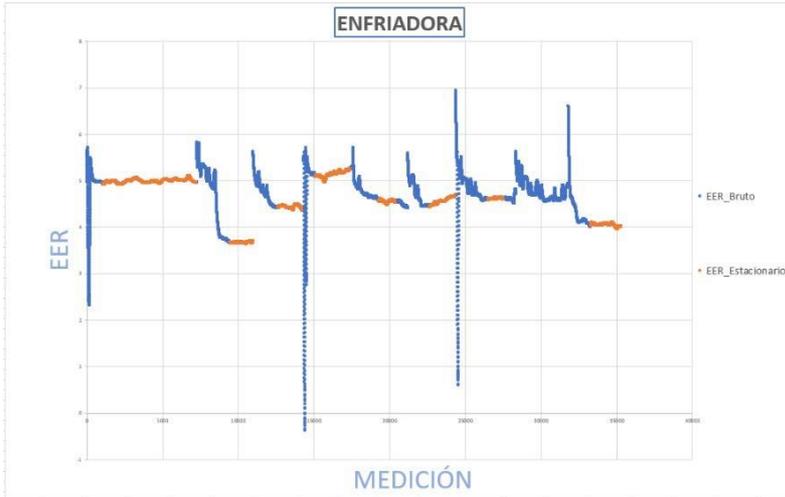
Ensayos	Filtrado de datos
<p>1 (17/07/2018)</p> <p>2 (23/07/2018)</p> <p>3 (25/07/2018)</p> <p>4 (27/07/2018)</p> <p>5 (30/07/2018)</p> <p>6 (31/07/2018)</p> <p>7 (3/08/2018)</p> <p>8 (4/08/2018)</p> <p>9 (7/08/2018)</p>	<p style="text-align: center;"><b>Datos sin filtrar</b></p> 
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; background-color: #fff9c4;"> <p>-ENSAYO 1: 1:7263</p> <p>-ENSAYO 2: 7263:10984</p> <p>-ENSAYO 3: 10984:14325</p> <p>-ENSAYO 4: 14325:17590</p> <p>-ENSAYO 5: 17590:21212</p> <p>-ENSAYO 6: 21212:24373</p> <p>-ENSAYO 7: 24373:28346</p> <p>-ENSAYO 8: 28436:31815</p> <p>-ENSAYO 9: 31815:35284</p> </div>	<p style="text-align: center;"><b>Datos filtrados</b></p> 

Tabla 3.7: Datos experimentales EER

Ya con las series de mediciones que vamos a utilizar para modelizar la expresión del EER, ya solo resta mostrar la expresión final para el subsistema.

<b>ERROR (%) EXPRESIONES EER</b>													
<b>Expresión bilineal</b>	-Si recordamos la explicación del subsistema en el apartado de metodología, los coeficientes de la expresión eran los mismos tanto para el método de correlación lineal múltiple, como para el Curve Fitting Matlab.												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>a</th> <th>b</th> <th>c</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>6,33085808</td> <td>0,22154888</td> <td>-0,11634056</td> </tr> </tbody> </table>	a	b	c	6,33085808	0,22154888	-0,11634056						
	a	b	c										
6,33085808	0,22154888	-0,11634056											
<table border="1"> <thead> <tr> <th>ERROR_LINEAL</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2,033979092</td> </tr> </tbody> </table>	ERROR_LINEAL	2,033979092											
ERROR_LINEAL													
2,033979092													
<b>Expresión bicuadrática</b>													
<b>Método mínimos cuadrados</b>													
<table border="1"> <thead> <tr> <th>a</th> <th>b</th> <th>c</th> <th>d</th> <th>e</th> <th>f</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>4,64605966</td> <td>2,60999E-06</td> <td>5,70304E-05</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>		a	b	c	d	e	f	4,64605966	2,60999E-06	5,70304E-05	0	0	0
a	b	c	d	e	f								
4,64605966	2,60999E-06	5,70304E-05	0	0	0								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>ERROR_BICUADRÁTICA</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>8,562656516</td> </tr> </tbody> </table>		ERROR_BICUADRÁTICA	8,562656516										
ERROR_BICUADRÁTICA													
8,562656516													
<b>Método Curve Fitting Matlab</b>													
<table border="1"> <thead> <tr> <th>a</th> <th>b</th> <th>c</th> <th>d</th> <th>e</th> <th>f</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>12,15</td> <td>-1,826</td> <td>0,2108</td> <td>0,1166</td> <td>0,004213</td> <td>-0,05686</td> </tr> </tbody> </table>		a	b	c	d	e	f	12,15	-1,826	0,2108	0,1166	0,004213	-0,05686
a	b	c	d	e	f								
12,15	-1,826	0,2108	0,1166	0,004213	-0,05686								
<table border="1"> <thead> <tr> <th>ERROR_CURVE FITTING</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1,001026323</td> </tr> </tbody> </table>		ERROR_CURVE FITTING	1,001026323										
ERROR_CURVE FITTING													
1,001026323													

Tabla 3.8: Errores expresión EER

Como podemos ver por los resultados de la Tabla 3.8, la **expresión bicuadrática** con los coeficientes obtenidos por **Matlab Curve Fitting** genera el menor error de todas las formas; utilizamos esta expresión para la modelización de la enfriadora.

$$EER = 12,15 - 1,826 \cdot Tw_{o_{evap}} + 0,2108 \cdot Tw_{o_{evap}}^2 + 0,1166 \cdot Tw_{i_{cond}} + 0,004213 \cdot Tw_{i_{cond}} - 0,05686 \cdot Tw_{o_{evap}} \cdot Tw_{i_{cond}}$$

### 3.5. BOMBA HIDRÁULICA

Al no disponer de datos experimentales de la bomba hidráulica de la instalación, no podemos efectuar la validación del mismo, solo comprobar que se ajusta a la curva característica que encontramos en Gómez (2018), en el programa 'Epanet'. En la Tabla 3.9 se puede encontrar los errores generados al comparar los datos de 'Epanet' sobre la instalación y bomba hidráulica, con las expresiones obtenidas.

Errores (%) modelización bomba hidráulica	
<b>Instalación</b>	<p style="text-align: center;"><b>Error curva instalación</b></p> $Hm = Hg + 88,16 \cdot Q^2$ <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; background-color: #e67e22; color: white; font-weight: bold;">ERROR CURVE FITTING</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; background-color: white; font-weight: bold;">0,948946582</div>
<b>Bomba hidráulica</b>	<p style="text-align: center;"><b>Error curva altura manométrica</b></p> $Hm = 45,05 \cdot M1 - H \frac{Q}{1,308} I^2 S$ <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; background-color: #f1c40f; font-weight: bold;">ERROR CURVE FITTING</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; background-color: white; font-weight: bold;">0,882002189</div> <p style="text-align: center;"><b>Error curva rendimiento</b></p> $\eta = 3,4 \cdot M \frac{Q}{1,308} - H \frac{Q}{1,308} I^2 S$ <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; background-color: #f1c40f; font-weight: bold;">ERROR CURVE FITTING</div> <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center; background-color: white; font-weight: bold;">0</div>

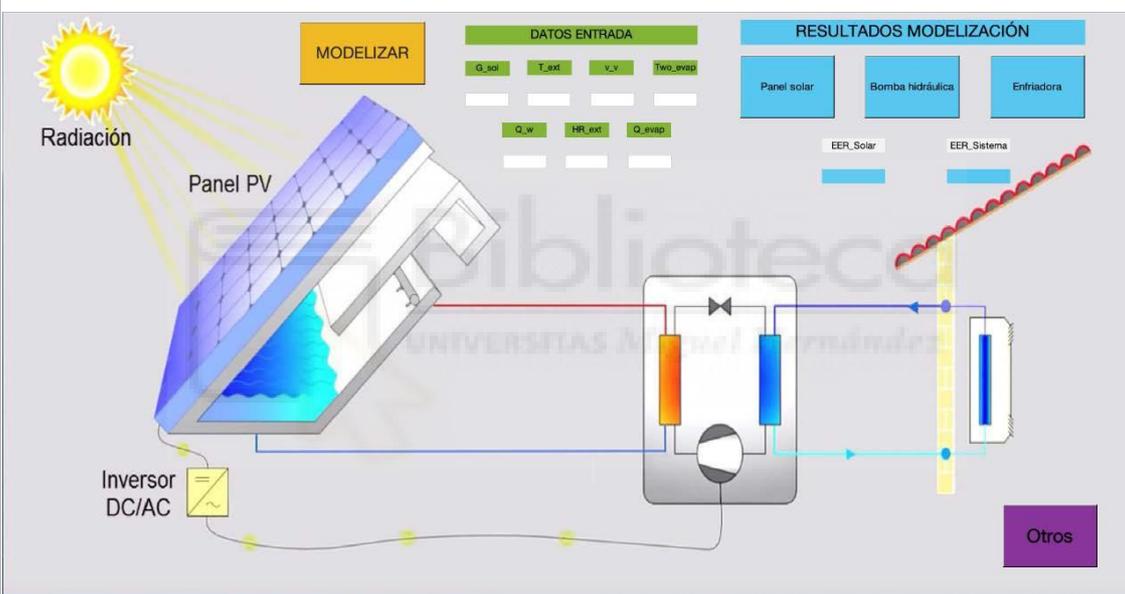
Tabla 3.9: Errores validación bomba hidráulica

### 3.6. INTERFAZ GRÁFICA

Para terminar, como comentamos al final del apartado de metodología, se ha decidido generar una interfaz gráfica en 'Matlab', y así facilitar el estudio de los subsistemas de la instalación.

La interfaz contiene una ventana principal denominada 'ChimeneaSolar', que podemos ver en la Tabla 3.10, donde se encuentra una imagen de toda la instalación, acompañada de unos recuadros donde se han de introducir los datos de entrada. También hay 5 botones que podemos clicar, que tendrán la función de: realizar el cálculo, abrir las interfaces de los subsistemas, o abrir una subinterfaz donde se encuentra información relevante de la modelización.

ChimeneaSolar



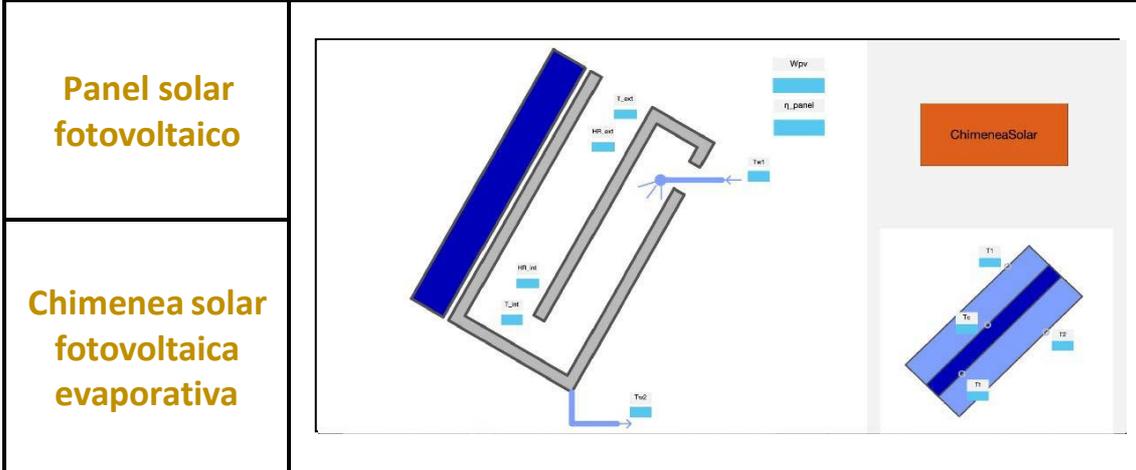
- **DATOS ENTRADA:** Sección donde introducimos los datos de entrada de la modelización.
- **MODELIZAR:** Botón que, una vez estén introducidos los datos de entrada, clicamos para que se calcule todos los parámetros del sistema.
- **RESULTADOS MODELIZACIÓN:** Aquí nos encontramos por una parte los resultados del  $EER_{solar}$  y  $EER_{sistema}$ , que al ser resultados de la instalación y no de un subsistema, se han introducido en la ventana principal. También contamos con tres botones que, al clicarlos, nos llevarán a cada uno de los subsistemas de la instalación.
- **Otros:** Con este botón, pasamos a una subinterfaz que nos mostrará, como hemos dicho, a datos predefinidos en el código.

<p><b>DATOS ENTRADA</b></p>	<p>-Para facilitar la comprensión de la interfaz, vamos a recordar que significaba cada uno de los datos de entrada, y las unidades de cada uno.</p>
	<p><math>G_{sol}</math>: Radiación solar incidente (<math>W/m^2</math>).</p> <p><math>T_{ext}</math>: Temperatura exterior (<math>^{\circ}C</math>).</p> <p><math>v_v</math>: Velocidad del viento exterior (<math>m/s</math>).</p> <p><math>Q</math>: Caudal de agua rociada (<math>m^3/h</math>).</p> <p><math>HR_{ext}</math>: Humedad relativa aire de entrada (%).</p> <p><math>Q_{UVW}</math>: Potencia del evaporador (<math>kW</math>).</p> <p><math>T_{w_{k,0}}</math>: Temperatura agua salida del evaporador (<math>^{\circ}C</math>).</p>
<p><b>EJEMPLO</b></p>	

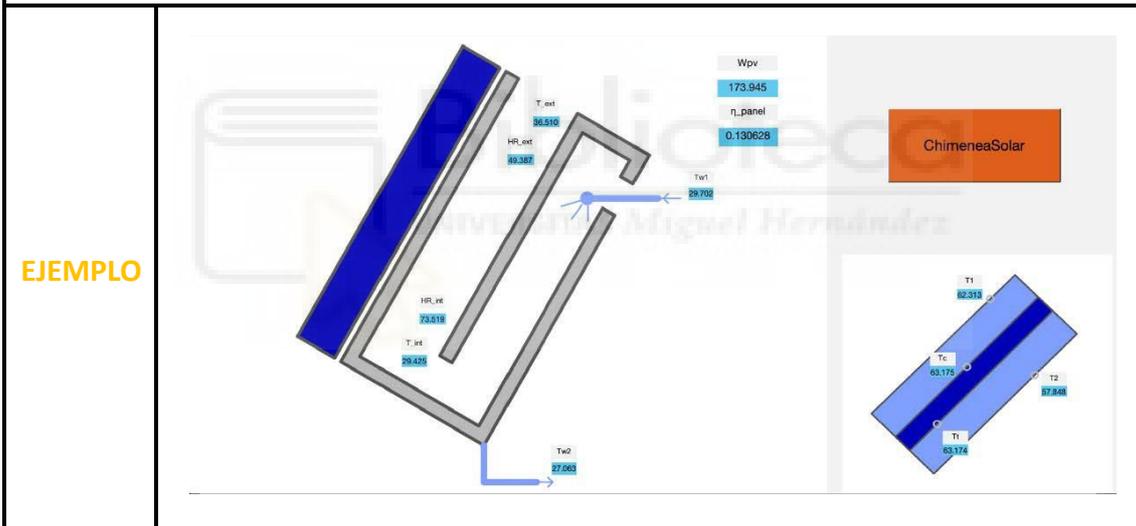
Tabla 3.10: Ventana ChimeneaSolar

A continuación, pasamos a mostrar el resto de las ventanas de la interfaz gráfica en la Tabla 3.11, 3.12 y 3.13

**Subsistemas 1-2**

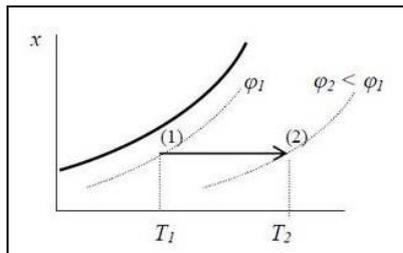


-En esta ventana de la interfaz, hemos introducido los dos primeros subsistemas. Además de todos los parámetros que hemos explicado anteriormente, hemos introducido la temperatura y humedad relativa del aire a la salida de la chimenea.



-El aire, a su paso por la cara anterior del panel, sufre un calentamiento sensible, es decir, aumenta su temperatura, mientras que la humedad específica se mantiene constante. Mediante un cálculo muy simple, podemos obtener las propiedades del aire a la salida de la chimenea.

**Proceso calentamiento sensible**



- 1: Entrada al proceso (int)
- 2: Salida del proceso (ext)

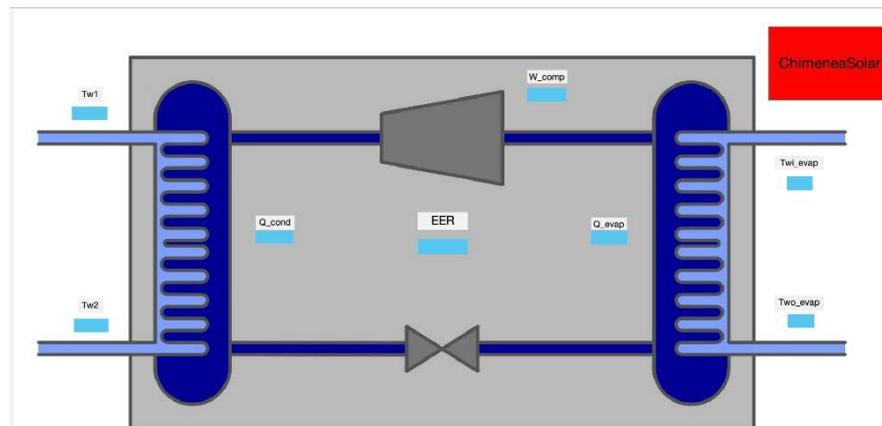
Datos conocidos	Calentamiento sensible
<p>-<math>h_i</math>: Coef. de convección interno [<math>W/(m^2 \cdot ^\circ C)</math>]                      -<math>A</math>: Área de capa anterior del panel (<math>m^2</math>)                      -<math>T_t</math>: Temperatura de la capa de tedlar (<math>^\circ C</math>)                      -<math>T_{int}</math>: Temperatura interior chimenea (<math>^\circ C</math>)                      -<math>\dot{m}_j</math>: Gasto másico de aire (<math>kg/s</math>)</p>	<p>1. Calculamos el flujo de calor en el panel solar fotovoltaico:</p> $Q (W) = h \cdot A \cdot (T_{\%} - T'_{<\%})$ <p>2. Con este cálculo, ya podemos obtener la entalpía del aire a la salida del calentamiento sensible:</p>
<p>-<math>h_{int}</math>: Entalpía del aire a la entrada del calentamiento sensible (<math>J/kg</math>)</p> <p>-Con la función 'Me_Poppe_pf' podemos obtener la humedad específica del aire a salida del proceso evaporativo (<math>w_{int}</math>). Con esto, y la temperatura del aire en esa zona, y aprovechando el diagrama psicrométrico, podemos obtener <math>h_{int}</math>.</p>	$h_{\%} (J/kg) = h'_{<\%} + \frac{Q}{\dot{m}_g}$ <p>-Calentamiento sensible: <math>w_{ext} = w_{int}</math></p> <p>3. Con la humedad específica y la entalpía del aire a la salida del proceso, y con el diagrama psicrométrico, ya podemos calcular su temperatura y humedad relativa.</p>

Tabla 3.11: Subsistemas 1-2

**Subsistemas 3-4**

-Para acabar con los subsistemas, tenemos las ventanas para la enfriadora y la bomba hidráulica. Lo único a destacar es que, en la bomba hidráulica, el caudal que se muestra es el del agua rociada, pero en l/s.

**Enfriadora**

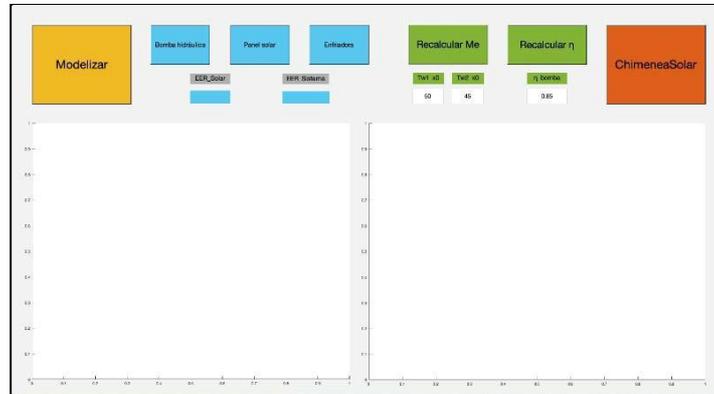


<p>EJEMPLO</p>									
<p>Bomba hidráulica</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th><math>\eta_{bomba}</math></th> <th><math>W_{bomba}</math></th> <th><math>Q</math></th> <th><math>H_m</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.846508</td> <td>0.0812731</td> <td>0.416667</td> <td>16.3056</td> </tr> </tbody> </table>	$\eta_{bomba}$	$W_{bomba}$	$Q$	$H_m$	0.846508	0.0812731	0.416667	16.3056
$\eta_{bomba}$	$W_{bomba}$	$Q$	$H_m$						
0.846508	0.0812731	0.416667	16.3056						
<p>EJEMPLO</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th><math>\eta_{bomba}</math></th> <th><math>W_{bomba}</math></th> <th><math>Q</math></th> <th><math>H_m</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.846508</td> <td>0.0812731</td> <td>0.416667</td> <td>16.3056</td> </tr> </tbody> </table>	$\eta_{bomba}$	$W_{bomba}$	$Q$	$H_m$	0.846508	0.0812731	0.416667	16.3056
$\eta_{bomba}$	$W_{bomba}$	$Q$	$H_m$						
0.846508	0.0812731	0.416667	16.3056						

Tabla 3.12: Subsistemas 3-4

### Otros

-En esta ventana de la interfaz hemos introducido dos parámetros de la modelización: el rendimiento máximo de la bomba hidráulica, y los valores iniciales para el comando 'fsolve'.

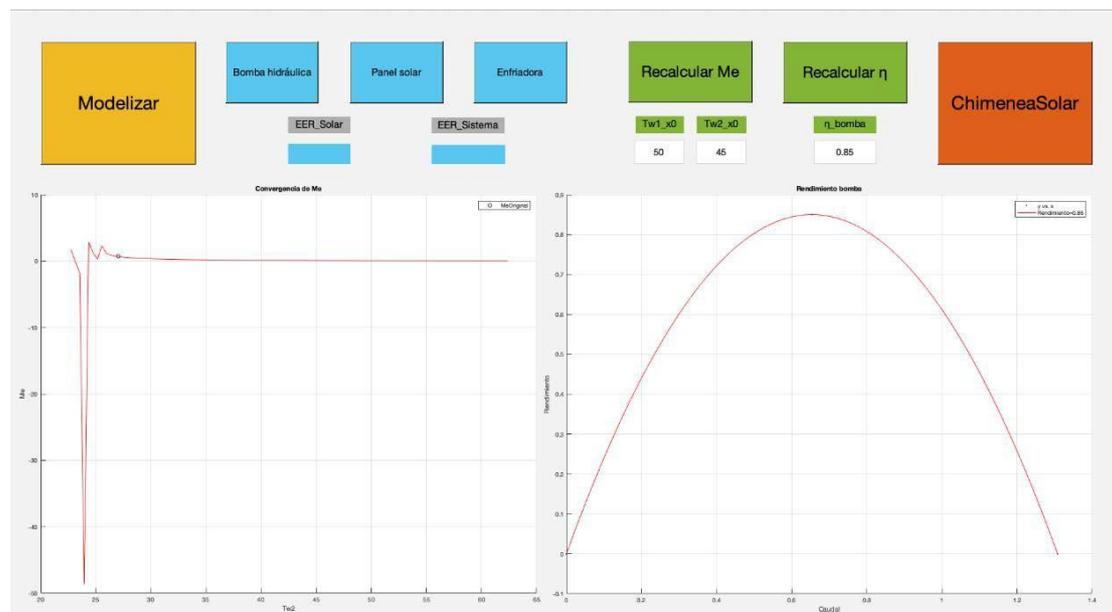


$Tw_{1_0}$ : Valor inicial  $Tw_1$  para 'fsolve'.

$Tw_{2_0}$ : Valor inicial  $Tw_2$  para 'fsolve'.

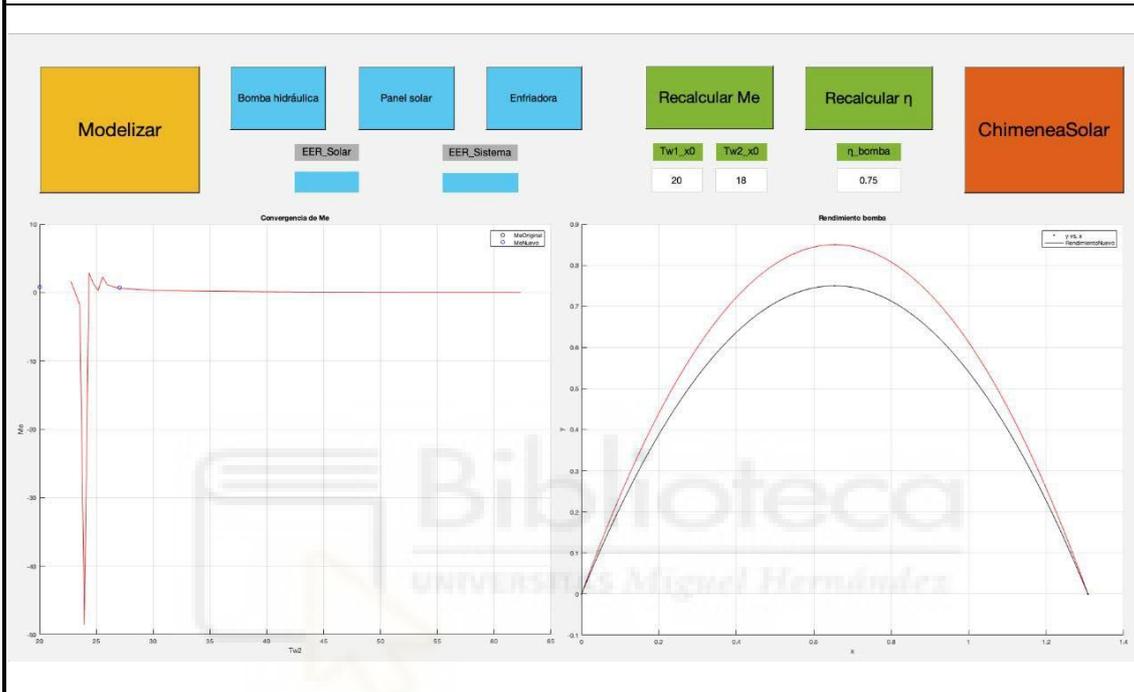
$\eta$ : Rendimiento máximo de la bomba hidráulica.

-Cuando realicemos el cálculo en 'ChimeneaSolar', en esta ventana se generará en la gráfica de la izquierda la evolución del Me y la posición de nuestra solución en la gráfica, en forma de círculo negro. En la gráfica de la derecha se generará la curva de la bomba hidráulica.



-Podemos cambiar el rendimiento considerado si lo necesitamos, y si clicamos el botón de 'Recalcular  $\eta$ ' se genera una curva de la bomba hidráulica para este nuevo valor, en la gráfica de la derecha.

-Si al ensayar el modelo obtenemos resultados incoherentes será por un problema de los valores iniciales de  $T_{w1-2}$ . Para arreglar esto, acudimos a esta ventana y cambiamos los valores. Si clicamos 'Recalcular Me' se genera un nuevo círculo de color azul en la gráfica del número de Me, para estos nuevos valores de  $T_{w1-2}$ ; si el círculo está en la zona estable la solución ahora si será correcta.



-Obviamente si cambiamos cualquiera de estos tres valores mencionados, será para volver a recalcular el modelo, por lo tanto tenemos otro botón de 'Modelizar', que al clicarlo volverá a obtener todos los parámetros para estos nuevos valores introducidos. Además, tenemos de nuevo los botones que nos llevan a cada uno de los subsistemas.

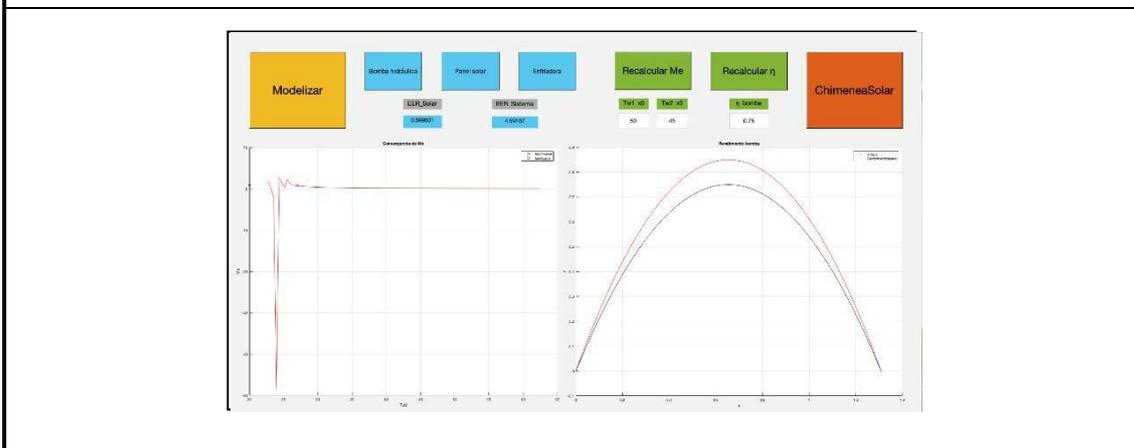


Tabla 3.13: Ventana Otros

### 3.7. ESTUDIO DE OPTIMIZACIÓN

El caudal de agua rociada en la chimenea solar fotovoltaica evaporativa es una variable clave en el funcionamiento de la instalación. A mayor caudal volumétrico, mayor es el gasto másico de agua, y por lo tanto mayor el número de Me, aunque esto último no es un efecto inmediato, puesto que el número de Me depende a su vez del gasto másico de aire; en la Tabla 3.14 se realiza una aclaración de esto. Un mayor número de Me conllevará una mayor transferencia de calor en el enfriamiento evaporativo, y por lo consiguiente, una menor temperatura del agua a la salida de la chimenea. A menor temperatura del agua que transfiera calor con el condensador, mayor será el EER de la enfriadora, es decir, el consumo del compresor será menor. Esto es debido a que cuanto menor sea la temperatura en la enfriadora, la presión necesaria para condensar se verá reducida. Si hay mayor transferencia de calor en el enfriamiento evaporativo, además de las consecuencias en la enfriadora, menor será la temperatura del aire a la salida del enfriamiento, y por lo tanto más refrigerará las capas del panel, aumentando el rendimiento de éste, y por lo consiguiente, generando mayor potencia eléctrica.

Todo lo expuesto serían las ventajas de aumentar el caudal de agua rociada, pero hay que tener en cuenta que, a mayor caudal rociado mayor será la altura manométrica en el circuito de calor, y por lo tanto mayor potencia requerirá la bomba hidráulica; todo esto se puede ver mejor en la Tabla 3.14.

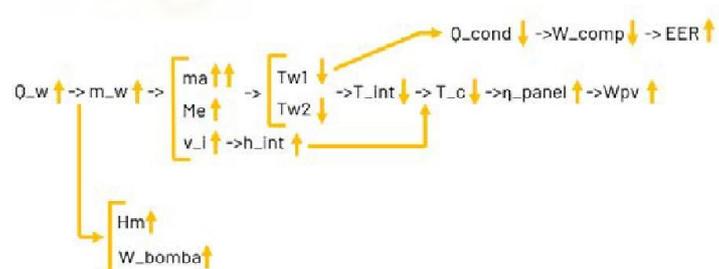
<b>Influencia del caudal</b>

<p>-La temperatura de entrada del agua rociada disminuye al ser menor la temperatura de salida del agua. Una <math>T_{w2}</math> menor hará que su pareja <math>T_{w1}</math> se reduzca para que se cumpla la teoría de Poppe para el número de Me.</p> <p>-Como <math>m_a = -6,1751 \cdot m_w + 2,2469 \cdot m_w - 0,07653</math>, y <math>Me = 0,70998846 \cdot 4 \cdot \dots^{-/1+23456+}</math>, el gasto másico de aire tiene que ser mayor que el gasto másico de agua para que se cumpla ese aumento del número de Me que habíamos comentado. Se ha realizado esta explicación para aclarar las dos flechas que se pueden ver en el símbolo del gasto másico de aire.</p>

Tabla 3.14: Influencia del caudal

El objetivo es encontrar un punto óptimo de funcionamiento, sabiendo que el consumo de la bomba aumenta con el caudal, y el consumo del compresor disminuye con el mismo; estamos buscando un caudal que nos dé el consumo mínimo en la instalación.

### 3.7.1. DATOS CLIMATOLÓGICOS

Para realizar el estudio de optimización, hemos decidido utilizar unos datos de entrada realistas, para dotar de mayor utilidad los resultados que obtengamos, que encontramos en la Tabla 3.15, 3.16, y 3.17. Se ha buscado los datos climatológicos en la ciudad de Alicante en la época de verano, y para tres tipos diferentes de días. La selección de la estación es obvia puesto que es este el momento en el que funciona la instalación. Los tipos de días que hemos considerado serían:

- **Día más caluroso:** Se ha comenzado con el día más caluroso de todo el mes de julio de 2019, el 27 de julio. Se ha realizado el estudio en el 2019 puesto que, en el sistema de información utilizado para obtener los datos de radiación solar en Alicante, que podemos encontrar en la web del IDEA como 'Photovoltaic geographical information system (PVGISD)', en el momento en el que se realizó el estudio, la última actualización de sus bases de datos fue el 15/10/2019.
- **Día normal:** Seguimos el estudio para un día con una temperatura media ni muy alta ni muy baja del mes de julio de 2019, para ser exactos, el 11 de julio.
- **Día medio:** Para acabar hemos creado unos datos climatológicos haciendo la media de los datos medios de los meses de junio, julio, y agosto.

#### Día más caluroso

-En el PVGISD se puede obtener los datos de radiación solar, pero de un día medio del mes seleccionado. Como queremos los valores más altos posibles, utilizamos la radiación solar a las 12 de la mañana. Además, en el programa se ha de introducir el valor del azimut y la inclinación solar, y se han utilizado respectivamente 0° y 35°, para todos los tipos de días.



	G_sol (W/m <sup>2</sup> )
Julio 12:00	920,17

-Para el resto de los datos climatológicos hemos utilizado la web 'TuTiempo.net'. Como hemos dicho, nos centramos en el día más caluroso de todo el mes. Además, para hacer más extremo el análisis, utilizamos la temperatura máxima de ese día.

Datos climáticos: Julio 2019														
Día	T	TM	Tm	SLP	H	PP	VV	V	VM	VG	RA	SN	TS	FG
1	25.9	29.7	21.8	1015.1	63	0	16.3	8.7	16.5	-				
2	25.7	29.1	23.2	1014.8	72	0	13.8	9.4	14.8	-				
3	25.6	30.7	19.2	1014	58	0	19.5	8.7	18.3	-				
4	26	30.5	20.3	1015.3	58	0	19	8.9	18.3	-	o			
5	26.3	30.5	21.7	1019.9	70	0	13.2	7	13	-				
6	27.6	33.5	23.6	1013.4	69	0	11.9	6.7	11.1	-				
7	28.6	34	26	1011.6	53	0	15.8	6.9	11.1	-				
8	26.4	29.2	23.1	1011	72	-	13	7	11.1	-	o			
9	25.9	30.5	20.2	1011.9	58	0	17.4	7	13	-				
10	25.7	30.2	20.7	1014.5	57	0	19.5	6.9	13	-				
11	26.6	31.6	20.5	1014.8	49	0	20	6.3	13	-				
12	27.8	33.2	21.7	1014.9	40	0	20	5.6	11.1	-				
13	27.9	32.7	25.5	1013	55	0	19.6	8.9	16.5	-				
14	27.3	30.7	23.7	1010.6	68	0	16.9	7.8	14.8	-				
15	26.8	31.5	22.3	1011.2	70	0	14.3	7.8	16.5	-				
16	26.7	30.1	23.8	1015.1	67	0	17.1	9.1	13	-				
17	25.7	29.7	21.3	1013.9	55	0	18.3	6.3	14.8	-				
18	25.8	30.1	20.6	1014.6	58	0	20	6.1	11.1	-				
19	26.3	31.1	20.6	1015.1	56	0	19.3	9.4	18.3	-				
20	26.1	32.2	23.2	1014.5	44	0	19.6	10.6	22.2	-				
21	26.5	34.6	23.2	1018	43	0	19.6	11.5	20.6	-				
22	28.1	33	23.1	1019.8	44	0	19.8	10.6	20.6	-				
23	28.3	34.5	21.3	1017	38	0	19.8	8.9	16.5	-				
24	28.6	34.2	22.4	1015.4	34	0	19.6	8	16.5	-				
25	27.8	32.7	22.8	1013.9	45	0	19.8	8.9	14.8	-				
26	26.8	30.5	21.6	1009.8	64	0	16.6	6.5	11.1	-				
27	29.8	35.6	23.1	1005.9	35	0	17.4	10.9	20.6	-				
28	26.9	30	23.5	1009.8	57	0	19.5	9.1	18.3	-				
29	26.1	30.7	21.2	1011.1	63	0	19.8	6.9	16.5	-				
30	25.6	30	21.9	1013.1	73	0	18.3	8	13	-				
31	25.4	28.5	21.9	1014.6	66	0	19.2	12.6	24.1	-				

T	Temperatura media (°C)
TM	Temperatura máxima (°C)
Tm	Temperatura mínima (°C)
SLP	Presión atmosférica a nivel del mar (hPa)
H	Humedad relativa media (%)
PP	Precipitación total de lluvia y/o nieve derretida (mm)
VV	Visibilidad media (Km)
V	Velocidad media del viento (Km/h)
VM	Velocidad máxima sostenida del viento (Km/h)
VG	Velocidad de ráfagas máximas de viento (Km/h)
RA	Indica si hubo lluvia o llovizna (En la media mensual, total días que llovió)
SN	Indicador de nieve (En la media mensual, total días que nevó)
TS	Indica si hubo tormenta (En la media mensual, total días con tormenta)
FG	Indica si hubo niebla (En la media mensual, total días con niebla)

	T_ext (°C)	v_v (m/s)	HR (%)
27 de Julio	35,6	3,028	35

Tabla 3.15: Día más caluroso

### Día normal

-En este caso, hemos utilizado para la radiación solar el valor medio de julio a las 9 de la mañana, que tiene una magnitud ni muy alta ni muy baja.



	G_sol (W/m^2)
Julio 9:00	636,02

-Para el resto de los datos, como hemos dicho antes, hemos utilizado el día con una temperatura media que no destaque ni por ser muy alta ni muy baja. En este caso, en vez de utilizar la temperatura máxima del día, hemos aprovechado la media del día.

Datos climáticos: Julio 2019														
Día	T	TM	Tm	SLP	H	PP	VV	V	VM	VG	RA	SN	TS	FG
1	25.9	29.7	21.8	1015.1	63	0	16.3	8.7	16.5	-				
2	25.7	29.1	23.2	1014.8	72	0	13.8	9.4	14.8	-				
3	25.6	30.7	19.2	1014	58	0	19.5	8.7	18.3	-				
4	26	30.5	20.3	1015.3	58	0	19	8.9	18.3	-	o			
5	26.3	30.5	21.7	1015.9	70	0	13.2	7	13	-				
6	27.6	33.5	23.6	1013.4	69	0	11.9	6.7	11.1	-				
7	29.6	34	26	1011.6	53	0	15.8	8.9	11.1	-				
8	26.4	29.2	23.1	1011	72	-	13	7	11.1	-	o			
9	25.9	30.5	20.2	1011.9	56	0	17.4	7	13	-				
10	25.7	30.2	20.7	1014.5	57	0	19.5	6.9	13	-				
11	26.6	31.6	20.5	1014.8	49	0	20	6.3	13	-				
12	27.8	33.2	21.7	1014.9	40	0	20	5.6	11.1	-				
13	27.9	32.7	25.5	1013	55	0	19.6	8.9	16.5	-				
14	27.3	30.7	23.7	1010.6	69	0	16.9	7.8	14.8	-				
15	26.8	31.5	22.3	1011.2	70	0	14.3	7.8	16.5	-				
16	26.7	30.1	23.8	1015.1	67	0	17.1	9.1	13	-				
17	25.7	29.7	21.3	1013.9	55	0	18.3	6.3	14.8	-				
18	25.8	30.1	20.6	1014.6	58	0	20	6.1	11.1	-				
19	26.3	31.1	20.6	1015.1	56	0	19.3	9.4	18.3	-				
20	28.1	32.2	23.2	1014.5	44	0	19.6	10.8	22.2	-				
21	28.5	34.6	23.2	1018	43	0	19.6	11.5	20.6	-				
22	28.1	33	23.1	1019.8	44	0	19.8	10.6	20.6	-				
23	28.3	34.5	21.3	1017	36	0	19.8	8.9	16.5	-				
24	28.6	34.2	22.4	1015.4	34	0	19.6	8	16.5	-				
25	27.8	32.7	22.6	1013.9	45	0	19.8	8.9	14.8	-				
26	26.8	30.5	21.0	1009.8	64	0	16.6	6.5	11.1	-				
27	29.8	35.6	23.1	1005.9	35	0	17.4	10.9	20.6	-				
28	26.9	30	23.5	1009.8	57	0	19.5	9.1	18.3	-				
29	26.1	30.7	21.2	1011.1	63	0	19.8	8.9	16.5	-				
30	25.6	30	21.9	1013.1	73	0	18.3	8	13	-				
31	25.4	28.5	21.9	1014.6	66	0	19.2	12.6	24.1	-				

T	Temperatura media (°C)
TM	Temperatura máxima (°C)
Tm	Temperatura mínima (°C)
SLP	Presión atmosférica a nivel del mar (hPa)
H	Humedad relativa media (%)
PP	Precipitación total de lluvia y/o nieve derretida (mm)
VV	Visibilidad media (Km)
V	Velocidad media del viento (Km/h)
VM	Velocidad máxima sostenida del viento (Km/h)
VG	Velocidad de ráfagas máximas de viento (Km/h)
RA	Indica si hubo lluvia o llovizna (En la media mensual, total días que llovió)
SN	Indicador de nieve (En la media mensual, total días que nevó)
TS	Indica si hubo tormenta (En la media mensual, total días con tormenta)
FG	Indica si hubo niebla (En la media mensual, total días con niebla)

	T_ext (°C)	v_v (m/s)	HR (%)
11 de Julio	26,6	1,556	49

Tabla 3.16: Día normal

**Día medio**

-En este caso, la radiación solar que vamos a utilizar será a las 3 del mediodía para los meses de junio, julio, y agosto.

Junio	Julio	Agosto

	G_sol (W/m <sup>2</sup> )
Junio 15:00	595.18
Julio 15:00	633,63
Agosto 15:00	613,6
G_sol media	623,615

-Para este estudio de día medio, hemos utilizado el valor medio de la temperatura media de cada día.

**Datos climáticos: Junio 2019**

Día	T	TM	Tm	SLP	H	PP	VV	V	VM	VG	RA	SN	TS	FG
Medias y totales mensuales:														
	22.9	27.6	17.6	1014.9	56.4	0.25	17.7	7.5	14.9		3	0	0	0

**Datos climáticos: Julio 2019**

Día	T	TM	Tm	SLP	H	PP	VV	V	VM	VG	RA	SN	TS	FG
Medias y totales mensuales:														
	27	31.5	22.2	1013.7	56.5	0	17.9	8.2	15.6		2	0	0	0

**Datos climáticos: Agosto 2019**

Día	T	TM	Tm	SLP	H	PP	VV	V	VM	VG	RA	SN	TS	FG
Medias y totales mensuales:														
	26.2	30.5	21.6	1015.4	67.7	106.94	17.7	6.8	13.7		4	0	2	0

	T_ext (°C)	v_v (m/s)	HR (%)
Junio	22,9	2,083	56,4
Julio	27	2,278	56,5
Agosto	26,2	1,889	67,7
Media	25,367	2,083	60,200

Tabla 3.17: Día medio

### 3.7.2. EER<sub>grid</sub>

Antes de proceder los resultados del estudio de optimización, se ha decidido que lo más adecuado para este apartado es introducir un nuevo parámetro de estudio. Este parámetro será el único resultado que vamos a mostrar del cálculo, y es debido a que es el que mejor muestra si existe un punto de funcionamiento óptimo en nuestra instalación.

El parámetro al que nos referimos es el EER<sub>grid</sub> (Tabla 3.18), que expresa cuanta potencia frigorífica se produce en la instalación, frente a los kW eléctricos que realmente consumimos de la red, es decir, el consumo del compresor y bomba hidráulica pero además teniendo en cuenta la potencia eléctrica generada por los paneles fotovoltaicos.

<b>EER<sub>grid</sub></b>
$EER_{grid} = \frac{Q_{0}}{\dot{W}_{2} + \dot{W}_{1} - 4 \cdot \dot{W}_{1}}$
-Recordar que la fórmula de la potencia generada por el panel fotovoltaico, en el primer subsistema, estaba referida a un solo panel; multiplicamos por 4 para tener en cuenta toda la instalación de paneles

Tabla 3.18: EER<sub>grid</sub>

### 3.7.3. RESULTADOS

Para el estudio de optimización hemos considerado un intervalo de caudal de agua desde un 1 m<sup>3</sup>/h hasta los 2 m<sup>3</sup>/h, con incrementos de 0,05 m<sup>3</sup>/h, como se puede ver en la Imagen 3.4. Los ensayos, que hemos utilizado para la modelización de la instalación, se realizaron para un caudal de bombeo de 2000 l/h en total para los cuatro paneles, donde a lo largo del ensayo se registraron bajadas en el caudal. No podemos ensayar los subsistemas para un caudal mayor del que hemos utilizado para la modelización, pero si para caudales menores al saber que a lo largo de los ensayos se reducía este valor. Se intentó realizar el cálculo para valores menores de 1 m<sup>3</sup>/h, pero desde los 0,8 m<sup>3</sup>/h se produce un error en el cálculo, dando a entender que, en los ensayos el caudal de agua rociada no se reducía a tal punto.

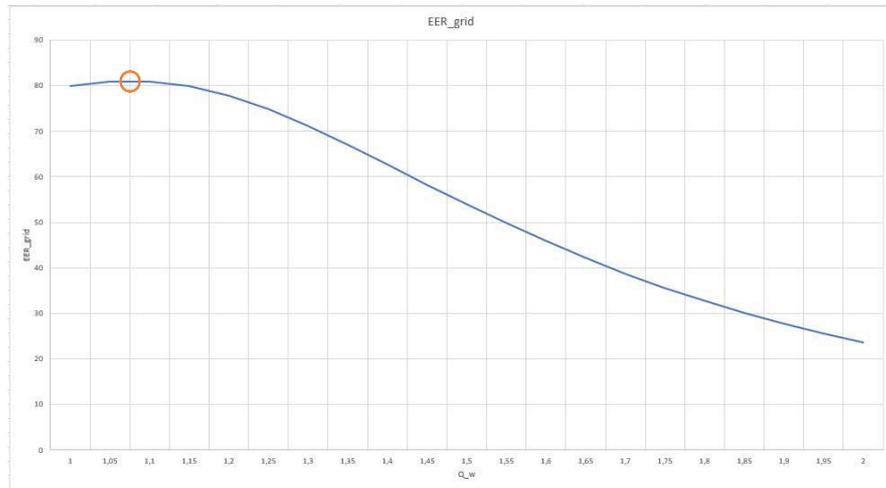
Q <sub>w</sub> (m <sup>3</sup> /h)
1
1,05
1,1
1,15
1,2
1,25
1,3
1,35
1,4
1,45
1,5
1,55
1,6
1,65
1,7
1,75
1,8
1,85
1,9
1,95
2

Imagen 3.4: Caudal estudio de optimización

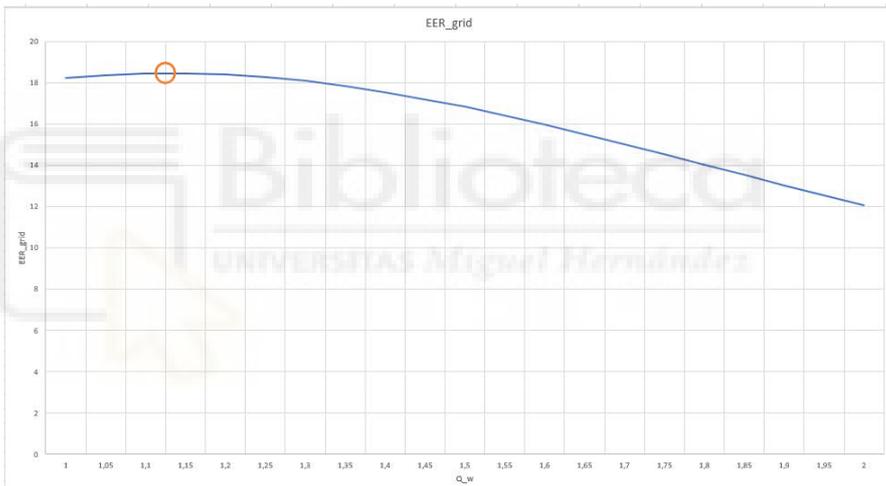
Una vez ya explicado los caudales de ensayo, ya podemos pasar a los resultados del EER<sub>grid</sub>; buscamos un valor del caudal que nos de su valor máximo, antes de que el consumo de la bomba produzca una disminución del parámetro. En la Tabla 3.19 se pueden encontrar los resultados del estudio de optimización.

## Resultados estudio de optimización

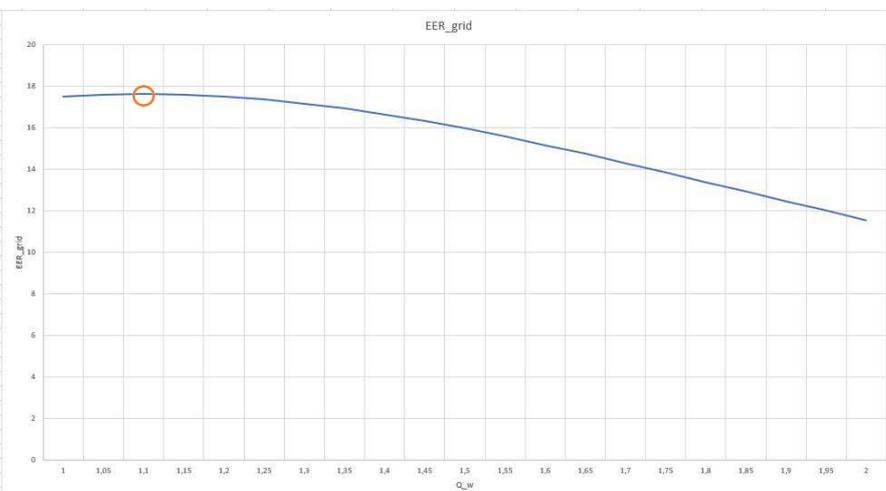
**Día más caluroso**



**Día normal**



**Día medio**



-El punto de funcionamiento no solo depende del caudal de agua rociada, sino también del resto de datos de entrada. Como el resto son datos climatológicos que no podemos controlar, hicimos este estudio para el único dato que si podemos regular, como es obvio. Por lo tanto, la conclusión a la que hemos llegado, es que con independencia de las condiciones ambientales, hay punto óptimo de funcionamiento para la instalación.

-Los puntos rojos que se han añadido a cada una de las gráficas son los puntos de funcionamiento óptimo de la instalación, para cada uno de los tres tipos de días estudiados. Además de las gráficas, para hacer más enclarecedor el estudio, se van a añadir los resultados numéricos del  $EER_{grid}$ .

	$Q_w$ (m <sup>3</sup> /h)	$EER_{grid}$ (-)
<b>Día más caluroso</b>	1	79,8379582
	1,05	80,91419321
	1,1	80,92160264
	1,15	79,83460323
	1,2	77,72956734
	1,25	74,7612747
	<b>Día normal</b>	1
1,05		18,37342292
1,1		18,45435766
1,15		18,46395592
1,2		18,40415694
1,25		18,27819423
<b>Día medio</b>		1
	1,05	17,5601115
	1,1	17,59606852
	1,15	17,57102243
	1,2	17,48681949
	1,25	17,34637024

Tabla 3.19: Resultados optimización

Como hemos podido ver en los resultados, el punto de funcionamiento de la instalación lo encontraremos a los **1,1 m<sup>3</sup>/h** en el día más caluroso y medio. En el caso del día normal, necesitaríamos aumentar el bombeo a **1,15 m<sup>3</sup>/h**. Con todo esto, ya hemos obtenido un caudal óptimo de uso para tres tipos de días de verano; esto nos servirá como punto de partida si queremos hacer uso de la instalación. En la Tabla 3.20 podemos encontrar un resumen de la optimización, además del consumo de la bomba hidráulica en cada una de estas situaciones.

<b>Resumen resultados optimización</b>						
DATOS DE CADA DÍA	G_sol (W/m <sup>2</sup> )	T_ext (°C)	v_v (m/s)	Q_w (m <sup>3</sup> /h)	φi (%)	Q_evap (kW)
Día más caluroso	920,17	35,6	3,028	1,1	35	3,8
Día normal	636,02	26,6	1,556	1,15	49	3,8
Día medio	623,615	25,367	2,083	1,1	60,2	3,8
<b>Consumo de la bomba</b>	Q=1,1 m <sup>3</sup> /h -> $\dot{W}_i = 0,0338$ kW					
	Q=1,15 m <sup>3</sup> /h -> $\dot{W}_i = 0,03828$ kW					

Tabla 3.20: Resumen optimización

### 3.8. ANÁLISIS DE INFLUENCIA

Como habíamos mencionado anteriormente, el segundo objetivo del proyecto, una vez obtenida la modelización, era el análisis de influencia de los datos de entrada sobre los resultados del modelo. Si recordamos, nuestras variables de entrada son: la radiación solar incidente en la instalación, la temperatura ambiente, la velocidad del viento exterior, el caudal de agua rociada, la humedad relativa exterior, y la potencia en el evaporador. El estudio del caudal de agua ya se ha realizado en el estudio de optimización, y la potencia frigorífica no tiene sentido analizar su influencia sobre la instalación; la potencia frigorífica no puede ser mayor a los 3,8 kW que marca la enfriadora, y además no podemos hacer el estudio para una potencia menor, puesto que ninguno de los ensayos que hemos aprovechado se realizó con carga parcial, es decir, se trabajaba a carga máxima todo el tiempo. Como se puede ver, nos quedamos entonces con cuatro de los seis de datos de entrada para realizar el análisis de influencia, y fijamos  $Q_{UVW} = 3,8 \text{ kW}$ , y el caudal a un valor arbitrario de  $1,1 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Para realizar un buen análisis, hemos decidido generar cuatro series de valores para cada uno de los datos de entrada, acabando con 16 valores, como podemos ver en la Imagen 3.5; las series se han escogido a conciencia, teniendo en cuenta el utilizar valores razonables para cada uno de los datos de entrada. Como queremos mostrar bien la influencia, vamos a realizar el cálculo para cada una de las permutaciones posibles. Al tener 4 series con 4 valores en cada una, tenemos  $4^4$  posibilidades de análisis, es decir, 256 permutaciones. Todo esto último mencionado se puede ver con mayor claridad en la Tabla 3.21.

DATOS DE ENTRADA			
$G_{\text{sol}}$ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	$T_{\text{ext}}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$v_v$ (m/s)	$HR_{\text{ext}}$ (%)
250	25	2,5	25
500	30	5	50
750	35	7,5	75
1000	40	10	100

Imagen 3.5: Datos análisis de influencia

### Permutaciones del análisis

-Las posibilidades de análisis las hemos realizado con un orden para no olvidar ninguna permutación.

#### DATOS DE ENTRADA

G_sol	T_ext	v_v	HR_ext
250 <sup>1</sup>	25 <sup>1</sup>	2,5 <sup>1</sup>	25 <sup>1</sup>
500 <sup>2</sup>	30 <sup>2</sup>	5 <sup>2</sup>	50 <sup>2</sup>
750 <sup>3</sup>	35 <sup>3</sup>	7,5 <sup>3</sup>	75 <sup>3</sup>
1000 <sup>4</sup>	40 <sup>4</sup>	10 <sup>4</sup>	100 <sup>4</sup>

-Se van a mostrar todas las permutaciones posibles, donde habrá 4 bloques que irán en orden de cálculo por el número que se le asigne. En cada uno de los bloques habrá 4 conjuntos de datos de entrada, que al igual que los bloques, irán en orden de cálculo por el número que se le asigne. Para terminar, dentro de cada conjunto, habrá 16 series de valores, donde el orden de cálculo sea de arriba abajo. Con todo esto, completaremos las 256 permutaciones posibles.

#### 1ºBloque

1 1 1 1	1 1 3 1
2 1 1 1	2 1 3 1
3 1 1 1	3 1 3 1
4 1 1 1	4 1 3 1
1 2 1 1	1 2 3 1
2 2 1 1	2 2 3 1
3 2 1 1	3 2 3 1
4 2 1 1	4 2 3 1
1 3 1 1	1 3 3 1
2 3 1 1	2 3 3 1
3 3 1 1	3 3 3 1
4 3 1 1	4 3 3 1
1 4 1 1	1 4 3 1
2 4 1 1	2 4 3 1
3 4 1 1	3 4 3 1
4 4 1 1	4 4 3 1
1 1 2 1	1 1 4 1
2 1 2 1	2 1 4 1
3 1 2 1	3 1 4 1
4 1 2 1	4 1 4 1
1 2 2 1	1 2 4 1
2 2 2 1	2 2 4 1
3 2 2 1	3 2 4 1
4 2 2 1	4 2 4 1
1 3 2 1	1 3 4 1
2 3 2 1	2 3 4 1
3 3 2 1	3 3 4 1
4 3 2 1	4 3 4 1
1 4 2 1	1 4 4 1
2 4 2 1	2 4 4 1
3 4 2 1	3 4 4 1
4 4 2 1	4 4 4 1

#### 2ºBloque

1 1 1 2	1 1 3 2
2 1 1 2	2 1 3 2
3 1 1 2	3 1 3 2
4 1 1 2	4 1 3 2
1 2 1 2	1 2 3 2
2 2 1 2	2 2 3 2
3 2 1 2	3 2 3 2
4 2 1 2	4 2 3 2
1 3 1 2	1 3 3 2
2 3 1 2	2 3 3 2
3 3 1 2	3 3 3 2
4 3 1 2	4 3 3 2
1 4 1 2	1 4 3 2
2 4 1 2	2 4 3 2
3 4 1 2	3 4 3 2
4 4 1 2	4 4 3 2
1 1 2 2	1 1 4 2
2 1 2 2	2 1 4 2
3 1 2 2	3 1 4 2
4 1 2 2	4 1 4 2
1 2 2 2	1 2 4 2
2 2 2 2	2 2 4 2
3 2 2 2	3 2 4 2
4 2 2 2	4 2 4 2
1 3 2 2	1 3 4 2
2 3 2 2	2 3 4 2
3 3 2 2	3 3 4 2
4 3 2 2	4 3 4 2
1 4 2 2	1 4 4 2
2 4 2 2	2 4 4 2
3 4 2 2	3 4 4 2
4 4 2 2	4 4 4 2

3ºBloque	4ºBloque																																																																
<table border="1"> <tr><td>1 1 1 3</td><td>1 1 3 3</td></tr> <tr><td>2 1 1 3</td><td>2 1 3 3</td></tr> <tr><td>3 1 1 3</td><td>3 1 3 3</td></tr> <tr><td>4 1 1 3</td><td>4 1 3 3</td></tr> <tr><td>1 2 1 3</td><td>1 2 3 3</td></tr> <tr><td>2 2 1 3</td><td>2 2 3 3</td></tr> <tr><td>3 2 1 3</td><td>3 2 3 3</td></tr> <tr><td>4 2 1 3</td><td>4 2 3 3</td></tr> <tr><td>1 3 1 3</td><td>1 3 3 3</td></tr> <tr><td>2 3 1 3</td><td>2 3 3 3</td></tr> <tr><td>3 3 1 3</td><td>3 3 3 3</td></tr> <tr><td>4 3 1 3</td><td>4 3 3 3</td></tr> <tr><td>1 4 1 3</td><td>1 4 3 3</td></tr> <tr><td>2 4 1 3</td><td>2 4 3 3</td></tr> <tr><td>3 4 1 3</td><td>3 4 3 3</td></tr> <tr><td>4 4 1 3</td><td>4 4 3 3</td></tr> </table>	1 1 1 3	1 1 3 3	2 1 1 3	2 1 3 3	3 1 1 3	3 1 3 3	4 1 1 3	4 1 3 3	1 2 1 3	1 2 3 3	2 2 1 3	2 2 3 3	3 2 1 3	3 2 3 3	4 2 1 3	4 2 3 3	1 3 1 3	1 3 3 3	2 3 1 3	2 3 3 3	3 3 1 3	3 3 3 3	4 3 1 3	4 3 3 3	1 4 1 3	1 4 3 3	2 4 1 3	2 4 3 3	3 4 1 3	3 4 3 3	4 4 1 3	4 4 3 3	<table border="1"> <tr><td>1 1 1 4</td><td>1 1 3 4</td></tr> <tr><td>2 1 1 4</td><td>2 1 3 4</td></tr> <tr><td>3 1 1 4</td><td>3 1 3 4</td></tr> <tr><td>4 1 1 4</td><td>4 1 3 4</td></tr> <tr><td>1 2 1 4</td><td>1 2 3 4</td></tr> <tr><td>2 2 1 4</td><td>2 2 3 4</td></tr> <tr><td>3 2 1 4</td><td>3 2 3 4</td></tr> <tr><td>4 2 1 4</td><td>4 2 3 4</td></tr> <tr><td>1 3 1 4</td><td>1 3 3 4</td></tr> <tr><td>2 3 1 4</td><td>2 3 3 4</td></tr> <tr><td>3 3 1 4</td><td>3 3 3 4</td></tr> <tr><td>4 3 1 4</td><td>4 3 3 4</td></tr> <tr><td>1 4 1 4</td><td>1 4 3 4</td></tr> <tr><td>2 4 1 4</td><td>2 4 3 4</td></tr> <tr><td>3 4 1 4</td><td>3 4 3 4</td></tr> <tr><td>4 4 1 4</td><td>4 4 3 4</td></tr> </table>	1 1 1 4	1 1 3 4	2 1 1 4	2 1 3 4	3 1 1 4	3 1 3 4	4 1 1 4	4 1 3 4	1 2 1 4	1 2 3 4	2 2 1 4	2 2 3 4	3 2 1 4	3 2 3 4	4 2 1 4	4 2 3 4	1 3 1 4	1 3 3 4	2 3 1 4	2 3 3 4	3 3 1 4	3 3 3 4	4 3 1 4	4 3 3 4	1 4 1 4	1 4 3 4	2 4 1 4	2 4 3 4	3 4 1 4	3 4 3 4	4 4 1 4	4 4 3 4
1 1 1 3	1 1 3 3																																																																
2 1 1 3	2 1 3 3																																																																
3 1 1 3	3 1 3 3																																																																
4 1 1 3	4 1 3 3																																																																
1 2 1 3	1 2 3 3																																																																
2 2 1 3	2 2 3 3																																																																
3 2 1 3	3 2 3 3																																																																
4 2 1 3	4 2 3 3																																																																
1 3 1 3	1 3 3 3																																																																
2 3 1 3	2 3 3 3																																																																
3 3 1 3	3 3 3 3																																																																
4 3 1 3	4 3 3 3																																																																
1 4 1 3	1 4 3 3																																																																
2 4 1 3	2 4 3 3																																																																
3 4 1 3	3 4 3 3																																																																
4 4 1 3	4 4 3 3																																																																
1 1 1 4	1 1 3 4																																																																
2 1 1 4	2 1 3 4																																																																
3 1 1 4	3 1 3 4																																																																
4 1 1 4	4 1 3 4																																																																
1 2 1 4	1 2 3 4																																																																
2 2 1 4	2 2 3 4																																																																
3 2 1 4	3 2 3 4																																																																
4 2 1 4	4 2 3 4																																																																
1 3 1 4	1 3 3 4																																																																
2 3 1 4	2 3 3 4																																																																
3 3 1 4	3 3 3 4																																																																
4 3 1 4	4 3 3 4																																																																
1 4 1 4	1 4 3 4																																																																
2 4 1 4	2 4 3 4																																																																
3 4 1 4	3 4 3 4																																																																
4 4 1 4	4 4 3 4																																																																
<table border="1"> <tr><td>1 1 2 3</td><td>1 1 4 3</td></tr> <tr><td>2 1 2 3</td><td>2 1 4 3</td></tr> <tr><td>3 1 2 3</td><td>3 1 4 3</td></tr> <tr><td>4 1 2 3</td><td>4 1 4 3</td></tr> <tr><td>1 2 2 3</td><td>1 2 4 3</td></tr> <tr><td>2 2 2 3</td><td>2 2 4 3</td></tr> <tr><td>3 2 2 3</td><td>3 2 4 3</td></tr> <tr><td>4 2 2 3</td><td>4 2 4 3</td></tr> <tr><td>1 3 2 3</td><td>1 3 4 3</td></tr> <tr><td>2 3 2 3</td><td>2 3 4 3</td></tr> <tr><td>3 3 2 3</td><td>3 3 4 3</td></tr> <tr><td>4 3 2 3</td><td>4 3 4 3</td></tr> <tr><td>1 4 2 3</td><td>1 4 4 3</td></tr> <tr><td>2 4 2 3</td><td>2 4 4 3</td></tr> <tr><td>3 4 2 3</td><td>3 4 4 3</td></tr> <tr><td>4 4 2 3</td><td>4 4 4 3</td></tr> </table>	1 1 2 3	1 1 4 3	2 1 2 3	2 1 4 3	3 1 2 3	3 1 4 3	4 1 2 3	4 1 4 3	1 2 2 3	1 2 4 3	2 2 2 3	2 2 4 3	3 2 2 3	3 2 4 3	4 2 2 3	4 2 4 3	1 3 2 3	1 3 4 3	2 3 2 3	2 3 4 3	3 3 2 3	3 3 4 3	4 3 2 3	4 3 4 3	1 4 2 3	1 4 4 3	2 4 2 3	2 4 4 3	3 4 2 3	3 4 4 3	4 4 2 3	4 4 4 3	<table border="1"> <tr><td>1 1 2 4</td><td>1 1 4 4</td></tr> <tr><td>2 1 2 4</td><td>2 1 4 4</td></tr> <tr><td>3 1 2 4</td><td>3 1 4 4</td></tr> <tr><td>4 1 2 4</td><td>4 1 4 4</td></tr> <tr><td>1 2 2 4</td><td>1 2 4 4</td></tr> <tr><td>2 2 2 4</td><td>2 2 4 4</td></tr> <tr><td>3 2 2 4</td><td>3 2 4 4</td></tr> <tr><td>4 2 2 4</td><td>4 2 4 4</td></tr> <tr><td>1 3 2 4</td><td>1 3 4 4</td></tr> <tr><td>2 3 2 4</td><td>2 3 4 4</td></tr> <tr><td>3 3 2 4</td><td>3 3 4 4</td></tr> <tr><td>4 3 2 4</td><td>4 3 4 4</td></tr> <tr><td>1 4 2 4</td><td>1 4 4 4</td></tr> <tr><td>2 4 2 4</td><td>2 4 4 4</td></tr> <tr><td>3 4 2 4</td><td>3 4 4 4</td></tr> <tr><td>4 4 2 4</td><td>4 4 4 4</td></tr> </table>	1 1 2 4	1 1 4 4	2 1 2 4	2 1 4 4	3 1 2 4	3 1 4 4	4 1 2 4	4 1 4 4	1 2 2 4	1 2 4 4	2 2 2 4	2 2 4 4	3 2 2 4	3 2 4 4	4 2 2 4	4 2 4 4	1 3 2 4	1 3 4 4	2 3 2 4	2 3 4 4	3 3 2 4	3 3 4 4	4 3 2 4	4 3 4 4	1 4 2 4	1 4 4 4	2 4 2 4	2 4 4 4	3 4 2 4	3 4 4 4	4 4 2 4	4 4 4 4
1 1 2 3	1 1 4 3																																																																
2 1 2 3	2 1 4 3																																																																
3 1 2 3	3 1 4 3																																																																
4 1 2 3	4 1 4 3																																																																
1 2 2 3	1 2 4 3																																																																
2 2 2 3	2 2 4 3																																																																
3 2 2 3	3 2 4 3																																																																
4 2 2 3	4 2 4 3																																																																
1 3 2 3	1 3 4 3																																																																
2 3 2 3	2 3 4 3																																																																
3 3 2 3	3 3 4 3																																																																
4 3 2 3	4 3 4 3																																																																
1 4 2 3	1 4 4 3																																																																
2 4 2 3	2 4 4 3																																																																
3 4 2 3	3 4 4 3																																																																
4 4 2 3	4 4 4 3																																																																
1 1 2 4	1 1 4 4																																																																
2 1 2 4	2 1 4 4																																																																
3 1 2 4	3 1 4 4																																																																
4 1 2 4	4 1 4 4																																																																
1 2 2 4	1 2 4 4																																																																
2 2 2 4	2 2 4 4																																																																
3 2 2 4	3 2 4 4																																																																
4 2 2 4	4 2 4 4																																																																
1 3 2 4	1 3 4 4																																																																
2 3 2 4	2 3 4 4																																																																
3 3 2 4	3 3 4 4																																																																
4 3 2 4	4 3 4 4																																																																
1 4 2 4	1 4 4 4																																																																
2 4 2 4	2 4 4 4																																																																
3 4 2 4	3 4 4 4																																																																
4 4 2 4	4 4 4 4																																																																

Tabla 3.21: Permutaciones análisis influencia



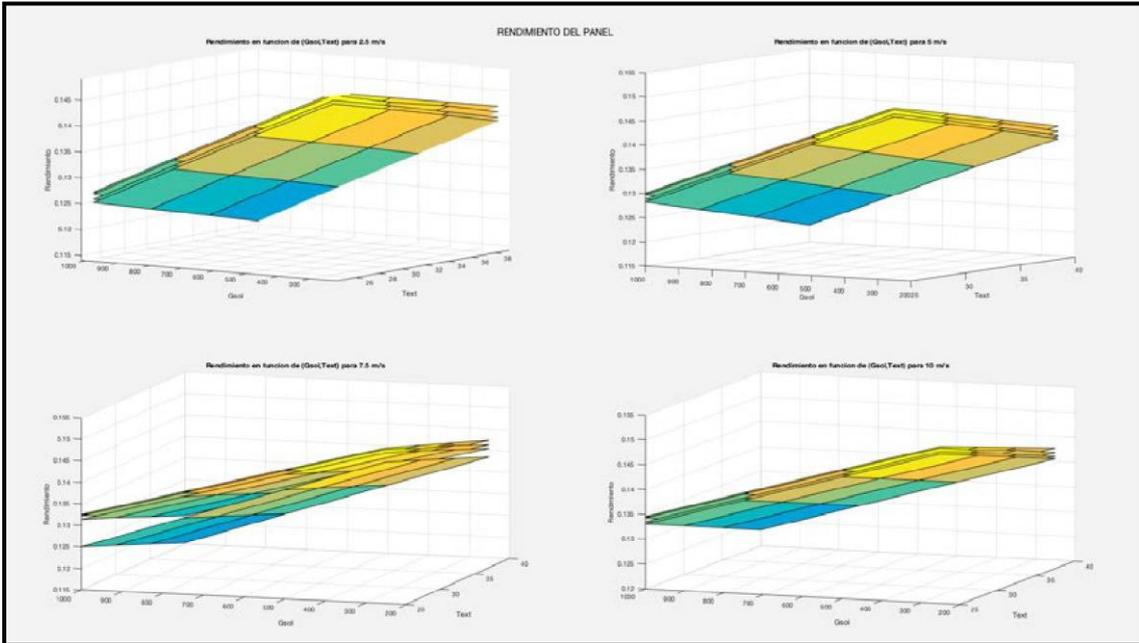


Imagen 3.6: Influencia en  $\eta_c$

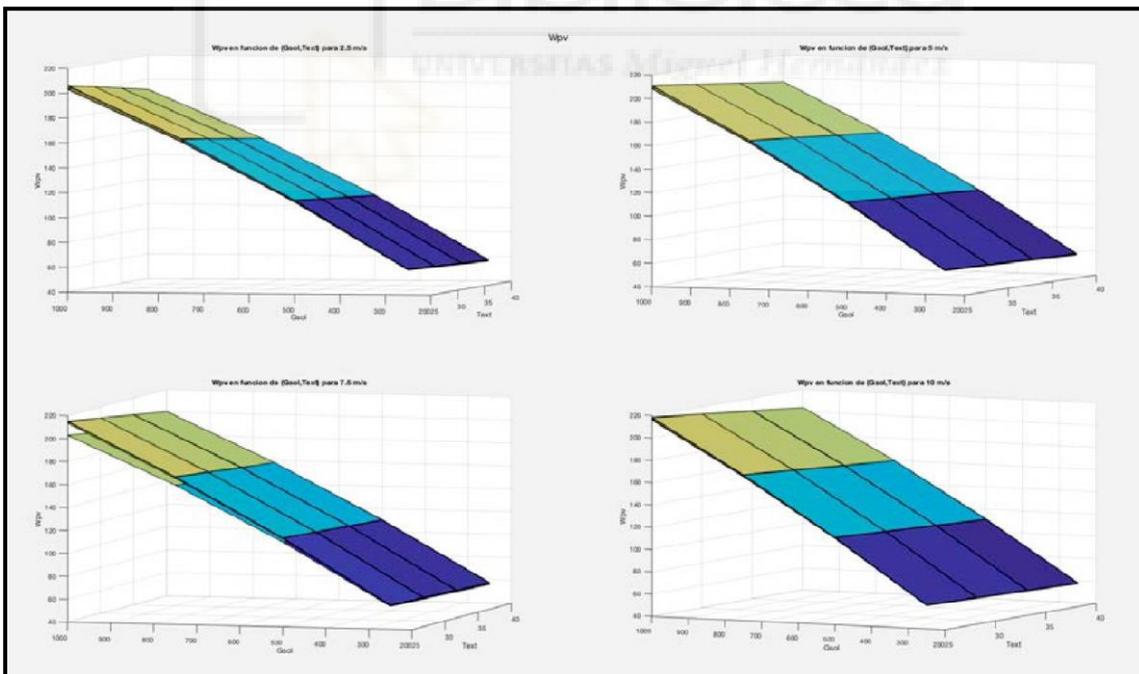


Imagen 3.7: Influencia en  $W_D$

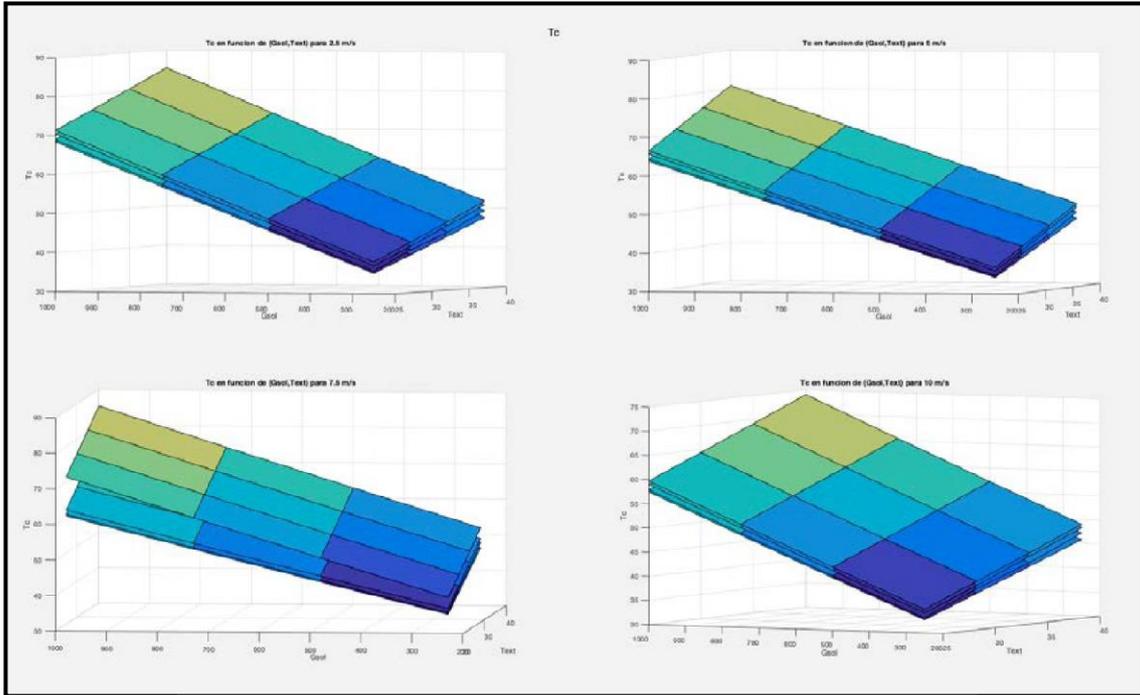


Imagen 3.8: Influencia en  $T_c$

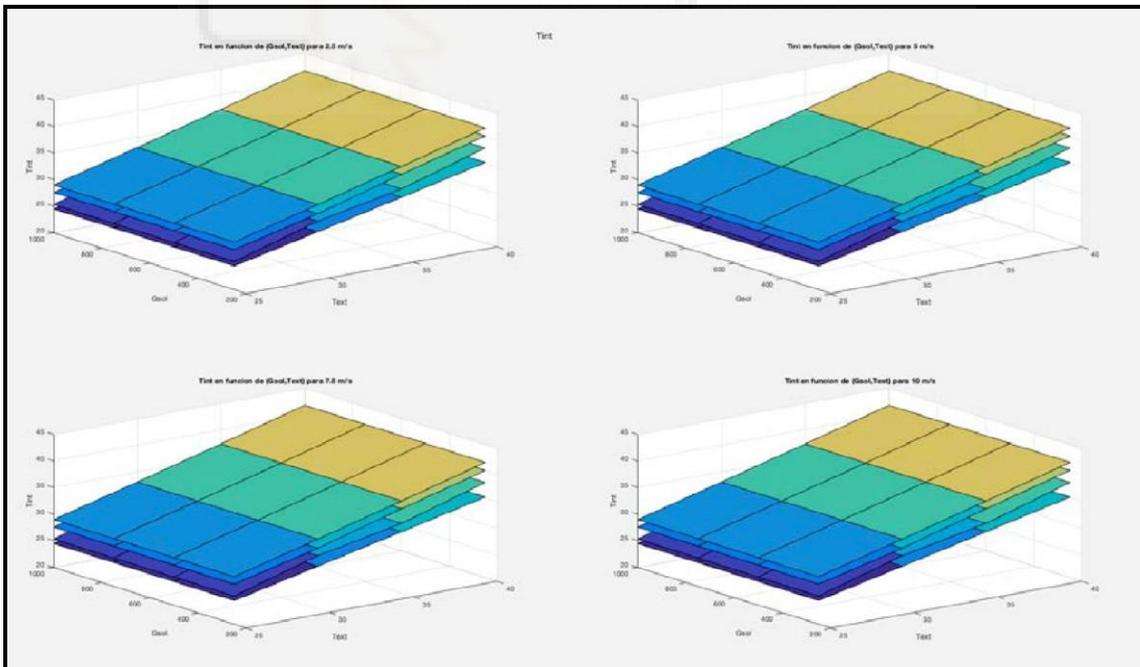


Imagen 3.9: Influencia en  $T_{int}$

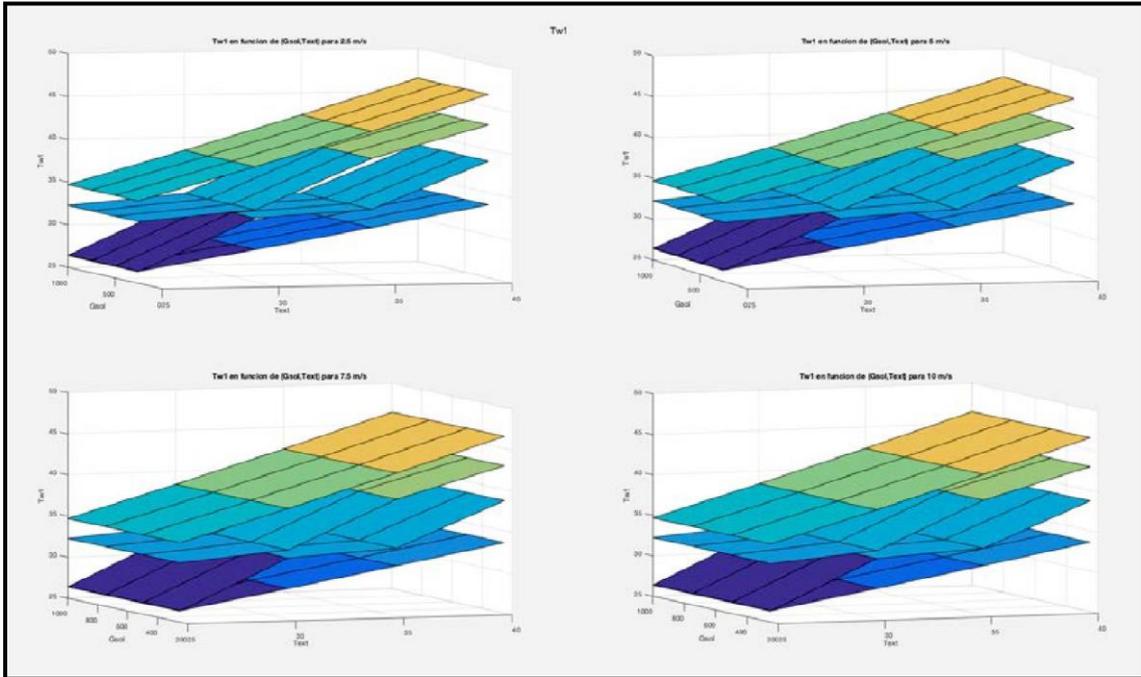


Imagen 3.10: Influencia en  $T_{w1}$

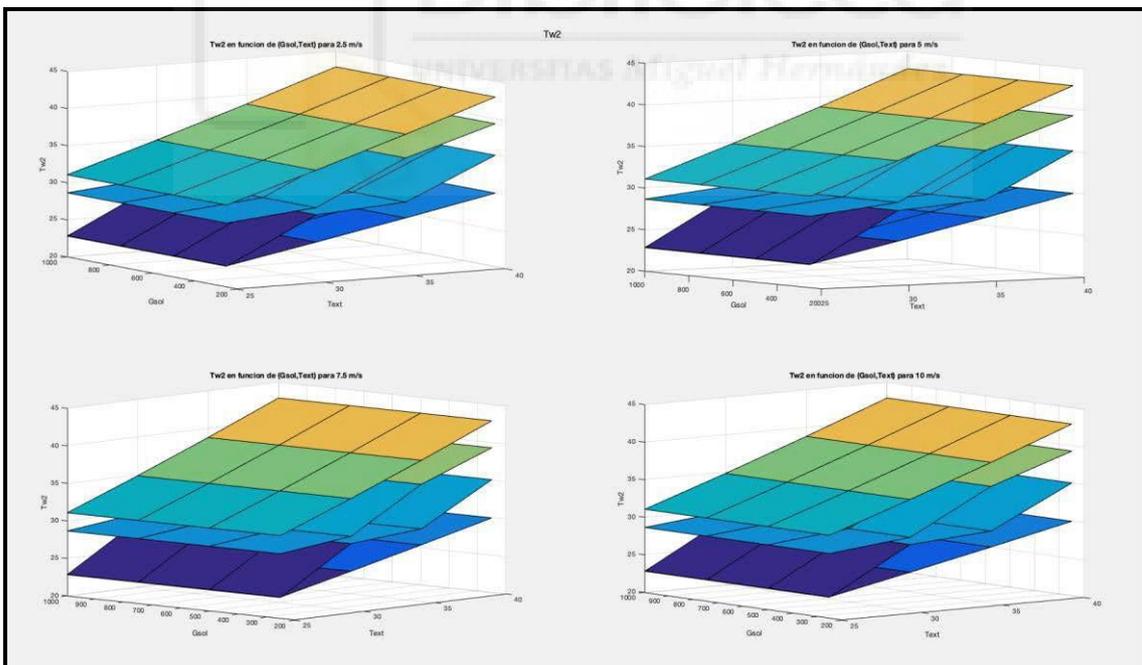


Imagen 3.11: Influencia en  $T_{w2}$

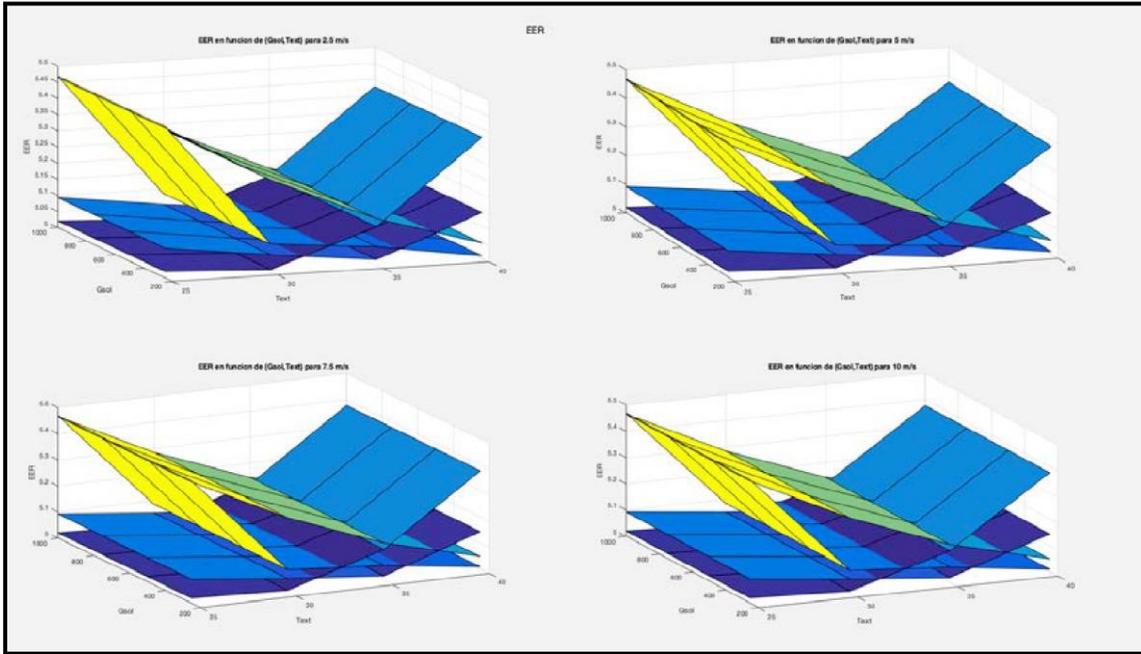


Imagen 3.12: Influencia en EER

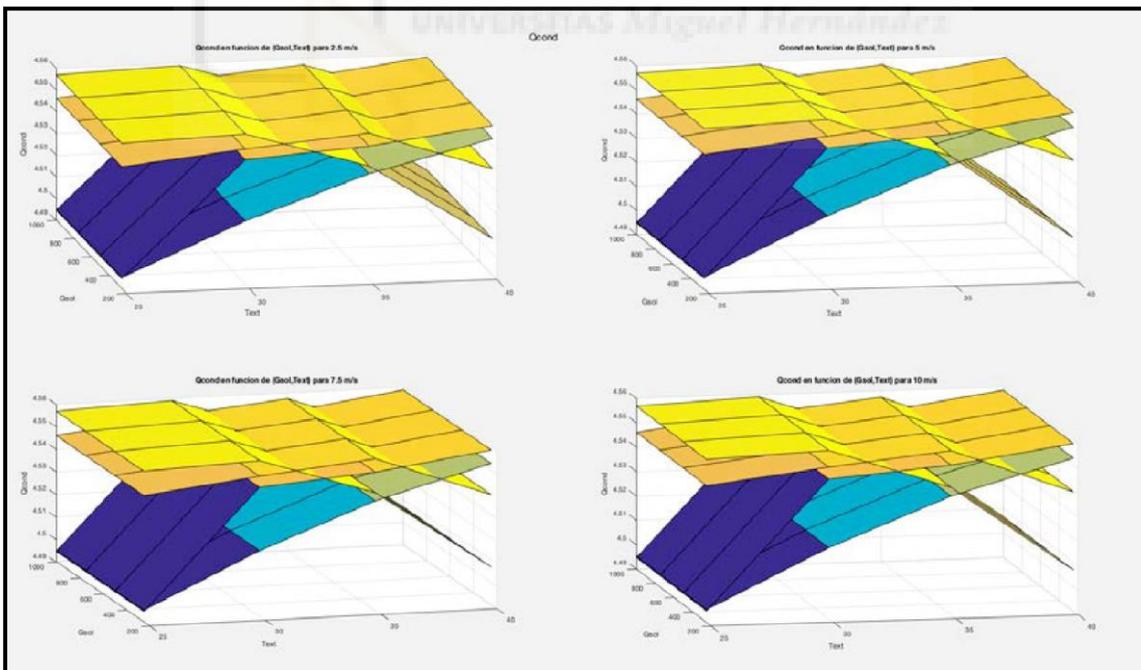


Imagen 3.13: Influencia en  $Q_{DEFG}$

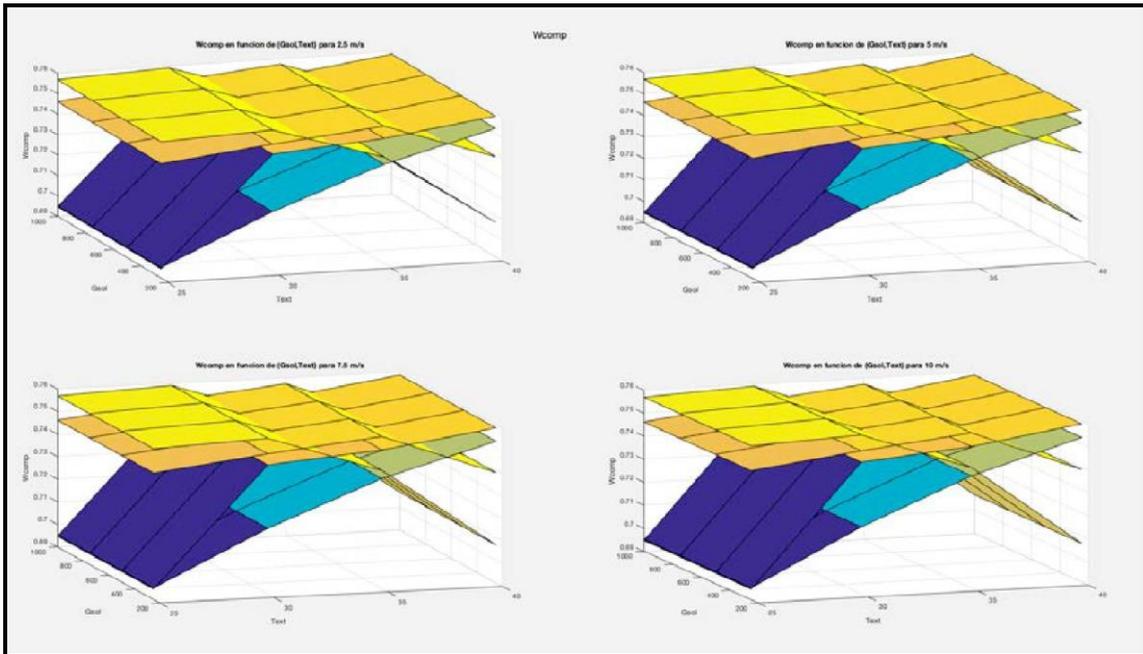


Imagen 3.14: Influencia en  $\dot{W}_{DEHI}$

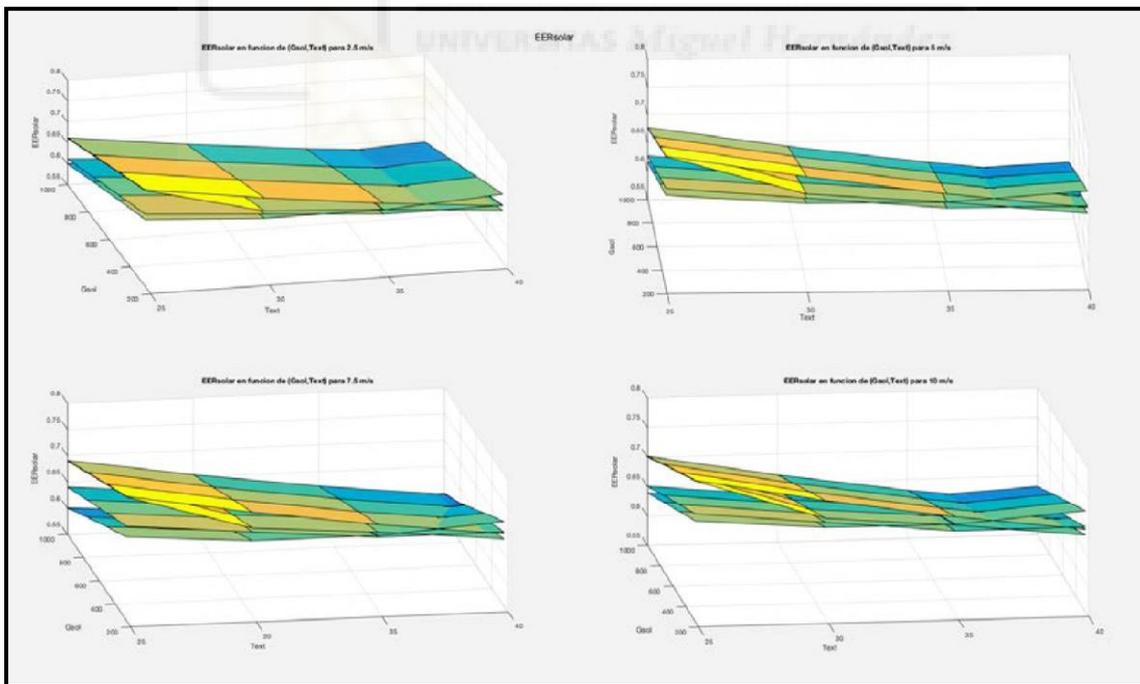


Imagen 3.15: Influencia en  $EER_{solar}$

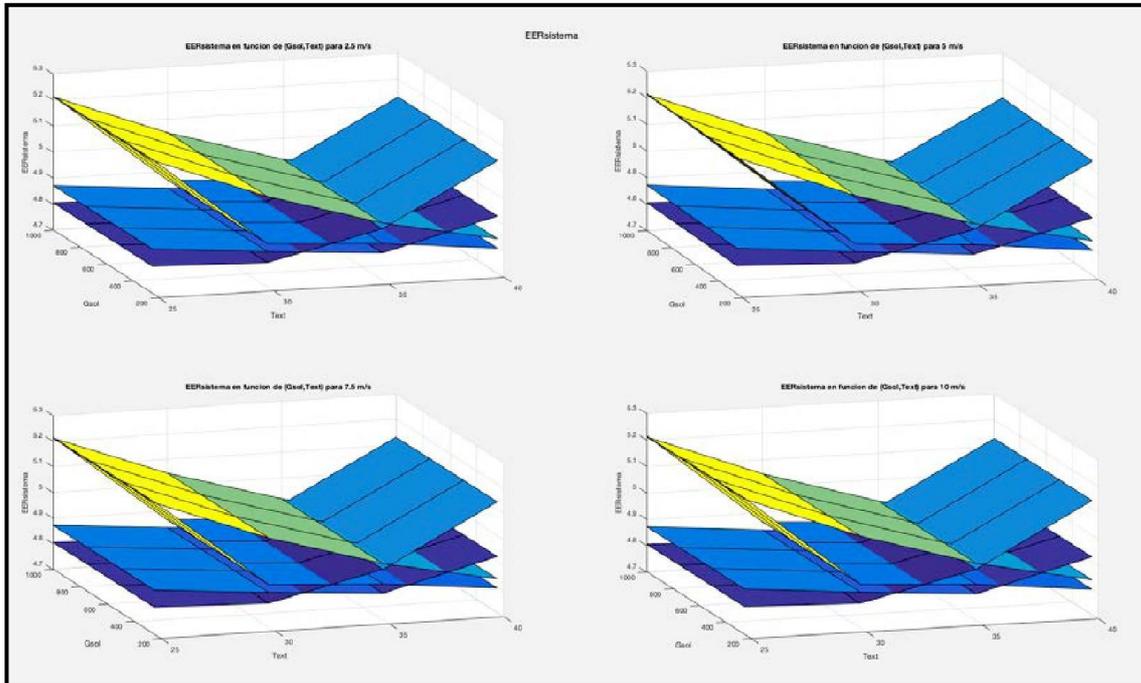
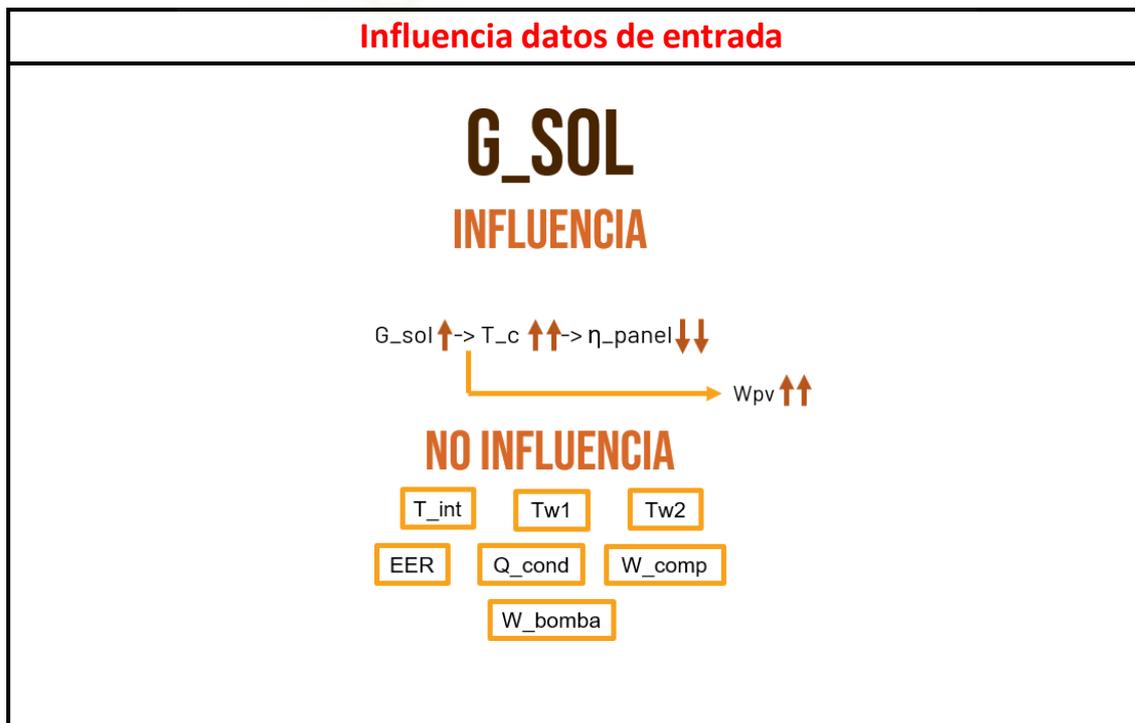


Imagen 3.16: Influencia en  $EER_{sistema}$

Con todo lo mostrado, damos por finalizado la muestra de resultados. Además, se han creado unos diagramas de los datos de entrada (Tabla 3.23), para mostrar como influyen en cada uno de los parámetros del modelo, a excepción del  $EER_{solar-sistema}$  al obtenerse del resto de parámetros. Recordar que  $\dot{W}_i$  solo depende del caudal de agua impulsado por la bomba hidráulica.

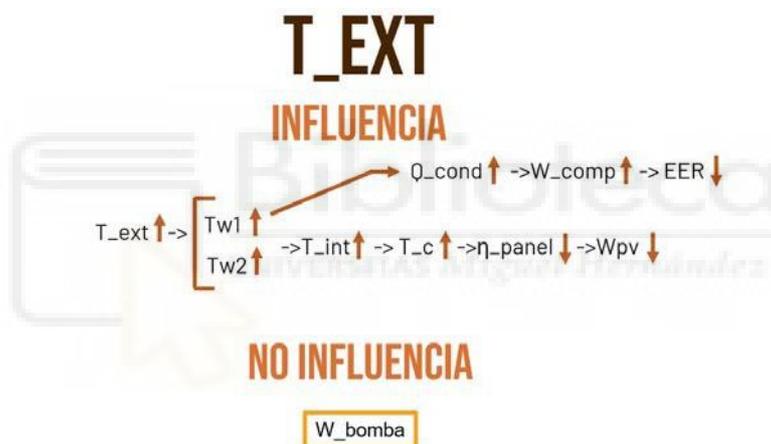


$$W_{pv} = W_c$$

-La radiación solar no afecta a una gran cantidad de variables de la modelización, puesto que el acoplamiento del enfriamiento evaporativo con la enfriadora no está influenciado por este parámetro.

-Los dos modelos mencionados dependen de  $T_{ext}$ ,  $T_{wb}$ ,  $\dot{m}_j$ ,  $\dot{m}_-$ ; donde  $T_{wb}$  se ha obtenido mediante  $T_{ext}$  y  $HR_{ext}$ , y  $\dot{m}_j$  depende únicamente de  $\dot{m}_-$ .

-La radiación solar influye directamente en el análisis térmico y eléctrico del panel, por lo tanto, su incremento o disminución producirá un aumento o reducción de  $T_c$ . Como  $\eta_c$  depende únicamente de  $T_c$ , es obvio que  $G_{sol}$  influya directamente en este parámetro, y como a mayor  $T_c$  menor es el rendimiento, entonces al aumentar  $G_{sol}$  se reducirá  $\eta_c$ . Para finalizar,  $\dot{W}_c$  depende de  $\eta_c$  y  $G_{sol}$ , así que también es influenciado directamente por este dato de entrada; en este caso, el rendimiento disminuye más lento comparado con el aumento de la radiación, conllevando a un aumento de la potencia.



-Observando la explicación de la influencia de  $G_{sol}$ , podemos ya entender como afectará  $T_{ext}$  a los resultados del modelo.

-El cálculo matemático del conjunto chimenea y enfriadora dependerá, como hemos dicho antes, de  $T_{ext}$ ,  $T_{wb}$ ,  $\dot{m}_j$ ,  $\dot{m}_-$ . Como con ese cálculo obtenemos la pareja de valores  $T_{w1-2}$ , es obvio que  $T_{ext}$  influya en estas temperaturas, incrementándolas cuando aumentamos este dato; además son utilizadas para obtener  $T_{int}$ , que como  $T_{w1-2}$  aumenta, entonces el intercambio de calor se reduce, y esto lleva a un aumento de  $T_{int}$ . Como  $Q_{CKST}$  la hemos expresado en función de  $\Delta T_-$ , y como el  $\dot{W}_{CKXW}$  depende de la potencia en el condensador, y el EER de la potencia del compresor, se entiende que  $T_{ext}$  influya en todos estos. En este caso,  $T_{w1}$  aumenta con mayor rapidez que  $T_{w2}$ , que conlleva a un crecimiento de  $\Delta T_-$ , y por lo tanto a un aumento de todos los parámetros de la enfriadora.

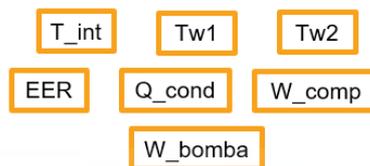
-Como hemos dicho,  $T_{int}$  depende de  $T_{ext}$ , y esta temperatura interior es utilizada para completar el análisis térmico y eléctrico del panel. Debido al aumento de  $T_{int}$ , el flujo de calor disminuye en el panel, y conlleva a un aumento de  $T_c$ ; como  $T_c$  se obtiene de éste, entonces  $T_{ext}$  influye también a  $\eta_c$  y  $\dot{W}_c$ .

## V\_v INFLUENCIA

$v_v \uparrow \rightarrow h_{ext} \uparrow \rightarrow T_c \downarrow \rightarrow \eta_{panel} \uparrow \rightarrow W_{pv} \uparrow$

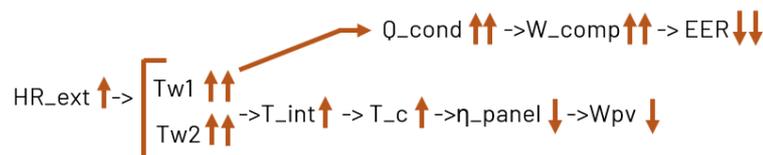
$h_{ext}$ : coeficiente de convección externa.

## NO INFLUENCIA



-Como se ha podido ver,  $v_v$  no influye en la modelización de la chimenea y enfriadora. Influirá solo en el análisis térmico y eléctrico del panel mediante el coeficiente de convección externa, al obtenerse mediante esta velocidad gracias a la expresión de García (2015), que como hemos visto anteriormente, el coeficiente aumenta a medida que crece esta velocidad; cuanto mayor es la convección, mayor será el flujo de calor, y por lo tanto menor será  $T_c$ . Al afectar a  $T_c$ , también afectará a  $\eta_c$  y  $\dot{W}_c$ .

## HR\_EXT INFLUENCIA



## NO INFLUENCIA

$W_{bomba}$

-La humedad relativa del aire a la entrada de la chimenea afectará a  $T_{wb}$ , aumentando su valor; esta temperatura se utiliza para obtener  $T_{int}$ , que es necesaria para el análisis del panel. Por lo tanto, al igual que  $T_{ext}$ , influye en el modelo de la chimenea y enfriadora, al igual que en el del panel solar fotovoltaico.

Tabla 3.23: Diagramas de influencia

Ya con los diagramas presentados, y ya sabiendo como influye cada dato de entrada en la modelización, nos disponemos a finalizar el análisis mostrando la influencia en porcentaje que generan estos datos en los parámetros de salida del modelo.

Al tener tal cantidad de resultados, este último apartado podría ser interminable si no acordamos una manera de proceder. Se mostrarán las diferencias, en porcentaje, de cada uno de los resultados del modelo para los valores extremos de cada dato de entrada. Para la temperatura y radiación, utilizaremos los resultados con humedad relativa del 25% y velocidad del viento de 2,5 m/s; calcularemos la diferencia entre el valor del resultado del modelo a 25 °C, y a 40 °C en el caso de la temperatura; para la radiación realizaremos lo mismo para una radiación de 250 W/m<sup>2</sup> y 1000 W/m<sup>2</sup>. Todo esto se repite para una humedad del 100% con la misma velocidad del viento, y así ver cómo afecta el incremento de humedad en los resultados. Para la velocidad del viento, compararemos las diferencias por temperatura y radiación para una humedad del 25%, y una velocidad del viento de 2,5 m/s y 10 m/s.

Las diferencias que se van a mostrar a continuación son en valor absoluto; la información necesaria, para saber si el dato de entrada hace que aumente o disminuya el resultado en cada caso, se puede encontrar en los diagramas de influencia ubicados en la Tabla 3.23. En esta última parte, solo nos queremos centrar en la magnitud de la influencia de cada dato de entrada, mediante información numérica (Tabla 3.24).

### Análisis resultados análisis de influencia

$\eta_c$

ESTUDIO DE INFLUENCIA EN PORCENTAJES			
VIENTO 2,5 m/s		VIENTO 10 m/s	
HUMEDAD 25%		HUMEDAD 25%	
	RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)		RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)
25°C	15,24790657	25°C	11,25240112
40°C	16,33157732	40°C	12,08825414
	TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)		TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)
250 W/m <sup>2</sup>	5,697603077	250 W/m <sup>2</sup>	5,928254921
1000 W/m <sup>2</sup>	6,903387439	1000 W/m <sup>2</sup>	6,814252439
	HUMEDAD 100%		
	RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)		
25°C	15,48916559		
40°C	16,72839043		
	TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)		
250 W/m <sup>2</sup>	6,382302796		
1000 W/m <sup>2</sup>	7,755066145		

-Como se puede ver por los resultados, el rendimiento se ve afectado en mayor medida por la radiación que por la temperatura, no solo por ser mayor la diferencia en valores por el cambio de radiación, sino además porque la diferencia por temperatura se eleva en mayor medida, comparándola con la radiación, al pasar de los 250 W/m<sup>2</sup> a los 1000 W/m<sup>2</sup>.

-El aumento de la humedad relativa no conlleva a un cambio drástico del rendimiento, a diferencia de la velocidad, que influye en mayor medida en el resultado del modelo.

$W_c$

ESTUDIO DE INFLUENCIA EN PORCENTAJES			
VIENTO 2,5 m/s		VIENTO 10 m/s	
HUMEDAD 25%		HUMEDAD 25%	
	RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)		RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)
25°C	239,0083737	25°C	254,9903955
40°C	234,6736907	40°C	251,6469834
	TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)		TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)
250 W/m <sup>2</sup>	5,697603077	250 W/m <sup>2</sup>	5,928254921
1000 W/m <sup>2</sup>	6,903387439	1000 W/m <sup>2</sup>	6,814252439
	HUMEDAD 100%		
	RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)		
25°C	238,0433376		
40°C	233,0864383		
	TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)		
250 W/m <sup>2</sup>	6,382302796		
1000 W/m <sup>2</sup>	7,755066145		

-Al igual que el rendimiento del panel, la potencia generada por el panel estará altamente ligada a la radiación incidente, y casi nada a la temperatura exterior.

-La velocidad del viento influye en menor medida que en el caso del rendimiento del panel, y la humedad relativa aumenta su influencia, aunque no demasiado, en la potencia del panel.

$T_c$

ESTUDIO DE INFLUENCIA EN PORCENTAJES			
VIENTO 2,5 m/s		VIENTO 10 m/s	
HUMEDAD 25%		HUMEDAD 25%	
RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)		RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)	
25°C	93,68219934	25°C	75,37978252
40°C	70,08830237	40°C	54,52485821
TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)		TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)	
250 W/m <sup>2</sup>	35,00572257	250 W/m <sup>2</sup>	39,71335202
1000 W/m <sup>2</sup>	18,55965205	1000 W/m <sup>2</sup>	23,09962756
HUMEDAD 100%		HUMEDAD 100%	
RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)		RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)	
25°C	86,82150952	25°C	86,82150952
40°C	64,65355059	40°C	64,65355059
TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)		TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)	
250 W/m <sup>2</sup>	35,7747588	250 W/m <sup>2</sup>	35,7747588
1000 W/m <sup>2</sup>	19,66393042	1000 W/m <sup>2</sup>	19,66393042

-La temperatura de la célula, a diferencia de los dos parámetros anteriores, está afectada en gran medida tanto por la temperatura exterior como por la radiación incidente. Se puede observar en las diferencias de cada uno, como en el cambio de sus valores al pasar a 40 °C, o a 1000 W/m<sup>2</sup>.

-La humedad relativa no afecta tanto como el resto de los datos de entrada. La velocidad del viento tiene una gran influencia para las diferencias en radiación, pero esta influencia disminuye en gran medida en el caso de las temperaturas.

$T_{int}$

ESTUDIO DE INFLUENCIA EN PORCENTAJES			
VIENTO 2,5 m/s		VIENTO 10 m/s	
HUMEDAD 25%		HUMEDAD 25%	
RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)		RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)	
25°C	0	25°C	0
40°C	0	40°C	0
TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)		TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)	
250 W/m <sup>2</sup>	43,65169047	250 W/m <sup>2</sup>	43,65169047
1000 W/m <sup>2</sup>	43,65169047	1000 W/m <sup>2</sup>	43,65169047
HUMEDAD 100%		HUMEDAD 100%	
RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)		RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)	
25°C	1,42109E-14	25°C	1,42109E-14
40°C	0	40°C	0
TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)		TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)	
250 W/m <sup>2</sup>	43,89241817	250 W/m <sup>2</sup>	43,89241817
1000 W/m <sup>2</sup>	43,89241817	1000 W/m <sup>2</sup>	43,89241817

-La temperatura interior no se verá afectada por la radiación solar incidente, ni por la velocidad del viento exterior. Estará afectada, y en gran medida, por la temperatura exterior, además de por la humedad relativa del aire.

**Tw<sub>1</sub>**

ESTUDIO DE INFLUENCIA EN PORCENTAJES			
VIENTO 2,5 m/s		VIENTO 10 m/s	
HUMEDAD 25%		HUMEDAD 25%	
RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)		RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)	
25°C	1,42109E-14	25°C	1,42109E-14
40°C	0	40°C	0
TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)		TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)	
250 W/m <sup>2</sup>	26,91311603	250 W/m <sup>2</sup>	26,91311603
1000 W/m <sup>2</sup>	26,91311603	1000 W/m <sup>2</sup>	26,91311603
HUMEDAD 100%		HUMEDAD 100%	
RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)		RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)	
25°C	0	25°C	0
40°C	1,42109E-14	40°C	1,42109E-14
TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)		TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)	
250 W/m <sup>2</sup>	33,95688342	250 W/m <sup>2</sup>	33,95688342
1000 W/m <sup>2</sup>	33,95688342	1000 W/m <sup>2</sup>	33,95688342

-La temperatura del agua rociada a la chimenea solar no se verá afectada por la radiación solar incidente, ni por la velocidad del viento exterior. Estará afectada, y en gran medida, por la temperatura exterior, aunque no tanto como en el caso de  $T_{int}$ , además de por la humedad relativa del aire, y con mayor influencia comparado con  $T_{int}$ .

**Tw<sub>2</sub>**

ESTUDIO DE INFLUENCIA EN PORCENTAJES			
VIENTO 2,5 m/s		VIENTO 10 m/s	
HUMEDAD 25%		HUMEDAD 25%	
RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)		RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)	
25°C	1,42109E-14	25°C	1,42109E-14
40°C	0	40°C	0
TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)		TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)	
250 W/m <sup>2</sup>	30,91274931	250 W/m <sup>2</sup>	30,91274931
1000 W/m <sup>2</sup>	30,91274931	1000 W/m <sup>2</sup>	30,91274931
HUMEDAD 100%		HUMEDAD 100%	
RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)		RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)	
25°C	0	25°C	0
40°C	0	40°C	0
TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)		TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)	
250 W/m <sup>2</sup>	38,03704148	250 W/m <sup>2</sup>	38,03704148
1000 W/m <sup>2</sup>	38,03704148	1000 W/m <sup>2</sup>	38,03704148

-La temperatura del agua rociada a la salida de la chimenea solar no se verá afectada por la radiación solar incidente, ni por la velocidad del viento exterior. Estará afectada, y en gran medida, por la temperatura exterior, aunque no tanto como en el caso de  $T_{int}$  pero más que  $Tw_1$ . También influye otra vez la humedad relativa, influyendo de manera muy parecida a como lo ha hecho con  $Tw_1$ .

EER

ESTUDIO DE INFLUENCIA EN PORCENTAJES			
VIENTO 2,5 m/s		VIENTO 10 m/s	
HUMEDAD 25%		HUMEDAD 25%	
RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)		RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)	
25°C	1,42109E-14	25°C	1,42109E-14
40°C	0	40°C	0
TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)		TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)	
250 W/m <sup>2</sup>	7,631478188	250 W/m <sup>2</sup>	7,631478188
1000 W/m <sup>2</sup>	7,631478188	1000 W/m <sup>2</sup>	7,631478188
HUMEDAD 100%		HUMEDAD 100%	
RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)		RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)	
25°C	0	25°C	0
40°C	0	40°C	0
TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)		TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)	
250 W/m <sup>2</sup>	7,089278375	250 W/m <sup>2</sup>	7,089278375
1000 W/m <sup>2</sup>	7,089278375	1000 W/m <sup>2</sup>	7,089278375

-Como el EER de la enfriadora depende de  $T_{w1}$  y  $T_{w2}$  sobre todo, es razonable suponer que la influencia será la misma que para estas temperaturas.

-El EER de la enfriadora no se verá afectada por la radiación solar incidente, ni por la velocidad del viento exterior. Estará afectada por la temperatura exterior, y la humedad relativa del aire.

$Q_{cond}$

ESTUDIO DE INFLUENCIA EN PORCENTAJES			
VIENTO 2,5 m/s		VIENTO 10 m/s	
HUMEDAD 25%		HUMEDAD 25%	
RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)		RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)	
25°C	0	25°C	0
40°C	0	40°C	0
TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)		TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)	
250 W/m <sup>2</sup>	1,277860696	250 W/m <sup>2</sup>	1,277860696
1000 W/m <sup>2</sup>	1,277860696	1000 W/m <sup>2</sup>	1,277860696
HUMEDAD 100%		HUMEDAD 100%	
RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)		RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)	
25°C	0	25°C	0
40°C	0	40°C	0
TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)		TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)	
250 W/m <sup>2</sup>	1,099559468	250 W/m <sup>2</sup>	1,099559468
1000 W/m <sup>2</sup>	1,099559468	1000 W/m <sup>2</sup>	1,099559468

-La potencia en el condensador no se verá afectada por la radiación solar incidente, ni por la velocidad del viento exterior. Estará afectada por la temperatura exterior, y la humedad relativa del aire, aunque mucho menos al compararlo con el EER.

$W_{comp}$

ESTUDIO DE INFLUENCIA EN PORCENTAJES

VIENTO 2,5 m/s		VIENTO 10 m/s	
HUMEDAD 25%		HUMEDAD 25%	
RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)		RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)	
25°C	1,42109E-14	25°C	1,42109E-14
40°C	0	40°C	0
TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)		TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)	
250 W/m <sup>2</sup>	8,261990165	250 W/m <sup>2</sup>	8,261990165
1000 W/m <sup>2</sup>	8,261990165	1000 W/m <sup>2</sup>	8,261990165
HUMEDAD 100%		HUMEDAD 100%	
RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)		RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)	
25°C	1,42109E-14	25°C	1,42109E-14
40°C	1,42109E-14	40°C	1,42109E-14
TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)		TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)	
250 W/m <sup>2</sup>	6,619970255	250 W/m <sup>2</sup>	6,619970255
1000 W/m <sup>2</sup>	6,619970255	1000 W/m <sup>2</sup>	6,619970255

-La potencia del compresor no se verá afectada por la radiación solar incidente, ni por la velocidad del viento exterior. Estará afectada por la temperatura exterior, y la humedad relativa del aire, y en magnitud muy similar al EER.

$W_{bomba}$

ESTUDIO DE INFLUENCIA EN PORCENTAJES

VIENTO 2,5 m/s		VIENTO 10 m/s	
HUMEDAD 25%		HUMEDAD 25%	
RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)		RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)	
25°C	0	25°C	0
40°C	0	40°C	0
TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)		TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)	
250 W/m <sup>2</sup>	0	250 W/m <sup>2</sup>	0
1000 W/m <sup>2</sup>	0	1000 W/m <sup>2</sup>	0
HUMEDAD 100%		HUMEDAD 100%	
RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)		RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)	
25°C	0	25°C	0
40°C	0	40°C	0
TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)		TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)	
250 W/m <sup>2</sup>	0	250 W/m <sup>2</sup>	0
1000 W/m <sup>2</sup>	0	1000 W/m <sup>2</sup>	0

-Como hemos explicado anteriormente, al mantener constante el caudal de agua rociada, no habrá variaciones en el consumo de la bomba hidráulica.

**EER<sub>solar</sub>**

ESTUDIO DE INFLUENCIA EN PORCENTAJES			
VIENTO 2,5 m/s		VIENTO 10 m/s	
HUMEDAD 25%		HUMEDAD 25%	
RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)		RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)	
25°C	15,24790657	25°C	11,25240112
40°C	16,33157732	40°C	12,08825414
TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)		TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)	
250 W/m <sup>2</sup>	12,58469566	250 W/m <sup>2</sup>	12,79850254
1000 W/m <sup>2</sup>	13,70241918	1000 W/m <sup>2</sup>	13,61979389
HUMEDAD 100%		HUMEDAD 100%	
RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)		RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)	
25°C	15,48916559		
40°C	16,72839043		
TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)		TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)	
250 W/m <sup>2</sup>	0,048682026		
1000 W/m <sup>2</sup>	1,514318439		

-Al depender el EER<sub>solar</sub> del rendimiento del panel solar fotovoltaico, y como este parámetro es influido por todos los datos de entrada, es de esperar que para este parámetro ocurra lo mismo.

-La radiación afecta de manera muy similar a la temperatura exterior. En el caso de la humedad relativa, el efecto de la temperatura disminuye en casi su totalidad, mientras que en la radiación aumenta ligeramente. La velocidad del viento afecta más para el caso de la radiación que para la temperatura exterior del aire.

**EER<sub>sistema</sub>**

ESTUDIO DE INFLUENCIA EN PORCENTAJES			
VIENTO 2,5 m/s		VIENTO 10 m/s	
HUMEDAD 25%		HUMEDAD 25%	
RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)		RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)	
25°C	15,24790657	25°C	11,25240112
40°C	16,33157732	40°C	12,08825414
TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)		TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)	
250 W/m <sup>2</sup>	12,58469566	250 W/m <sup>2</sup>	12,79850254
1000 W/m <sup>2</sup>	13,70241918	1000 W/m <sup>2</sup>	13,61979389
HUMEDAD 100%		HUMEDAD 100%	
RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)		RADIACIÓN (1000 W/m <sup>2</sup> -250 W/m <sup>2</sup> ) (%)	
25°C	15,48916559		
40°C	16,72839043		
TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)		TEMPERATURA (40°C-25°C) (%)	
250 W/m <sup>2</sup>	0,048682026		
1000 W/m <sup>2</sup>	1,514318439		

-El EER<sub>sistema</sub> está afectado en mayor medida por la radiación que por la temperatura exterior. En el caso de la humedad relativa, el efecto de la temperatura disminuye en casi su totalidad, mientras que en la radiación aumenta ligeramente. La velocidad del viento afecta más para el caso de la radiación que para la temperatura exterior del aire.

Tabla 3.24: Análisis de resultados de influencia

### 3.9. CONCLUSIONES

Antes de proceder con el capítulo de conclusiones de la totalidad del proyecto, vamos a introducir unas conclusiones propias de los resultados de nuestra modelización:

- El análisis térmico y eléctrico del panel solar fotovoltaico, sin considerar la teoría de óptica y radiación atmosférica, proporciona el error mínimo del rendimiento respecto a los datos experimentales.
- La expresión del rendimiento del panel, que desprecia la radiación solar incidente, modeliza de mejor manera el comportamiento real de los paneles, con un error del 3,046% respecto a los datos experimentales de Díez (2015).
- La validación del modelo de la chimenea solar fotovoltaica evaporativa sin acoplar la enfriadora ha generado unos errores muy reducidos, comparando los resultados con el ensayo de Díez (2015). Un error para  $T_{w1}$  del 0,6148%, 0,7348% para  $T_{w2}$ , y para  $T_{int}$  un error del 1,27%.
- La expresión bicuadrática del EER, por 'Curve Fitting', genera el error más bajo de entre todos, con un valor del 1,001%.
- Se ha comprobado que las expresiones de la modelización de la bomba hidráulica están ajustadas a la curva característica que encontramos en Gómez (2018). Un error de la expresión de la curva de la instalación del 0,9489%, un 0,882% para la altura manométrica de la bomba, y un 0% para su curva del rendimiento.
- Se ha concluido que la instalación dispone de un punto de funcionamiento óptimo. Para un día muy caluroso y un día medio de verano, el funcionamiento óptimo se obtendrá para un caudal impulsado de 1,1 m<sup>3</sup>/h. Para un día normal de verano, el funcionamiento óptimo estará en un caudal de 1,15 m<sup>3</sup>/h.
- Se ha incluido un estudio de influencia profundo de las variables de entrada al sistema ( $G_{sol}$ ,  $T_{ext}$ ,  $v_v$ ,  $HR_{ext}$ ), sobre todos los parámetros de salida de la modelización.



## CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES

En el presente proyecto se ha llevado a cabo la modelización completa de la instalación del sistema de refrigeración solar basado en chimenea solar fotovoltaica evaporativa, a excepción del lazo frío al ser dependiente del tipo de instalación en el que nos encontremos.

Se ha aprovechado el ensayo realizado de Díez (2015), donde se midieron todos los parámetros de esta instalación a excepción de la bomba de calor. Con estos datos se ha podido validar la totalidad de la modelización del subsistema del panel solar fotovoltaico, y la chimenea solar fotovoltaica evaporativa. Para la modelización de la enfriadora y la bomba hidráulica del circuito de calor, solo se ha podido validar las expresiones del EER de la enfriadora, y la del rendimiento y altura manométrica de la bomba hidráulica, al igual que la expresión de la curva hidráulica de la instalación; no tiene sentido intentar validar el modelo completo para un ensayo diferente al utilizado en la modelización de los dos primeros subsistemas. Como los últimos dos subsistemas se introducen en la modelización mediante estas expresiones validadas, no es incorrecto concluir que la totalidad del modelo es válido.

Respecto a la caracterización de la instalación, se han seguido diferentes métodos de estudio de los subsistemas, y se han llegado a las siguientes conclusiones:

- El comportamiento de los paneles solares fotovoltaicos se verá mejor reflejado en la modelización, mediante un rendimiento que no contenga la expresión de la radiación solar incidente, y solo considere la temperatura de la célula solar como variable.
- El análisis térmico del panel solar generará un menor error si no tenemos en cuenta el intercambio de radiación entre la atmósfera y la capa frontal de vidrio, y fijando la transmitancia de esta capa a la radiación solar incidente, sin tener en cuenta variaciones por el transcurso del día y los efectos de la óptica.
- El código que modeliza el subsistema de la chimenea solar, donde se incluye el enfriamiento evaporativo que toma lugar en la parte anterior del panel, podrá generar fallos al generar resultados matemáticos y no físicos.
- El subsistema de la enfriadora se verá mejor simulado mediante la expresión bicuadrática del EER, con los coeficientes obtenidos mediante la aplicación 'Curve Fitting'.
- Se ha aprovechado la curva de altura manométrica generada en el programa 'Epanet', después de ensayar en el programa para diferentes caudales de impulsión; la curva del rendimiento se ha obtenido considerando un rendimiento máximo de la bomba genérico del 85%.

- Se ha llegado a generar una interfaz gráfica con la totalidad de la instalación, a excepción del circuito de frío. Además, se ha tenido en cuenta los dos parámetros del modelo que se suponen, que son los valores iniciales de  $T_{w1-2}$  para la resolución del sistema de ecuaciones del enfriamiento evaporativo y enfriadora, y el rendimiento máximo de la bomba hidráulica. De esta manera, se da la posibilidad de poder ensayar la instalación para un rendimiento máximo diferente de la bomba hidráulica, y además si la modelización genera una solución matemática en vez de una solución física, es posible cambiar los valores iniciales del sistema de ecuaciones para obtener la solución física.
- Gracias al estudio de optimización, se ha llegado a la conclusión que la instalación dispondrá de punto de funcionamiento óptimo sin importar las condiciones ambientales.
- Para terminar con el proyecto, se ha obtenido de manera completa la influencia que supone cada uno de los datos de entrada al modelo, a excepción de la potencia frigorífica de la enfriadora al siempre estar trabajando a carga máxima, en los resultados del modelo.



## CAPÍTULO 5. BIBLIOGRAFÍA

[1] Ruiz J., Martínez P., Sadafi H., Aguilar F.J., Toledo F.J., Blanes J.M., Lucas M., 'Analytical optimization of a solar-driven cooling system enhanced with a photovoltaic evaporative chimney', Miguel Hernandez University of Elche (Spain), 2019.

[2] Ruiz J., 'Applied thermal energy systems; cooling systems', Miguel Hernandez University of Elche (Spain).

[3] E. Skoplaki, J.A. Palyvos, 'On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations', National Technical University of Athens, 2008.

[4] Yunus A. Çengel, Michael A. Boles, 'Termodinámica, Apéndice 1, Tablas y propiedades, figuras y diagramas (Unidades SI)'.

[5] Instituto para la diversificación y ahorro en energía (IDAE), 'CALENER-GT: Grandes edificios terciarios. Manual de curvas', 2009.

[6] Francisco Javier Aguilar Valero, 'Análisis del efecto de la temperatura en las condiciones de funcionamiento de los paneles solares fotovoltaicos', proyecto fin de carrera, universidad Miguel Hernández de elche, escuela politécnica superior de Elche, ingeniería industrial, 2008.

[7] Javier Molina González, Javier Ruiz Ramírez, 'Apuntes de la asignatura calor y frío industrial', universidad Miguel Hernández de Elche.

[8] Jesús Maldonado García, Damián Crespí Llorens, 'Apuntes de la asignatura transmisión de calor', universidad Miguel Hernández de Eche.

[9] Pedro Juan Martínez Beltrán, 'Apuntes de la asignatura de eficiencia energética y energías renovables', universidad Miguel Hernández de Elche.

[10] Samuel Rodríguez Galipienso, 'Diseño y construcción de un prototipo de chimenea fotovoltaica evaporativa', trabajo de fin de grado, 2015.

[11] Juan Francisco Bernal Vidal, 'Estudio experimental del comportamiento térmico de un prototipo de chimenea fotovoltaica evaporativa para el accionamiento y disipación de calor simultánea de un sistema de climatización', trabajo de fin de grado, 2015.

[12] Hugo Garcés Gómez, 'Diseño y construcción de instalación de ensayos eléctricos de una chimenea fotovoltaica', trabajo de fin de grado, 2015.

[13] Pablo Díez Sánchez, 'Estudio sistemático del comportamiento térmico de un prototipo de chimenea fotovoltaica evaporativa para el accionamiento y disipación de calor simultánea de un sistema de climatización', trabajo de fin de grado, 2015.

[14] Víctor García García, 'Modelización del comportamiento térmico de un prototipo de chimenea fotovoltaica evaporativa', trabajo de fin de grado, 2015.

[15] Jaime Navas Martínez, 'Estudio numérico de un prototipo de chimenea fotovoltaica evaporativa para el accionamiento y disipación de calor simultánea de un sistema de climatización', trabajo de fin de grado, 2016.

[16] Eduardo Gálvez Garrido, 'Caracterización experimental de un prototipo de chimenea fotovoltaica evaporativa', trabajo de fin de grado, 2016.

[17] Fernando Martínez Sevilla, 'Estudio experimental de una chimenea fotovoltaica evaporativa adaptada para su refrigeración mediante deslizamiento de agua', trabajo de fin de grado, 2016.

[18] Óscar Parreño Agulló, 'Análisis experimental del comportamiento del sistema de deslizamiento de agua sobre una chimenea fotovoltaica evaporativa', trabajo de fin de grado, 2017.

[19] Francisco de Asís Almendro Sánchez, 'Modelización del comportamiento térmico de un prototipo de chimenea fotovoltaica evaporativa con deslizamiento de agua', trabajo de fin de grado, 2017.

[20] Pablo Sola-Vera Gómez, 'Diseño y construcción de un prototipo de climatización solar basado en enfriadora de agua y chimenea fotovoltaica evaporativa', trabajo de fin de grado, 2018.

[21] Alexandre Baeza Moreno, 'Sensorización y estudio instantáneo de una prueba de concepto de instalación de climatización basado en chimenea fotovoltaica evaporativa', trabajo de fin de grado, 2018.

[22] Gonzalo Francisco Villalgordo Cordero, 'Estudio energético de prueba de concepto basado en enfriadora más chimenea fotovoltaica evaporativa', trabajo de fin de grado, 2018.

[23] Patricia Ortega Antón, 'Rediseño, puesta a punto y caracterización experimental de un sistema de refrigeración solar con chimenea fotovoltaica evaporativa', trabajo de fin de grado, 2019.

[24] Aarón Boix Agulló, 'Caracterización experimental de un sistema de refrigeración solar con chimenea fotovoltaica evaporativa. Estudio instantáneo', trabajo de fin de grado, 2019.

[25] Jose Coves Díez, 'Caracterización experimental de un sistema de refrigeración solar con chimenea fotovoltaica evaporativa. Estudio energético', trabajo de fin de grado, 2019.

[26] Daniel Mugnier, Roberto Fedrizzi, Richard Thygesen, Tim Selke, 'New generation solar cooling and heating systems with IEA SHC', International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, 2014.

[27] Ursula Eicker, Antonio Colmenar-Santos, Mariela Cotrado Sehgelmeble, 'Economic evaluation of solar thermal and photovoltaic cooling systems through simulation in different climatic conditions: An analysis in three different cities in Europe', 2014.

[28] Pascal Henry Biwole, Dominic Groulx, 'Solar PV Passive Temperature Control Using Phase Change Materials', 15th International Heat Transfer Conference, 2013.

[29] Saad Odeh, Masud Behnia, 'Improving Photovoltaic Module Efficiency Using Water Cooling', 2009.

[30] H.G. Teo, P.S. Lee, M.N.A. Hawlader, 'An active cooling system for photovoltaic modules', 2012.

[31] H. Bahaidarah, Abdul Subhan, P. Gandhidasan and S. Rehman, 'Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions', 2013.

[32] Bernhard Kaiser, Wolfram Jaegermann, Félix Urbain, Jan-Philipp Becker, Vladimir Smirnov, Friedhelm Finger, 'Photoelectrochemical and Photovoltaic Characteristics of Amorphous-Silicon-Based Tandem Cells as Photocathodes for Water Splitting', 2014.

[33] Yanping Wang, Fadong Yan, Pilho Huh, Lian Li, Lynne A. Samuelson, Jayant Kumar, 'Photovoltaic Performance Enhancement in Dye-Sensitized Solar Cells with Periodic Surface Relief Structures', 2009.

[34] Huan Liu, Jiang Tang, Kyle W Kemp, Sjoerd Hoogland, Kwang S Jeong, Larissa Levina, Melissa Furukawa, Xihua Wang, Ratan Debnath, Dongkyu Cha, Kang Wei Chou, Armin Fischer, Aram Amassian, John B Asbury, Edward H Sargent, 'Colloidal-quantum-dot photovoltaics using atomic-ligand passivation', 2011.

[35] Giuseppe Marco Tina, Raniero Cazzaniga, Marco Rosa-Clot, Paolo Rosa-Clot, 'Floating tracking cooling concentrating (FTCC) systems', 2012.

[36] S.S.Chandel, Tanya Agarwal, 'Review of cooling techniques using phase change materials for enhancing efficiency of photovoltaic power systems', 2017.

## ANEXOS

### ANEXO I. CÓGIDO MATLAB MODELIZACIÓN FINAL

-En el programa 'Matlab', si introducimos una tilde en algún comentario del código, el programa no podrá interpretarla e introducirá un símbolo de interrogación en la letra con tilde. Con este comentario, justificamos la ausencia de tildes en todos los códigos que se van a mostrar a continuación.

-Para homogenizar la simbología del trabajo, los signos de multiplicación en la programación están representados mediante un punto; en el programa se ha de utilizar el asterisco para que el código no genere un error.

#### ·PSYCRHOMETRICSNEW:

-Código de 'Matlab' para obtener las propiedades psicrométricas del aire en la chimenea solar fotovoltaica evaporativa.

```
% VARIABLES
% Tdb (dry bulb temperature) and Tdp(dew point temperature) in C
% w (humidity ratio) in kg/kg of dry air
% phi (relative humidity) in %
% h (enthalpy) in J/kg of dry air
% v (specific volume) in m3/kg of dry air
% Twb (wet bulb temperature) in C
% P (atmospheric pressure) in kPa

% The following cases are present:
% Tdb, w; Tdb, phi; Tdb, h; w, phi; w, h; phi, h; Tdb, Twb; w, Twb; phi, Twb;

% Following ASHRAE 2013 Fundamentals SI Psychrometrics chapter equations are used:
% Eq6:Pws=f(Tdb); Eq22: w=f(Tdb, phi, p); Eq24: phi=f(Tdb, w, p); Eq28:v=f(Tdb, w and p);
Eq32:h=f(Tdb, w and p);
% Eq35:Twb=f(Tdb,w); Eq39:Tdp=f(Tdb, p);
function [Tdb, w, phi, h, Tdp, v, Twb] = Psychrometricsnew (varargin)

if length(varargin)<4
    display('Need four inputs:"prop1",value1,"prop2",value2"');
    Tdb=[];w=[];phi=[];h=[];Tdp=[];v=[];Twb=[];
    return
elseif length(varargin)>4 && length(varargin)<6
    display('Need six inputs:"prop1",value1,"prop2",value2",,"Pamb",value in kPa"');
    Tdb=[];w=[];phi=[];h=[];Tdp=[];v=[];Twb=[];
    return
elseif length(varargin)==4
    Tdb_in=[];w_in=[];phi_in=[];h_in=[];Twb_in=[];
    prop(1) = {lower(char(varargin(1)))};
    prop(2) = {lower(char(varargin(3)))};
    propVal(1) = cell2mat(varargin(2));
    propVal(2) = cell2mat(varargin(4));
```

```

P = 101.325; %kPa, atmospheric pressure value
% P =101.71227;
% P =100;
elseif length(varargin)==6
Tdb_in=[];w_in=[];phi_in=[];h_in=[];Twb_in=[];
prop(1) = {lower(char(varargin(1)))};
prop(2) = {lower(char(varargin(3)))};
propVal(1) = cell2mat(varargin(2));
propVal(2) = cell2mat(varargin(4));
P = cell2mat(varargin(6));
end

for i=1:2
switch prop{i}
case 'tdb'
    Tdb_in=propVal(i);
case 'w'
    w_in=propVal(i);
case 'phi'
    phi_in=propVal(i);
case 'h'
    h_in=propVal(i);
case 'twb'
    Twb_in=propVal(i);
end
end
if (~isempty(Twb_in) && ~isempty(h_in))
    display('function not available');
    Tdb=[];w=[];phi=[];h=[];Tdp=[];v=[];Twb=[];
    return
end
c_air = 1006; %J/kg, value from ASHRAE 2013 Fundamentals eq. 32
hlg = 2501000; %J/kg, value from ASHRAE 2013 Fundamentals eq. 32
cw = 1860; %J/kg, value from ASHRAE 2013 Fundamentals eq. 32

%+++++
if (~isempty(Tdb_in) && ~isempty(w_in))
    Tdb=Tdb_in;w=w_in;

    % phi calculation from Tdb and w
    Pw=w*P/(0.621945+w); %partial pressure of water wapor
    Pws=Saturation_pressure(Tdb);
    phi=Pw/Pws*100;

    % h calculation from Tdb and w
    h=c_air*Tdb+w*(hlg+cw*Tdb); %ASHRAE 2013 fundamentals eq. 32

    % v calculation from Tdb and w
    v=0.287042*(Tdb+273.15)*(1+1.607858*w)/P; %ASHRAE 2013 fundamentals eq. 28
end
%+++++
if (~isempty(Tdb_in) && ~isempty(phi_in))
    Tdb=Tdb_in;phi=phi_in;

```

```

% w calculation from Tdb and phi
Pws=Saturation_pressure(Tdb);
Pw=phi/100·Pws;
w=0.621945·Pw/(P-Pw);

% h calculation from Tdb and w
h=c_air·Tdb+w·(hlg+cw·Tdb);

% v calculation from Tdb and w
v=0.287042·(Tdb+273.15)·(1+1.607858·w)/P;
end
%+++++
if (~isempty(Tdb_in) && ~isempty(h_in))
    Tdb=Tdb_in;h=h_in;

% w calculation from Tdb and h
w=(h - c_air·Tdb)/(hlg+cw·Tdb);

% phi calculation from Tdb and w
Pw=w·P/(0.621945+w); %partial pressure of water wapor
Pws=Saturation_pressure(Tdb);
phi=Pw/Pws·100;

% v calculation from Tdb and w
v=0.287042·(Tdb+273.15)·(1+1.607858·w)/P;
end
%+++++
if (~isempty(w_in) && ~isempty(h_in))
    w=w_in;h=h_in;

% Tdb calculation from w and h
Tdb=(h - w·hlg)/(c_air+w·cw);

% phi calculation from Tdb and w
Pw=w·P/(0.621945+w); %partial pressure of water wapor
Pws=Saturation_pressure(Tdb);
phi=Pw/Pws·100;

% v calculation from Tdb and w
v=0.287042·(Tdb+273.15)·(1+1.607858·w)/P;
end
%+++++
if (~isempty(w_in) && ~isempty(phi_in))
    w=w_in;phi=phi_in;

% Tdb calculation from phi and w
Pw=w·P/(0.621945+w); %partial pressure of water wapor
Pws=Pw/phi·100;
options=optimset('LargeScale','off','Display','off');
[y,val,exitflag]=fsolve(@Iteration_function_1, 20,options);Tdb =y(1);
if exitflag<1
    disp('Iteration error')
end
    
```

```

% h calculation from Tdb and w
h=c_air·Tdb+w·(hlg+cw·Tdb);

% v calculation from Tdb and w
v=0.287042·(Tdb+273.15)·(1+1.607858·w)/P;
end
%+++++
if (~isempty(phi_in) && ~isempty(h_in))
    phi=phi_in;h=h_in;

% Tdb calculation from phi and h
options=optimset('LargeScale','off','Display','off');
[y,val,exitflag]=fsolve(@Iteration_function_2, 20,options);Tdb =y(1);
if exitflag<1
    disp('Iteration error')
end

% w calculation from Tdb and phi
Pws=Saturation_pressure(Tdb);
Pw=phi/100·Pws;
w=0.621945·Pw/(P-Pw);

% h calculation from Tdb and w
h=c_air·Tdb+w·(hlg+cw·Tdb);

% v calculation from Tdb and w
v=0.287042·(Tdb+273.15)·(1+1.607858·w)/P;
end
%+++++
if (~isempty(Tdb_in) && ~isempty(Twb_in))
    Tdb=Tdb_in;Twb=Twb_in;

% w calculation from Tdb and Twb
Pws=Saturation_pressure(Tdb);
Pwsasterik=Saturation_pressure(Twb);
ws=0.621945·Pwsasterik/(P-Pwsasterik);
w= ((hlg-2.326e3·Twb)-ws·c_air·(Tdb-Twb))/(hlg+cw·Tdb-4.186e3·Twb);

% phi calculation from Tdb and w
Pw=w·P/(0.621945+w); %partial pressure of water wapor
phi=Pw·100/Pws;

% h calculation from Tdb and w
h=c_air·Tdb_in+w·(hlg+cw·Tdb_in);

% v calculation from Tdb and w
v=0.287042·(Tdb_in+273.15)·(1+1.607858·w)/P;
end
%+++++
if (~isempty(w_in) && ~isempty(Twb_in))
    w=w_in;Twb=Twb_in;

% Tdb calculation from Twb and w

```

```

Pwsasterik=Saturation_pressure(Twb);
ws=0.621945·Pwsasterik/(P-Pwsasterik);
options=optimset('LargeScale','off','Display','off');
[y,val,exitflag]=fsolve(@Iteration_function_4, Twb,options);Tdb =y(1);
if exitflag<1
    disp('Iteration error')
end

% phi calculation from Tdb and w
Pws=Saturation_pressure(Tdb);
Pw=w·P/(0.621945+w); %partial pressure of water wapor
phi=Pw·100/Pws;

% h calculation from Tdb and w
h=c_air·Tdb_in+w·(hlg+cw·Tdb_in);

% v calculation from Tdb and w
v=0.287042·(Tdb_in+273.15)·(1+1.607858·w)/P;
end
%+++++
if (~isempty(phi_in) && ~isempty(Twb_in))
    phi=phi_in;Twb=Twb_in;

% Tdb calculation from phi and Twb
Pwsasterik=Saturation_pressure(Twb);
ws=0.621945·Pwsasterik/(P-Pwsasterik);
options=optimset('LargeScale','off','Display','off');
[y,val,exitflag]=fsolve(@Iteration_function_5, Twb,options);Tdb =y(1);
if exitflag<1
    disp('Iteration error')
end

% w calculation from Tdb and phi
Pws=Saturation_pressure(Tdb);
Pw=phi/100·Pws;
w=0.621945·Pw/(P-Pw);

% h calculation from Tdb and w
h=c_air·Tdb+w·(hlg+cw·Tdb);

% v calculation from Tdb and w
v=0.287042·(Tdb+273.15)·(1+1.607858·w)/P;
end

% dew point calculation from w
% pw=(P·w)/(0.621945+w); % water vapor partial pressure in kPa
alpha=log(Pw);
Tdp=6.54 + 14.526·alpha+0.7389·(alpha^2)+0.09486·(alpha^3)+0.4569·(Pw^0.1984); % valid for Tdp
between 0 C and 93 C

%+++++
if nargout>6 && isempty(Twb_in)
% Note: this Twb calc. equations are good for patm=101325 Pa only.
if abs(Tdb - Tdp) < .001, Twb=Tdb;return;end

```

```

options=optimset('LargeScale','off','Display','off');
[y,val,exitflag]=fsolve(@Iteration_function_3,Tdb,options);Twb=y(1);
if Twb > Tdb,Twb=Tdb;end
if Twb < Tdp,Twb=Tdp;end
end
% if phi>100
% Tdb = NaN;
% w = NaN;
% phi = NaN;
% h = NaN;
% Tdp = NaN;
% v =NaN;
%
% disp('ERROR: Point is outside the chart')
% end

function [Pws] = Saturation_pressure(Tdb) %saturated water vapor pressure ASHRAE 2013
fundamentals eq. 6
T=Tdb+273.15;
Pws=exp(-(5.8002206e3)/T+1.3914993+-(4.8640239e-2)·T+(4.1764768e-5)·(T^2)-(1.4452093e-8)·(T^3)+6.5459673·log(T)); %in Pa valid for 0 to 200C
Pws=Pws/1000; % in kPa
end

function result = Iteration_function_1(y) %calc Tdb from phi and w
Tdb_as=y(1);
Pws=Saturation_pressure(Tdb_as);
phi_as=Pw/Pws·100; %ASHRAE 2013 fundamentals eq. 24
% equation to satisfy
result=phi_as-phi;
end

function result = Iteration_function_2(y) %calc Tdb from phi and h
Tdb_as=y(1);
% w calculation from Tdb and phi
Pws=Saturation_pressure(Tdb_as);
Pw=phi/100·Pws;
w_as=0.621945·Pw/(P-Pw); %ASHRAE 2013 fundamentals eq. 22
% h calculation from Tdb and w
h_as=c_air·Tdb_as+w_as·(hlg+cw·Tdb_as);
% equation to satisfy
result=h_as-h;
end

function result = Iteration_function_3(y) %calc Twb from Tdb and w using ASHRAE 2013
fundamentals eq. 35
Twb_as=y(1);
Pws_as=Saturation_pressure(Twb_as);
ws=0.621945·Pws_as/(P-Pws_as);
w_as=((hlg-2.326e3·Twb_as)-ws·c_air·(Tdb-Twb_as))/(hlg+cw·Tdb-4.186e3·Twb_as);
result=(w-w_as)·1000;

```

```

end

function result = Iteration_function_4(y) %calc Tdb from Twb and w Tdp using ASHRAE 2013
fundamentals eq. 35
    Tdb_as=y(1);
    w_as= ((hlg-2.326e3·Twb)·ws-c_air·(Tdb_as-Twb))/(hlg+cw·Tdb_as-4.186e3·Twb);
    result=(w-w_as)·1000;
end

function result = Iteration_function_5(y) %calc Tdb from Twb and phi Tdp using ASHRAE 2013
fundamentals eq. 35
    Tdb_as=y(1);
    w_as= ((hlg-2.326e3·Twb)·ws-c_air·(Tdb_as-Twb))/(hlg+cw·Tdb_as-4.186e3·Twb);
    Pw_as=w_as·P/(0.621945+w_as); %partial pressure of water wapor
    Pws_as=Saturation_pressure(Tdb_as);
    phi_as=Pw_as·100/Pws_as;
    result=phi-phi_as;
end

function result = Iteration_function_6(y) %calc Pw from Tdb and Tdp using ASHRAE 2013
fundamentals eq. 39
    Pw_as=y(1);
    Tdp_as=
6.54+14.526·log(Pw_as)+0.7389·(log(Pw_as))^2+0.09486·(log(Pw_as))^3+0.4569·(Pw_as^0.1984); %
valid for Tdp between 0 C and 93 C
    result=Tdp-Tdp_as;
end
end

```

## ·T\_da\_ss:

-Código de 'Matlab' complementario para el código de 'Me\_Poppe\_pf'.

```
function [Tda_ss] = T_da_ss(h,w,pT)
%La funcion T_da_ss devuelve la temperatura del aire (K) que, en
%condiciones de sobresaturacion, verifica los valores de entalpia y humedad
%especifica introducidos como inputs.

%% Constantes para el calculo de las propiedades termofisicas del aire y vapor de agua Kruger:

To= 273.15;
C1=1.045356·10^3;
C2=3.161783·10^(-1);
C3=7.083814·10^(-4);
C4=2.705209·10^(-7);
C5=1.3605·10^3;
C6=2.31334;
C7=2.46784·10^(-10);
C8=5.91332·10^(-13);
C9=3.4831814·10^6;
C10=5.8627703·10^3;
C11=12.139568;
C12=1.40290431·10^(-2);
C13=8.15599·10^3;
C14=2.80627·10^1;
C15=5.11283·10^(-2);
C16=2.17582·10^(-13);
C17=2501.6;
C18=2.3263;
C19=1.8577;
C20=4.184;
C21=0.62509;
C22=1.005;
C23=1.00416;
C24=10.79586;
C25=5.02808;
C26=1.50474·10^(-4);
C27=4.2873·10^(-4);
C28=2.786118312;
C29=0.865;
C30=0.667;
C31=0.622;

Tda_ini=5+273.15; % Temperatura minima considerada para el aire en el inicio de la iteracion 5
grados
dTda=0.001; % Variacion de temperatura en cada ciclo (precision)
Tdamax=60+273.15; % Temperatura maxima considerada para el aire en el inicio de la iteracion 5
grados
N=ceil((Tdamax-Tda_ini)/dTda); % Longitud maxima del vector de temperaturas

h_fg=C9-C10·To+C11·(To^2)-C12·(To^3); % Entalpia de vaporizacion (evaluada en 273.15 K)
```

```

% Allocations (si creo el vector antes evito que crezca en cada loop y
% reduzco tiempo de calculo).

Tda = zeros(1, N);
T_cps = zeros(1, N);
c_pa = zeros(1, N);
c_pv = zeros(1, N);
c_pw = zeros(1, N);
pvs = zeros(1, N);
pvs = zeros(1, N);
w_sa = zeros(1, N);
h_ss = zeros(1, N);
R = zeros(1, N);

% inicio secuencia iterativa
Tda(1)=Tda_ini;

R(1)=2; % iniciamos en un valor mayor que el requisito
i=1;

while R(i)>0.01 %Si la diferencia porcentual supera el 0.1% actualizamos Tda
    i=i+1;
    Tda(i)=Tda(i-1)+dTda; %Actualizacion de la temperatura del aire
    T_cps(i)=(Tda(i)+273.15)/2; %T_cps
    c_pa(i)=C1-C2·T_cps(i)+C3·(T_cps(i))^2-C4·(T_cps(i))^3; %Cpa
    c_pv(i)=C5+C6·T_cps(i)-C7·(T_cps(i))^5+C8·(T_cps(i))^6; %Cpv
    c_pw(i)=C13-C14·T_cps(i)+C15·(T_cps(i))^2-C16·(T_cps(i))^6; %Cpw
    pvs(i)=10^(C24·(1-(To/Tda(i)))+C25·(log10(To/Tda(i)))+C26·(1-10^((-8.29692)·((Tda(i)/To)-
    1)))+C27·(10^((4.76955)·(1-(To/Tda(i))))-1)+C28); % pvs
    w_sa(i)=(0.62198 · pvs(i)) / (pT - pvs(i)); %wsa
    h_ss(i)=(c_pa(i)·(Tda(i)-273.15)+w_sa(i)·(h_fg+c_pw(i)·(Tda(i)-273.15))+(w-w_sa(i))·c_pw(i)·(Tda(i)-
    273.15))/1000; % hss en kJ/kg
    R(i)=((abs(h_ss(i)-h))/h_ss(i))·100;
end

Tda_ss=Tda(i);

```

·w\_a:

-Código de 'Matlab' complementario para el código de 'Me\_Poppe\_pf'.

```
function [w_a] = w_a(Tda,HR,pT)
%La funcion w devuelve la humedad del aire en (kg/kg) a partir de la temperatura seca del aire (K), la
humedad relativa (%) y la presion total del aire (Pa)

%% Constantes para el calculo de las propiedades termofisicas del aire y vapor de agua Kruger:

To= 273.15;
C1=1.045356·10^3;
C2=3.161783·10^(-1);
C3=7.083814·10^(-4);
C4=2.705209·10^(-7);
C5=1.3605·10^3;
C6=2.31334;
C7=2.46784·10^(-10);
C8=5.91332·10^(-13);
C9=3.4831814·10^6;
C10=5.8627703·10^3;
C11=12.139568;
C12=1.40290431·10^(-2);
C13=8.15599·10^3;
C14=2.80627·10^1;
C15=5.11283·10^(-2);
C16=2.17582·10^(-13);
C17=2501.6;
C18=2.3263;
C19=1.8577;
C20=4.184;
C21=0.62509;
C22=1.005;
C23=1.00416;
C24=10.79586;
C25=5.02808;
C26=1.50474·10^(-4);
C27=4.2873·10^(-4);
C28=2.786118312;
C29=0.865;
C30=0.667;
C31=0.622;

%% Calculo humedad

pvs=10^(C24·(1-(To/Tda))+C25·(log10(To/Tda))+C26·(1-10^((-8.29692)·((Tda/To)-
1)))+C27·(10^((4.76955)·(1-(To/Tda)))-1)+C28); % pvs
w_a = (0.62198 · pvs · (HR / 100)) / (pT - pvs · (HR / 100)); %w
```

## ·Me\_Poppe\_pf:

-Código de 'Matlab' para obtener el número de Me por la teoría de **Poppe**, además de las diversas propiedades del aire, que ya hemos mencionado anteriormente.

```

funcion [Me_poppe_pf, Tasalida, HRsalida,w_salida] =
Me_Poppe_pf(Tw1,Tw2,Tas1,Tbh,ma,mw,pT,N)
%La funcion Me_Poppe devuelve el calculo del numero de Merkel de acuerdo al
%metodo de calculo de Poppe. Devuelve 2 matrices R (resultados parciales) y
%Res (finales) del proceso. La matriz R tiene dimensiones de 17x4·N
%mientras que la de resultados tiene dimensiones de 11xN+1 (entrada +
%salida del numero de intervalos). Las magnitudes asociadas a cada una de
%las filas de las matrices se pueden ver en el excel.

%% Constantes para el calculo de las propiedades termofisicas del aire y vapor de agua Kruger.

To= 273.15;
C1=1.045356·10^3;
C2=3.161783·10^(-1);
C3=7.083814·10^(-4);
C4=2.705209·10^(-7);
C5=1.3605·10^3;
C6=2.31334;
C7=2.46784·10^(-10);
C8=5.91332·10^(-13);
C9=3.4831814·10^6;
C10=5.8627703·10^3;
C11=12.139568;
C12=1.40290431·10^(-2);
C13=8.15599·10^3;
C14=2.80627·10^1;
C15=5.11283·10^(-2);
C16=2.17582·10^(-13);
C17=2501.6;
C18=2.3263;
C19=1.8577;
C20=4.184;
C21=0.62509;
C22=1.005;
C23=1.00416;
C24=10.79586;
C25=5.02808;
C26=1.50474·10^(-4);
C27=4.2873·10^(-4);
C28=2.786118312;
C29=0.865;
C30=0.667;
C31=0.622;

hfg=C9-C10·To+C11·(To^2)-C12·(To^3); % Calor latente del agua a la temperatura T=To

% Con la funcion Psychrometricsnew calculo las propiedades en la entrada:
    
```

```
[Tdb, humratio, phi, entalphy, Tdp, volume, Twb] =Psychrometricsnew('Tdb',Tas1-273.15,'Twb',Tbh-273.15);
```

```
%SIENDO tdb TEMPERATURA DE BULBO SECO, humratio HUMEDAD ESPECIFICA, phi  
%HUMEDAD RELATIVA, entalphy ENTALPIA, tdp (), volume VOLUMEN, twb  
%TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO.
```

```
%% Inicio Runge-Kutta cuarto orden  
% Numero de intervalos y DeltaTw
```

```
DeltaTw=(Tw1-Tw2)/N;
```

```
% Preveamos las dimensiones de las matrices de resultados y de calculo y  
% definimos el primer nivel de la matriz de resultados  
R=zeros(19,4*N);  
Res=zeros(7,N+1);
```

```
% Creamos la primera columna matriz resultados Res(:,1).  
% Res(:,1)=[humratio;entalphy/1000;Tw2;0;Tas1;phi;Tbh;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0];  
Res(1,1)=humratio; %HUMEDAD ESPECIFICA  
Res(2,1)=entalphy/1000; %ENTALPIA  
Res(3,1)=Tw1; %TEMPERATURA DE ENTRADA DEL AGUA (YA QUE EN EQUICORRIENTE EL AIRE  
INTERCAMBIA CON LA ENTRADA DEL AGUA)  
Res(4,1)=0; % Me al inicio es nulo  
Res(5,1)=Tas1; %TEMPERATURA DE ENTRADA DEL AIRE  
Res(6,1)=phi;%HUMEDAD RELATIVA  
Res(7,1)=Tbh;%TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO EN LA ENTRADA DE AIRE.
```

```
%% El calculo de Me depende de la humedad absoluta a la salida. Al ser desconocida realizamos la  
programacion en torno a ella.
```

```
% Para ello, calculamos un vector de humedades que debe converger en el  
% valor de humedad a la salida. El primer valor sera el correspondiente a  
% la entrada y el segundo lo aumentamos un 5% para que entre en el bucle  
% del while
```

```
% Humedad especifica en la seccion de entrada (ya calculada)
```

```
w(1)=Res(1,1);  
wo=w(1,1); %LA HUMEDAD QUE TENGO A LA SALIDA DIGO QUE VA A SER IGUAL QUE LA QUE TENGO  
EN LA ENTRADA
```

```
f=2;  
w(f)=1.05*wo;
```

```
while abs(w(f)-w(f-1))*100/w(f)>0.1 %ESTE BUCLE VA HACIENDO LAS ITERACIONES HASTA QUE EL  
ERROR SEA MENOR DE 0.1  
f=f+1;
```

```
for i=1:N;  
if Res(6,i)<100; % Evaluamos HR. Si HR<100 al final del intervalo calculamos normal. De lo contrario  
consideramos sobresaturacion
```

```
  %Todo lo que va aqui dentro es el calculo sin saturacion
```

```
  for k=1:4; % Calculo de subetapas en cada intervalo
```

```
    j=4*(i-1)+k;
```

```

if j==1 % Sirve para identificar que la primera etapa es la entrada del aire y salida del agua
R(1,j)=Res(1,i); %GUARDO LA HUMEDAD ESPECIFICA
R(2,j)=Res(2,i)*1000; %GUARDO LA ENTALPIA
R(3,j)=Res(3,i); %TEMPERATURA DE ENTRADA DEL AGUA
else % Si no es la primera etapa
if k==1
R(1,j)=Res(1,i); % Humedad en el step anterior
R(2,j)=Res(2,i)*1000; %h
R(3,j)=Res(3,i);
R(17,j)=Res(4,i); %Me
elseif k==2
R(1,j)=R(1,j-1)+R(14,j-1)/2;
R(2,j)=R(2,j-1)+R(15,j-1)/2;
R(3,j)=Res(3,i)-DeltaTw/2;
elseif k==3
R(1,j)=R(1,j-2)+R(14,j-1)/2;
R(2,j)=R(2,j-2)+R(15,j-1)/2;
R(3,j)=Res(3,i)-DeltaTw/2;
else
R(1,j)=R(1,j-3)+R(14,j-1);
R(2,j)=R(2,j-3)+R(15,j-1);
R(3,j)=Res(3,i)-DeltaTw;
end
end
R(4,j)=(R(3,j)+273.15)/2; %T_cps (TEMPERATURA A LA QUE TIENEN QUE SER EVALUADOS LOS
CALORES ESPECIFICOS)
R(5,j)=C1-C2*R(4,j)+C3*(R(4,j))^2-C4*(R(4,j))^3; %Cpa (CALOR ESPECIFICO DEL AIRE SECO)
R(6,j)=C5+C6*R(4,j)-C7*(R(4,j))^5+C8*(R(4,j))^6; %Cpv (CALOR ESPECIFICO DEL VAPOR DE AGUA)
R(7,j)=C13-C14*R(4,j)+C15*(R(4,j))^2-C16*(R(4,j))^6; %Cpw (CALOR ESPECIFICO DEL AGUA)
R(8,j)=10^(C24*(1-(To/R(3,j)))+C25*(log10(To/R(3,j)))+C26*(1-10^((-8.29692)*((R(3,j)/To)-
1)))+C27*(10^(4.76955)*(1-(To/R(3,j))))-1)+C28); % pvs (PRESION DE VAPOR DE AGUA EVALUADA EN
TO)
R(9,j)=(C21*R(8,j))/(pT-(C22*R(8,j))); %wsw (RELACION DE HUMEDAD PARA AIRE SATURADO)
R(10,j)=hfg+(R(6,j)*(R(3,j)-To)); %hv (ENTALPIA DEL VAPOR DE AGUA A LA TEMPERATURA LOCAL,
EN RELACION CON EL AGUA A 0 grados)
R(11,j)=(R(5,j)*(R(3,j)-To))+R(9,j)*R(10,j); %hmasw (ENTALPIA DE AIRE SATURADO A LA
TEMPERATURA DEL AGUA)
R(12,j)=(C29^C30)*(((C31+R(9,j))/(C31+R(1,j)))-1)/(log(((C31+R(9,j))/(C31+R(1,j))))); %Le
(NUMERO DE LEWIS)
R(13,j)=(mw/ma)*(1-((ma/mw)*(wo-R(1,j)))); %Balance de masa (BALANCE DE MASA)
R(14,j)=(DeltaTw*R(7,j)*R(13,j)*(R(9,j)-R(1,j)))/(R(11,j)-R(2,j)+(R(12,j)-1)*(R(11,j)-R(2,j))-R(9,j)-
R(1,j))*R(10,j)-((R(9,j)-R(1,j))*R(7,j)*(R(3,j)-To)); %j (CALCULO DE LA J)
R(15,j)=(DeltaTw*R(7,j)*R(13,j))*(1+((R(9,j)-R(1,j))*R(7,j)*(R(3,j)-To))/(R(11,j)-R(2,j)+(R(12,j)-
1)*(R(11,j)-R(2,j))-R(9,j)-R(1,j))*R(10,j)-((R(9,j)-R(1,j))*R(7,j)*(R(3,j)-To)))); %k (CALCULO DE LA K)
R(16,j)=(DeltaTw*R(7,j))/(R(11,j)-R(2,j)+(R(12,j)-1)*(R(11,j)-R(2,j))-R(9,j)-R(1,j))*R(10,j)-((R(9,j)-
R(1,j))*R(7,j)*(R(3,j)-To)); %l (CALCULO DE LA L)
[Tdb, humratio, phi, entalphy, Tdp, volume, Twb] =Psychrometricsnew('h',R(2,j),'w',R(1,j));
%PARA ESA ENTALPIA Y HUMEDAD ESPECIFICA DE ESE SUBNIVEL OBTENGO LOS VALORES
PSICROMETRICOS
R(18,j)=Tdb+273.15; % Tas puede que difiera del valor real si dentro del intervalo se produce
sobresaturacion. Si se activan los siguientes comandos se puede evaluar
end
% Al final del ciclo de k completamos la matriz de resultados. Dejamos en

```

```

% blanco la temperatura del aire, la humedad y el bulbo humedo al no saber si estamos en
condiciones de
% sobresaturacion. Completamos i+1 ya que estamos en k=4 del nivel
% anterior
% Res(:,i+1)=[Res(1,i)+(R(14,j-3)+2·R(14,j-2)+2·R(14,j-1)+R(14,j))/6;(1000·Res(2,i)+(R(15,j-3)+2·R(15,j-
2)+2·R(15,j-1)+R(15,j))/6)/1000;Res(3,i)+DeltaTw;Res(4,i)+(R(16,j-3)+2·R(16,j-2)+2·R(16,j-
1)+R(16,j))/6;0;0;0;0;0;0;0;0;0];
Res(1,i+1)=Res(1,i)+(R(14,j-3)+2·R(14,j-2)+2·R(14,j-1)+R(14,j))/6; %RELACION DE HUMEDAD EN EL
NIVEL CORRESPONDIENTE
Res(2,i+1)=(1000·Res(2,i)+(R(15,j-3)+2·R(15,j-2)+2·R(15,j-1)+R(15,j))/6)/1000; %ENTALPIA DEL AIRE EN
EL NIVEL CORRESPONDIENTE
Res(3,i+1)=Res(3,i)-DeltaTw;
Res(4,i+1)=Res(4,i)+(R(16,j-3)+2·R(16,j-2)+2·R(16,j-1)+R(16,j))/6; %NUMERO DE MERKEL EN EL NIVEL
CORRESPONDIENTE
% Con la funcion Psychrometricsnew calculo las propiedades a partir h y w
% de la matriz Res
[Tdb, humratio, phi, entalphy, Tdp, volume, Twb]
=Psychrometricsnew('h',1000·Res(2,i+1),'w',Res(1,i+1));

% Asumimos aire no saturado, E INTRODUCIMOS LOS VALORES QUE NOS INTERESAN
% DEL DIAGRAMA PICROMETRICO
Res(5,i+1)=Tdb+273.15; %TEMPERATURA DE BULBO SECO
Res(6,i+1)=phi;%HUMEDAD RELATIVA
Res(7,i+1)=Twb+273.15; %TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO

if Res(6,i+1)<100; %SI LA HUMEDAD RELATIVA ES MENOR DE 100
% Confirmamos si no esta saturado
Res(5,i+1)=Tdb+273.15;
Res(6,i+1)=phi;
Res(7,i+1)=Twb+273.15;
else
% Corregimos si esta sobresaturado
Res(5,i+1)=T_da_ss(Res(2,i+1),Res(1,i+1),pT);
% La funcion T_da_ss devuelve la temperatura del aire (K) que, en
% condiciones de sobresaturacion, verifica los valores de entalpia y humedad
% especifica introducidos como inputs.
Res(6,i+1)=100; %EN ESTE CASO AL ESTAR SOBRESATURADO LA HUMEDAD RELATIVA ES 100
Res(7,i+1)=Res(5,i+1);
end

else %ESTE VA CON EL IF QUE ESTA JUSTO ANTES DEL FOR DE ARRIBA DE MANERA QUE
% COMO EN ESE NOS SALE QUE EL AIRE YA ESTA SATURADO DA EL SALTO A
% ESTAS ECUACIONES Y NO HACE EL CALCULO DE NO SATURADO Y DESPUES
% CORREGIR.
% Todo lo que va aqui dentro es el calculo con sobre saturacion
for k=1:4; % Calculo de subetapas en cada intervalo
j=4·(i-1)+k;
if k==1
R(1,j)=Res(1,i); % Humedad en el step anterior
R(2,j)=Res(2,i)·1000; %h
R(3,j)=Res(3,i);
R(17,j)=Res(4,i); %Me

```



end

w(f)=Res(1,N+1);

wo=w(f);

end

w\_salida=Res(1,i+1);

Me\_poppe\_pf=Res(4,i+1);

Tasalida=Res(5,i+1);

HRsalida=Res(6,i+1);

end



## ·MODELIZACIÓN:

-Código de 'Matlab' donde se encuentra la modelización final de la instalación del sistema de refrigeración basado en chimenea solar fotovoltaica evaporativa.

```
function [Rendimiento, Wpv, T, T_int, Tw1, Tw2, EER, Q_cond, W_comp, W_bomba, EER_sistema,
EER_solar, h_int]=Modelizacion(G_sol, T_ext, v_v, Q_w, HR, Q_evap, Two_evap)
```

%DATOS DE ENTRADA (4 paneles):

%G\_sol: Irradiación solar (medido mediante un piranómetro) (W/m<sup>2</sup>).

%T\_ext: Temperatura ambiente (medido mediante el termohigrómetro exterior) (C).

%v\_v: Velocidad del viento ambiente (mediante anemómetro de veleta) (m/s).

%Q\_w: Caudal volumétrico de agua rociada total (m<sup>3</sup>/h).

%HR: Humedad relativa del aire a la entrada de la zona evaporativa (%).

%Q\_evap: Potencia en el evaporador del ciclo (kW).

%Two\_evap: Temperatura del agua a la salida del evaporador (C).

%EJEMPLO:

```
%[Rendimiento, Wpv, T, T_int, Tw1, Tw2, EER, Q_cond,
W_comp]=Modelizacion(611.55,30.36,2.85,1.46,59.29,3.8,7)
```

%DESARROLLO ENFRIADORA CALCULO T\_INT, TW1 Y TW2:

N=2;

%N: número de intervalos para la función Me\_Poppe. Se deberían utilizar 5

%intervalos, pero para no sobrecargar el programa de iteraciones se

%utilizan 2 intervalos.

pT=101325;

Cpw=3.99175;

%Cpw: calor específico del agua (KJ/(kg·C)).

%CALCULO PROPIEDADES PSICROMÉTRICAS:

```
[Tdb, w, phi, h, Tdp, v, Twb]=Psychrometricsnew('Tdb', T_ext, 'phi', HR);
```

%Para la función introducimos dos valores:

% 1.Tdb\_in: Temperatura de bulbo seco del aire a la entrada de la zona evaporativa.

% 2.phi\_in: Humedad relativa del aire a la entrada de la zona evaporativa.

%Si introducimos dos valores, la función aplicará un tercer valor por

%si solo, esta será la presión que se tomará la atmosférica.

%Los valores pueden variar. Para nuestro análisis se han

%utilizado estas, habiéndolas obtenido mediante mediciones con el

%termohigrómetro.

```

%La funcion Psychrometricsnew nos permite obtener las propiedades del
%aire mediante el diagrama psicrometrico, en nuestro caso necesitamos
%Twb para el metodo de Poppe.

%Twb: Temperatura de bulbo humedo del aire a la entrada de la zona evaporativa (C).

m_w=((Q_w/3600)*1033.3)/4;

%Dividimos entre 3600 para pasar a m^3/s, y multiplicamos por la densidad
%del agua para pasar a kg/s.

%Consideramos que el gasto masico sera el mismo para los cuatro paneles.

%m_w: gasto masico de agua rociada en un panel (kg/s).

ma=-6.17512222*(m_w)^2+2.24691627*m_w-0.07653007;
Me_corr=0.70998846*(m_w/ma)^(-0.32548962);

%ma: gasto masico de aire (kg/s).

%Me_corr: numero de Me para la teoria de Merkel.

%DESARROLLO ENFRIADORA:

%DeltaT_w=Q_cond/(m_w*4*Cpw);
%DeltaT_w: diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del agua rociada.

%Q_cond=m_w*Cpw*4*(Tw1-Tw2);

%MODELO EER:

%EER=Q_evap/W_comp=Q_evap/(Q_cond-Q_evap)=Q_evap/(m_w*4*Cpw*(Tw1-Tw2)-Q_evap);
%EER=f(Two_evap,Tw2)=12.15-1.826*Two_evap+0.2108*Two_evap^2+0.1166*Tw2+0.004213*Tw2^2-
0.05686*Two_evap*Tw2;

%La funcion del EER respecto a Two_evap y Tw2 la obtenemos con el
%archivo Excel Modelizacion_EER_Enfriadora.

f=@(x)[Me_Poppe_pf(x(1)+273.15,x(2)+273.15,T_ext+273.15,Twb+273.15,ma,m_w,pT,N)-Me_corr;
(Q_evap/((Cpw*4*m_w*(x(1)-x(2)))-Q_evap))-(12.15-
1.826*Two_evap+0.2108*Two_evap^2+0.1166*x(2)+0.004213*x(2)^2-0.05686*Two_evap*x(2))];

%x(1)=Tw1; x(2)=Tw2

x0=[50,45];

x=fsolve(f,x0);
    
```

%La funcion fsolve es un solucionador utilizado para resolver sistemas de ecuaciones no  
%lineales. Tambien se puede utilizar con funciones donde uno de los datos de entrada  
%es una incognita. De esta manera, obtenemos Tw1 y Tw2 introduciendo  
%unos valores iniciales, que en este caso, serian 50 y 45 grados.

```
Tw1=x(1);
Tw2=x(2);
```

%CONDENSADOR Y COMPRESOR:

```
Q_cond=Cpw·m_w·4·(Tw1-Tw2);
```

%Q\_cond: Potencia del condensador (kW).

```
W_comp=Q_cond-Q_evap;
```

%W\_comp: Potencia del compresor (kW).

%EER ENFRIADORA:

```
EER=Q_evap/W_comp;
```

%Ya obtenidas Tw1 y Tw2, utilizamos la funcion Me\_Poppe para obtener  
%Tasalida, la temperatura del aire en la zona intermedia del panel  
%solar, que corresponde con T\_int del analisis del panel.

%CALCULO T\_int:

```
[Me_poppe_pf,Tasalida, HRsalida, w_salida] =  
Me_Poppe_pf(Tw1+273.15,Tw2+273.15,T_ext+273.15,Twb+273.15,ma,m_w,pT,N);
```

```
T_int=Tasalida-273.15;
```

```
Me(1,1)=Me_corr;  
Me(1,2)=Me_poppe_pf;
```

%Una vez calculado todas las temperaturas, comprobamos el numero de Me.  
%Si el valor con Poppe corresponde al de la teoria de Me, podemos  
%afirmar que la pareja de valores de Tw es correcta.

%ANALISIS DE TEMPERATURAS EN EL PANEL:

A=1.623904;  
x\_cr=0.004;  
x\_c=0.0003;  
x\_t=0.001;  
k\_cr=1;  
k\_c=148;  
k\_t=0.08;

%x\_cr,x\_c,x\_t: espesor del cristal, celula y tedlar (m).

%k\_cr,k\_c,k\_t: coeficiente de conductividad del cristal, celula y tedlar (W/(m·K)).

%A: area (es la misma para el cristal, celula y tedlar) (m<sup>2</sup>).

%T\_ext: temperatura del aire ambiente (mediante el termohigrometro exterior) (C).

%T\_int: temperatura del aire en la zona convectiva (mediante el termohigrometro interior) (C).

alpha\_c=1; %Aproximacion muy cercana a la realidad.

tau\_cr=0.9; %Aproximacion muy cercana a la realidad.

%alpha\_c: absortividad de la celula respecto a la radiacion solar incedente.

%tau\_cr: transmisividad del cristal frontal respecto a la radiacion solar incidente.



%Análisis termico panel fotovoltaico:

% Pared vidrio:  $\{[k_{cr} \cdot (T_c - T_1) \cdot A] / x_{cr}\} = h_{ext} \cdot A \cdot (T_1 - T_{ext})$

% Pared panel:  $alpha_c \cdot G_{sol} \cdot tau_{cr} \cdot A = \{[k_{cr} \cdot (T_c - T_1) \cdot A] / x_{cr}\} + \{[k_c \cdot (T_c - T_t) \cdot A] / x_c\} + alpha_c \cdot G_{sol} \cdot A \cdot RendimientoPanel$

% Pared tedlar interior:  $\{[k_c \cdot (T_c - T_t) \cdot A] / x_c\} = \{[k_t \cdot (T_t - T_2) \cdot A] / x_t\}$

% Pared tedlar conveccion:  $\{[k_t \cdot (T_t - T_2) \cdot A] / x_t\} = h_{int} \cdot A \cdot (T_2 - T_{int})$

%Al ser todas las capas del mismo area, las eliminamos del analisis.

%Resolvemos el sistema de ecuaciones:

v\_i = -207.32538 · m\_w<sup>2</sup> + 67.97833 · m\_w - 2.38035;

%v\_i: velocidad del aire en la zona interior de la celula (m/s).

h\_ext = 0.841 · v\_v + 4.61;

h\_int = 1.97 · v\_i + 10;

%h\_ext: coeficiente de conveccion externa ([W/(m<sup>2</sup>·C)]).

%h\_int: coeficiente de conveccion interna ([W/(m<sup>2</sup>·C)]).

%RESOLUCION SISTEMA DE ECUACIONES:

%Como en el analisis entra el rendimiento del panel, y no lo tenemos,  
%complementamos el analisis del panel con la formula del rendimiento  
%para tener un sistema de 5 ecuaciones con 5 incognitas.

%Constantes del rendimiento, obtenidas del fabricante:

Rendimiento\_ref=0.157;  
T\_ref=25;  
beta\_ref=0.0044;

F=@(x)[h\_ext\*(x(1)-T\_ext)-((k\_cr\*(x(2)-x(1)))/x\_cr);  
alpha\_c\*G\_sol\*tau\_cr-alpha\_c\*G\_sol\*x(5)-((k\_cr\*(x(2)-x(1)))/x\_cr)-((k\_c\*(x(2)-x(3)))/x\_c);  
((k\_c\*(x(2)-x(3)))/x\_c)-((k\_t\*(x(3)-x(4)))/x\_t);  
((k\_t\*(x(3)-x(4)))/x\_t)-h\_int\*(x(4)-T\_int);  
x(5)-Rendimiento\_ref\*(1-beta\_ref\*(x(2)-T\_ref))];

x0=[0;0;0;0;0];  
x=fsolve(F,x0);

T(1,1)=x(1);  
T(1,2)=x(2);  
T(1,3)=x(3);  
T(1,4)=x(4);



%Generamos 5 vectores columna:

%T(1,1)=T\_1: temperatura de la capa de cristal (C).  
%T(1,2)=T\_c: temperatura de la celula (C).  
%T(1,3)=T\_t: temperatura de la capa de tedlar (C).  
%T(1,4)=T\_2: temperatura del panel en la zona convectiva (C).

Rendimiento=x(5);

Wpv=Rendimiento\*A\*G\_sol;

%Wpv: potencia del panel (W).

```

%CALCULO BOMBA HIDRAULICA:

%Curva característica instalacion (EPANET):

Hg=1; %altura geometrica desde el deposito a rociadores (m).

Q=Q_w/3.6; %caudal de agua bombeada (l/s).

C_t=88.16; %constante de perdidas obtenida mediante EPANET con los datos de la instalacion
(m/(l/s)^2).

Hm=Hg+C_t*Q^2; %altura manometrica (m).

%Curva característica de la bomba (Matlab): Hm1=45.05*(1-(Q/1.308)^2);

%Curva rendimiento de la bomba (Matlab): Rendimiento1=3.4*[(Q/1.308)-(Q/1.308)^2];

%Curva característica de la bomba con variador de frecuencia: Hm2=(45.05*(1-(Q*k/1.308)^2))/k^2;

%Curva rendimiento de la bomba con variador de frecuencia: Rendimiento2=3.4*((Q*k/1.308)-
(Q*k/1.308)^2);

%k=Omega1/Omega2;

F=@(x)((45.05*(1-(Q*x/1.308)^2))/x^2)-Hm;

k=fsolve(F,1);

%Calculo potencia consumida por la bomba:

%Rendimiento1=(p*g*Q1*Hm1)/(Weje1);
%3.4*[(Q*k/1.308)-(Q*k/1.308)^2]=(p*g*Q2*k^3*Hm)/(Weje2*k^3);

Rendimiento_bomba=3.4*((Q*k/1.308)-(Q*k/1.308)^2);

W_bomba=(1033.3*9.8*(Q_w/3600)*k^3*Hm)/(Rendimiento_bomba*k^3*1000);

%EER_SISTEMA Y EER_SOLAR:

EER_sistema=Q_evap/(W_comp+W_bomba); %Potencia frigorifica entre el consumo del sistema.

EER_solar=EER_sistema*Rendimiento; %Se tiene en cuenta la potencia generada por los paneles.

end
    
```

## **ANEXO II. CÓGIDO MATLAB INTERFAZ GRÁFICA**

-En 'Matlab', las interfaces gráficas tienen varios archivos de códigos, uno por cada ventana que tengamos. Si recordamos, tenemos la ventana principal, donde podíamos acceder mediante los diferentes botones, a los tres subsistemas y a la ventana 'Otros'. En esta última ventana, podíamos recalculer el modelo para nuevos parámetros, y disponíamos de otro conjunto de botones donde nos llevaban a los subsistemas; como los datos cambian, el código no es el mismo para los subsistemas de la ventana principal y la ventana 'Otros'. Al igual que antes, disponemos de los códigos de: Psychrometricsnew, T\_da\_ss, w\_a, y Me\_Poppe\_pf; como estos códigos no cambian, no los vamos a volver a mostrar en este apartado.

### **·ChimeneaSolar:**

```
function varargout = ChimeneaSolar(varargin)

%CODIGO DE INICIALIZACION DE LA INTERFAZ:

%Todo esto es generado por matlab al guardar el archivo GUIDE.

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @ChimeneaSolar_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn', @ChimeneaSolar_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn', [], ...
    'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

%Todas las funciones que prosiguen tambien han sido generadas por Matlab, y
%no editamos el codigo existente de estas.

function ChimeneaSolar_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

%CODIGO FONDO DE PANTALLA:

axes(handles.axes1); %Definimos axes1 como fondo de pantalla. Axes1 debe ocupar toda la ventana
grafica.
[x,map]=imread('FondoChimeneaSolar.jpg'); %Leemos la imagen que queremos como fondo.
```

```
image(x) %Situamos la imagen como fondo de pantalla.
colormap(map); %Mostramos los colores de la imagen.
axis off %Eliminamos los ejes de axes1, para que sea un verdadero fondo de pantalla.
hold on %Mantenemos el fondo de pantalla.
```

```
handles.output = hObject;
```

```
guidata(hObject, handles);
```

%En nuestra interfaz se han introducido varios Push Button, varios Edit Text, y  
%varios Static Text. Los dos primeros generan funciones en el código, y tendrán  
%el nombre que se le haya asignado en el tag del GUIDE.

%Para introducir los valores de entrada, editamos solo las funciones Callback,  
%de los Edit Text del archivo GUIDE.

```
function varargout = ChimeneaSolar_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
varargout{1} = handles.output;
```

```
%EDIT TEXT G_SOL:
```

```
function G_sol_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
%CODIGO INTRODUCIR DATO G_SOL:
```

```
global G_sol;
G_sol=str2double(get(hObject,'String'));
```

```
function G_sol_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end
```

```
%EDIT TEXT T_ext:
```

```
function T_ext_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
%CODIGO INTRODUCIR DATO T_ext:

global T_ext;
T_ext=str2double(get(hObject,'String'));

function T_ext_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%EDIT TEXT v_v:

function v_v_Callback(hObject, eventdata, handles)

%CODIGO INTRODUCIR DATO v_v:

global v_v;
v_v=str2double(get(hObject,'String'));

function v_v_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%EDIT TEXT Q_w:

function Q_w_Callback(hObject, eventdata, handles)

%CODIGO INTRODUCIR DATO Q_w:
```

```
global Q_w;  
Q_w=str2double(get(hObject,'String'));  
  
function Q_w_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
  
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
end  
  
%EDIT TEXT HR:  
  
function HR_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
%CODIGO INTRODUCIR DATO HR:  
  
global HR;  
HR=str2double(get(hObject,'String'));  
  
function HR_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)  
  
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
end  
  
%EDIT TEXT Q_evap:  
  
function Q_evap_Callback(hObject, eventdata, handles)  
  
%CODIGO INTRODUCIR DATO Q_evap:  
  
global Q_evap;  
Q_evap=str2double(get(hObject,'String'));
```

```
function Q_evap_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%EDIT TEXT Two_evap:

function Two_evap_Callback(hObject, eventdata, handles)

%CODIGO INTRODUCIR DATO Q_evap:

global Two_evap;
Two_evap=str2double(get(hObject,'String'));

function Two_evap_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%PUSH BUTTON:

%La ultima funciones que genera Matlab son las del Push Button, y en esta es
%donde introducimos todo el codigo de la modelizacion, asi al clickarlo se
%ejecuta este.

function Modelizar_Callback(hObject, eventdata, handles)

%Comenzamos llamando a todas los datos de entrada que se han introducido en la interfaz:

global G_sol;
global T_ext;
global v_v;
```

```
global Q_w;  
global HR;  
global Q_evap;  
global Two_evap;
```

```
%Guardamos todos los resultados del modelo para poder mostrarlos en cada  
%una de las subinterfaces:
```

```
global Rendimiento;  
global Wpv;  
global T;  
global T_int;  
global HR_int;  
global Tw1;  
global Tw2;  
global Twi_evap;  
global EER;  
global Q_cond;  
global W_comp;  
global Rendimiento_bomba;  
global W_bomba;  
global EER_solar;  
global EER_sistema;  
global Q;  
global Hm;  
global Text;  
global HRExt;  
global Tw22;  
global Me_poppe_pff;  
global Me;
```



```
%DATOS DE ENTRADA (4 paneles):
```

```
%G_sol: Irradiacion solar (medido mediante un piranometro) (W/m^2).  
%T_ext: Temperatura ambiente (medido mediante el termohigrometro exterior) (C).  
%v_v: Velocidad del viento ambiente (mediante anemometro de veleta) (m/s).  
%Q_w: Caudal volumetrico de agua rociada total (m^3/h).  
%HR: Humedad relativa del aire a la entrada de la zona evaporativa (%).  
%Q_evap: Potencia en el evaporador del ciclo (kW).  
%Two_evap: Temperatura del agua a la salida del evaporador (C).
```

```
%EJEMPLO:
```

```
% G_sol=611.55;  
% T_ext=30.36;  
% v_v=2.85;  
% Q_w=1.46;  
% HR=59.29;  
% Q_evap=1.15;  
% Two_evap=7;
```

%DESARROLLO ENFRIADORA CALCULO T\_INT, TW1 Y TW2:

N=2;

%N:numero de intervalos para la funcion Me\_Poppe. Se deberian utilizar 5  
%intervalos, pero para no sobrecargar el programa de iteraciones se  
%utilizan 2 intervalos.

pT=101325;

Cpw=3.99175;

%Cpw: calor especifico del agua (KJ/(kg·C)).

Twi\_evap=12;

%Twi\_evap: temperatura entrada del agua en el evaporador (C).

%Es usual en la practica fijar las temperaturas de entrada y salida del  
%evaporador a 12 y 7 grados respectivamente.

%CALCULO PROPIEDADES PSICROMETRICAS:

[Tdb, w, phi, h, Tdp, v, Twb]=Psychrometricsnew('Tdb',T\_ext,'phi',HR);

%Para la funcion introducimos dos valores:

- % 1.Tdb\_in: Temperatura de bulbo seco del aire a la entrada de la zona evaporativa.
- % 2.phi\_in: Humedad relativa del aire a la entrada de la zona evaporativa.

%Si introducimos dos valores, la funcion aplicara un tercer valor por  
%si solo, esta sera la presion que se tomara la atmosferica.

%Los valores pueden variar. Para nuestro analisis se han  
%utilizado estas, habiendolas obtenido mediante mediciones con el  
%termohigrometro.

%La funcion Psychrometricsnew nos permite obtener las propiedades del  
%aire mediante el diagrama psicrometrico, en nuestro caso necesitamos  
%Twb para el metodo de Poppe.

%Twb: Temperatura de bulbo humedo del aire a la entrada de la zona evaporativa (C).

```
m_w=((Q_w/3600)*1033.3)/4;
```

```
%Dividimos entre 3600 para pasar a m^3/s, y multiplicamos por la densidad  
%del agua para pasar a kg/s.
```

```
%Consideramos que el gasto masico sera el mismo para los cuatro paneles.
```

```
%m_w: gasto masico de agua rociada (kg/s).
```

```
ma=-6.17512222*(m_w)^2+2.24691627*m_w-0.07653007;  
Me_corr=0.70998846*(m_w/ma)^(-0.32548962);
```

```
%ma: gasto masico de aire (kg/s).
```

```
%Me_corr: numero de Me para la teoria de Merkel.
```

```
%DESARROLLO ENFRIADORA:
```

```
%DeltaT_w=Q_cond/(m_w*4*Cpw);
```

```
%DeltaT_w: diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del agua rociada.
```

```
%Q_cond=m_w*4*Cpw*(Tw1-Tw2);
```

```
%MODELO EER:
```

```
%EER=Q_evap/W_comp=Q_evap/(Q_cond-Q_evap)=Q_evap/(m_w*4*Cpw*(Tw1-Tw2)-Q_evap);  
%EER=f(Two_evap,Tw2)=12.15-1.826*Two_evap+0.2108*Two_evap^2+0.1166*Tw2+0.004213*Tw2^2-  
0.05686*Two_evap*Tw2;
```

```
%La funcion del EER respecto a Two_evap y Tw2 la obtenemos con el  
%archivo Excel Modelizacion_EER_Enfriadora.
```

```
f=@(x)[Me_Poppe_pf(x(1)+273.15,x(2)+273.15,T_ext+273.15,Twb+273.15,ma,m_w,pT,N)-Me_corr;  
(Q_evap/((Cpw*4*m_w*(x(1)-x(2)))-Q_evap))-(12.15-  
1.826*Two_evap+0.2108*Two_evap^2+0.1166*x(2)+0.004213*x(2)^2-0.05686*Two_evap*x(2))];
```

```
%x(1)=Tw1; x(2)=Tw2
```

```
x0=[50,45];
```

```
x=fsolve(f,x0);
```

```
%La funcion fsolve es un solucionador utilizado para resolver sistemas de ecuaciones no
%lineales. Tambien se puede utilizar con funciones donde uno de los datos de entrada
%es una incognita. De esta manera, obtenemos Tw1 y Tw2 introduciendo
%unos valores iniciales, que en este caso, serian 50 y 45 grados.
```

```
Tw1=x(1);
Tw2=x(2);
```

```
%CONDENSADOR Y COMPRESOR:
```

```
Q_cond=Cpw·m_w·4·(Tw1-Tw2);
```

```
%Q_cond: Potencia del condensador (kW).
```

```
W_comp=Q_cond-Q_evap;
```

```
%W_comp: Potencia del compresor (kW).
```

```
%EER ENFRIADORA:
```

```
EER=Q_evap/W_comp;
```

```
%Ya obtenidas Tw1 y Tw2, utilizamos la funcion Me_Poppe para obtener
%Tasalida, la temperatura del aire en la zona intermedia del panel
%solar, que corresponde con T_int del analisis del panel.
```

```
%CALCULO T_int:
```

```
[Me_poppe_pf,Tasalida, HRsalida, w_salida] =
Me_Poppe_pf(Tw1+273.15,Tw2+273.15,T_ext+273.15,Twb+273.15,ma,m_w,pT,N);
```

```
%w_salida la sacamos para calcular despues las propiedades del aire a la salida de la
%chimenea.
```

```
HR_int=HRsalida;
T_int=Tasalida-273.15;
```

```
Me(1,1)=Me_corr;
Me(1,2)=Me_poppe_pf;
```

```
%Una vez calculado todas las temperaturas, comprobamos el numero de Me.
%Si el valor con Poppe corresponde al de la teoria de Me. Podemos
%afirmar que la pareja de valores de Tw es correcta.
```

```
%CALCULO GRAFICA CONVERGENCIA DE Me:
```

```
DeltaT_w=4.5/(4·m_w·Cpw);
```

```
%Para hacer la comprobacion de convergencia sin ser dependiente del fsolve,
%aplicamos un valor general de la potencia en el condensador de 4.5 kW.
```

```
Tw22(1)=Twb+0.5;
```

```
for A=1:100
```

```
    [Me_poppe_pff(A),Tasalida, HRsalida] =
    Me_Poppe_pf(Tw22(A)+DeltaT_w+273.15,Tw22(A)+273.15,T_ext+273.15,Twb+273.15,ma,m_w,pT,N)
    ;
```

```
    Tw22(A+1)=Tw22(A)+0.4;
```

```
end
```

```
%ANALISIS DE TEMPERATURAS EN EL PANEL:
```

```
A=1.623904;
x_cr=0.004;
x_c=0.0003;
x_t=0.001;
k_cr=1;
k_c=148;
k_t=0.08;
```

```
%x_cr,x_c,x_t: espesor del cristal, celula y tedlar (m).
```

```
%k_cr,k_c,k_t: coeficiente de conductividad del cristal, celula y tedlar (W/(m·K)).
```

```
%A: area (es la misma para el cristal, celula y tedlar) (m^2).
```

%T\_ext: temperatura del aire ambiente (mediante el termohigrometro exterior) (C).  
%T\_int: temperatura del aire en la zona convectiva (mediante el termohigrometro interior) (C).

alpha\_c=1; %Aproximacion muy cercana a la realidad.  
tau\_cr=0.9; %Aproximacion muy cercana a la realidad.

%alpha\_c: absortividad de la celula respecto a la radiacion solar incedente.  
%tau\_cr: transmisividad del cristal frontal respecto a la radiacion solar incidente.

%Análisis termico panel fotovoltaico:

% Pared vidrio:  $\{[k_{cr} \cdot (T_c - T_{t1}) \cdot A] / x_{cr}\} = h_{ext} \cdot A \cdot (T_{t1} - T_{ext})$   
% Pared panel:  $alpha_c \cdot G_{sol} \cdot tau_{cr} \cdot A = \{[k_{cr} \cdot (T_c - T_{t1}) \cdot A] / x_{cr}\} + \{[k_c \cdot (T_c - T_t) \cdot A] / x_c\} + alpha_c \cdot G_{sol} \cdot A \cdot RendimientoPanel$   
% Pared tedlar interior:  $\{[k_c \cdot (T_c - T_t) \cdot A] / x_c\} = \{[k_t \cdot (T_t - T_{t2}) \cdot A] / x_t\}$   
% Pared tedlar conveccion:  $\{[k_t \cdot (T_t - T_{t2}) \cdot A] / x_t\} = h_{int} \cdot A \cdot (T_{t2} - T_{int})$

%Al ser todas las capas del mismo area, las eliminamos del analisis.

%Resolvemos el sistema de ecuaciones:

v\_i=-207.32538·m\_w^2+67.97833·m\_w-2.38035;

%v\_i: velocidad del aire en la zona interior de la celula (m/s).

h\_ext=0.841·v\_v+4.61;  
h\_int=1.97·v\_i+10;

%h\_ext: coeficiente de conveccion externa ([W/(m^2·C)]).  
%h\_int: coeficiente de conveccion interna ([W/(m^2·C)]).

%RESOLUCION SISTEMA DE ECUACIONES:

%Como en el analisis entra el rendimiento del panel, y no lo tenemos,  
%complementamos el analisis del panel con la formula del rendimiento  
%para tener un sistema de 5 ecuaciones con 5 incognitas.

%Constantes del rendimiento, obtenidas del fabricante:

Rendimiento\_ref=0.157;  
T\_ref=25;  
beta\_ref=0.0044;

```

F=@(x)[h_ext*(x(1)-T_ext)-((k_cr*(x(2)-x(1)))/x_cr);
alpha_c*G_sol*tau_cr-alpha_c*G_sol*x(5)-((k_cr*(x(2)-x(1)))/x_cr)-((k_c*(x(2)-x(3)))/x_c);
((k_c*(x(2)-x(3)))/x_c)-((k_t*(x(3)-x(4)))/x_t);
((k_t*(x(3)-x(4)))/x_t)-h_int*(x(4)-T_int);
x(5)-Rendimiento_ref*(1-beta_ref*(x(2)-T_ref));

x0=[0;0;0;0;0];
x=fsolve(F,x0);

T(1,1)=x(1);
T(1,2)=x(2);
T(1,3)=x(3);
T(1,4)=x(4);

%Generamos 5 vectores columna:

%T(1,1)=T_1: temperatura de la capa de cristal (C).
%T(1,2)=T_c: temperatura de la celula (C).
%T(1,3)=T_t: temperatura de la capa de tedlar (C).
%T(1,4)=T_2: temperatura del panel en la zona convectiva (C).

Rendimiento=x(5);

Wpv=Rendimiento*A*G_sol;

%Wpv: potencia del panel (W).

%CALCULO AIRE SALIDA CHIMENEA:

%Calculamos las propiedades psicrometricas del aire en la zona intermedia:

[Tdb, w, phi, h, Tdp, v, Twb]=Psychrometricsnew('Tdb',T_int,'w',w_salida);

%Para la funcion introducimos dos valores:
% 1.Tdb_in: Temperatura de bulbo seco del aire en la zona intermedia de la chimenea.
% 2.w_in: Humedad absoluta del aire en la zona intermedia de la chimenea (kgv/kg).

%h: entalpia del aire en la zona intermedia de la chimenea (J/kg).

Q_convect=h_int*A*(T(1,4)-T_int); %(W).
    
```

hext=h+Q\_convec/ma; %(l/kg).

%Como tenemos un proceso de calentamiento sensible, wext es wint:

wext=w\_salida; %(kgv/kg).

%Con wext y hext podemos calcular Tdb y phi con Pyschmetricsnew:

[Tdb, w, phi, h, Tdp, v, Twb]=Psychrometricsnew('h',hext,'w',wext);

Text=Tdb; %temperatura del aire a la salida de la chimenea (C).

HRext=phi; %humedad relativa del aire a la salida de la chimenea (%).

%CALCULO BOMBA HIDRAULICA:

%Curva característica instalacion (EPANET):

Hg=1; %altura geometrica desde el deposito a rociadores (m).

Q=Q\_w/3.6; %caudal de agua bombeada (l/s).

C\_t=88.16; %constante de perdidas obtenida mediante EPANET con los datos de la instalacion (m/(l/s)^2).

Hm=Hg+C\_t\*Q^2; %altura manometrica (m).

%Curva característica de la bomba (Matlab): Hm1=45.05\*(1-(Q/1.308)^2);

%Curva rendimiento de la bomba (Matlab): Rendimiento1=3.4\*[(Q/1.308)-(Q/1.308)^2];

%Curva característica de la bomba con variador de frecuencia: Hm2=(45.05\*(1-(Q\*k/1.308)^2))/k^2;

%Curva rendimiento de la bomba con variador de frecuencia: Rendimiento2=3.4\*((Q\*k/1.308)-(Q\*k/1.308)^2);

%k=Omega1/Omega2;

F=@(x)((45.05\*(1-(Q\*x/1.308)^2))/x^2)-Hm;

```
k=fsolve(F,1);
```

```
%Calculo potencia consumida por la bomba:
```

```
%Rendimiento1=(p·g·Q1·Hm1)/(Weje1);
```

```
%3.4·[(Q·k/1.308)-(Q·k/1.308)^2]=(p·g·Q2·k^3·Hm)/(Weje2·k^3);
```

```
Rendimiento_bomba=3.4·((Q·k/1.308)-(Q·k/1.308)^2);
```

```
W_bomba=(1033.3·9.8·(Q_w/3600)·k^3·Hm)/(Rendimiento_bomba·k^3·1000);
```

```
%EER_SISTEMA Y EER_SOLAR:
```

```
EER_sistema=Q_evap/(W_comp+W_bomba); %Potencia frigorifica entre el consumo del sistema.
```

```
EER_solar=EER_sistema·Rendimiento; %Se tiene en cuenta la potencia generada por los paneles.
```

```
%VALORES DE SALIDA:
```

```
%El EER_Solar y el EER_Sistema los mostramos en la interfaz principal.
```

```
set(handles.EER_Solar,'String',EER_solar);
```

```
set(handles.EER_Sistema,'String',EER_sistema);
```

```
%Una vez calculado todo el modelo, generamos el resto de Push buttons para  
%generar otra interfaz con cada parte del sistema por separado.
```

%PANEL SOLAR:

```
function Panel_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

%Comenzamos llamando a los resultados del modelo que queremos mostrar en esta interfaz:

```
global Rendimiento;  
global Wpv;  
global T;  
global T_int;  
global HR_int;  
global Tw1;  
global Tw2;  
global Text;  
global HRExt;
```

%Introducimos los valores dentro de la estructura handles para poder pasar los valores a  
%otra interfaz:

```
handles.Rendimiento=Rendimiento;
```

```
handles.Wpv=Wpv;
```

```
handles.T=T;
```

```
handles.T_int=T_int;
```

```
handles.HR_int=HR_int;
```

```
handles.Tw1=Tw1;
```

```
handles.Tw2=Tw2;
```

```
handles.Text=Text;
```

```
handles.HRExt=HRExt;
```

```
guidata(hObject, handles);
```

PanelSolar

%Introduciendo el nombre de la siguiente interfaz nos permite, al clickar en la interfaz  
%el boton, aparecer en la interfaz PanelSolar.

%BOMBA CIRCUITO DE CALOR:

```
function Bomba_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

%Comenzamos llamando a los resultados del modelo que queremos mostrar en esta interfaz:

```
global W_bomba;  
global Rendimiento_bomba;  
global Q;  
global Hm;
```

%Introducimos los valores dentro de la estructura handles para poder pasar los valores a  
%otra interfaz:

```
handles.W_bomba=W_bomba;
```

```
handles.Rendimiento_bomba=Rendimiento_bomba;
```

```
handles.Q=Q;
```

```
handles.Hm=Hm;
```

```
guidata(hObject, handles);
```

Bomba\_caliente

%Introduciendo el nombre de la siguiente interfaz nos permite, al clickar en la interfaz  
%el boton, aparecer en la interfaz Bomba\_caliente.

%ENFRIADORA:

```
function Enfriadora_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

%Comenzamos llamando a los resultados del modelo que queremos mostrar en esta interfaz:

```
global W_comp;  
global Q_cond;  
global Tw1;  
global Tw2;  
global Two_evap;  
global Twi_evap;  
global EER;  
global Q_evap;
```

%Introducimos los valores dentro de la estructura handles para poder pasar los valores a  
%otra interfaz:

```
handles.W_comp=W_comp;
```

```
handles.Q_cond=Q_cond;
```

```
handles.Tw1=Tw1;
```

```
handles.Tw2=Tw2;
```

```
handles.Two_evap=Two_evap;
```

```
handles.Twi_evap=Twi_evap;
```

```
handles.EER=EER;
```

```
handles.Q_evap=Q_evap;
```

```
guidata(hObject, handles);
```

Enfriadora

%Introduciendo el nombre de la siguiente interfaz nos permite, al clickar en la interfaz  
%el boton, aparecer en la interfaz Enfriadora.

%OTROS:

%Mediante este boton pasaremos a una interfaz con la convergencia de Me y  
%la curva de rendimiento de la bomba hidraulica.

```
function Otros_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

%Comenzamos llamando a los resultados del modelo que queremos mostrar en esta interfaz:

```
global Me_poppe_pff;  
global Tw22;  
global Tw2;  
global Me;
```

```
global G_sol;  
global T_ext;  
global v_v;  
global Q_w;  
global HR;  
global Q_evap;  
global Two_evap;
```

%Introducimos los valores dentro de la estructura handles para poder pasar los valores a  
%otra interfaz:

```
handles.Tw22=Tw22;  
handles.Me_poppe_pf=Me_poppe_pff;  
handles.Tw2=Tw2;  
handles.Me=Me;
```

```
handles.G_sol=G_sol;  
handles.T_ext=T_ext;  
handles.v_v=v_v;  
handles.Q_w=Q_w;  
handles.HR=HR;  
handles.Q_evap=Q_evap;  
handles.Two_evap=Two_evap;
```

```
guidata(hObject,handles);
```

Otros

%Introduciendo el nombre de la siguiente interfaz nos permite, al clickar en la interfaz  
%el boton, aparecer en la interfaz Otros.

## PanelSolar:

```
function varargout = PanelSolar(varargin)

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @PanelSolar_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn', @PanelSolar_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn', [], ...
    'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function PanelSolar_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

global Resultados;

%CODIGO FONDO DE PANTALLA:

axes(handles.axes1); %Definimos axes1 como fondo de pantalla. Axes1 debe ocupar toda la ventana grafica.
[x,map]=imread('FondoPanelSolar.jpg'); %Leemos la imagen que queremos como fondo.
image(x) %Situamos la imagen como fondo de pantalla.
colormap(map); %Mostramos los colores de la imagen.
axis off %Eliminamos los ejes de axes1, para que sea un verdadero fondo de pantalla.
hold on %Mantenemos el fondo de pantalla.

axes(handles.axes2); %Definimos axes1 como fondo de pantalla. Axes1 debe ocupar toda la ventana grafica.
[x,map]=imread('FondoTemperaturasPanel.jpg'); %Leemos la imagen que queremos como fondo.
image(x) %Situamos la imagen como fondo de pantalla.
colormap(map); %Mostramos los colores de la imagen.
axis off %Eliminamos los ejes de axes1, para que sea un verdadero fondo de pantalla.
hold on %Mantenemos el fondo de pantalla.

%Llamamos a los resultados guardados en ChimeneaSolar:
```

```
Resultados=guidata(ChimeneaSolar);

%Una vez obtenido los resultados del modelo, generamos el codigo que
%situara los resultados en los Static Text de la interfaz:

set(handles.Rendimiento,'String',Resultados.Rendimiento);

set(handles.Wpv,'String',Resultados.Wpv);

set(handles.T_int,'String',Resultados.T_int);

set(handles.Tw1,'String',Resultados.Tw1);

set(handles.Tw2,'String',Resultados.Tw2);

set(handles.HR_int,'String',Resultados.HR_int);

set(handles.Text,'String',Resultados.Text);

set(handles.HRext,'String', Resultados.HRext);

set(handles.T1,'String',Resultados.T(1));
set(handles.Tc,'String',Resultados.T(2));
set(handles.Tt,'String',Resultados.T(3));
set(handles.T2,'String',Resultados.T(4));

handles.output = hObject;

guidata(hObject, handles);

function varargout = PanelSolar_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

varargout{1} = handles.output;

function ChimeneaSolar_Callback(hObject, eventdata, handles)

ChimeneaSolar

%Con este Push button conseguiremos, al clickarlo, volver a la interfaz original.
```

## ·Bomba\_caliente:

```
function varargout = Bomba_caliente(varargin)

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @Bomba_caliente_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn', @Bomba_caliente_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn', [], ...
    'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function Bomba_caliente_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

%CODIGO FONDO DE PANTALLA:

axes(handles.axes1); %Definimos axes1 como fondo de pantalla. Axes1 debe ocupar toda la ventana
grafica.
[x,map]=imread('FondoBombaCaliente1.jpg'); %Leemos la imagen que queremos como fondo.
image(x) %Situamos la imagen como fondo de pantalla.
colormap(map); %Mostramos los colores de la imagen.
axis off %Eliminamos los ejes de axes1, para que sea un verdadero fondo de pantalla.
hold on %Mantenemos el fondo de pantalla.

axes(handles.axes2);
Imagen=imread('FondoBombaCaliente2.jpg');
imshow(Imagen);

%Llamamos a los resultados guardados en ChimeneaSolar:

Resultados=guidata(ChimeneaSolar);

%Una vez obtenido los resultados del modelo, generamos el codigo que
%situara los resultados en los Static Text de la interfaz:
```

```
set(handles.Rendimiento_bomba,'String',Resultados.Rendimiento_bomba);

set(handles.W_bomba,'String',Resultados.W_bomba);

set(handles.Q,'String',Resultados.Q);

set(handles.Hm,'String',Resultados.Hm);

handles.output = hObject;

guidata(hObject, handles);

function varargout = Bomba_caliente_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

varargout{1} = handles.output;

function ChimeneaSolar_Callback(hObject, eventdata, handles)

ChimeneaSolar

%Con este Push button conseguiremos, al clickarlo, volver a la interfaz original.
```

## ·ENFRIADORA:

```
function varargout = Enfriadora(varargin)

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @Enfriadora_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn', @Enfriadora_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn', [], ...
    'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function Enfriadora_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

%CODIGO FONDO DE PANTALLA:

imdata=imread('FondoEnfriadora.jpg');

imshow(imdata);

%Llamamos a los resultados guardados en ChimeneaSolar:

Resultados=guidata(ChimeneaSolar);

%Una vez obtenido los resultados del modelo, generamos el codigo que
%situara los resultados en los Static Text de la interfaz:

set(handles.W_comp,'String',Resultados.W_comp);

set(handles.Q_cond,'String',Resultados.Q_cond);

set(handles.Tw1,'String',Resultados.Tw1);
```

```
set(handles.Tw2,'String',Resultados.Tw2);

set(handles.Two_evap,'String',Resultados.Two_evap);

set(handles.Twi_evap,'String',Resultados.Twi_evap);

set(handles.EER,'String',Resultados.EER);

set(handles.Q_evap,'String',Resultados.Q_evap);

handles.output = hObject;

guidata(hObject, handles);

function varargout = Enfriadora_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

varargout{1} = handles.output;

function ChimeneaSolar_Callback(hObject, eventdata, handles)

ChimeneaSolar

%Con este Push button conseguiremos, al clickarlo, volver a la interfaz original.
```

## ·Otros:

```
function varargout = Otros(varargin)

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @Otros_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn', @Otros_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn', [], ...
    'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function Otros_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

global Resultados;
global Me1;

%Llamamos a los resultados guardados en ChimeneaSolar:

Resultados=guidata(ChimeneaSolar);

Tw22=Resultados.Tw22;
Me_poppe_pf=Resultados.Me_poppe_pf;
Tw2=Resultados.Tw2;
Me=Resultados.Me;

%GRAFICA CONVERGENCIA DE MERKEL:

axes(handles.axes1);

hold on

plot(Tw22(1:100),Me_poppe_pf(1:100),'r');
```

```
Me1=plot(Tw2,Me(1,2),'ko');

legend(Me1,'MeOriginal');

title('Convergencia de Me');

xlabel('Tw2');
ylabel('Me');

grid on

%GRAFICA RENDIMIENTO BOMBA:

x=[0 0.654 1.308];
y=[0 0.85 0];

%Codigo obtenido del Curve Fitting.

[xData, yData] = prepareCurveData( x, y );

ft = fitype( 'a*((x/b)-(x/b)^2)', 'independent', 'x', 'dependent', 'y' );
opts = fitoptions( 'Method', 'NonlinearLeastSquares' );
opts.Display = 'Off';
opts.StartPoint = [0.369304032072002 0.196545927912524];

[fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft, opts );

axes(handles.axes2);

hold on

g = plot( fitresult, xData, yData );
legend( g, 'y vs. x', 'Rendimiento=0.85', 'Location', 'NorthEast' );
title('Rendimiento bomba');

xlabel Caudal
ylabel Rendimiento
grid on

handles.output = hObject;

guidata(hObject, handles);
```

```
function varargout = Otros_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

varargout{1} = handles.output;

%EDIT TEXT RENDIMIENTO:

function RendimientoValor_Callback(hObject, eventdata, handles)

%CODIGO INTRODUCIR DATO RENDIMIENTO:

global Rendimiento

Rendimiento=str2double(get(hObject,'String'));

function RendimientoValor_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

%RENDIMIENTO:

%Boton que, al clickarlo, se recalculara la expresion del rendimiento para
%el nuevo valor del rendimiento maximo de la bomba.

function Rendimiento_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Rendimiento;

global a;
global b;
```

```
x=[0 0.654 1.308];
y=[0 Rendimiento 0];
```

```
funcion=@(Coef,x) Coef(1)-((x/Coef(2))-(x/Coef(2)).^2);
```

%Coef: vector con los coeficientes de la ecuación.

%x: vector de valores experimentales.

%Poner el punto en el elevado al trabajar con vectores.

```
x0=[0.37 0.2];
```

%Llamamos a la app Curve Fitting para resolver el sistema:

```
Coef_opt=lsqcurvefit(funcion,x0,x,y);
```

%Obtenemos los nuevos valores de los parámetros de la expresión del

%rendimiento:

```
a=Coef_opt(1);
```

```
b=Coef_opt(2);
```

%Volvemos a graficar la nueva curva:

```
[xData, yData] = prepareCurveData( x, y );
```

```
ft = fitype( 'a-((x/b)-(x/b)^2)', 'independent', 'x', 'dependent', 'y' );
```

```
opts = fitoptions( 'Method', 'NonlinearLeastSquares' );
```

```
opts.Display = 'Off';
```

```
opts.StartPoint = [0.369304032072002 0.196545927912524];
```

```
[fitresult, gof] = fit( xData, yData, ft, opts );
```

```
axes(handles.axes2);
```

```
h = plot( fitresult,'k', xData, yData);
```

```
legend( h, 'y vs. x', 'RendimientoNuevo', 'Location', 'NorthEast' );
```

%EDIT TEXT Tw1\_x0:

```
function Tw1_x0_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

%CODIGO INTRODUCIR DATO Tw1\_x0:

```
global Tw1_x0
```

```
Tw1_x0=str2double(get(hObject,'String'));
```

```
function Tw1_x0_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
end
```

%EDIT TEXT Tw2\_x0:

```
function Tw2_x0_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

%CODIGO INTRODUCIR DATO Tw2\_x0:

```
global Tw2_x0
```

```
Tw2_x0=str2double(get(hObject,'String'));
```

```
function Tw2_x0_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
end
```

%MERKEL:

%Con este boton, al clickarlo, recalcularemos el Me.

```
function Merkel_Callback(hObject, eventdata, handles)

global Resultados;
global Tw1_x0;
global Tw2_x0;
global Me1;

global T_ext;
global Q_w;
global HR;
global Q_evap;
global Two_evap;

T_ext=Resultados.T_ext;
Q_w=Resultados.Q_w;
HR=Resultados.HR;
Q_evap=Resultados.Q_evap;
Two_evap=Resultados.Two_evap;

%DESARROLLO ENFRIADORA CALCULO T_INT, TW1 Y TW2:

N=2;

%N:numero de intervalos para la funcion Me_Poppe. Se deberian utilizar 5
%intervalos, pero para no sobrecargar el programa de iteraciones se
%utilizan 2 intervalos.

pT=101325;

Cpw=3.99175;

%Cpw: calor especifico del agua (KJ/(kg·C)).

%CALCULO PROPIEDADES PSICROMETRICAS:
```

```
[Tdb, w, phi, h, Tdp, v, Twb]=Psychrometricsnew('Tdb',T_ext,'phi',HR);
```

%Para la funcion introducimos dos valores:

% 1.Tdb\_in: Temperatura de bulbo seco del aire a la entrada de la zona evaporativa.

% 2.phi\_in: Humedad relativa del aire a la entrada de la zona evaporativa.

%Si introducimos dos valores, la funcion aplicara un tercer valor por  
%si solo, esta sera la presion que se tomara la atmosferica.

%Los valores pueden variar. Para nuestro analisis se han  
%utilizado estas, habiendolas obtenido mediante mediciones con el  
%termohigrometro.

%La funcion Psychrometricsnew nos permite obtener las propiedades del  
%aire mediante el diagrama psicrometrico, en nuestro caso necesitamos  
%Twb para el metodo de Poppe.

%Twb: Temperatura de bulbo humedo del aire a la entrada de la zona evaporativa (C).

```
m_w=((Q_w/3600)*1033.3)/4;
```

%Dividimos entre 3600 para pasar a m<sup>3</sup>/s, y multiplicamos por la densidad  
%del agua para pasar a kg/s.

%Consideramos que el gasto masico sera el mismo para los cuatro paneles.

%m\_w: gasto masico de agua rociada (kg/s).

```
ma=-6.17512222*(m_w)^2+2.24691627*m_w-0.07653007;
```

```
Me_corr=0.70998846*(m_w/ma)^(-0.32548962);
```

%ma: gasto masico de aire (kg/s).

%Me\_corr: numero de Me para la teoria de Merkel.

%DESARROLLO ENFRIADORA:

```
%DeltaT_w=Q_cond/(m_w*4*Cpw);
```

%DeltaT\_w: diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del agua rociada.

```
%Q_cond=m_w*4*Cpw*(Tw1-Tw2);
```

%MODELO EER:

```
%EER=Q_evap/W_comp=Q_evap/(Q_cond-Q_evap)=Q_evap/(m_w*4*Cpw*(Tw1-Tw2)-Q_evap);
%EER=f(Two_evap,Tw2)=12.15-1.826*Two_evap+0.2108*Two_evap^2+0.1166*Tw2+0.004213*Tw2^2-
0.05686*Two_evap*Tw2;
```

%La funcion del EER respecto a Two\_evap y Tw2 la obtenemos con el  
%archivo Excel Modelizacion\_EER\_Enfriadora.

```
f=@(x)[Me_Poppe_pf(x(1)+273.15,x(2)+273.15,T_ext+273.15,Twb+273.15,ma,m_w,pT,N)-Me_corr;
(Q_evap/((Cpw*4*m_w*(x(1)-x(2)))-Q_evap))-(12.15-
1.826*Two_evap+0.2108*Two_evap^2+0.1166*x(2)+0.004213*x(2)^2-0.05686*Two_evap*x(2))];
```

```
%x(1)=Tw1; x(2)=Tw2
```

```
x0=[Tw1_x0,Tw2_x0];
```

```
x=fsolve(f,x0);
```

%Volvemos a realizar la resolucio del modelo mediante la funcion  
%fsolve, donde Tw1 y Tw2 seran las incognitas de un sistema de dos  
%ecuaciones formado por Me\_Poppe\_pf y la ecuacion del EER.

```
Tw1=x(1);
```

```
Tw2=x(2);
```

%Ya obtenidas Tw1 y Tw2, utilizamos la funcion Me\_Poppe para obtener  
%Tasalida, la temperatura del aire en la zona intermedia del panel  
%solar, que corresponde con T\_int del analisis del panel.

%CALCULO T\_int:

```
[Me_poppe_pf,Tasalida, HRsalida, w_salida] =
Me_Poppe_pf(Tw1+273.15,Tw2+273.15,T_ext+273.15,Twb+273.15,ma,m_w,pT,N);
```

```
HR_int=HRsalida;
```

```
T_int=Tasalida-273.15;
```

```
Me(1,1)=Me_corr;
```

```
Me(1,2)=Me_poppe_pf;
```

```
%Una vez calculado todas las temperaturas, comprobamos el numero de Me.  
%Si el valor con Poppe corresponde al de la teoria de Me. Podemos  
%afirmar que la pareja de valores de Tw es correcta.
```

```
axes(handles.axes1);
```

```
Me2=plot(Tw2,Me(1,2),'bo');
```

```
legend([Me1,Me2],'MeOriginal','MeNuevo');
```

```
%MODELIZAR:
```

```
%Con este boton, volveremos a modelizar el modelo para los nuevos valores  
%de rendimiento y x0 del fsolve, si se han cambiado.
```

```
function Modelizar_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
global Resultados;  
global a;  
global b;  
global Tw1_x0;  
global Tw2_x0;
```

```
global G_sol;  
global T_ext;  
global v_v;  
global Q_w;  
global HR;  
global Q_evap;  
global Two_evap;
```

```
G_sol=Resultados.G_sol;  
T_ext=Resultados.T_ext;  
v_v=Resultados.v_v;  
Q_w=Resultados.Q_w;  
HR=Resultados.HR;  
Q_evap=Resultados.Q_evap;  
Two_evap=Resultados.Two_evap;
```

```
%Guardamos todos los resultados del modelo para poder mostrarlos en cada  
%una de las subinterfaces:
```

```
global Rendimiento;  
global Wpv;  
global T;  
global T_int;  
global HR_int;  
global Tw1;  
global Tw2;  
global Twi_evap;  
global EER;  
global Q_cond;  
global W_comp;  
global Rendimiento_bomba;  
global W_bomba;  
global EER_solar;  
global EER_sistema;  
global Q;  
global Hm;  
global Text;
```

```
%DESARROLLO ENFRIADORA CALCULO T_INT, TW1 Y TW2:
```

```
N=2;
```

```
pT=101325;
```

```
Cpw=3.99175;
```

```
Twi_evap=12;
```

```
%CALCULO PROPIEDADES PSICROMETRICAS:
```

```
[Tdb, w, phi, h, Tdp, v, Twb]=Psychrometricsnew('Tdb',T_ext,'phi',HR);
```

```
m_w=((Q_w/3600)*1033.3)/4;
```

```

ma=-6.17512222*(m_w)^2+2.24691627*m_w-0.07653007;
Me_corr=0.70998846*(m_w/ma)^(-0.32548962);

f=@(x)[Me_Poppe_pf(x(1)+273.15,x(2)+273.15,T_ext+273.15,Twb+273.15,ma,m_w,pT,N)-Me_corr;
(Q_evap/((Cpw*4*m_w*(x(1)-x(2)))-Q_evap))-(12.15-
1.826*Two_evap+0.2108*Two_evap^2+0.1166*x(2)+0.004213*x(2)^2-0.05686*Two_evap*x(2))];

x0=[Tw1_x0,Tw2_x0];

x=fsolve(f,x0);

Tw1=x(1);
Tw2=x(2);

%CONDENSADOR Y COMPRESOR:

Q_cond=Cpw*m_w*4*(Tw1-Tw2);

%Q_cond: Potencia del condensador (kW).

W_comp=Q_cond-Q_evap;

%W_comp: Potencia del compresor (kW).

%EER ENFRIADORA:

EER=Q_evap/W_comp;

%Ya obtenidas Tw1 y Tw2, utilizamos la funcion Me_Poppe para obtener
%Tasalida, la temperatura del aire en la zona intermedia del panel
%solar, que corresponde con T_int del analisis del panel.

%CALCULO T_int:

```

```
[Me_poppe_pf,Tasalida, HRsalida, w_salida] =
Me_Poppe_pf(Tw1+273.15,Tw2+273.15,T_ext+273.15,Twb+273.15,ma,m_w,pT,N);

%w_salida la sacamos para calcular despues las propiedades del aire a la salida de la
%chimenea.

HR_int=HRsalida;
T_int=Tasalida-273.15;

Me(1,1)=Me_corr;
Me(1,2)=Me_poppe_pf;

%ANALISIS DE TEMPERATURAS EN EL PANEL:

A=1.623904;
x_cr=0.004;
x_c=0.0003;
x_t=0.001;
k_cr=1;
k_c=148;
k_t=0.08;

%x_cr,x_c,x_t: espesor del cristal, celula y tedlar (m).
%k_cr,k_c,k_t: coeficiente de conductividad del cristal, celula y tedlar (W/(m·K)).
%A: area (es la misma para el cristal, celula y tedlar) (m^2).
%T_ext: temperatura del aire ambiente (mediante el termohigrometro exterior) (C).
%T_int: temperatura del aire en la zona convectiva (mediante el termohigrometro interior) (C).

alpha_c=1; %Aproximacion muy cercana a la realidad.
tau_cr=0.9; %Aproximacion muy cercana a la realidad.

%alpha_c: absortividad de la celula respecto a la radiacion solar incedente.
%tau_cr: transmisividad del cristal frontal respecto a la radiacion solar incidente.

%Analisis termico panel fotovoltaico:

% Pared vidrio:      {[k_cr·(T_c-T_1)·A]/x_cr}=h_ext·A·(T_1-T_ext)
% Pared panel:      alpha_c·G_sol·tau_cr·A={ [k_cr·(T_c-T_1)·A]/x_cr } + { [k_c·(T_c-
T_t)·A]/x_c } + alpha_c·G_sol·A·RendimientoPanel
% Pared tedlar interior:  {[k_c·(T_c-T_t)·A]/x_c} = { [k_t·(T_t-T_2)·A]/x_t }
% Pared tedlar conveccion:  {[k_t·(T_t-T_2)·A]/x_t} = h_int·A·(T_2-T_int)

%Al ser todas las capas del mismo area, las eliminamos del analisis.
```

```
%Resolvemos el sistema de ecuaciones:
```

```
v_i=-207.32538·m_w^2+67.97833·m_w-2.38035;
```

```
%v_i: velocidad del aire en la zona interior de la celula (m/s).
```

```
h_ext=0.841·v_v+4.61;
```

```
h_int=1.97·v_i+10;
```

```
%h_ext: coeficiente de conveccion externa ([W/(m^2·C)]).
```

```
%h_int: coeficiente de conveccion interna ([W/(m^2·C)]).
```

```
%RESOLUCION SISTEMA DE ECUACIONES:
```

```
%Como en el analisis entra el rendimiento del panel, y no lo tenemos,  
%complementamos el analisis del panel con la formula del rendimiento  
%para tener un sistema de 5 ecuaciones con 5 incognitas.
```

```
%Constantes del rendimiento, obtenidas del fabricante:
```

```
Rendimiento_ref=0.157;
```

```
T_ref=25;
```

```
beta_ref=0.0044;
```

```
F=@(x)[h_ext·(x(1)-T_ext)-((k_cr·(x(2)-x(1)))/x_cr);  
alpha_c·G_sol·tau_cr-alpha_c·G_sol·x(5)-((k_cr·(x(2)-x(1)))/x_cr)-((k_c·(x(2)-x(3)))/x_c);  
((k_c·(x(2)-x(3)))/x_c)-((k_t·(x(3)-x(4)))/x_t);  
((k_t·(x(3)-x(4)))/x_t)-h_int·(x(4)-T_int);  
x(5)-Rendimiento_ref·(1-beta_ref·(x(2)-T_ref))];
```

```
x0=[0;0;0;0;0];
```

```
x=fsolve(F,x0);
```

```
T(1,1)=x(1);
```

```
T(1,2)=x(2);
```

```
T(1,3)=x(3);
```

```
T(1,4)=x(4);
```

```
%Generamos 5 vectores columna:
```

```
%T(1,1)=T_1: temperatura de la capa de cristal (C).
```

```
%T(1,2)=T_c: temperatura de la celula (C).
%T(1,3)=T_t: temperatura de la capa de tedlar (C).
%T(1,4)=T_2: temperatura del panel en la zona convectiva (C).

Rendimiento=x(5);

Wpv=Rendimiento*A*G_sol;

%Wpv: potencia del panel (W).

%CALCULO AIRE SALIDA CHIMENEA:

%Calculamos las propiedades psicrometricas del aire en la zona intermedia:

[Tdb, w, phi, h, Tdp, v, Twb]=Psychrometricsnew('Tdb',T_int,'w',w_salida);

%Para la funcion introducimos dos valores:
% 1.Tdb_in: Temperatura de bulbo seco del aire en la zona intermedia de la chimenea.
% 2.w_in: Humedad absoluta del aire en la zona intermedia de la chimenea (kgv/kg).

%h: entalpia del aire en la zona intermedia de la chimenea (J/kg).

Q_convec=h_int*A*(T(1,4)-T_int); %(W).

hext=h+Q_convec/ma; %(J/kg).

%Como tenemos un proceso de calentamiento sensible, wext es wint:

wext=w_salida; %(kgv/kg).

%Con wext y hext podemos calcular Tdb y phi con Pyschrometricsnew:

[Tdb, w, phi, h, Tdp, v, Twb]=Psychrometricsnew('h',hext,'w',wext);

Text=Tdb; %temperatura del aire a la salida de la chimenea (C).
HRext=phi; %humedad relativa del aire a la salida de la chimenea (%).

%CALCULO BOMBA HIDRAULICA:
```

%Curva característica instalacion (EPANET):

Hg=1; %altura geometrica desde el deposito a rociadores (m).

Q=Q\_w/3.6; %caudal de agua bombeada (l/s).

C\_t=88.16; %constante de perdidas obtenida mediante EPANET con los datos de la instalacion (m/(l/s)^2).

Hm=Hg+C\_t·Q^2; %altura manometrica (m).

%Curva característica de la bomba (Matlab): Hm1=45.05·(1-(Q/1.308)^2);

%Curva rendimiento de la bomba (Matlab): Rendimiento1=3.4·[(Q/1.308)-(Q/1.308)^2];

%Curva característica de la bomba con variador de frecuencia: Hm2=(45.05·(1-(Q·k/1.308)^2))/k^2;

%Curva rendimiento de la bomba con variador de frecuencia: Rendimiento2=3.4·((Q·k/1.308)-(Q·k/1.308)^2);

%k=Omega1/Omega2;

F=@(x)((45.05·(1-(Q·x/1.308)^2))/x^2)-Hm;

k=fsolve(F,1);

%Calculo potencia consumida por la bomba:

%Rendimiento1=(p·g·Q1·Hm1)/(Weje1);

%3.4·[(Q·k/1.308)-(Q·k/1.308)^2]=(p·g·Q2·k^3·Hm)/(Weje2·k^3);

Rendimiento\_bomba=a·((Q·k/b)-(Q·k/b)^2);

W\_bomba=(1033.3·9.8·(Q\_w/3600)·k^3·Hm)/(Rendimiento\_bomba·k^3·1000);

%EER\_SISTEMA Y EER\_SOLAR:

```
EER_sistema=Q_evap/(W_comp+W_bomba); %Potencia frigorifica entre el consumo del sistema.
```

```
EER_solar=EER_sistema·Rendimiento; %Se tiene en cuenta la potencia generada por los paneles.
```

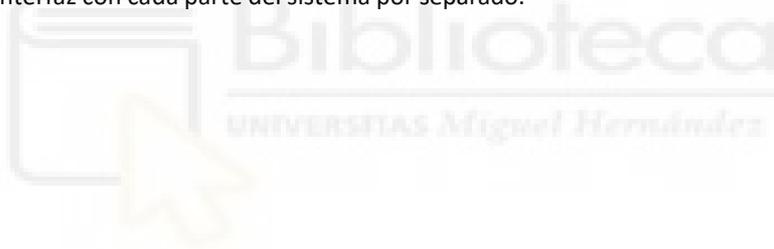
```
%VALORES DE SALIDA:
```

```
%El eer_solar y el eer_sistema los mostramos en la interfaz Otros:
```

```
set(handles.EER_Solar,'String',EER_solar);
```

```
set(handles.EER_Sistema,'String',EER_sistema);
```

```
%Una vez calculado todo el modelo, generamos el resto de Push buttons para  
%generar otra interfaz con cada parte del sistema por separado.
```



```
%PANEL SOLAR:
```

```
function Panel_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
%Comenzamos llamando a los resultados del modelo que queremos mostrar en esta interfaz:
```

```
global Rendimiento;  
global Wpv;  
global T;  
global T_int;  
global HR_int;  
global Tw1;  
global Tw2;  
global Text;  
global HText;
```

```
%Introducimos los valores dentro de la estructura handles para poder pasar los valores a  
%otra interfaz:
```

```
handles.Rendimiento=Rendimiento;
```

```
handles.Wpv=Wpv;
```

```
handles.T=T;
```

```
handles.T_int=T_int;
```

```
handles.HR_int=HR_int;
```

```
handles.Tw1=Tw1;
```

```
handles.Tw2=Tw2;
```

```
handles.Text=Text;
```

```
handles.HRext=HRext;
```

```
guidata(hObject, handles);
```

```
PanelSolarR
```

```
%Introduciendo el nombre de la siguiente interfaz nos permite, al clickar en la interfaz  
%el boton, aparecer en la interfaz PanelSolarR.
```

```
%BOMBA CIRCUITO DE CALOR:
```

```
function Bomba_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
%Comenzamos llamando a los resultados del modelo que queremos mostrar en esta interfaz:
```

```
global W_bomba;  
global Rendimiento_bomba;  
global Q;  
global Hm;
```

```
%Introducimos los valores dentro de la estructura handles para poder pasar los valores a  
%otra interfaz:
```

```
handles.W_bomba=W_bomba;
```

```
handles.Rendimiento_bomba=Rendimiento_bomba;

handles.Q=Q;

handles.Hm=Hm;

guidata(hObject, handles);

Bomba_calienteR

%Introduciendo el nombre de la siguiente interfaz nos permite, al clickar en la interfaz
%el boton, aparecer en la interfaz Bomba_calienteR.

%ENFRIADORA:

function Enfriadora_Callback(hObject, eventdata, handles)

%Comenzamos llamando a los resultados del modelo que queremos mostrar en esta interfaz:

global W_comp;
global Q_cond;
global Tw1;
global Tw2;
global Two_evap;
global Twi_evap;
global EER;
global Q_evap;

%Introducimos los valores dentro de la estructura handles para poder pasar los valores a
%otra interfaz:

handles.W_comp=W_comp;

handles.Q_cond=Q_cond;

handles.Tw1=Tw1;

handles.Tw2=Tw2;

handles.Two_evap=Two_evap;
```

```
handles.Twi_evap=Twi_evap;
```

```
handles.EER=EER;
```

```
handles.Q_evap=Q_evap;
```

```
guidata(hObject, handles);
```

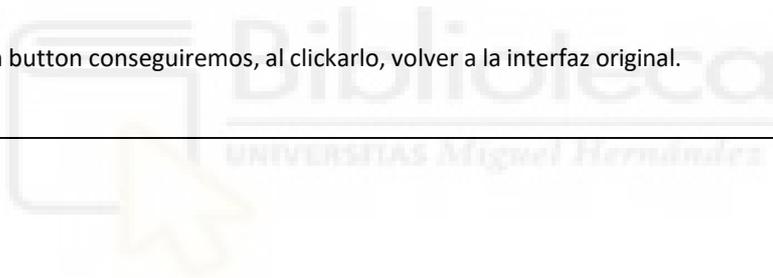
EnfriadoraR

%Introduciendo el nombre de la siguiente interfaz nos permite, al clickar en la interfaz  
%el boton, aparecer en la interfaz EnfriadoraR.

```
function ChimeneaSolar_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

ChimeneaSolar

%Con este Push button conseguiremos, al clickarlo, volver a la interfaz original.



## ·PanelSolarR:

-A continuación, se van a mostrar los códigos de las ventanas de la interfaz, de los subsistemas; todo esto desde la ventana 'Otros'.

```
function varargout = PanelSolarR(varargin)

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @PanelSolarR_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn', @PanelSolarR_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn', [], ...
    'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function PanelSolarR_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

global Resultados;

%CODIGO FONDO DE PANTALLA:

axes(handles.axes1); %Definimos axes1 como fondo de pantalla. Axes1 debe ocupar toda la ventana grafica.
[x,map]=imread('FondoPanelSolar.jpg'); %Leemos la imagen que queremos como fondo.
image(x) %Situamos la imagen como fondo de pantalla.
colormap(map); %Mostramos los colores de la imagen.
axis off %Eliminamos los ejes de axes1, para que sea un verdadero fondo de pantalla.
hold on %Mantenemos el fondo de pantalla.

axes(handles.axes2); %Definimos axes1 como fondo de pantalla. Axes1 debe ocupar toda la ventana grafica.
[x,map]=imread('FondoTemperaturasPanel.jpg'); %Leemos la imagen que queremos como fondo.
image(x) %Situamos la imagen como fondo de pantalla.
colormap(map); %Mostramos los colores de la imagen.
axis off %Eliminamos los ejes de axes1, para que sea un verdadero fondo de pantalla.
hold on %Mantenemos el fondo de pantalla.
```

```
%Llamamos a los resultados guardados en la nueva modelizacion:

Resultados=guidata(Otros);

%Una vez obtenido los resultados del modelo, generamos el codigo que
%situara los resultados en los Static Text de la interfaz:

set(handles.Rendimiento,'String',Resultados.Rendimiento);

set(handles.Wpv,'String',Resultados.Wpv);

set(handles.T_int,'String',Resultados.T_int);

set(handles.Tw1,'String',Resultados.Tw1);

set(handles.Tw2,'String',Resultados.Tw2);

set(handles.HR_int,'String',Resultados.HR_int);

set(handles.Text,'String',Resultados.Text);

set(handles.HRext,'String', Resultados.HRext);

set(handles.T1,'String',Resultados.T(1));
set(handles.Tc,'String',Resultados.T(2));
set(handles.Tt,'String',Resultados.T(3));
set(handles.T2,'String',Resultados.T(4));

handles.output = hObject;

guidata(hObject, handles);

function varargout = PanelSolarR_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

varargout{1} = handles.output;

function ChimeneaSolar_Callback(hObject, eventdata, handles)

ChimeneaSolar

%Con este Push button conseguiremos, al clickarlo, volver a la interfaz original.

function Otros_Callback(hObject, eventdata, handles)

Otros

%Con este Push button conseguiremos, al clickarlo, volver a la interfaz Otros.
```

## ·Bomba\_calienteR:

```
function varargout = Bomba_calienteR(varargin)

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @Bomba_calienteR_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn', @Bomba_calienteR_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn', [], ...
    'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function Bomba_calienteR_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

%CODIGO FONDO DE PANTALLA:

axes(handles.axes1); %Definimos axes1 como fondo de pantalla. Axes1 debe ocupar
toda la ventana grafica.
[x,map]=imread('FondoBombaCaliente1.jpg'); %Leemos la imagen que queremos
como fondo.
image(x) %Situamos la imagen como fondo de pantalla.
colormap(map); %Mostramos los colores de la imagen.
axis off %Eliminamos los ejes de axes1, para que sea un verdadero fondo de
pantalla.
hold on %Mantenemos el fondo de pantalla.

axes(handles.axes2);
Imagen=imread('FondoBombaCaliente2.jpg');
imshow(Imagen);
```

```
%Llamamos a los resultados guardados en la nueva modelizacion:

Resultados=guidata(Otros);

%Una vez obtenido los resultados del modelo, generamos el codigo que
%situara los resultados en los Static Text de la interfaz:

set(handles.Rendimiento_bomba,'String',Resultados.Rendimiento_bomba);

set(handles.W_bomba,'String',Resultados.W_bomba);

set(handles.Q,'String',Resultados.Q);

set(handles.Hm,'String',Resultados.Hm);

handles.output = hObject;

guidata(hObject, handles);

function varargout = Bomba_calienteR_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

varargout{1} = handles.output;

function ChimeneaSolar_Callback(hObject, eventdata, handles)

ChimeneaSolar

%Con este Push button conseguiremos, al clickarlo, volver a la interfaz original.

function Otros_Callback(hObject, eventdata, handles)

Otros

%Con este Push button conseguiremos, al clickarlo, volver a la interfaz Otros.
```

## ·EnfriadoraR:

```
function varargout = EnfriadoraR(varargin)

gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',    mfilename, ...
    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @EnfriadoraR_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn', @EnfriadoraR_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn', [], ...
    'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end

function EnfriadoraR_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

%CODIGO FONDO DE PANTALLA:

imdata=imread('FondoEnfriadora.jpg');

imshow(imdata);

%Llamamos a los resultados guardados en la nueva modelizacion:

Resultados=guidata(Otros);

%Una vez obtenido los resultados del modelo, generamos el codigo que
%situara los resultados en los Static Text de la interfaz:

set(handles.W_comp,'String',Resultados.W_comp);

set(handles.Q_cond,'String',Resultados.Q_cond);

set(handles.Tw1,'String',Resultados.Tw1);
```

```
set(handles.Tw2,'String',Resultados.Tw2);

set(handles.Two_evap,'String',Resultados.Two_evap);

set(handles.Twi_evap,'String',Resultados.Twi_evap);

set(handles.EER,'String',Resultados.EER);

set(handles.Q_evap,'String',Resultados.Q_evap);

handles.output = hObject;

guidata(hObject, handles);

function varargout = EnfriadoraR_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

varargout{1} = handles.output;

function ChimeneaSolar_Callback(hObject, eventdata, handles)

ChimeneaSolar

%Con este Push button conseguiremos, al clickarlo, volver a la interfaz original.

function Otros_Callback(hObject, eventdata, handles)

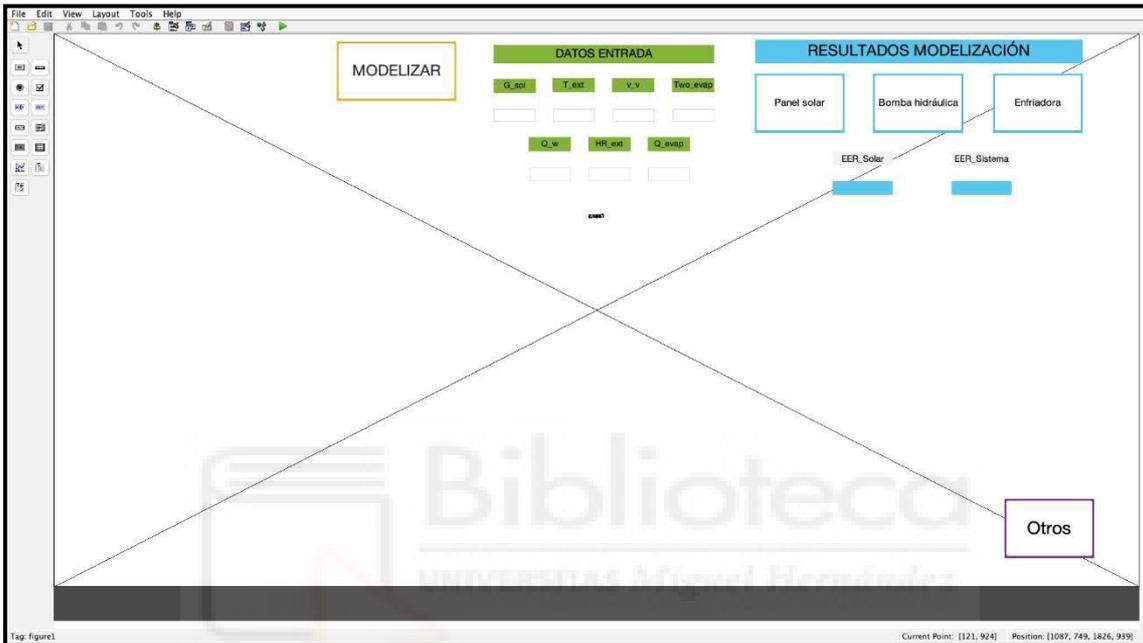
Otros

%Con este Push button conseguiremos, al clickarlo, volver a la interfaz Otros.
```

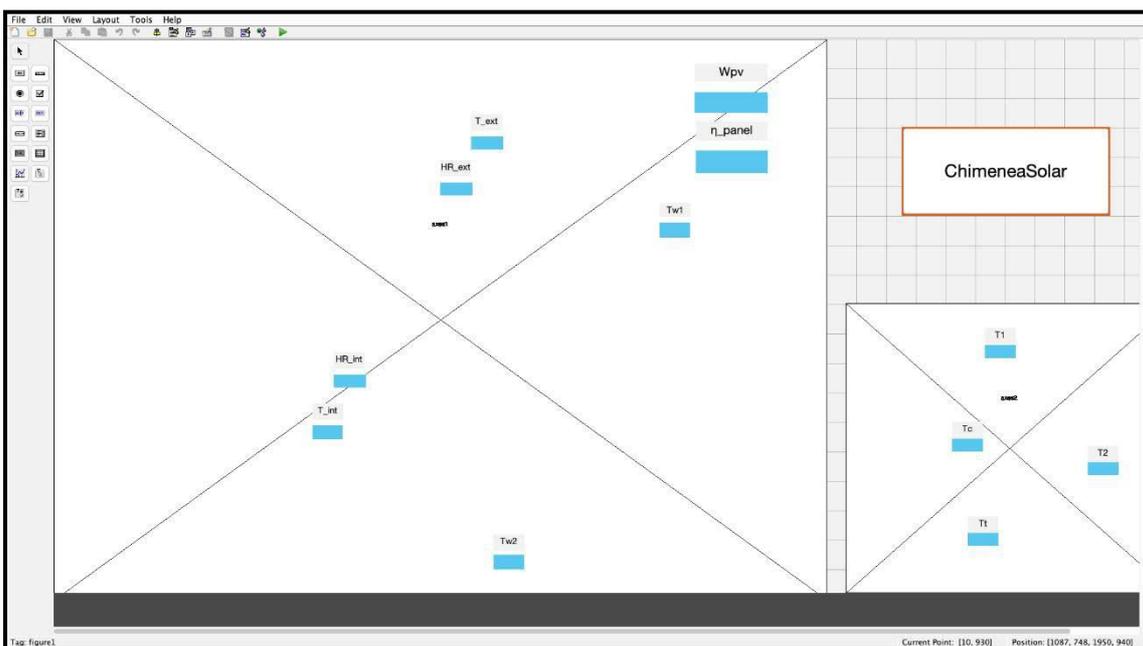
## ANEXO III. MATLAB guide

-Además del código que hemos mostrado para poder obtener la interfaz gráfica de la instalación, se ha de crear una interfaz donde introducimos la estructura de la ventana final, es decir, los botones a clicar, los cuadros donde introducimos los datos de entrada, etc.

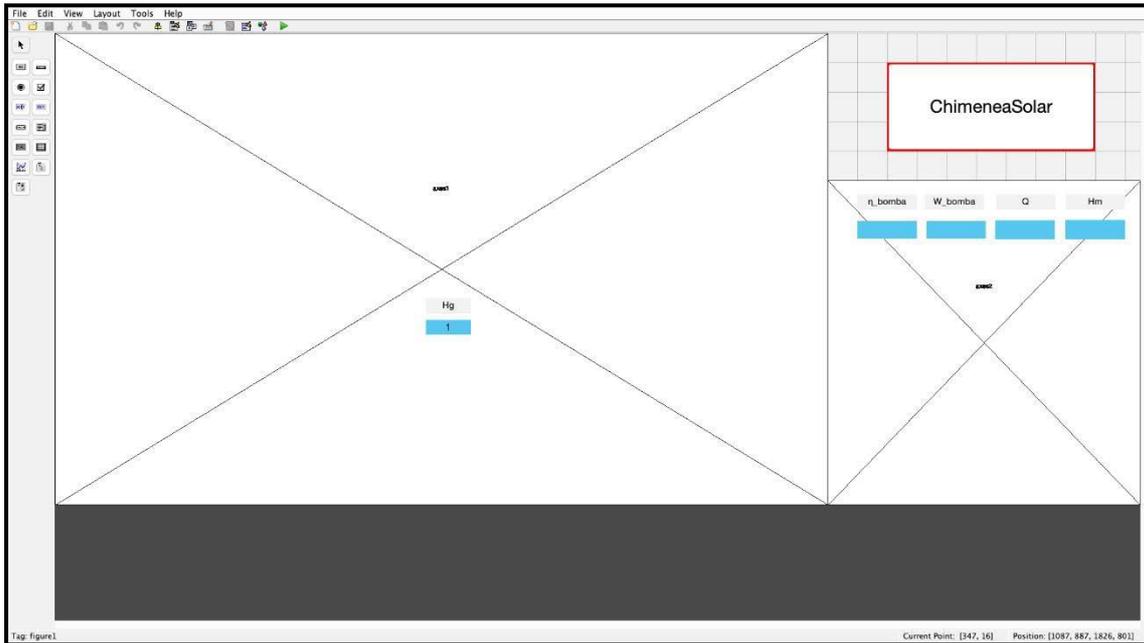
### ·ChimeneaSolar:



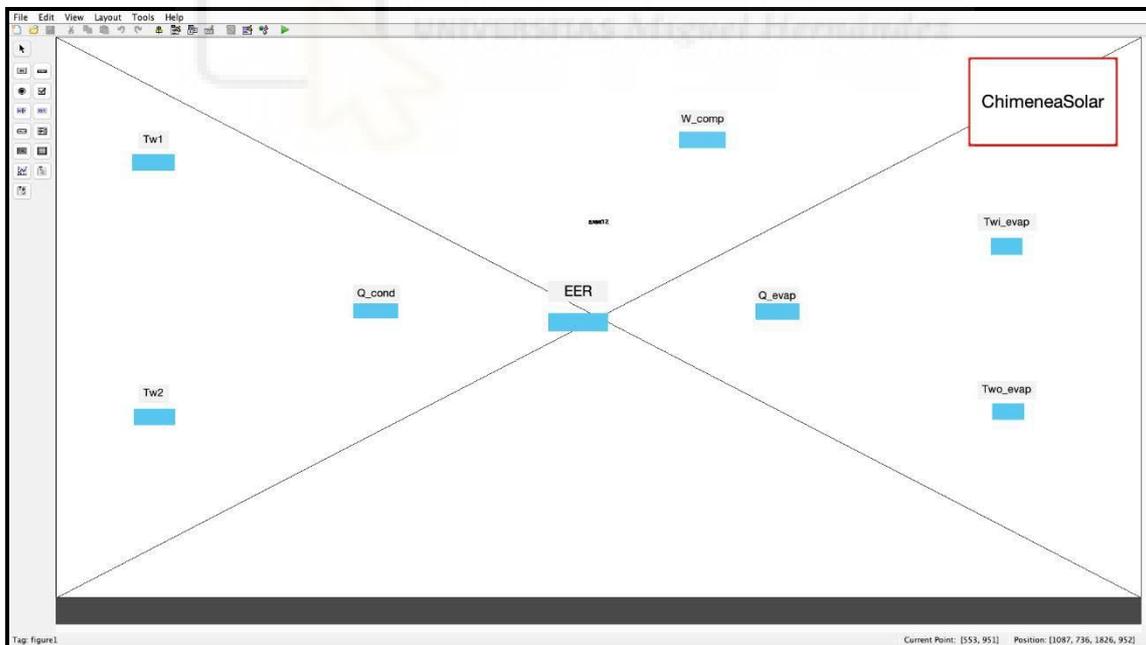
### ·PanelSolar:



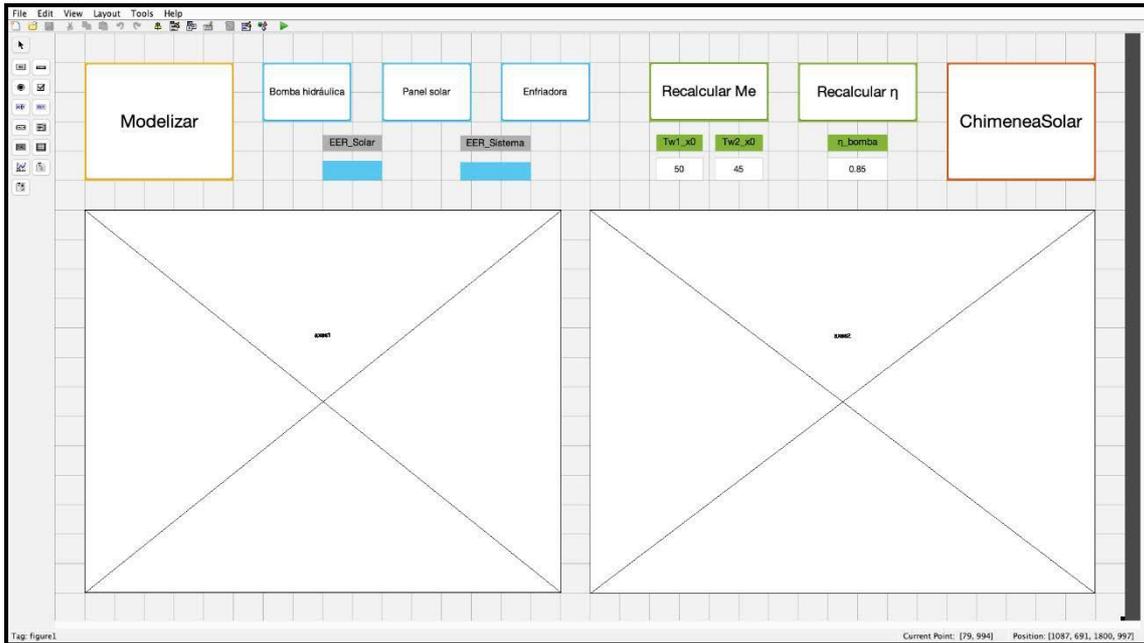
•Bomba\_caliente:



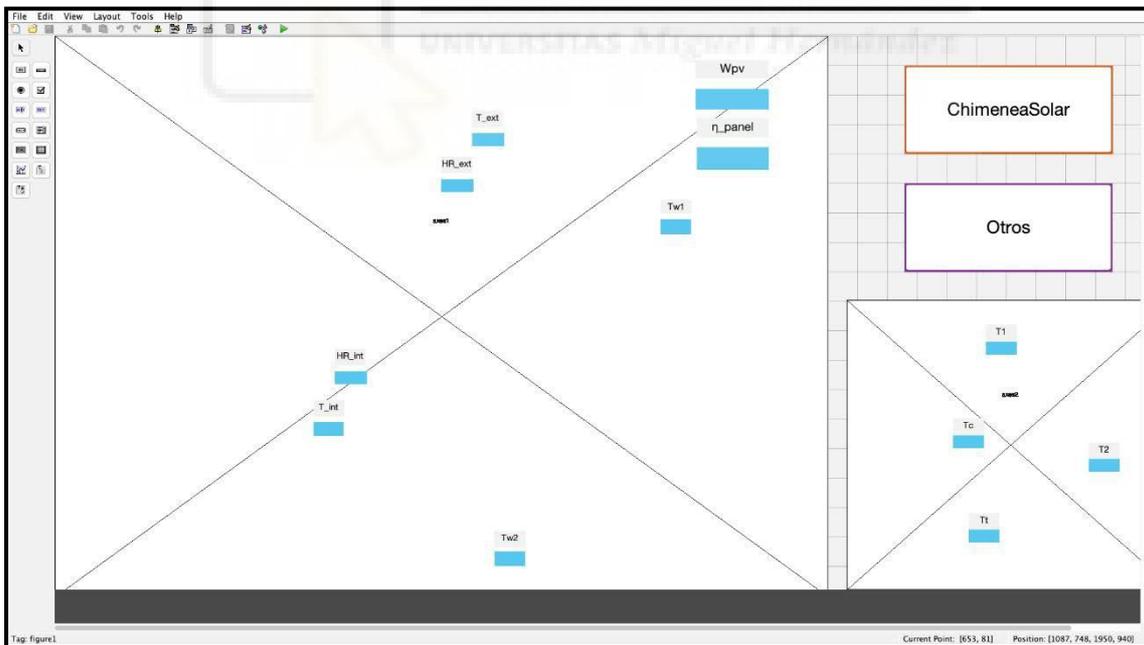
•Enfriadora:



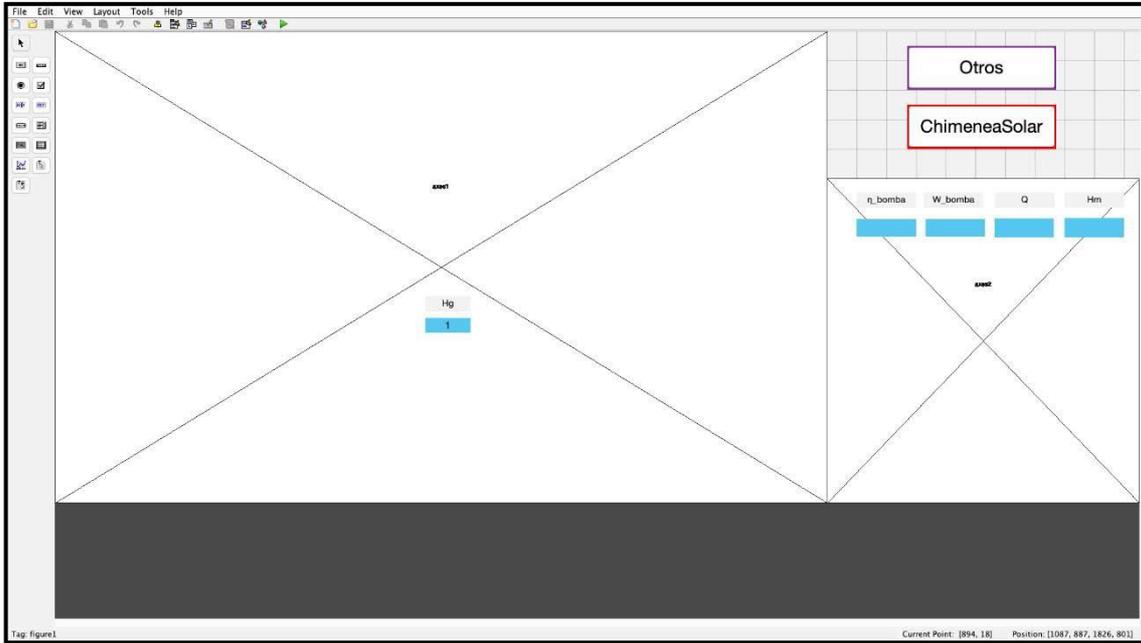
·Otros:



·PanelSolarR:



### •Bomba\_calienteR:



### •EnfriadoraR:

