



**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

**UNIVERSIDAD DE VALLADOLID**

**ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES**

**Grado en Ingeniería eléctrica**

# **Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta**

**Autor:**

**Diego Pellón, Darío**

**Tutor:**

**Tejero González, Ana  
Departamento de Ingeniería  
Energética y Fluidomecánica**

**Valladolid, Junio 2020.**



## **RESUMEN**

El presente trabajo hace un ligero recorrido por las tecnologías de desalación más conocidas, con el fin de introducir y justificar el interés por la destilación solar en situaciones de aislamiento, aridez y elevada irradiancia solar.

Se hace uso de la herramienta Matlab Simulink para realizar una simulación dinámica del comportamiento de un destilador solar de tipo caseta, para posteriormente analizar los resultados y proponer una mejora basada en el precalentamiento del agua de entrada empleando el calor latente del agua destilada al condensarse. Así mismo, se realiza un escueto análisis del efecto de diferentes parámetros y potenciales modificaciones sobre la producción.

## **ABSTRACT**

Most common desalination systems are briefly overviewed with the aim of introducing and justifying the use of solar stills in isolated, arid locations with high irradiance.

Matlab Simulink is used to conduct a dynamic simulation of a shed type solar still, with the results being discussed and a proposal for improvement being made; which is based on the inlet water preheating using the latent heat of water being condensed. A brief analysis is also made on the impact of some parameters and prospective changes on output.



Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta

***PALABRAS CLAVE***

Simulación, Destilador Solar, Matlab Simulink, Ecuaciones Diferenciales, Desalación

***KEYWORDS***

Modeling, Solar still, Matlab Simulink, Differential Equations, Desalination



## ÍNDICE GENERAL

<b>1. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS</b> .....	15
1.1 JUSTIFICACIÓN .....	16
1.2 OBJETIVOS .....	17
<b>2. ESTADO DE LA TÉCNICA</b> .....	19
2.1. DESTILACIÓN SÚBITA DE EFECTO FLASH (MSF).....	21
2.10. INTERCAMBIO IÓNICO .....	29
2.2. DESTILACIÓN MULTIEFECTO (MED) .....	22
2.3. COMPRESIÓN DE VAPOR (TÉRMICA Y MECÁNICA) .....	23
2.4. DESTILACIÓN SOLAR.....	24
2.5. CONGELACIÓN .....	25
2.6. FORMACIÓN DE HIDRATOS.....	25
2.7. DESTILACIÓN CON MEMBRANAS.....	25
2.8. ÓSMOSIS INVERSA .....	26
2.9. ELECTRODIÁLISIS .....	28
<b>3. CÁLCULOS Y SIMULACIÓN</b> .....	31
3.1. INTRODUCCIÓN.....	32
3.2. EMPLAZAMIENTO Y CARACTERÍSTICAS.....	34
3.3. DATOS DE ENTRADA A LA SIMULACIÓN.....	36
3.4. CÁLCULOS.....	38
3.4.A. CONSIDERACIONES Y SUPOSICIONES PREVIAS.....	39
3.4.B. PARÁMETROS Y VARIABLES.....	41
3.4.C. CÁLCULOS INTERCAMBIOS TÉRMICOS SIN TRANSMISIÓN DE MASA .....	45
3.4.D. CÁLCULOS INTERCAMBIOS TÉRMICOS CON TRANSMISIÓN DE MASA.....	63
3.5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS .....	72
3.6. EFECTO DE DIFERENTES PARÁMETROS SOBRE LA PRODUCCIÓN DE DESTILADO .....	77
3.6.A. REDUCCIÓN DEL VIENTO QUE ALCANZA EL DESTILADOR .....	78
3.6.B. REFRIGERACIÓN DEL VIDRIO, MANTENIENDO TV CONSTANTE E IGUAL A 30°C.....	79
3.6.C. REDUCCIÓN DE LA PURGA .....	81
3.6.D. TRATAMIENTO SUPERFICIAL DEL VIDRIO .....	83
3.6.E. PRECALENTAMIENTO DEL AGUA DE ENTRADA HASTA 32°C .....	84
3.6.F. APORTE DE CALOR MEDIANTE INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA Y RESISTENCIAS .....	85
3.6.G. PRECALENTAMIENTO DEL AGUA DE ENTRADA HASTA TV .....	86
3.6.H. RESUMEN DE LOS FENÓMENOS DE POSIBLE APLICACIÓN .....	87
<b>4. PROPUESTA DE MEJORA Y ANÁLISIS</b> .....	88
<b>5. CONCLUSIONES</b> .....	96
<b>6. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	98

## **ÍNDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 2.1. Métodos de desalación existentes en el mercado. Fuente: (4).....</b>	<b>14</b>
<b>Tabla 3.1 Resumen de los fenómenos y efectos.....</b>	<b>79</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Esquema de una planta de destilación súbita por efecto flash. Fuente: (4).	13
Figura 2.2 Esquema de una planta MED. Fuente: (4).	14
Figura 2.3 Esquema de un proceso de compresión mecánica de vapor. Fuente: (5).	15
Figura 2.4 Esquema de un sistema de destilación solar. Fuente: Elaboración propia.	16
Figura 2.5 Esquema de destilación con membranas con separación de aire. Fuente: (6).	18
Figura 2.6 Esquemas de los fenómenos de ósmosis natural y ósmosis inversa. Fuente: (5).	18
Figura 2.7 Esquemas de desalación por ósmosis inversa con un único módulo. Fuente: (4).	19
Figura 2.8 Esquemas de desalación por electrodiálisis. Fuente: (4).	20
Figura 3.1 Esquema de medios del destilador. Fuente: Elaboración propia.	23
Figura 3.2 Dimensiones del destilador. Fuente: Elaboración propia.	24
Figura 3.3 Irradiación mensual a 23°. Fuente: (10).	26
Figura 3.4 Incidencia de la sequía. Julio 2019. Fuente (11).	26
Figura 3.5 Evolución de la irradiancia solar para una inclinación de 23°. Fuente: Elaboración propia.	27
Figura 3.6: Evolución de la temperatura. Fuente: Elaboración propia.	28
Figura 3.7 Evolución de la velocidad del viento. Fuente: Elaboración propia.	28
Figura 3.8 Evolución de la humedad relativa. Fuente: Elaboración propia.	28
Figura 3.9 Flujos de calor vidrio y ambiente. Fuente: Elaboración propia.	36
Figura 3.10 Simulink 1. Fuente: Elaboración propia.	37
Figura 3.11 Simulink 2. Fuente: Elaboración propia.	37
Figura 3.12 Simulink 3. Fuente: Elaboración propia.	37
Figura 3.13 Simulink 4. Fuente: Elaboración propia.	38
Figura 3.14 Evolución de la temperatura del punto de rocío. Fuente: Elaboración propia.	38
Figura 3.15 Evolución de la temperatura efectiva del cielo. Fuente: Elaboración propia.	39
Figura 3.16 Evolución del número de Reynolds. Fuente: Elaboración propia.	39
Figura 3.17 Evolución del coeficiente de convección forzada. Fuente: Elaboración propia.	40
Figura 3.18 Simulink 5. Fuente: Elaboración propia.	40
Figura 3.19 Flujo de calor por convección natural vidrio y aire interior	41
Figura 3.20 Simulink 6. Fuente: Elaboración propia.	42
Figura 3.21 Simulink 7. Fuente: Elaboración propia.	42
Figura 3.22 Simulink 8. Fuente: Elaboración propia.	42
Figura 3.23 Simulink 9. Fuente: Elaboración propia.	43
Figura 3.24 Simulink 10. Fuente: Elaboración propia.	43
Figura 3.25 Simulink 11. Fuente: Elaboración propia.	43
Figura 3.25 Simulink 12. Fuente: Elaboración propia.	44
Figura 3.26 Simulink 13. Fuente: Elaboración propia.	44
Figura 3.27 Simulink 14. Fuente: Elaboración propia.	45
Figura 3.28 Flujo de calor por convección natural agua y aire interior. Fuente: Elaboración propia.	46
Figura 3.29 Simulink 15. Fuente: Elaboración propia.	46
Figura 3.30 Simulink 16. Fuente: Elaboración propia.	47
Figura 3.31 Simulink 17. Fuente: Elaboración propia.	47
Figura 3.32 Flujos de calor radiación solar incidente agua 1. Fuente: Elaboración propia.	48
Figura 3.33 Flujos de calor radiación solar reflejada agua. Fuente: Elaboración propia.	48
Figura 3.34 Flujos de calor radiación solar incidente agua 2. Fuente: Elaboración propia.	49
Figura 3.35 Simulink 18. Fuente: Elaboración propia.	49
Figura 3.36 Flujos de calor radiación térmica agua y vidrio. Fuente: Elaboración propia.	50
Figura 3.37 Simulink 19. Fuente: Elaboración propia.	50
Figura 3.38 Flujo de calor convección natural agua y placa absorbadora. Fuente: Elaboración propia.	51
Figura 3.39 Simulink 20. Fuente: Elaboración propia.	51

Figura 3.40 Simulink 21. Fuente: Elaboración propia. ....	52
Figura 3.41 Flujo de calor radiación solar incidente placa absorbadora. Fuente: Elaboración propia. ...	53
Figura 3.42 Simulink 22. Fuente: Elaboración propia. ....	53
Figura 3.43 Esquema destilador completo. Fuente: Elaboración propia. ....	54
Figura 3.44 Esquema condensación. Fuente: Elaboración propia. ....	54
Figura 3.45 Simulink 23. Fuente: Elaboración propia. ....	55
Figura 3.46 Simulink 24. Fuente: Elaboración propia. ....	56
Figura 3.47 Flujos de calor de evaporación y condensación. Fuente: Elaboración propia. ....	56
Figura 3.48 Simulink 25. Fuente: Elaboración propia. ....	57
Figura 3.49 Simulink 26. Fuente: Elaboración propia. ....	57
Figura 3.50 Simulink 27. Fuente: Elaboración propia. ....	57
Figura 3.51 Simulink 28. Fuente: Elaboración propia. ....	58
Figura 3.52 Esquema caudal entrante, purga y destilado. Fuente: Elaboración propia. ....	58
Figura 3.52 Simulink 29. Fuente: Elaboración propia. ....	58
Figura 3.53 Flujo de calor calentamiento agua entrante. Fuente: Elaboración propia. ....	59
Figura 3.54 Simulink 30. Fuente: Elaboración propia. ....	59
Figura 3.55 Flujos de calor por variación de temperatura del vapor. Fuente: Elaboración propia. ....	60
Figura 3.56 Simulink 31. Fuente: Elaboración propia. ....	60
Figura 3.57 Simulink 32. Fuente: Elaboración propia. ....	61
Figura 3.58 Esquema de conservación de la energía agua. Fuente: Elaboración propia. ....	61
Figura 3.59 Simulink 33. Fuente: Elaboración propia. ....	62
Figura 3.60 Temperaturas alcanzadas por los elementos del destilador. Fuente: Elaboración propia. .	63
Figura 3.61 Producción de agua destilada acumulada. Fuente: Elaboración propia. ....	64
Figura 3.62 Producción de agua destilada por segundo. Fuente: Elaboración propia. ....	64
Figura 3.63 Salinidad del agua en el destilador. Fuente: Elaboración propia. ....	65
Figura 3.64 Flujos de calor del vidrio. Fuente: Elaboración propia. ....	65
Figura 3.65 Flujos de calor del aire. Fuente: Elaboración propia. ....	66
Figura 3.66 Flujos de calor del agua. Fuente: Elaboración propia. ....	66
Figura 3.67 Flujo de calor del aluminio. Fuente: Elaboración propia. ....	67
Figura 3.68 Producción de agua destilada acumulada. Fuente: Elaboración propia. ....	68
Figura 3.69 Temperaturas alcanzadas por los elementos del destilador. Fuente: Elaboración propia. .	68
Figura 3.70 Refrigeración del vidrio. Fuente: Elaboración propia. ....	69
Figura 3.71 Producción de agua destilada acumulada. Fuente: Elaboración propia. ....	69
Figura 3.72 Temperaturas alcanzadas por los elementos del destilador. Fuente: Elaboración propia. .	70
Figura 3.73 Producción de agua destilada por segundo. Fuente: Elaboración propia. ....	70
Figura 3.74 Producción de agua destilada acumulada. Fuente: Elaboración propia. ....	71
Figura 3.75 Temperaturas alcanzadas por los elementos del destilador. Fuente: Elaboración propia. .	71
Figura 3.76 Salinidad del agua en el destilador. Fuente: Elaboración propia. ....	72
Figura 3.77 Producción de agua destilada acumulada. Fuente: Elaboración propia. ....	73
Figura 3.78 Temperaturas alcanzadas por los elementos del destilador. Fuente: Elaboración propia. .	73
Figura 3.79 Precalentamiento del agua de entrada. Fuente: Elaboración propia. ....	74
Figura 3.80 Producción de agua destilada acumulada. Fuente: Elaboración propia. ....	74
Figura 3.81 Temperaturas alcanzadas por los elementos del destilador. Fuente: Elaboración propia. .	75
Figura 3.82 Calentamiento del agua mediante instalación fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia. ...	75
Figura 3.83 Precalentamiento del agua de entrada. Fuente: Elaboración propia. ....	76
Figura 3.84 Producción de agua destilada acumulada. Fuente: Elaboración propia. ....	76
Figura 3.85 Temperaturas alcanzadas por los elementos del destilador. Fuente: Elaboración propia. .	76
Figura 4.1 Esquema propuesta de mejora. Fuente: Elaboración propia. ....	79
Figura 4.10 Flujos de calor del agua interior. Fuente: Elaboración propia. ....	83
Figura 4.11 Flujos de calor de la placa absorbadora. Fuente: Elaboración propia. ....	84
Figura 4.12 Salinidad del agua en el destilador. Fuente: Elaboración propia. ....	84
Figura 4.13 Producción de agua destilada por segundo. Fuente: Elaboración propia. ....	85

<b>Figura 4.2 Simulink 34. Fuente: Elaboración propia. ....</b>	<b>80</b>
<b>Figura 4.3 Flujos de calor calentamiento agua de entrada. Fuente: Elaboración propia. ....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 4.4 Simulink 35. Fuente: Elaboración propia. ....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 4.5 Simulink 36. Fuente: Elaboración propia. ....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 4.6 Producción de agua destilada acumulada. Fuente: Elaboración propia. ....</b>	<b>82</b>
<b>Figura 4.7 Temperaturas alcanzadas por los elementos del destilador. Fuente: Elaboración propia. ...</b>	<b>82</b>
<b>Figura 4.8 Flujos de calor del conjunto vidrio-agua. Fuente: Elaboración propia. ....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 4.9 Flujos de calor del aire interior. Fuente: Elaboración propia. ....</b>	<b>83</b>





---

**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

# **JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS**

## 1. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS

### 1.1 JUSTIFICACIÓN

El desarrollo del siguiente TFG queda contextualizado en un momento en que la eficiencia energética y en el consumo de agua están cobrando cada vez más importancia, debido en gran medida a los efectos que ya empiezan a ser palpables del llamado cambio climático.

La desertización, contaminación del aire, suelo y aguas, y la escasez de agua son fenómenos que están cobrando más y más importancia, afectando al medio ambiente, la economía y la calidad de vida de las personas. Debido a ello, la inversión en energías renovables, así como los cambios legislativos en favor de la reducción de emisiones contaminantes están viviendo una evolución sin precedentes.

A pesar de lo anterior, los patrones climáticos ya se están viendo alterados, y la falta de precipitaciones aumenta el estrés hídrico sobre multitud de zonas, incluidos muchos lugares de la geografía española, donde no solo debe considerarse el agua necesario para las necesidades humanas, sino otra clase de consumos, como son el agrario y el industrial, que suponiendo una gran parte de las mismas, son así mismo sustento de la economía en multitud de comarcas.

Ante esta situación de escasez de agua dulce en algunas regiones, y las dificultades de realizar grandes obras hidráulicas como grandes trasvases o embalses interanuales por motivos no solamente técnicos y económicos sino también políticos, las desaladoras constituyen una solución ampliamente adoptada en nuestro país. Generalmente se trata de grandes centrales desaladoras que emplean el método de la ósmosis inversa, requiriendo enormes consumos energéticos y generando grandes cantidades de emisiones contaminantes fuera de planta, debido a la composición actual del mix energético español.

El segundo problema de estas grandes plantas es el tratarse de soluciones a gran escala, que requiere obras hidráulicas para llevar el agua desalada hasta el consumidor, lo cual en algunos casos puede resultar económicamente inviable, realizándose ese suministro mediante camiones cisterna, o incluso extrayendo agua de pozos que están cerca de su agotamiento o de salinizarse en exceso debido a la retirada excesiva de agua a lo largo del tiempo. Se antoja por tanto conveniente la existencia de sistemas de desalación a pequeña escala y cuyo mantenimiento y operación sean sencillos, de forma que pueda ser realizado en su mayoría por el propio usuario. Es en estos casos cuando los destiladores solares pueden resultar de especial interés, además de contar con la gran ventaja de no realizar emisiones de gases contaminantes durante su operación. Otra de sus grandes ventajas reside en su sencillez, lo cual le otorga una gran velocidad de instalación y facilidad de mantenimiento.

## **1.2 OBJETIVOS**

La realización del trabajo pretende analizar en profundidad los fenómenos que suceden durante la operación de un destilador solar de tipo caseta, haciendo uso de una simulación dinámica, para así evaluar la influencia de ciertos parámetros sobre su producción y proponer de acuerdo a ello una mejora plausible que no suponga una complicación excesiva del sistema.

Se requerirá para su realización numerosas aptitudes adquiridas durante el grado de Ingeniería Eléctrica, tal y como conocimientos de termodinámica, técnica y transmisión de calor, tecnología ambiental y de procesos, informática industrial aplicada, conversión termohidráulica de energías, regulación automática en sistemas eléctricos y energías renovables, entre otras.

Así mismo, la comprensión de los fenómenos físicos involucrados mediante su simulación es un procedimiento de gran valor en cualquier ámbito de la ingeniería, y en especial en el ámbito de la generación eléctrica, permitiendo realizar un control o diseño adecuados, según corresponda; lo cual pretende ser demostrado.





---

**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

# **ESTADO DE LA TÉCNICA**

## 2. ESTADO DE LA TÉCNICA

A lo largo del presente apartado se realizará un recorrido por diferentes métodos existentes de desalación, siendo descritos y enunciadas sus principales características.

Como se podrá ver, el proceso de separación de las sales y el agua se puede llevar a cabo por medios mecánicos, térmicos, eléctricos y químicos, que aprovechan fenómenos diversos, todos ellos bajo un mismo fin.

Los procesos que serán descritos son los siguientes:

*Tabla 2.1. Métodos de desalación existentes en el mercado. Fuente: (4).*

Separación	Energía	Proceso	Método
Agua de sales	Térmica	Evaporación	Destilación súbita (flash)
			Destilación multiefecto
			Termocompresión de vapor
			Destilación solar
		Cristalización	Congelación
			Formación de hidratos
	Filtración y evaporación	Destilación con membranas	
Mecánica	Evaporación	Compresión mecánica vapor	
	Filtración	Ósmosis Inversa	
Sales de agua	Eléctrica	Filtración selectiva	Electrodialisis
	Química	Intercambio	Intercambio iónico



## 2.2. DESTILACIÓN MULTIEFECTO (MED)

Aun tratándose de un proceso evaporativo a través del aporte de energía térmica, la principal diferencia con la destilación por efecto flash es la naturaleza de la evaporación, pues en este caso se realiza de una manera mucho menos violenta. La evaporación tiene lugar en una de las paredes de los tubos que componen el intercambiador de calor, al aprovechar el calor latente cedido por la condensación de vapor en la pared opuesta. Es decir, se pulveriza el agua a desalar sobre tubos que contienen vapor caliente, de forma que simultáneamente sucede la condensación del vapor del interior de estos y la evaporación de parte del agua pulverizada en el exterior de los tubos. A su vez, el nuevo vapor generado será empleado como fuente de calor en el siguiente efecto.

De esta forma, el aporte de calor externo se puede realizar exclusivamente en el primer efecto (primera cámara); empleando generalmente vapor procedente de extracciones una central de generación eléctrica. Para la condensación del vapor producido en el último efecto, se incluye un precalentador del agua de aporte, de forma que se aproveche el calor liberado.

Como similitud con el sistema MSF, recalcar la composición de los mismos por múltiples etapas conectadas en serie a presiones inferiores según se avanza en el proceso. Así mismo, la necesidad de aporte de calor, generalmente en forma de vapor, desde el exterior del sistema de desalación, hace a ésta clase de desaladores apropiados para trabajar en sistemas de cogeneración, acoplados a plantas de potencia, al igual que en el caso de los MSF.

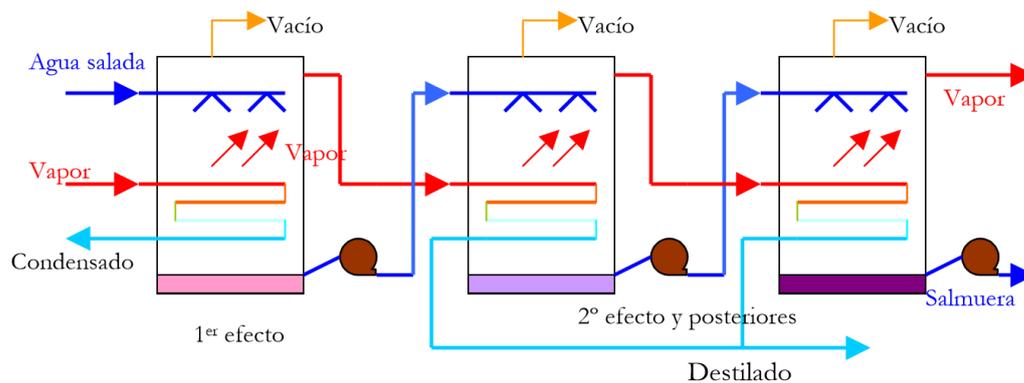


Figura 2.2. Esquema de una planta MED. Fuente: (4).

Debe ser mencionado que el consumo específico de energía es inferior a las plantas MSF, a pesar de no existir comúnmente recirculación de la salmuera.

## 2.3. COMPRESIÓN DE VAPOR (TÉRMICA Y MECÁNICA)

En ocasiones se le considera el mismo proceso que el MED, dado que el procedimiento para obtener el destilado es idéntico, aunque existen sistemas de una sola etapa. La variación respecto al mismo viene dada por la compresión del vapor a baja presión del último efecto, obteniendo así un vapor a media presión empleado como aporte a la primera etapa. Es decir, el vapor de la última etapa es empleado para aportar calor a la primera, tras ser previamente comprimido. Recordar que en el caso de las plantas MED convencionales, este vapor a baja presión es empleado para el precalentamiento del agua de alimentación.

Al igual que en el caso anterior, el agua de alimentación es precalentada por la purga de salmuera y por el destilado, que se encontrarán a una temperatura superior.

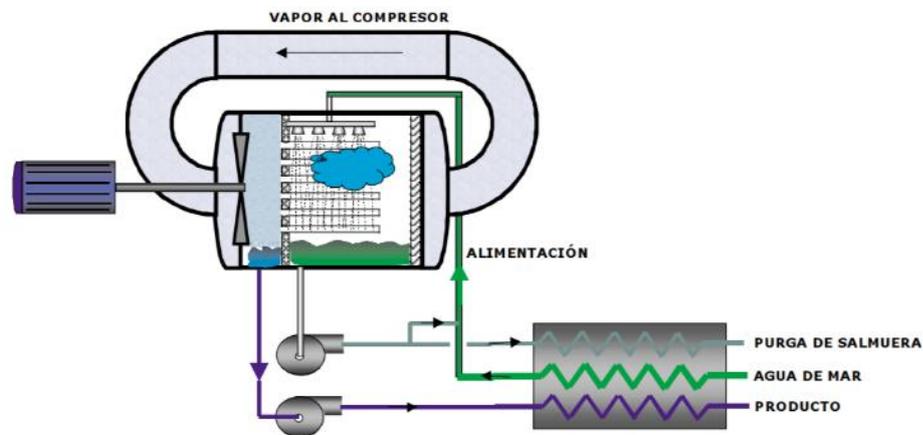


Figura 2.3. Esquema de un proceso de compresión mecánica de vapor. Fuente: (5).

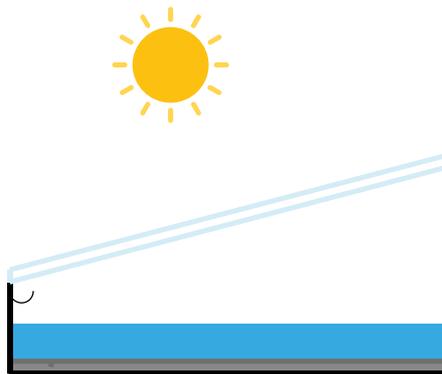
En cuanto al consumo específico, mejora ligeramente a las plantas MED.

## 2.4. DESTILACIÓN SOLAR

Se trata del último de los métodos de desalación por evaporación que se tratará en este documento, y acerca del cual se realizará la simulación. Se basa en el aprovechamiento del efecto invernadero, para elevar la temperatura del agua salada contenida en el sistema, favoreciendo la evaporación y su posterior condensación en la cubierta transparente que ha permitido el paso de la radiación solar, para resbalar por ella y caer a un canal colector que recogerá las gotas de agua destilada.

La cubierta debe ser de vidrio u otro material de elevada transmisividad a la radiación solar y reducida a la radiación térmica, como el policarbonato. De esta manera, se acumulará energía en el destilador, parte de ella aprovechada en la producción de agua destilada.

La producción por unidad de superficie de esta clase de destiladores es reducida; razón por la que no se encuentra implementado a gran escala, pero su nulo coste energético y reducida inversión requerida lo hacen apto para zonas aisladas con elevada irradiación solar, existiendo multitud de morfologías y sistemas desarrollados. Así, existen incluso sistemas concentradores acoplados a plantas MSF y MED, como productores del vapor de la primera etapa. En la figura 2.4 se muestra un destilador solar de tipo caseta, cuyo comportamiento se tratará con mayor profundidad a lo largo del presente trabajo.



*Figura 2.4. Esquema de un sistema de destilación solar. Fuente: Elaboración propia.*

## 2.5. CONGELACIÓN

Se trata de un método en fase de estudio, basado en la congelación del agua salada, para obtener hielo con concentraciones muy reducidas de sales; quedando la salmuera bajo el hielo formado. Es decir, la congelación de agua salada o salobre de manera controlada supone la formación de cristales de agua pura en estado sólido, así como aumenta la concentración de sales en el agua salada que permanece en estado líquido. Posteriormente, el hielo formado es extraído por procesos mecánicos y lavado, para eliminar el contenido en sales que haya podido quedar en la superficie exterior del mismo

La mencionada congelación se puede lograr por medio de un fluido refrigerante, o bien por reducción de la presión a bajas temperaturas, propiciando evaporación, acompañada de una pérdida de calor por parte del agua que será la causa de la congelación.

El principal interés de éste método radica en el menor calor latente involucrado en el proceso de cambio de fase de congelación respecto al de evaporación. A pesar de ello, su implementación a nivel industrial se ve muy limitada por el momento debido a su dificultad tecnológica, que supone unos precios específicos elevados del agua producida. Por tanto, esta técnica queda relegada para la industria alimentaria, con el objetivo contrario; la eliminación de contenido de agua para obtener concentrados de diferentes productos.

## 2.6. FORMACIÓN DE HIDRATOS

Encontrándose también en fase de estudio, el principio de este método es la adición de hidrocarburos al agua salada, provocando la cristalización de los mismos junto con una cierta cantidad de agua dulce, que posteriormente sería separada.

## 2.7. DESTILACIÓN CON MEMBRANAS

Se trata otro método en fase de estudio, basado en un proceso evaporativo y el empleo de membranas hidrófobas; permeables para el vapor pero impermeables para el agua líquida.

En este proceso, el agua a desalar es calentada, de forma que la evaporación se vea favorecida. Así, el vapor generado atraviesa la membrana para posteriormente condensar sobre una superficie fría. Tras ello, el agua desalada no puede atravesar la membrana de nuevo, y es colectada.

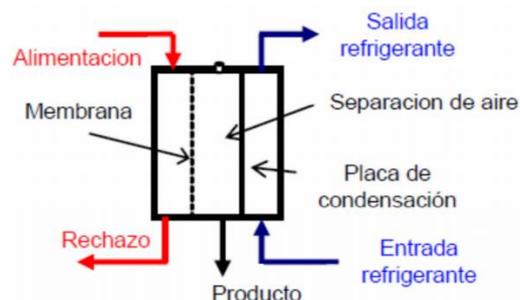


Figura 2.5. Esquema de destilación con membranas con separación de aire. Fuente: (6).

## 2.8. ÓSMOSIS INVERSA

Se trata del método de mayor implantación en España, debido en gran medida a su reducidos costos específicos.

Su principio de funcionamiento es un fenómeno ampliamente presente en el medio natural; la ósmosis. Si se conectan dos medios con diferentes concentraciones salinas a través de una membrana semipermeable; es decir, permeable para el disolvente (el agua) pero no para el soluto (las sales), existirá una tendencia hacia el intercambio de disolvente, de forma que el mismo vaya desde el lado de menor concentración hasta el de mayor (suponiendo una misma altura inicial de ambos medios). Este flujo desde un medio hasta el otro supondrá una elevación de la altura en el medio de mayor concentración, y una reducción en el de menor, hecho que puede medirse. La presión diferencial entre ambos lados de la membrana se denomina presión osmótica y depende de la concentración de sales en ambas disoluciones.

Así mismo, el proceso contrario es también posible, y es el empleado para la desalación. Aplicando presión sobre el medio de mayor concentración, se logra una transmisión de disolvente a través de la membrana hacia el lado de menor concentración. En este caso agua.

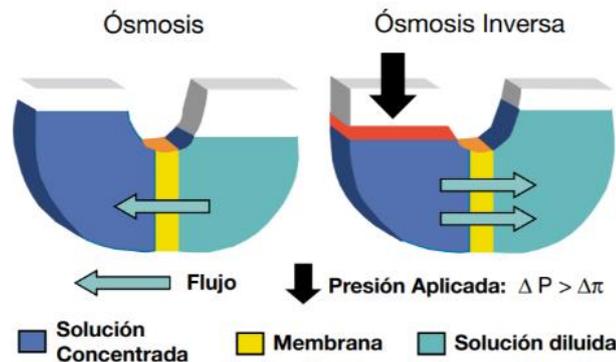


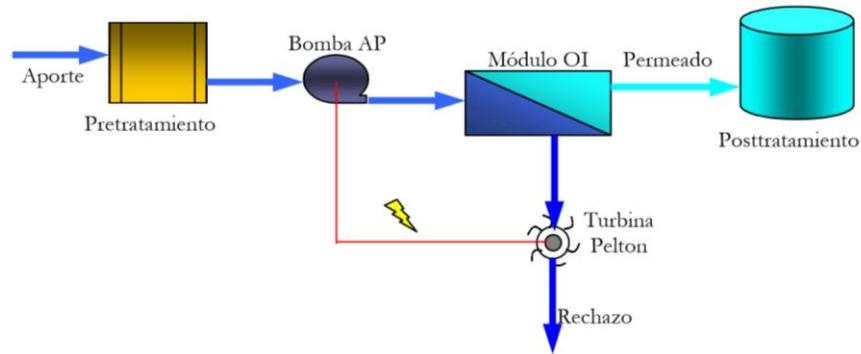
Figura 2.6. Esquemas de los fenómenos de ósmosis natural y ósmosis inversa. Fuente: (5).

El proceso de desalación se realiza a presiones mayores de la presión osmótica, para así permitir el permeado. Solo un cierto porcentaje del agua entrante pasa la membrana, quedando una gran cantidad de salmuera a retirar. Dicha salmuera tiene un gran contenido energético debido a su elevada presión, por lo que parte del mismo se recupera empleando turbinas tipo Pelton o Francis, reduciendo así la energía necesaria para llevar a cabo el proceso y abaratando la operación y el consumo específico del sistema.

Se puede entender por tanto las plantas como una agrupación de módulos con membranas semipermeables, alimentadas por agua salada a altas presiones a través de unas bombas de alta presión, antes de las cuales el agua alimentada debe pasar por una etapa de pretratamiento intensivo que reduzca el impacto de la operación sobre las membranas, así como tras el paso por los módulos, el agua desalada debe pasar por las etapas de postratamiento correspondientes, al igual que todos los métodos de desalación, para adecuar su contenido en sales y hacerla apta para el consumo. El contenido en sales del agua desalada por este procedimiento es mayor a la obtenida por los procesos de destilación.

En la figura 2.7 se puede observar un esquema de un proceso de desalación por ósmosis inversa que consta de un solo módulo y un sistema de recuperación de energía a través de una turbina Pelton.

## Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta



*Figura 2.7. Esquemas de desalación por ósmosis inversa con un único módulo. Fuente: (4).*

En las plantas reales se establecen configuraciones con módulos en serie, para aprovechar las presiones del rechazo y aumentar el aprovechamiento del agua de aporte para producción de agua desalada, empleando bombas de muy altas presiones y membranas que las resistan.

## 2.9. ELECTRODIÁLISIS

Se trata, como ya fue introducido, de un procedimiento de filtración selectiva haciendo uso de la energía eléctrica.

Los iones disueltos en el agua son atraídos o repelidos, en función de su signo, por unos electrodos que generan un campo eléctrico, y atraviesan membranas selectivas que permitan el paso de los iones pero no del agua. De ésta manera, se logra la desalación a través de la concentración de las sales.

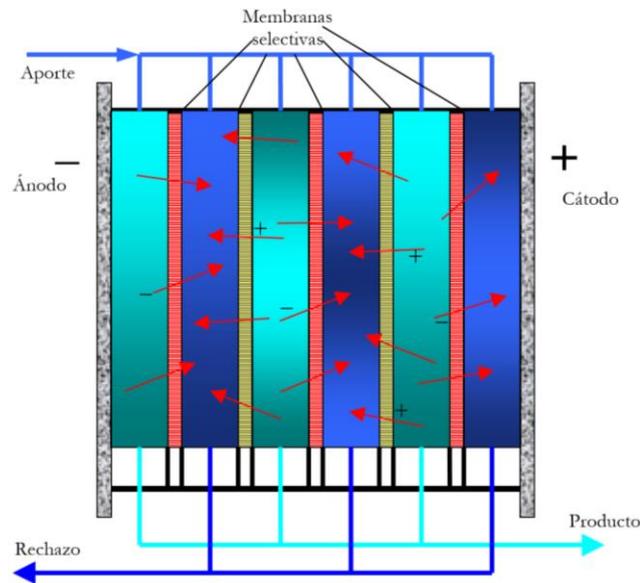


Figura 2.8. Esquemas de desalación por electrodiálisis. Fuente: (4).

En ocasiones la polarización de los electrodos se realiza de forma alternativa, para reducir el mantenimiento requerido por acumulación de sales en las membranas. Se trata de la electrodiálisis alternativa (EDR).

A pesar de tratarse de un método de desalación cuyo consumo específico es del mismo orden que la ósmosis inversa, se trata de un sistema que no afecta a las sustancias eléctricamente neutras, por lo que su efectividad depende enormemente de las características del agua de entrada.

## **2.10. INTERCAMBIO IÓNICO**

Su funcionamiento se basa en el empleo de resinas sólidas insolubles en agua, capaces de intercambiar los iones de las sales disueltas en ella por aniones hidróxido ( $\text{OH}^-$ ) y cationes hidrón ( $\text{H}^+$ ), en función de la clase de resina que se emplee, existiendo resinas intercambiadoras de cationes y resinas intercambiadoras de aniones.

Este sistema resulta apto para la eliminación de sales de un agua de bajo contenido bruto en las mismas, pero no para aguas de alta concentración, debido a que las mencionadas resinas requieren una regeneración con compuestos químicos como el ácido sulfúrico e hidróxido sódico, y tienden a agotarse tras su vida útil, menor cuanto mayor sea la concentración de sales del agua bruta. Es por ello que éste método queda relegado para aplicaciones de ajuste fino, como puede ser el tratamiento del agua en un ciclo de vapor de una central de producción eléctrica y no resulta adecuado para la desalación de aguas saladas y salobres para fines menos exigentes, como la agricultura o el consumo humano.





---

**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

# **CÁLCULOS Y SIMULACIÓN**

### 3. CÁLCULOS Y SIMULACIÓN

#### 3.1. INTRODUCCIÓN

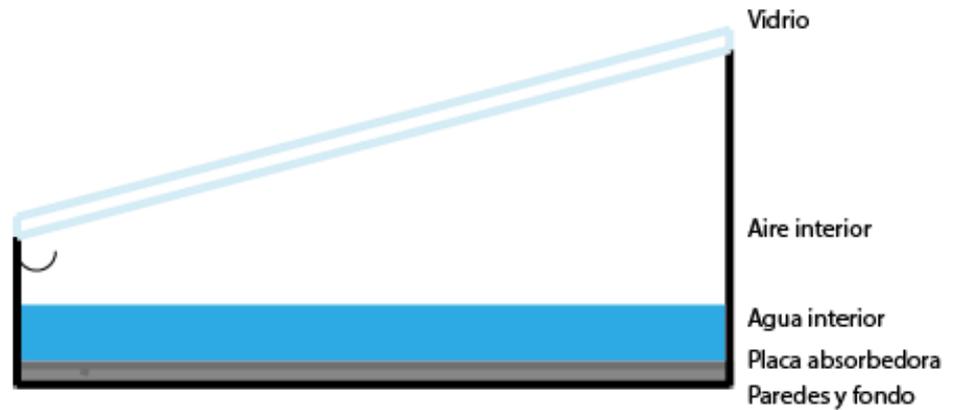


Figura 3.1. Esquema de medios del destilador. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la figura 3.1, existen cinco medios independientes perfectamente diferenciados que componen el destilador:

- Vidrio.
- Aire interior.
- Agua interior.
- Placa absorbedora.
- Paredes y fondo.

Las dimensiones, en mm serán las siguientes:

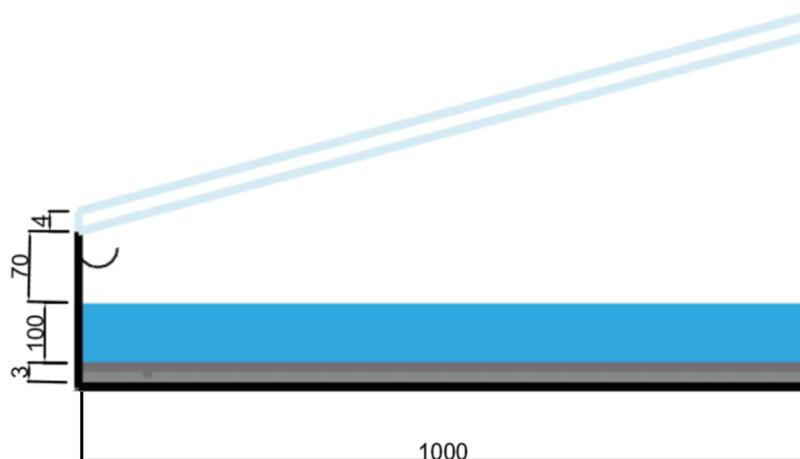


Figura 3.2. Dimensiones del destilador. Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, la inclinación de la cubierta será de  $23^\circ$ , parámetro determinado en función del emplazamiento escogido y las necesidades particulares, como ya será detallado más adelante.

## Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta

La profundidad escogida para el destilador bajo estudio es de 100m. Se debe tener en cuenta que los resultados son aproximadamente válidos también para un destilador compuesto por varios elementos de menor profundidad, siempre y cuando no existan sombras a lo largo del día entre ellos, y el área total ocupada por el agua contenida en los mismos sea de 100m<sup>2</sup>.

En beneficio de la simplicidad de los cálculos, se ha optado por realizar las siguientes consideraciones generales:

- Paredes laterales y fondo considerados aislantes perfectos, teniendo las paredes una reflectividad del 100% a la radiación solar y térmica, por lo que no serán tenidos en cuenta.
- El aire interior es un medio no participativo para la radiación.
- Sistema de parámetros concentrados (estupenda aproximación para el vidrio y la placa inferior, dado un número de Biot  $\leq 0,1$ , pero en el agua y el aire se realiza apoyándose en la suposición de que la convección natural propiciará una distribución de temperaturas aproximadamente uniforme).
- El mantenimiento y limpieza del sistema será idóneo.
- El agua destilada se considera H<sub>2</sub>O puro, libre de impurezas.
- Se desprecia el aumento de la reflectancia de los elementos del sistema con la variación del ángulo de incidencia de la radiación solar.
- No se considera la influencia de la presencia del canal colector de destilado.

Además de determinar la cantidad de agua destilada por el sistema, se obtendrá la temperatura de los diferentes elementos y flujos de calor involucrados en el mismo. Para ello, empleando el software de Matlab-Simulink, se ha realizará una simulación numérica, aplicando directamente las ecuaciones diferenciales implicadas, y procurando conservar una elevada rigurosidad en los cálculos a lo largo del proceso.

A pesar de ello, a lo largo de la simulación se llevarán a cabo las aproximaciones vistas anteriormente y otras enunciadas en el apartado 3.4.A, que suponen una simplificación de cálculo apreciable y conllevan imprecisiones asumibles, facilitando la comprensión e implementación de los cálculos, como ya se ha introducido.

### 3.2. EMPLAZAMIENTO Y CARACTERÍSTICAS:

Se tomará Roquetas Del Mar, Armería, España. A 16m sobre el nivel del mar.

Para realizar la simulación se ha optado por tomar un día correspondiente a la época de mayor déficit hídrico en la región, cuyas necesidades de agua son considerables debido a la gran cantidad de cultivos de invernadero presentes en la zona. Para ser más precisos, se escogió el día 25 de Julio de 2016, cuya irradiación total sobre un plano inclinado a 23º (el correspondiente al destilador estudiado) fue de 8036,95 Wh/m<sup>2</sup>.

Debe tenerse en cuenta que el sistema funcionará correctamente cualquier día del año y en cualquier emplazamiento, aunque variará la producción esperada. Introduciendo valores de otro día o conjunto de días de ésta u otra localización en el sistema de simulación desarrollado, este nos arrojará resultados igualmente válidos. La razón de tomar un único día se debe a maximizar la sencillez de comprensión, y facilitar que las conclusiones obtenidas a partir de la simulación sean más intuitivas.

Debe tenerse en cuenta que en función del emplazamiento y el momento del año en que se desee maximizar la producción, la inclinación óptima de la cubierta variará. La elección de una inclinación para la cubierta busca alcanzar una situación de compromiso entre maximizar la radiación en una determinada época del año (en este caso verano, sin comprometer en exceso la irradiación sobre el vidrio en septiembre, debido a las características climáticas de la zona), respetar una mínima inclinación de la cubierta para facilitar la caída del destilado resbalando por la superficie de la misma (alrededor de 20º, aunque algunos autores lo reducen hasta 12º) y evitar inclinaciones excesivas que supongan un gran volumen de aire contenido en el destilador (Se recomienda comúnmente no superar los 30º, pero ésta es una decisión muy dependiente de la radiación incidente para cada inclinación).

La evolución de la irradiación mensual sobre una superficie con la inclinación escogida (23º) y azimut 0, en el emplazamiento escogido es la siguiente:

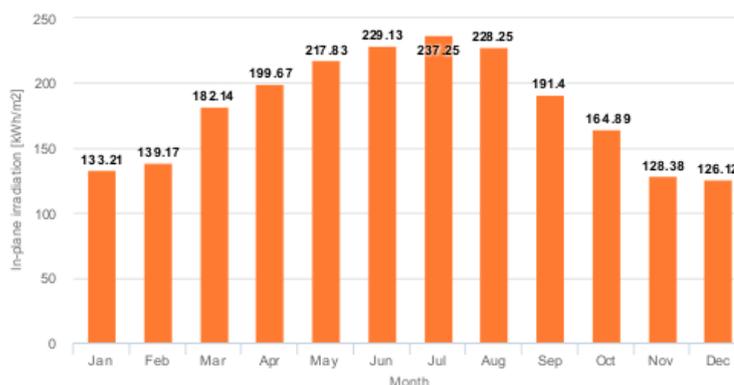
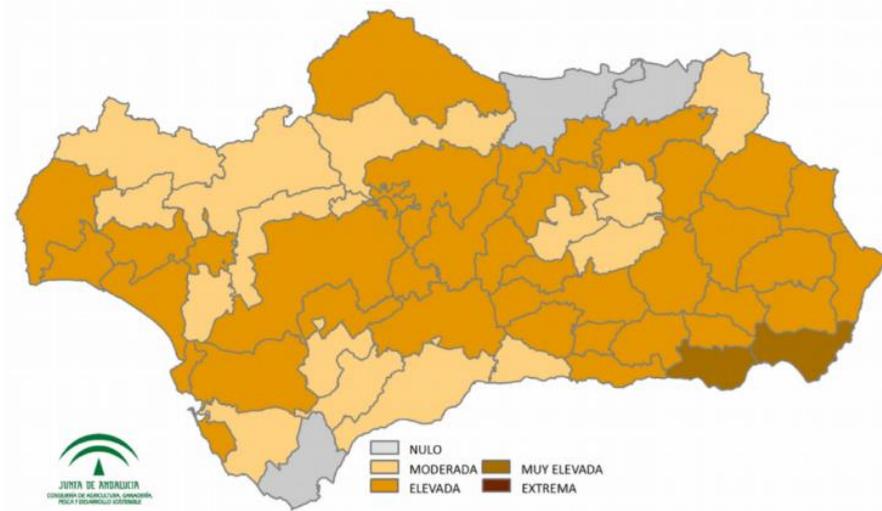


Figura 3.3. Irradiación mensual a 23º. Fuente: (10).

Para apoyar la decisión de haber escogido una inclinación que maximice la producción en los meses de junio, julio y agosto, sin perjudicar en exceso la producción en septiembre, se han tenido en cuenta los estudios de afección de la sequía realizados mensualmente por la Consejería de Medio Ambiente de Andalucía, presentes en la bibliografía.

Debe tenerse en cuenta que cada año hidrológico presenta variaciones, pero puede observarse que la época estival es la que mayor afección tiene. Por ejemplo, en el caso del año hidrológico 2017-2018, para el mes de julio, los resultados del estudio fueron los siguientes:



*Figura 3.4. Incidencia de la sequía. Julio 2019. Fuente (11).*

Vemos en la imagen anterior que la incidencia de la sequía sobre la región estudiada para julio de 2019 queda definida como muy elevada.

### 3.3. DATOS DE ENTRADA A LA SIMULACIÓN:

El tiempo se presentará en segundos, debido a las características del programa escogido para realizar la simulación. Debe por tanto tenerse en cuenta que 24 horas se corresponderán con 86400 segundos.

Todos los datos han sido extraídos del Centro Común de Investigación de la Unión Europea (JRC), referenciado en la bibliografía como (10). Las figuras desarrolladas a partir de esos datos se muestran a continuación, para el día y la localización escogidos.

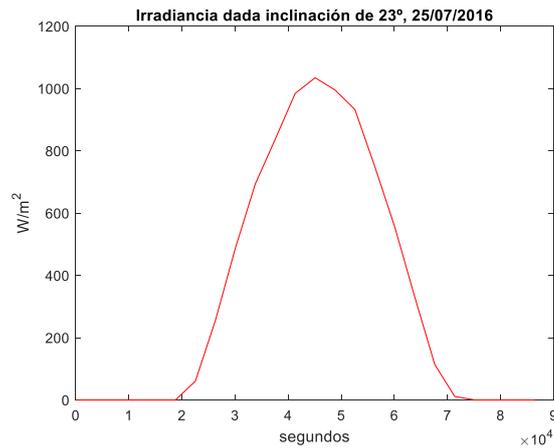


Figura 3.5. Evolución de la irradiancia solar para una inclinación de 23°. Fuente: Elaboración propia.

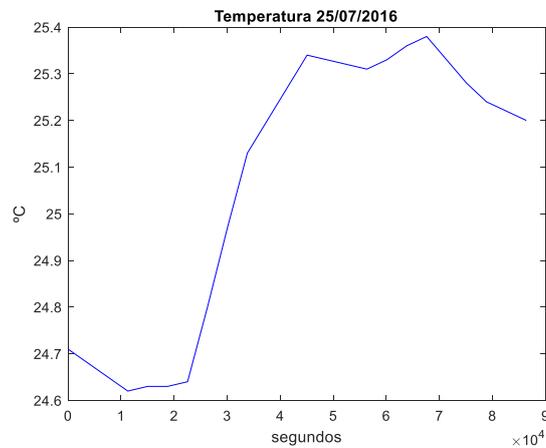
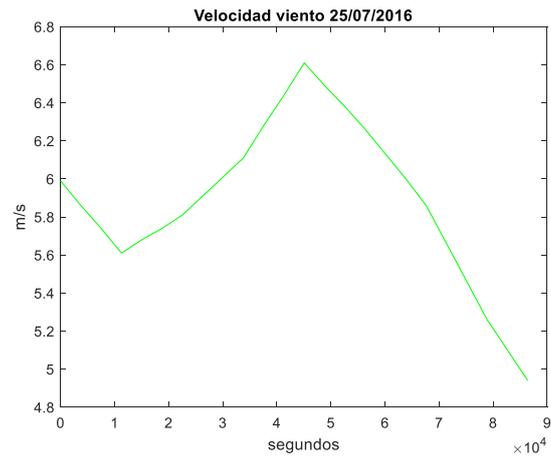
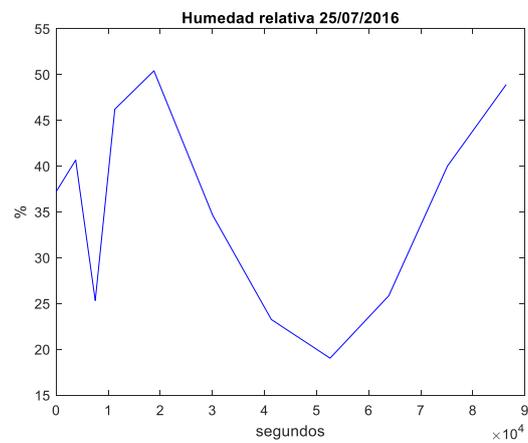


Figura 3.6. Evolución de la temperatura. Fuente: Elaboración propia.

## Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta



**Figura 3.7. Evolución de la velocidad del viento. Fuente: Elaboración propia.**



**Figura 3.8. Evolución de la humedad relativa. Fuente: Elaboración propia.**

### **3.4. CÁLCULOS:**

A partir de los datos anteriores, y sin suponer de antemano la temperatura de los elementos o la producción de destilado ni otros factores, así como considerando el proceso como no estacionario, se realizará la simulación, para lo cual deben ser desarrolladas las expresiones que describirán los flujos de calor involucrados en el proceso, y posteriormente implementadas en el sistema de simulación.

Con el objetivo de salvaguardar cierto orden y facilitar la posterior lectura y comprensión del trabajo, el orden de presentación de las expresiones y sus desarrollos será el siguiente:

- Vidrio. (1)
- Aire (incluido en vidrio y agua). (2)
- Agua. (3)
- Placa absorbidora. (4)

### 3.4.A. CONSIDERACIONES Y SUPOSICIONES PREVIAS

- Espesor vidrio: 4 mm.
- Área vidrio: 108,64 m<sup>2</sup>.
- Profundidad vidrio: 100m.
- Anchura vidrio: 1,0864m (debido a la inclinación; su proyección horizontal debe coincidir con la anchura del destilador).
- Inclinación: 23°C.
- Densidad vidrio: 2500 kg/m<sup>3</sup>.
- Profundidad destilador: 100m.
- Anchura destilador: 1m.
- Mantenimiento idóneo.
- Sin condensaciones peliculares que interfieran notablemente en su comportamiento frente a la radiación.
- A efectos de cálculo en la convección forzada, dado se suele considerar como transición entre laminar y turbulento, aquellos números de Reynolds comprendidos entre 10<sup>5</sup> y 3 x10<sup>6</sup>, se considerará en el presente trabajo convección laminar hasta  $Re \leq 8 \times 10^5$ .
- Para la convección natural, a efectos de cálculo, se asimilará la placa de vidrio por una en posición horizontal. Además, se considerará que el coeficiente de expansión volumétrica del aire interior es similar al de un gas ideal,  $\frac{1}{T}$ .
- Las propiedades ópticas del vidrio están comprendidas en dos tramos únicos y constantes; para radiación de onda larga (térmica), y de onda corta (solar). Se trata por tanto de aproximar su comportamiento por el de un cuerpo gris en dos tramos bien diferenciados. Las emisividades coinciden con las absortancias en cada uno de los tramos.

Tramo solar:

Transmitancia: 0,84.

Absortancia: 0,05.

Reflectancia: 0,11.

Tramo radiación térmica:

Transmitancia: 0.

Absortancia: 0,85.

Reflectancia: 0,15.

- Al igual que en el caso del vidrio, las propiedades ópticas del agua están comprendidas en dos tramos únicos y constantes; para radiación de onda larga (térmica), y de onda corta (solar). Las emisividades coinciden con las absortancias en cada uno de los tramos. Los datos tomados para una lámina de agua marina de 10cm se muestran a continuación.

Tramo solar:

Transmitancia: 0,549.

Absortancia: 0,431.

Reflectancia: 0,02.

Tramo radiación térmica:

Transmitancia: 0.

Absortancia: 0,98.

Reflectancia: 0,02.

- Conductividad térmica del aire exterior constante con la temperatura e igual a  $0,0255 \frac{W}{m \times K}$ .
- Se considera el vidrio una superficie difusa (emisión de radiación en una hemiesfera).
- Se supondrá que la condensación en la cara inferior del vidrio se realiza en forma de gotitas y no se tendrá en cuenta su influencia sobre las propiedades ópticas.
- Se toma el número de Prandtl del aire exterior constante e igual a 0,73.
- Volumen de aire interior supuesto constante e igual a  $23,5366 \text{ m}^3$ .
- Aceleración de la gravedad igual a  $9,81 \frac{m}{s^2}$ .
- Debido a la elevada conductividad térmica del agua, se despreciarán los efectos convectivos agua-aire, debidos al movimiento convectivo del agua.
- Densidad constante del agua en el destilador de  $1027 \frac{kg}{m^3}$ , así como el espesor de la lámina, luego la masa es 10270kg.
- Para calcular el intercambio radiativo entre vidrio y agua, serán consideradas superficies paralelas en el espacio, grises e infinitas en superficie.
- Espesor de la placa absorbidora de 3mm, masa de 81kg.
- Calor específico de la aleación de aluminio de la placa absorbidora constante de  $900 \frac{J}{kg \times K}$ , conductividad térmica constante de  $132 \frac{W}{m \times K}$  y coeficiente de expansión volumétrica constante de  $23,9 \times 10^{-6} \frac{1}{K}$ .
- Placa absorbidora considerada como cuerpo negro, con absortancia a la radiación solar unidad y emisividad unidad.
- Considerado aire saturado de vapor en todo momento para el aire interior.
- La toma de agua se supondrá a temperatura constante de 23°C desde el Mar de Alborán.
- La salinidad del agua de toma se supondrá constante de 38g/L.
- La situación inicial de la simulación es propia del funcionamiento estacionario del sistema. Esto significa que la situación de partida es igual a la situación de llegada al finalizar el día de estudio.
- La condensación y evaporación coincidirán en su cómputo global a lo largo del día. Como aproximación, se supondrá que evaporación y condensación coinciden en todo instante de tiempo, dado un aire saturado de vapor en todo momento.
- Calor específico del vapor de agua constante e igual a por  $1740 \frac{J}{kg \times K}$  y calor específico del agua líquida constante e igual a  $4182 \frac{J}{kg \times K}$  (dado que se espera que las temperaturas alcanzadas por el agua en el destilador se encuentren mayormente entre 40 y 60°C).

### 3.4.B. PARÁMETROS Y VARIABLES:

Irr : Irradiancia solar instantánea a 23°. [ $\frac{W}{m^2}$ ]

absortSolV : Absortancia del vidrio a la radiación solar.

transmiSolV : Transmisividad del vidrio al sol.

reflectSolV : Reflectividad del vidrio al sol.

emisV : Emisividad del vidrio.

absortTermicaV : Absortancia del vidrio a la radiación térmica.

transmiTermicaV : Transmisividad del vidrio a la radiación térmica.

reflectTermicaV : Reflectividad del vidrio a la radiación térmica.

Tv : Temperatura del vidrio [°C].

CV : Calor específico del vidrio [ $\frac{J}{kg \times K}$ ].

mV : Masa vidrio [kg].

areaV : Superficie vidrio [m<sup>2</sup>].

densV : Densidad vidrio [ $\frac{kg}{m^3}$ ].

espesorV : Espesor vidrio [m].

Lc : Anchura vidrio [m].

Qv : Sumatorio de flujos de calor hacia el vidrio [W].

Tamb : Temperatura ambiente instantánea [°C].

QradiadoV : Calor radiado al ambiente por el vidrio [W].

QabsortSolV : Calor solar absorbido por el vidrio [W].

$\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann [ $\frac{W}{m^2 \times K^4}$ ].

PrAir : Número de Prandtl del aire.

vAir : Viscosidad cinemática del aire [ $\frac{m^2}{s}$ ].

Vair : velocidad del viento en el exterior en cada instante [ $\frac{m}{s}$ ].

Nu : Número de Nusslet.

kAir : Conductividad térmica del aire [ $\frac{W}{m \times K}$ ].

hf : Coeficiente de transferencia de calor por convección forzada [ $\frac{W}{m^2 \times K}$ ].

QconvForz : Calor por convección forzada [W].

QconvNataguaair : Calor por convección natural [W].

## Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta

hn : Coeficiente de transferencia de calor por convección natural  $[\frac{W}{m^2 \times K}]$ .

TairInt : Temperatura instantánea aire interior [°C].

QairInt : Sumatorio de flujos de calor hacia el aire interior [W].

CairInt : Calor específico aire interior  $[\frac{J}{kg \times K}]$ .

mairInt : Masa aire interior [kg].

VolairInt : Volumen de aire interior [m<sup>3</sup>].

TpelVair : Temperatura instantánea de película entre vidrio y aire interior [°C].

Gr : Número de Grashof.

g : Aceleración de la gravedad  $[\frac{m}{s^2}]$ .

βair : Coeficiente de expansión volumétrica del aire  $[\frac{1}{K}]$ .

Lch : Longitud característica del vidrio para convección natural [m].

Ra : Número de Rayleigh.

areaAgua : Superficie del agua en el destilador [m<sup>2</sup>].

Tagua : Temperatura media instantánea del agua [°C].

TpelAguair : Temperatura instantánea de película entre agua y aire interior [°C].

Qagua : Sumatorio de flujos de calor hacia el agua [W].

Cagua : Calor específico agua interior  $[\frac{J}{kg \times K}]$ .

Cvapagua : Calor específico vapor de agua  $[\frac{J}{kg \times K}]$ .

magua : Masa agua [kg].

Kagua : Conductividad térmica del agua  $[\frac{W}{m \times K}]$ .

densagua: densidad agua  $[\frac{kg}{m^3}]$ .

absortSolagua : Absortancia del agua a la radiación solar.

transmiSolagua : Transmisividad del agua al sol.

reflectSolagua : Reflectividad del agua al sol.

emisagua : Emisividad del agua.

absortTermicaagua : Absortancia del agua a la radiación térmica.

transmiTermicaagua : Transmisividad del agua a la radiación térmica.

reflectTermicaagua : Reflectividad del agua a la radiación térmica.

QabsortSolagua : Calor solar absorbido por el agua [W].

## Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta

$Q_{transmiSolagua}$  : Calor solar transmitido por el agua [W].

$Q_{reflectSolagua}$ : Calor solar reflejado por el agua [W].

$Q_{radiadoVagua}$  : Calor intercambiado entre vidrio y agua por radiación térmica [W].

$CoefRadVagua$  : Coeficiente de radiación entre vidrio y agua  $[\frac{W}{K^4}]$ .

$Tal$  : Temperatura placa absorbadora de aluminio [ $^{\circ}C$ ].

$absortSolal$  : Absortancia de la placa absorbadora a la radiación solar.

$mal$  : masa placa absorbadora de aluminio [kg].

$Cal$  : Calor específico placa absorbadora  $[\frac{J}{kg \times K}]$ .

$Qal$  : Sumatorio de flujos de calor hacia la placa absorbadora [W].

$kal$  : Conductividad térmica placa absorbadora  $[\frac{W}{m \times K}]$ .

$TpelAguaal$  : Temperatura instantánea de película entre agua y placa absorbadora [ $^{\circ}C$ ].

$\beta_{agua}$  : Coeficiente de expansión volumétrica del agua  $[\frac{1}{K}]$ .

$\nu_{Agua}$  : Viscosidad cinemática del agua  $[\frac{m^2}{s}]$ .

$Pr_{agua}$  : Número de Prandlt del agua.

$Lcha$  : Longitud característica del agua y aluminio para convección natural [m].

$Densvap$  : Densidad de vapor saturado en el aire en función de la temperatura  $[\frac{kg}{m^3}]$ .

$Densvapair$  : Densidad de vapor saturado en el aire interior  $[\frac{kg}{m^3}]$ .

$DensvapV$  : Densidad de vapor saturado en la capa límite aire interior-vidrio  $[\frac{kg}{m^3}]$ .

$Densvapagua$  : Densidad de vapor saturado en la capa límite aire interior-agua  $[\frac{kg}{m^3}]$ .

$hmc$  : Coeficiente de convección de masa de condensación.

$Grm$  : Número de Grashof para convección de masa.

$Dab$  : Coeficiente de difusión de masa del aire-vapor  $[\frac{m^2}{s}]$ .

$Sc$  : Número de Schmidt.

$Q_{cond}$  : Calor cedido al vidrio por condensación [W].

$Q_{evap}$  : Calor cedido al agua por evaporación [W].

$mc$  : Flujo másico de destilado  $[\frac{kg}{s}]$ .

$CaudalE$  : Flujo másico de agua de toma  $[\frac{kg}{s}]$ .

$Purga$  : Flujo másico de agua de purga  $[\frac{kg}{s}]$ .

## Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta

QCaudalE : Calor cedido al agua por el agua de toma [W].

TCaudalE : Temperatura agua de toma [°C].

SalDes : Salinidad agua destilador [ $\frac{kg}{m^3}$ ].

SalE : Salinidad agua de toma [ $\frac{kg}{m^3}$ ].

QvarTvapAair : Calor transmitido por la variación de temperatura del vapor agua-aire [W].

QvarTvapairV : Calor transmitido por la variación de temperatura del vapor aire-vidrio [W].

Qconvaguaal : Calor transmitido por convección del aluminio al agua [W].

Rend : Rendimiento destilador.

mAguaV : Masa lámina de agua entre vidrios (mejora) [kg].

mva : Masa total vidrio y agua entre vidrios (mejora) [kg].

Cva : Calor específico conjunto vidrio-agua (mejora) [ $\frac{J}{kg \times K}$ ].

Tcielo : Temperatura efectiva del cielo para fenómenos de radiación [°C].

Tprocio : Temperatura del punto de rocío a la presión dada (en nuestro caso 1 atm) [°C].

Th : Tiempo según la hora del día. Por ejemplo, las 3:15 PM será 15,25.

Hr : Humedad relativa [%].

$\epsilon_{cielo}$  : Emitancia del cielo.

### 3.4.C. CÁLCULOS INTERCAMBIOS TÉRMICOS SIN TRANSMISIÓN DE MASA:

#### 3.4.C.1 VIDRIO

En este apartado se definirán los flujos de calor que involucran exclusivamente al vidrio y al ambiente:

- Radiación solar absorbida por el vidrio.
- Radiación térmica emitida por el vidrio hacia el ambiente.
- Calor perdido por convección forzada al ambiente debido al viento.

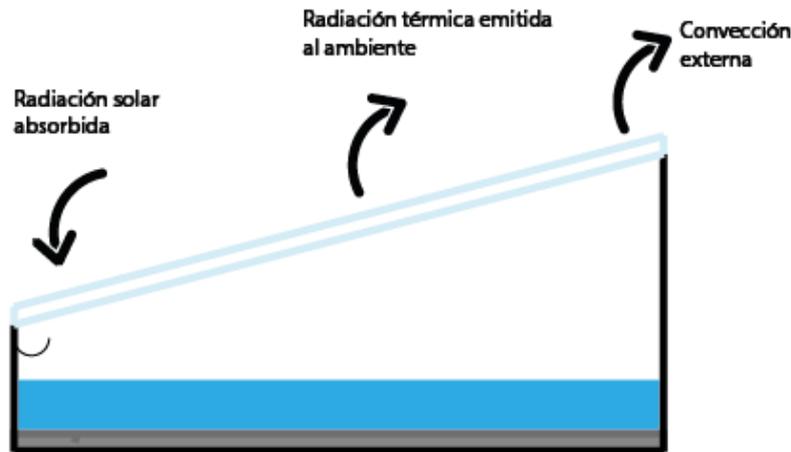


Figura 3.9. Flujos de calor vidrio y ambiente. Fuente: Elaboración propia.

En el caso de la radiación solar “Irr”, el calor absorbido por el vidrio, a razón de su absorptancia “absortSolV” supondrá un flujo de calor hacia el vidrio de la forma:

$$Q_{absortSolV} = Irr \times areaV \times absortSolV \quad (E-1)$$

Así mismo, el sumatorio de todos los flujos de calor del vidrio “Qv” ocasiona una variación de la temperatura del vidrio como:

$$Q_v = \frac{dT_v}{dt} \times CV \times mV \quad (E-2)$$

Lo cual, implementado en simulink, queda como:

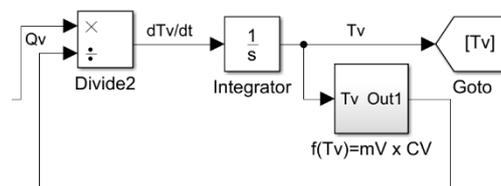


Figura 3.10. Simulink 1. Fuente: Elaboración propia.

Habiendo aproximado el calor específico del vidrio como:

$$CV = 840 + 0,72 \times (Tv - 25) \quad (E-3)$$

Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta

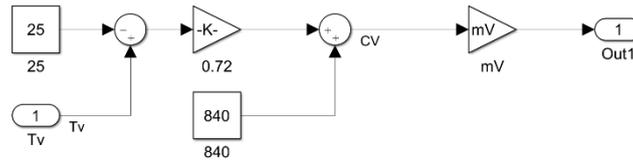


Figura 3.11. Simulink 2. Fuente: Elaboración propia.

La radiación solar transmitida será simplemente:

$$Irr \times areaV \times transmiSolV \quad (E-4)$$



Figura 3.12. Simulink 3. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al intercambio radiativo con los alrededores, y considerando su temperatura igual a la temperatura efectiva del cielo para las condiciones dadas, se puede describir ese calor como:

$$Q_{radiadoV} = \sigma \times emisV \times areaV \times ((Tv + 273.15)^4 - (T_{cielo} + 273.15)^4) \quad (E-5)$$

Lo que implementado en simulink queda:

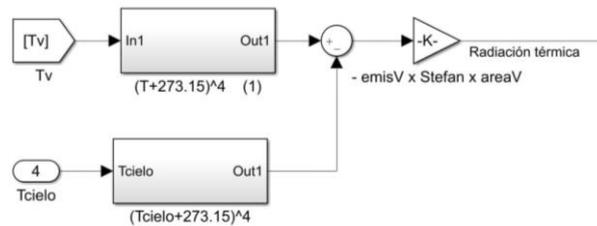


Figura 3.13 Simulink 4. Fuente: Elaboración propia.

Como resulta evidente, el absorbido por este mismo fenómeno será igual y de signo contrario, y es el implementado, como se puede observar.

La temperatura efectiva del cielo es calculada empleando la ecuación para la temperatura de cielo de Berdahl & Fromberg en 1982, que a su vez emplea la emitancia del cielo:

$$T_{cielo} = \epsilon_{cielo}^{\frac{1}{4}} \times Tamb \quad (E-6)$$

Hay diversas correlaciones para estimar la emitancia del cielo, tomándose en este trabajo la desarrollada por Berdahl y Martin en 1984:

$$\epsilon_{cielo} = 0,711 + 0,56 \times \frac{T_{procio}}{100} + 0,73 \times \left(\frac{T_{procio}}{100}\right)^2 \quad (E-7)$$

Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta

Para ello se necesitará la temperatura del punto de rocío, calculada suponiendo presión de 1atm, a partir de la ecuación de Santamouris & Asimakopoulos (1996):

$$T_{\text{pocio}} = 234,175 \times \frac{\ln(Hr/100) + \frac{17,08085 \times T_{\text{amb}}}{234,175 + T_{\text{amb}}}}{17,08085 - (\ln(Hr/100) + \frac{17,08085 \times T_{\text{amb}}}{234,175 + T_{\text{amb}}})} \quad (\text{E-8})$$

La evolución obtenida a lo largo del día de estudio es la mostrada en la figura 3.14.

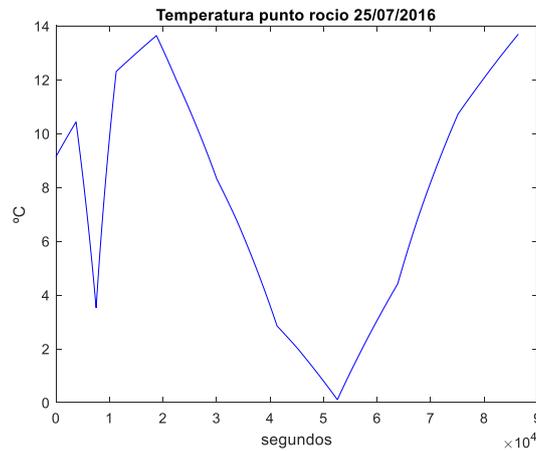


Figura 3.14 Evolución de la temperatura del punto de rocío. Fuente: Elaboración propia.

La temperatura efectiva del cielo obtenida se presenta a continuación en la figura 3.15.

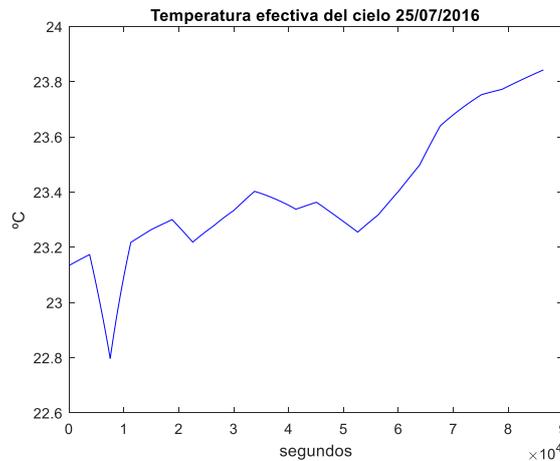


Figura 3.15 Evolución de la temperatura efectiva del cielo. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la convección externa, su cálculo exige hacer uso de los números adimensionales propios de la convección forzada, que se irán detallando más adelante, con el fin de determinar el coeficiente de transmisión de calor por convección forzada.

$v_{\text{Air}}$  es relativamente sensible a variaciones de la temperatura, por lo que se aproximará su valor por:

$$v_{\text{Air}} = (1.338 + 0.0092 \times T_{\text{amb}}) \times 10^{-5} \quad (\text{E-9})$$

Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta

El resultado anterior se empleará para calcular el número de Reynolds en cada instante, a través de la expresión:

$$Re_{Air} = \frac{v_{Air} \times Lc}{\nu_{Air}} \quad (E-10)$$

Con los parámetros climáticos establecidos se debe considerar flujo laminar en todo momento, debido a una evolución del Re como se muestra a continuación en la figura 3.16.

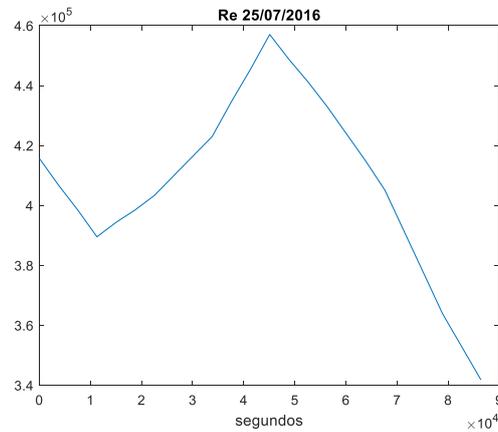


Figura 3.16 Evolución del número de Reynolds. Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, el número de Nusslet promedio sobre la plancha de vidrio se calculará como:

$$Nu = 0.664 \times Re_{Air}^{0.5} \times Pr^{1/3} \quad (E-11)$$

A partir de ello se podrá calcular el coeficiente de transferencia de calor, sabiendo que:

$$Nu = \frac{hf \times Lc}{k_{Air}} \quad (E-12)$$

Se obtienen por tanto unos valores instantáneos para hf a lo largo del día de estudio que se muestran en la figura 3.17.

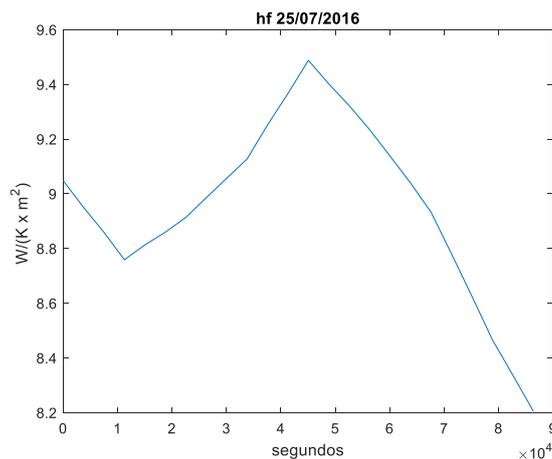


Figura 3.17 Evolución del coeficiente de convección forzada. Fuente: Elaboración propia.

El calor transmitido a la placa de vidrio por convección natural, respetando como positivo aquel entregado al vidrio, queda como:

$$Q_{convForz} = hf \times areaV \times (T_{amb} - T_v) \quad (E-13)$$

## Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta

Lo cual, implementado en Simulink, toma la siguiente forma, donde también se incluye la radiación térmica emitida por el vidrio al cielo y alrededores:

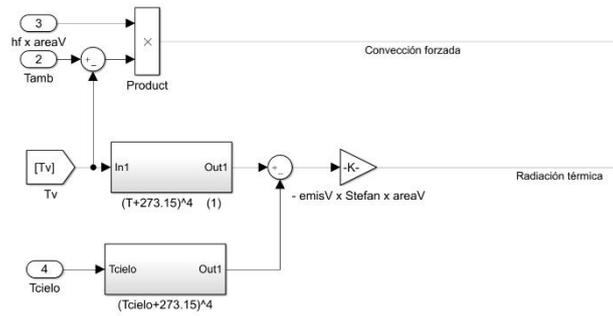


Figura 3.18 Simulink 5. Fuente: Elaboración propia.

### 3.4.C.1-2 VIDRIO-AIRE INTERIOR

En este apartado se considerará el fenómeno de convección natural entre el vidrio y el aire del interior del destilador, detallado a continuación, haciendo uso de sus correspondientes números adimensionales para determinar el coeficiente de convección natural, con el objetivo de calcular al calor transmitido por este fenómeno:

$$Q_{convNat} = hn \times \text{areaV} \times (T_{airInt} - T_v) \quad (E-14)$$

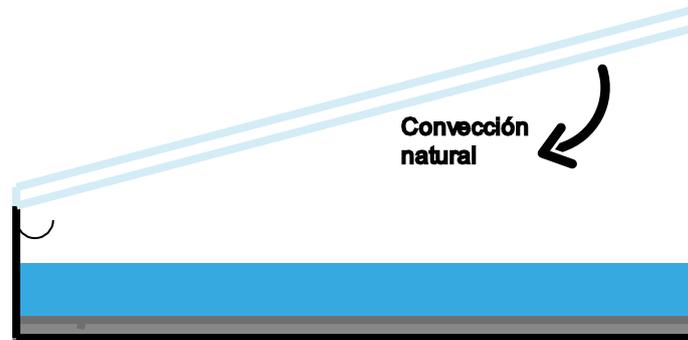


Figura 3.19 Flujo de calor por convección natural vidrio y aire interior

Se considerará como positivo el calor cedido al vidrio.

La temperatura del aire interior depende directamente de los flujos de calor propios del sistema de destilación, de la forma:

$$Q_{airInt} = \frac{dT_{airInt}}{dt} \times C_{airInt} \times m_{airInt} \quad (E-15)$$

En Simulink quedaría:

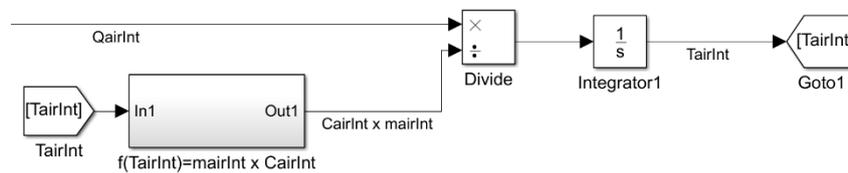


Figura 3.20 Simulink 6. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la masa del aire, dado que se ha tomado una presión constante de 1 atm en el sistema, será variable, y aproximada por:

$$m_{airInt} = (1.292 - 0.004 \times T_{airInt}) \times V_{olairInt} \quad (E-16)$$

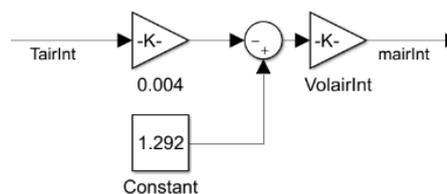


Figura 3.21 Simulink 7. Fuente: Elaboración propia.

El calor específico se aproximará por:

$$C_{airInt}=1006+0.03 \times T_{airInt} \quad (E-17)$$

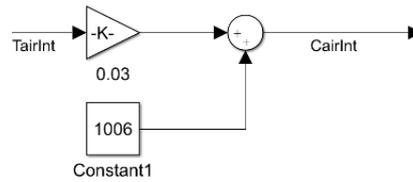


Figura 3.22 Simulink 8. Fuente: Elaboración propia.

Para comenzar con los cálculos de convección natural entre vidrio y aire interior, lo primero que hay que tener en cuenta es que las características del aire para el estudio de convección serán las respectivas a la temperatura de película entre vidrio y aire interior.

$$T_{pelVair}=\frac{T_{airInt}+T_v}{2} \quad (E-18)$$

Recordar que la viscosidad cinemática del aire la aproximamos por:

$$v_{Air}=(1.338+0.0092 \times T_{amb}) \times 10^{-5} \quad (E-9)$$

En este caso se trata de la temperatura de película, por lo que la variación se reducirá a sustituir este parámetro por la  $T_{amb}$ , quedando implementado como:

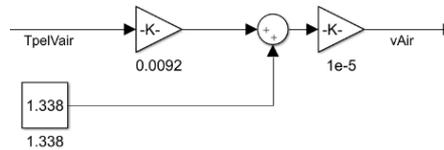


Figura 3.23 Simulink 9. Fuente: Elaboración propia.

En este caso, debido a la mayor variabilidad de temperaturas del aire interior, no se considera el Prandtl constante, sino regido por la expresión:

$$Pr_{Air}=0.7362-0.000268 \times T_{pelVair} \quad (E-19)$$

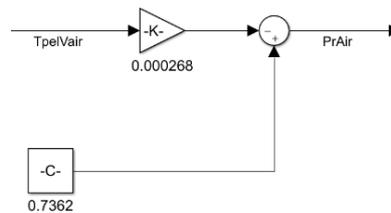


Figura 3.24 Simulink 10. Fuente: Elaboración propia.

El mismo razonamiento es seguido respecto a la conductividad térmica, calculada como:

$$k_{Air}=0.0236+0.000074 \times T_{pelVair} \quad (E-20)$$

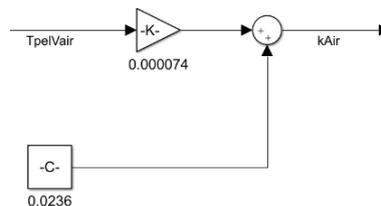


Figura 3.25 Simulink 11. Fuente: Elaboración propia.

## Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta

Se está en disposición ya de determinar el número de Grashof de la convección natural, a través de la siguiente expresión:

$$Gr = \frac{g \times \beta_{air} \times (T_{air} - T_v) \times Lch^3}{\nu_{Air}^2} \quad (E-21)$$

Rigiéndose la longitud característica y  $\beta$  por las siguientes expresiones:

$$Lch = \frac{areaV}{2 \times 100 + 2 \times Lc} \quad (E-22)$$

Resulta conveniente aclarar que en la ecuación anterior, el denominador es el perímetro del vidrio.

$$\beta_{air} = \frac{1}{T_{pelVair} + 273,15} \quad (E-23)$$

Quedando por tanto en Simulink:

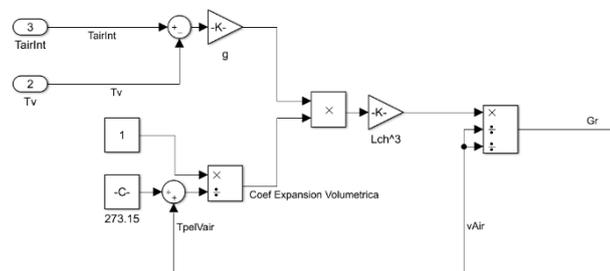


Figura 3.25 Simulink 12. Fuente: Elaboración propia.

Lo siguiente es definir el número de Rayleigh:

$$Ra = Gr \times Pr_{Air} \quad (E-24)$$

Al contar con un valor de  $Ra > 10^7$ , y dado que en el funcionamiento normal del destilador, el aire interior se encontrará a mayor temperatura que la superficie inferior del vidrio, se tomará la siguiente correlación para obtener el valor del Nusselt, empleado para conocer el coeficiente de convección natural. Se trata de la correlación de Mc Adams:

$$Nu = 0,15 \times Ra^{1/3} \quad (E-25)$$

Así mismo, se sabe:

$$h_n = \frac{Nu \times k_{airInt}}{Lch} \quad (E-26)$$

## Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta

La implementación en Simulink de los cálculos para el coeficiente de convección natural del aire interior y el vidrio es la mostrada en la figura 3.26.

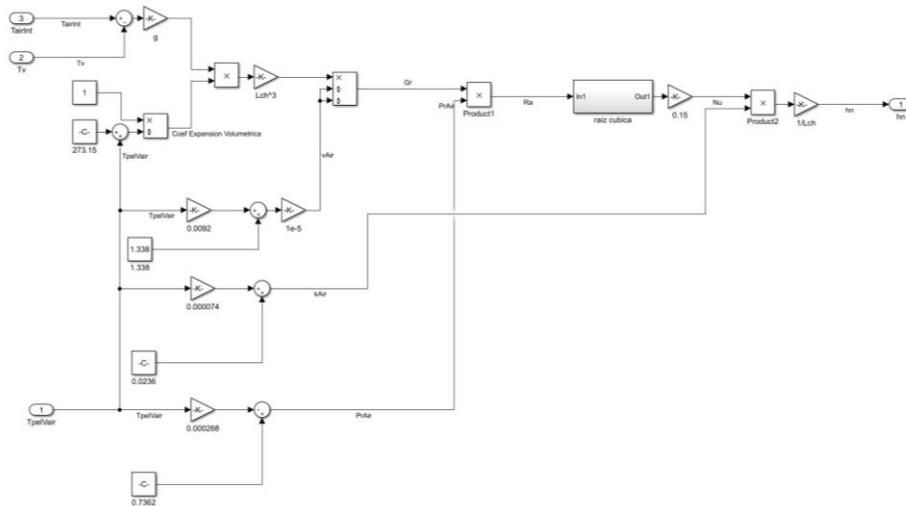


Figura 3.26 Simulink 13. Fuente: Elaboración propia.

Por tanto,  $Q_{convNat}$  queda como:

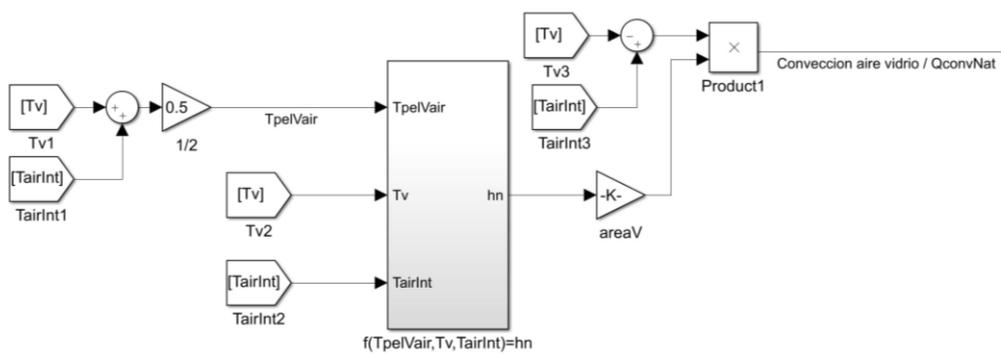


Figura 3.27 Simulink 14. Fuente: Elaboración propia.

Se recuerda, así mismo, que el flujo será positivo cuando el flujo de calor sea hacia el vidrio.

### 3.4.C.2-3 AIRE INTERIOR-AGUA

Resulta necesario considerar la transferencia de calor entre el aire interior y el agua por convección natural, de una manera semejante al caso visto inmediatamente antes.

En este caso:

$$Q_{convNataguaair} = h_n \times \text{areaAgua} \times (T_{Agua} - T_{airInt}) \quad (E-27)$$

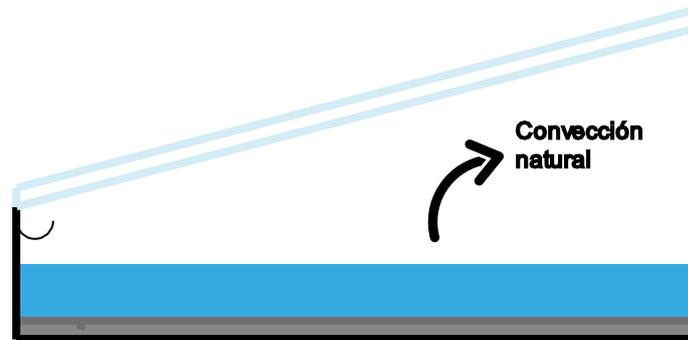


Figura 3.28 Flujo de calor por convección natural agua y aire interior. Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, como en los casos anteriores:

$$Q_{agua} = \frac{dT_{agua}}{dt} \times C_{agua} \times m_{agua} \quad (E-28)$$

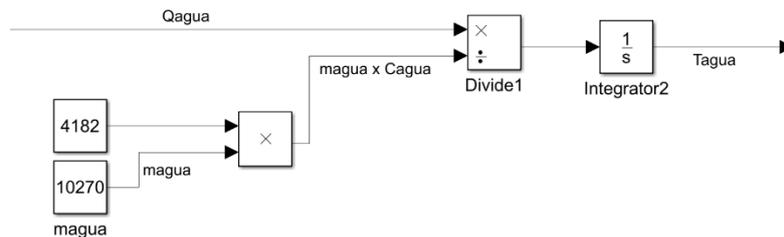


Figura 3.29 Simulink 15. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar y ya fue introducido anteriormente,  $C_{agua}$  será aproximado por  $4182 \frac{J}{kg \times K}$ .

El mecanismo de convección es esencialmente el mismo que en el caso anterior, teniendo en cuenta temperatura de película del agua-aire interior, y que la longitud característica; área partido perímetro, variará, por lo que su razonamiento e implementación es la misma que en el caso aire-vidrio, con esos ligeros cambios, tal y como se muestra en la figura 3.30.

## Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta

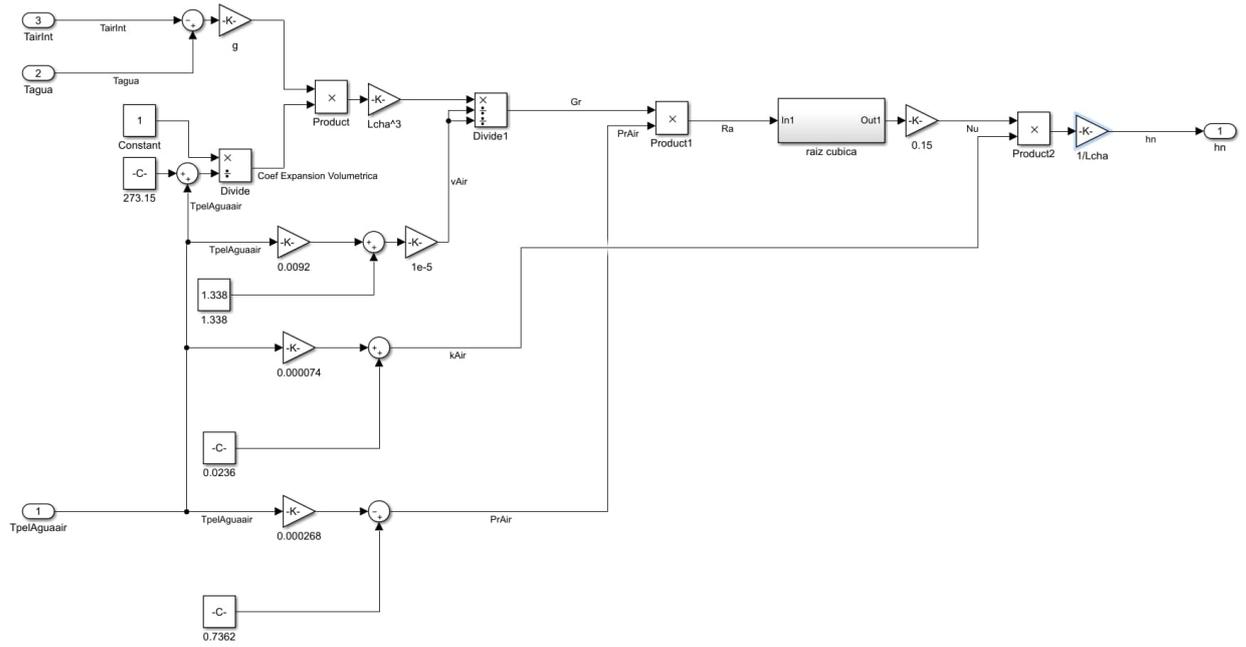


Figura 3.30 Simulink 16. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver, se considera positivo el flujo de calor desde el agua al aire.

Al igual que en el caso anterior, el coeficiente debe ser multiplicado por la superficie y la diferencia de temperaturas para obtener el flujo de calor transmitido:

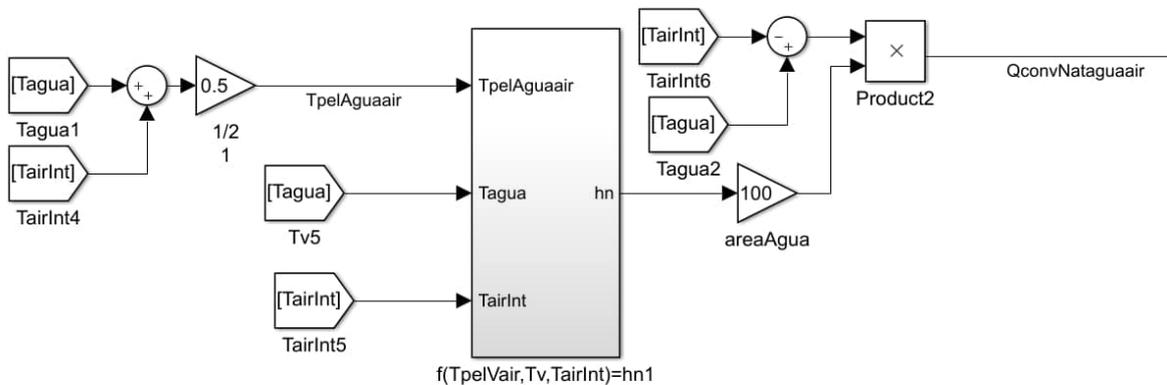


Figura 3.31 Simulink 17. Fuente: Elaboración propia.

### 3.4.C.3 AGUA

En éste apartado se tendrá en cuenta, al igual que en el caso del vidrio, aquellos fenómenos que solamente afecten al agua. En este caso se trata de la radiación solar absorbida por el agua, aunque será calculada la radiación transmitida y reflejada, por resultar de interés posteriormente, y se considerará las reflexiones existentes entre la superficie del vidrio y del agua frente a la radiación solar, siempre partiendo de la porción de radiación solar que ha sido transmitida por el vidrio.

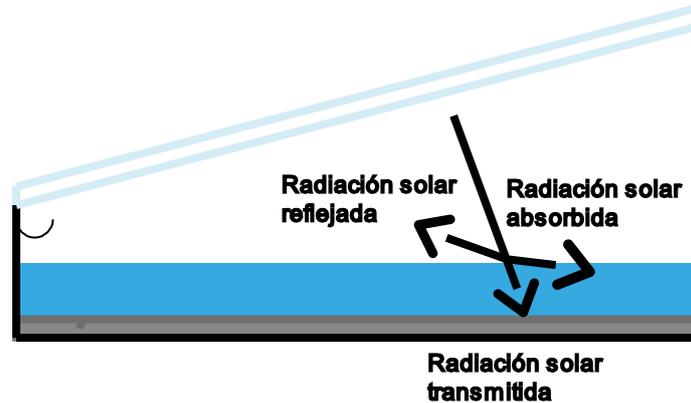


Figura 3.32 Flujos de calor radiación solar incidente agua 1. Fuente: Elaboración propia.

Al igual que en el caso del vidrio, la lámina de agua absorberá parte de la radiación incidente, en este caso aquella que atraviesa el vidrio, a razón de su absorción dada un espesor de lámina de 10cm:

$$Q_{absortSolagua} = Irr \times areaV \times transmiSolV \times absortSolagua \quad (E-29)$$

Así mismo, resulta correcto, con el fin de buscar una mayor precisión en los cálculos, considerar la reflexión en la superficie del agua, que incidirá sobre la superficie inferior del vidrio, de la forma:

$$Q_{reflectSolagua} = Irr \times areaV \times transmiSolV \times reflectSolagua \quad (E-30)$$

Volviendo al inicio, se observa que:

$$Q_{absortSolV} = Irr \times areaV \times absortSolV + Q_{reflectSolagua} \times absortSolV \quad (E-31)$$

Es decir, el vidrio es receptor de emisión de onda corta debido a la reflexión del agua, produciéndose así los efectos de transmisión, absorción y reflexión correspondientes.

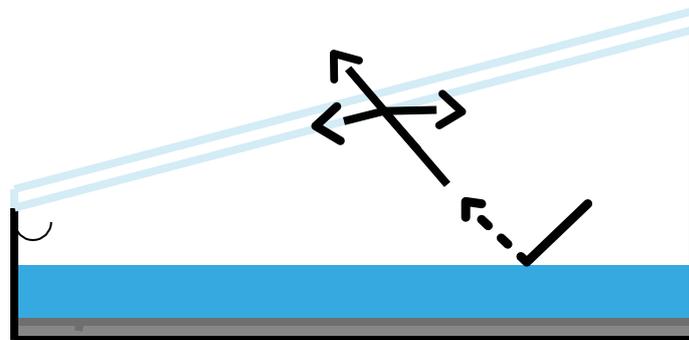


Figura 3.33 Flujos de calor radiación solar reflejada agua. Fuente: Elaboración propia.

## Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta

Resulta evidente que la radiación incidente por la cara inferior del vidrio podrá sufrir una reflexión hacia en agua, sumándose a la radiación incidente sobre el mismo:

$$Q_{absortSolagua} = (Irr \times areaV \times transmiSolV + Q_{reflectSolagua} \times reflectSolV) \times absortSolagua \quad (E-32)$$

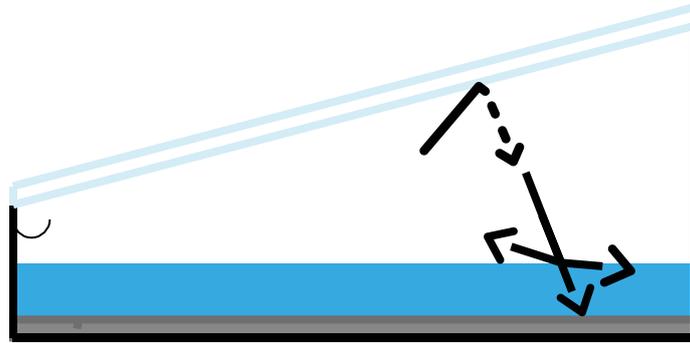


Figura 3.34 Flujos de calor radiación solar incidente agua 2. Fuente: Elaboración propia.

La implementación en Simulink será tal y como se muestra en la figura 3.35.

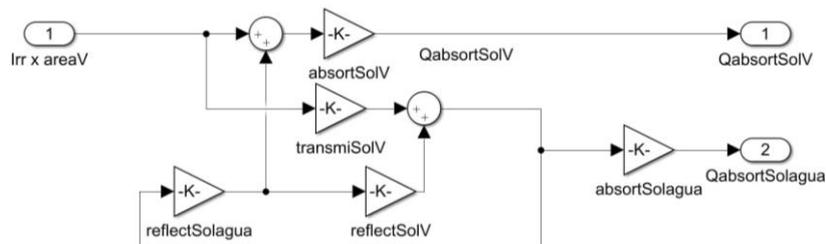


Figura 3.35 Simulink 18. Fuente: Elaboración propia.

### 3.4.C.3-1 AGUA-VIDRIO

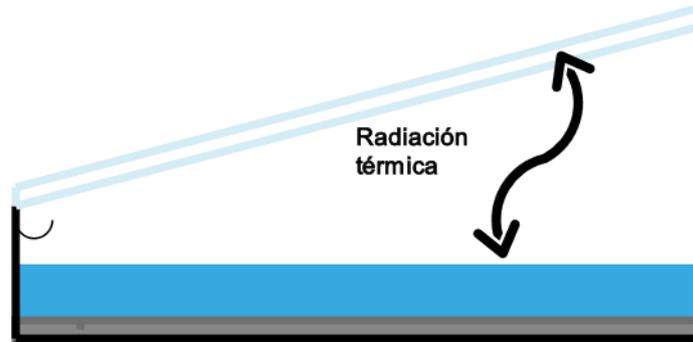


Figura 3.36 Flujos de calor radiación térmica agua y vidrio. Fuente: Elaboración propia.

Existirá un intercambio de calor por radiación entre el vidrio y el agua, en forma de radiación térmica, debido a la temperatura de sus superficies, que será calculado como:

$$Q_{radiadoVagua} = CoefRadVagua \times ((T_{agua} + 273.15)^4 - (T_v + 273.15)^4) \quad (E-33)$$

Siendo:

$$CoefRadVagua = \frac{\sigma}{\frac{1-emis_{agua}}{area_{Agua} \times emis_{agua}} + \frac{1}{area_{Agua}} + \frac{1-emis_V}{area_V \times emis_V}} \quad (E-34)$$

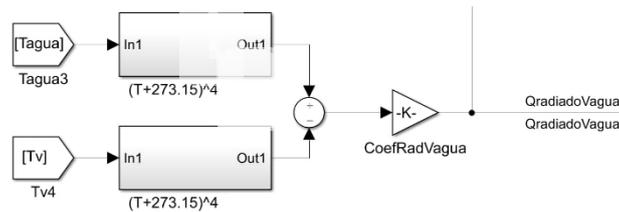


Figura 3.37 Simulink 19. Fuente: Elaboración propia.

Generalmente el flujo de calor será desde el agua hasta el vidrio, aunque hay que tener en cuenta que ambas situaciones son concebibles, por ejemplo en el primer llenado de agua de toma, es decir, en la primera puesta en funcionamiento del sistema.

### 3.4.C.3-4 AGUA-PLACA ABSORBEDORA

Al igual que en el caso del aire con el agua, se considerará una convección natural dentro del agua, que aumentará la razón de transferencia de calor entre agua y aluminio respecto al caso de transferencia por conducción exclusivamente.

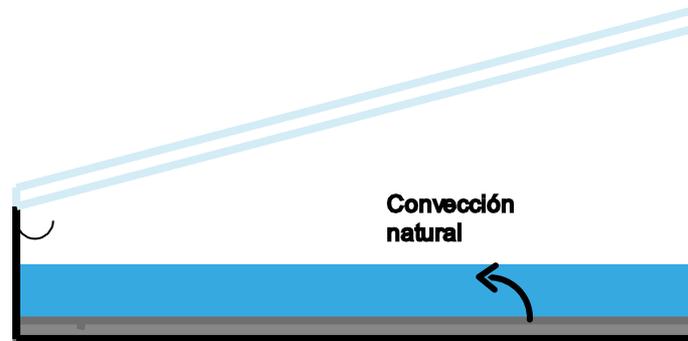


Figura 3.38 Flujo de calor convección natural agua y placa absorbedora. Fuente: Elaboración propia.

Respecto del aire, la principal diferencia es la variación de la viscosidad cinemática, el coeficiente de expansión volumétrica, la conductividad térmica y el número de Prandtl.

Como se ha realizado anteriormente, deben ser introducidas ahora la temperatura y demás variables del nuevo medio; una placa absorbedora de aluminio aleado con magnesio AW-5754, tintada de negro para mejorar sus propiedades ópticas.

Su temperatura será también una variable dinámica, presentada como:

$$Q_{al} = \frac{dT_{al}}{dt} \times Cal \times mal \quad (E-35)$$

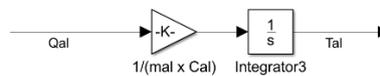


Figura 3.39 Simulink 20. Fuente: Elaboración propia.

Volviendo a la convección natural del agua sobre la aleación de aluminio empleada como placa absorbedora, se aproximarán la conductividad térmica, viscosidad cinemática, coeficiente de expansión volumétrica y Prandtl por:

$$k_{agua} = 10^{-3} \times (616 + 1,38 \times (T_{pelAguaal} - 30)) \quad (E-36)$$

$$\nu_{Agua} = 10^{-6} \times (0,8007 + 0,01235 \times (T_{pelAguaal} - 30)) \quad (E-37)$$

$$Pr_{agua} = 5,406 - 0,09271 \times (T_{pelAguaal} - 30) \quad (E-38)$$

$$\beta_{agua} = 10^{-6} \times (305,1 + 7,605 \times (T_{pelAguaal} - 30)) \quad (E-39)$$

## Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta

Así,  $Q_{convaguaal}$  será calculada exactamente igual que se hizo en el caso del aire, tal y como se aprecia en la figura 3.40.

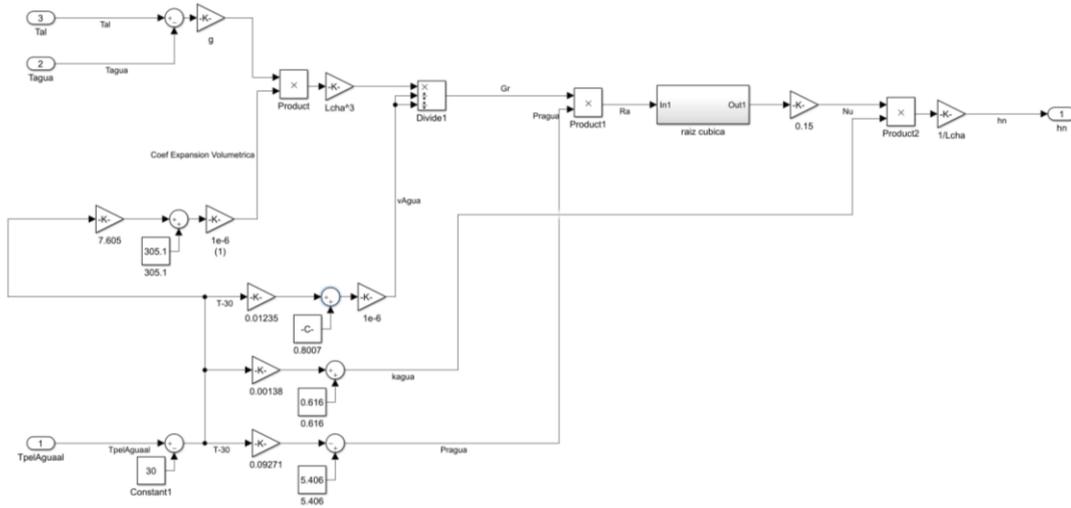


Figura 3.40 Simulink 21. Fuente: Elaboración propia.

### 3.4.C.4 PLACA ABSORBEDORA

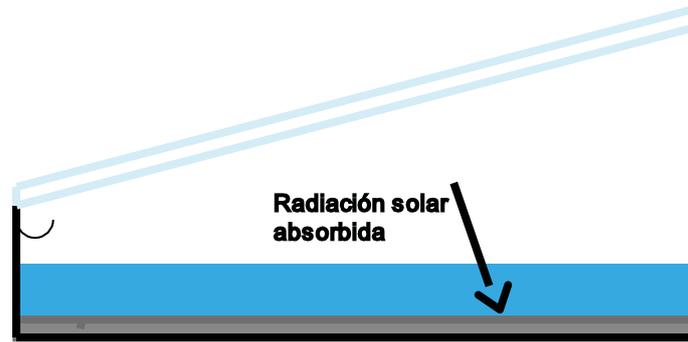


Figura 3.41 Flujo de calor radiación solar incidente placa absorbedora. Fuente: Elaboración propia.

La placa se comporta como un cuerpo negro, absorbiendo toda la radiación solar incidente, igual a aquella transmitida por la capa de agua. Así mismo, 10cm de espesor de agua resulta opaco para la radiación térmica, además de tener temperaturas muy semejantes el agua y la placa absorbedora, por lo que no se considerará intercambio radiativo en onda larga.

Por tanto, la radiación absorbida por la placa será igual a  $Q_{transmisio\ agua}$ , quedando implementado en simulink por el momento como se refleja en la figura

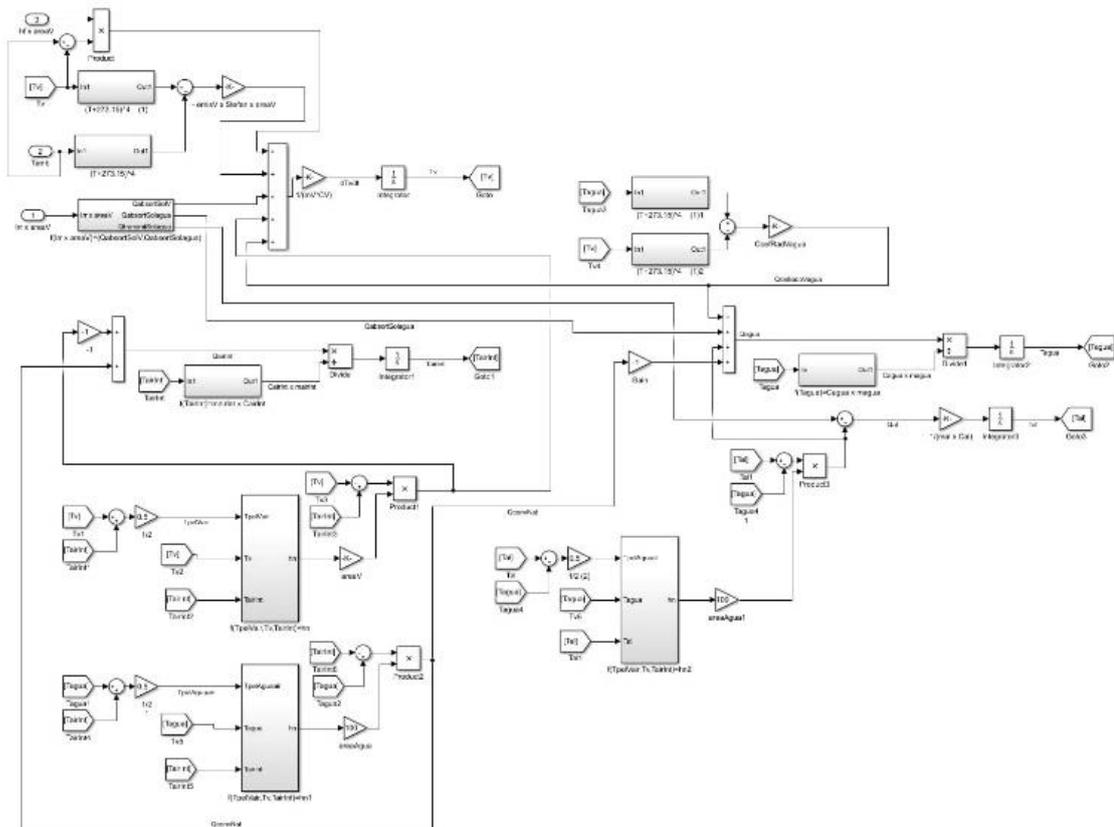


Figura 3.42 Simulink 22. Fuente: Elaboración propia.

### 3.4.D. CÁLCULOS INTERCAMBIOS TÉRMICOS CON TRANSMISIÓN DE MSA

Una vez definidas las temperaturas del aire y las superficies evaporadora y condensadora, se puede calcular el flujo másico obtenido de agua destilada, así como la purga y reposición de agua de mar que se debe realizar para mantener un correcto equilibrio salino en el agua del destilador, evitando precipitaciones indeseadas de sales en la placa absorbedora. A continuación se muestra la figura correspondiente al destilador completo, donde se pueden apreciar los depósitos de agua marina y de agua destilada, así como la purga ya mencionada.

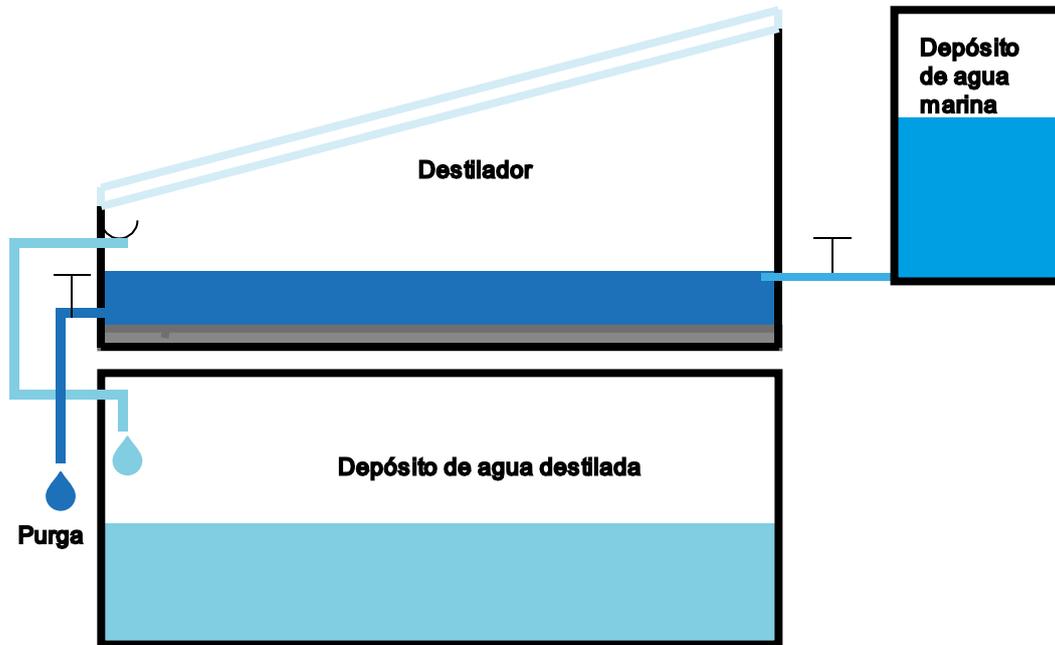


Figura 3.43 Esquema destilador completo. Fuente: Elaboración propia.

#### 3.4.D.1-2 CONDENSACIÓN VIDRIO-AIRE INTERIOR

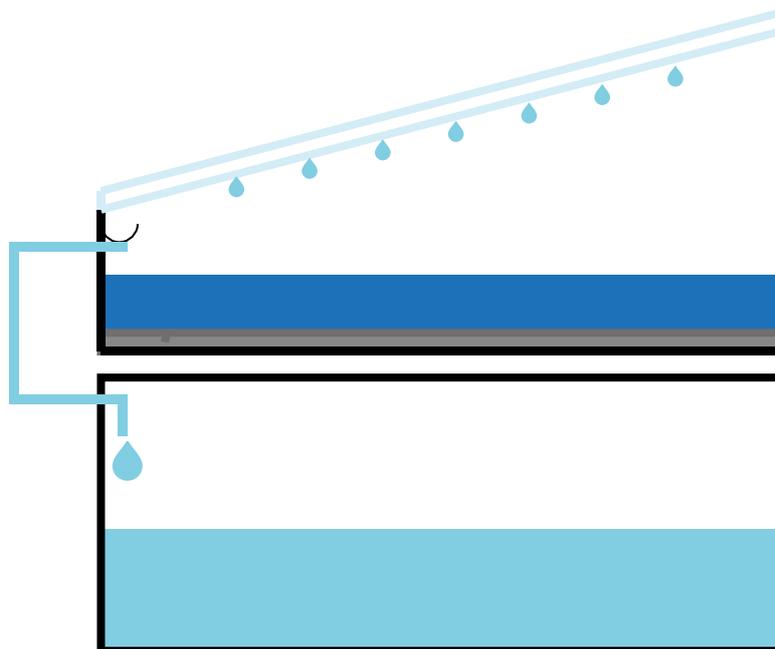


Figura 3.44 Esquema condensación. Fuente: Elaboración propia.

## Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta

Primero se calculará el agua condensada en el vidrio, que será el que se logre destilar gracias a un proceso de convección de masa. En su cálculo serán empleados, al igual que en la convección de calor, una serie de números adimensionales; definidos a continuación.

La fórmula que permitirá calcular la densidad de vapor saturado en el aire, en función de la temperatura del mismo será:

$$\text{Densvap} = 10^{-3} \times (6,335 + 0,6718T - 2,0887 \times 10^{-2} \times T^2 + 7,3095 \times 10^{-4} \times T^3) \quad (\text{E-40})$$

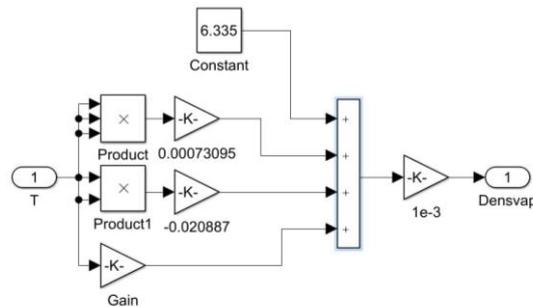


Figura 3.45 Simulink 23. Fuente: Elaboración propia.

El número de Grashof para la convección de masa:

$$\text{Grm} = \frac{g \times (\text{Densvapair} - \text{DensvapV}) \times Lch^3}{\text{Densvapair} \times v\text{Air}^2} \quad (\text{E-41})$$

El coeficiente de difusión de masa:

$$\text{Dab} = 1,87 \times 10^{-10} \times (T + 273,15)^{2,072} \quad (\text{E-42})$$

A partir de ello se está en posición de calcular el número de Schmidt como:

$$\text{Sc} = \frac{v\text{Air}}{\text{Dab}} \quad (\text{E-43})$$

Ahora, para calcular el número de Sherwood, dado que  $\text{Gr} \times \text{Sc} > 10^7$ , será empleada la correlación:

$$\text{Sh} = 0,15 \times (\text{Grm} \times \text{Sc})^{\frac{1}{3}} \quad (\text{E-44})$$

Para así posteriormente obtener el coeficiente de convección de masa como:

$$\text{hmc} = \frac{\text{Sh} \times \text{Dab}}{Lch} \quad (\text{E-45})$$

El sistema en simulink será el mostrado en la figura 3.46.

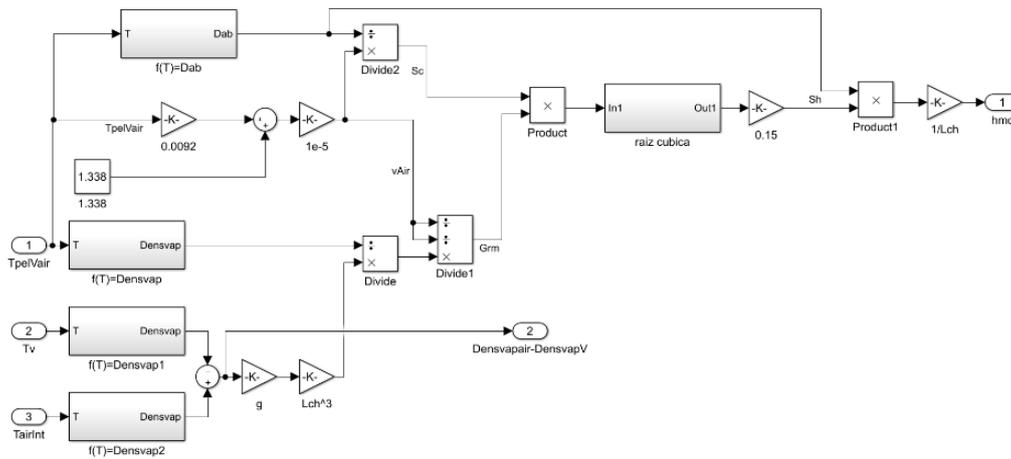


Figura 3.46 Simulink 24. Fuente: Elaboración propia.

Evidentemente, ese calor condensado supondrá una ganancia de calor hacia el vidrio, así como su evaporación supone una pérdida para el agua.

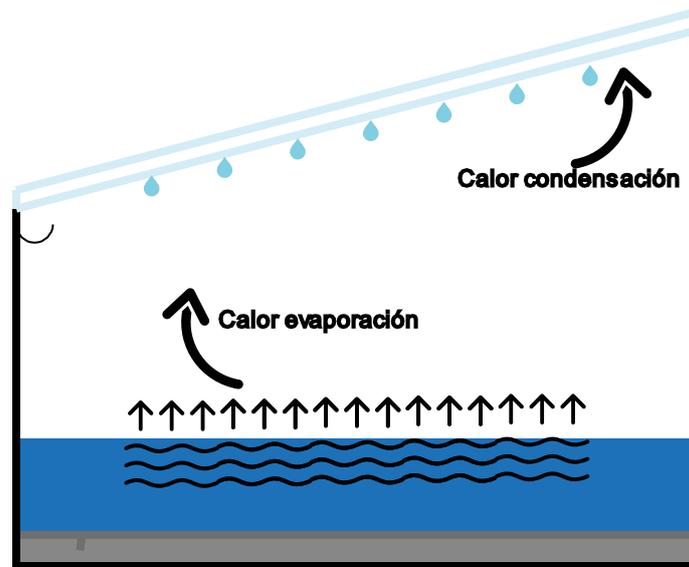


Figura 3.47 Flujos de calor de evaporación y condensación. Fuente: Elaboración propia.

Conviene recordar en este punto la aproximación tomada de que la evaporación y condensación llevarán el mismo ritmo.

De esta manera el flujo másico de condensación- evaporación será:

$$M_c = h_{mc} \times \text{Area}_V \times (\text{Densvapair} - \text{DensvapV}) \quad (\text{E-46})$$

Los calores involucrados se regirán por las siguientes expresiones:

$$Q_{\text{cond}} = m_c \times C_l \quad (\text{E-47}).$$

$$Q_{\text{evap}} = m_c \times C_l \quad (\text{E-48})$$

Donde, en la ecuación E-46, el calor latente es el correspondiente a la temperatura del vidrio y en la ecuación E-47, el calor latente es el correspondiente a la temperatura del agua.

## Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta

En cuanto al calor latente de vaporización, este no es constante con la temperatura, como ya fue introducido, sino que disminuye a temperaturas altas (una de las razones por las cuales la productividad de estos sistemas aumenta en función de la temperatura del agua contenida). Así, el valor de  $Cl$  será aproximado por la siguiente expresión:

$$Cl = 10^3 \times (2394,8 - (T_{agua} - 45) \times \frac{48,6}{20}) \quad (E-49)$$

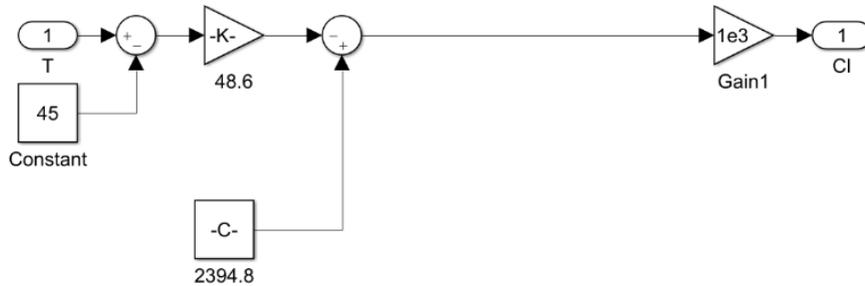


Figura 3.48 Simulink 25. Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar el resultado aplicado a Simulink a continuación, en la figura 3.49.

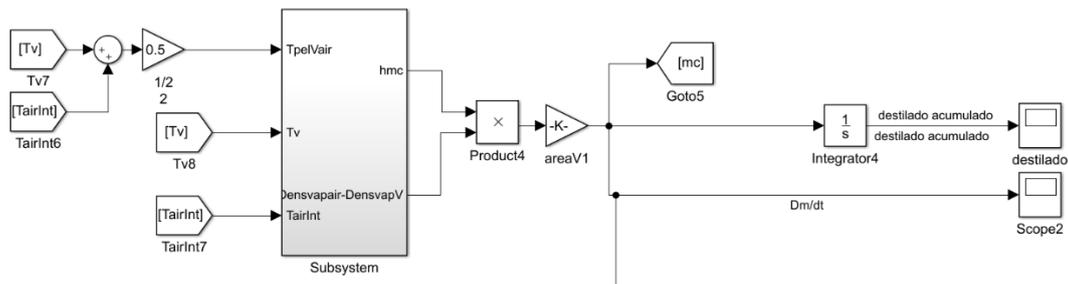


Figura 3.49 Simulink 26. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la ganancia de calor por parte del vidrio:

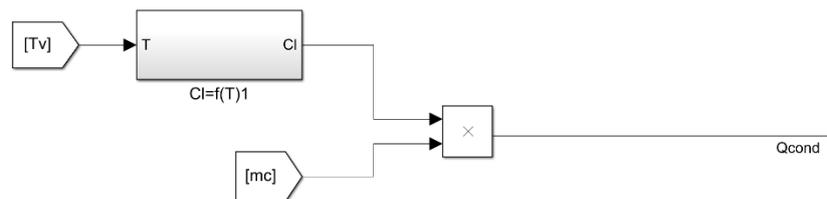


Figura 3.50 Simulink 27. Fuente: Elaboración propia.

Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta

El calor cedido por el agua al evaporarse:

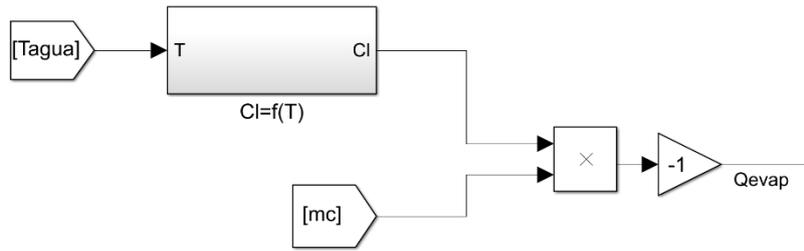


Figura 3.51 Simulink 28. Fuente: Elaboración propia.

Para garantizar la no precipitación de sales en el sistema, se realizará una purga constante de agua del destilador, a razón de 200 kg de agua por día o 0,002315 kg/s. De esta manera, dada una solubilidad de la sal de aproximadamente 360 g/L a 40°C y de 370g/L a 60°C, el sistema aguantará sin acumular precipitados un día cuya producción sea de hasta 1695kg de agua destilada, escenario muy altamente improbable y lejos de la producción estimada para el día escogido, dado un 103% de margen aproximadamente, si se toma como referencia los resultados de la simulación realizada para el día escogido; ya de por sí realizada en unas condiciones altamente favorables.

La purga se realizará de manera constante, mientras que la entrada de agua lo hará de forma que se mantenga el nivel en el destilador, para facilitar el control y reducir la complejidad del sistema:

$$\text{CaudalE} = \text{Purga} + mc \quad (\text{E-50})$$



Figura 3.52 Esquema caudal entrante, purga y destilado. Fuente: Elaboración propia.

Así, habrá un calor involucrado en el calentamiento del flujo entrante hasta la temperatura del resto del agua, que se puede considerar como “perdido”, visualizable en la figura 3.53, de la forma:

$$Q_{\text{CaudalE}} = \text{CaudalE} \times C_{\text{agua}} \times (\text{Tagua} - T_{\text{CaudalE}}) \quad (\text{E-51})$$

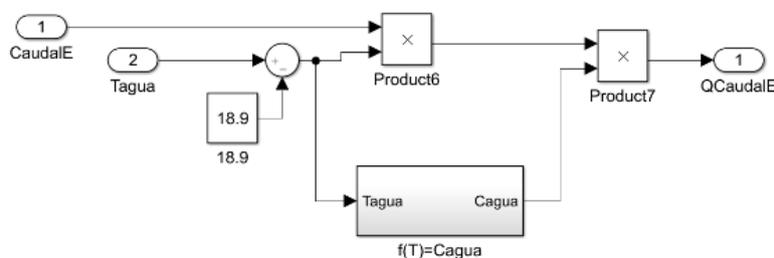


Figura 3.52 Simulink 29. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver, se considera Cagua como la propia de aquella a una temperatura media entre la de toma y la del destilador.

Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta

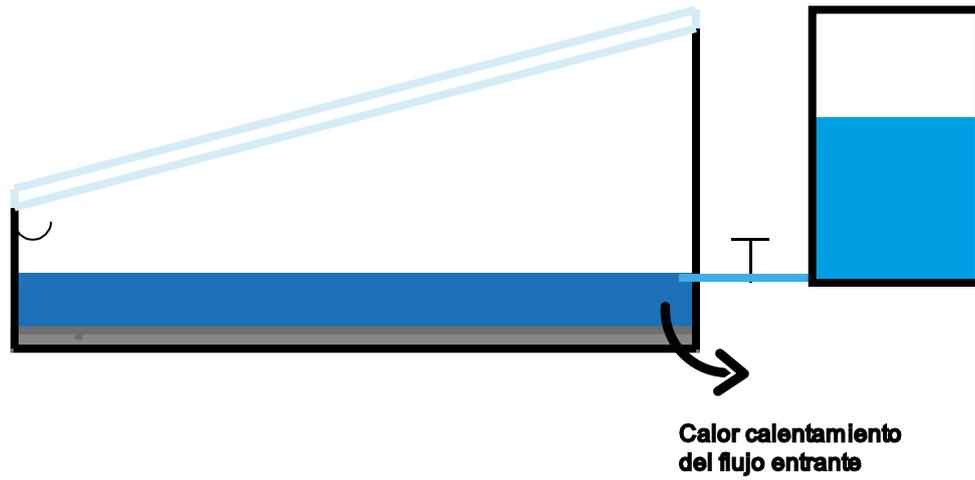


Figura 3.53 Flujo de calor calentamiento agua entrante. Fuente: Elaboración propia.

Puede resultar interesante conocer la salinidad del agua interior en cada momento, para confirmar que no habrá precipitaciones, dado en estado estacionario:

$$SalDes = \frac{CaudalE \times SalE}{Purga} \quad (E-52)$$

Y en estado dinámico:

$$\frac{dSalDes}{dt} = CaudalE \times SalE - Purga \times SalDes \quad (E-53)$$

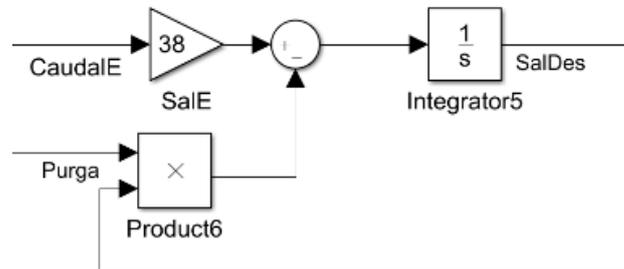


Figura 3.54 Simulink 30. Fuente: Elaboración propia.

Llegados a este se puede calcular el calor cedido por parte del agua evaporado al aire en primera instancia y más tarde al vidrio, debido a su variación de temperatura, de acuerdo a la figura 3.55. Se puede presuponer que el calor involucrado toma valores pequeños, pero a pesar de ello se tendrá en cuenta.

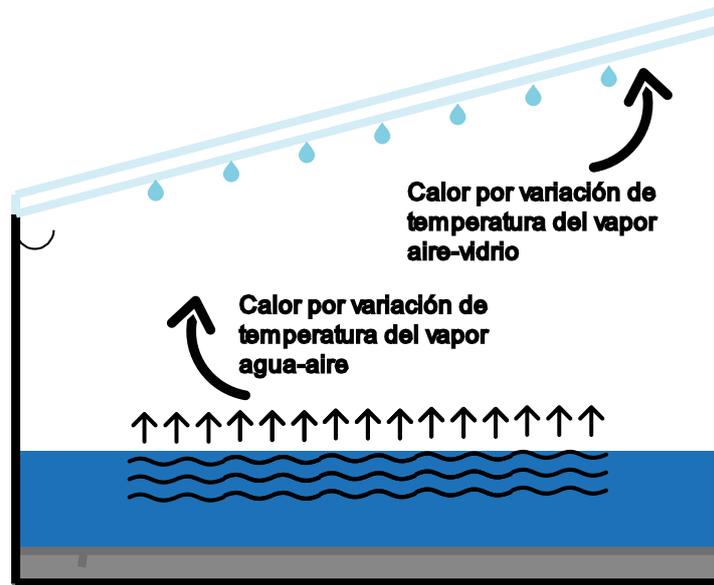


Figura 3.55 Flujos de calor por variación de temperatura del vapor. Fuente: Elaboración propia.

$$Q_{varT_{vap}A_{air}} = mc \times C_{vapagua} \times (T_{agua} - T_{air}) \quad (E-54)$$

Como se puede ver, el calor específico del vapor de agua toma valores diferentes al del agua líquida, y se aproximará por 1,74kJ/kg, debido a que el intervalo de temperaturas alcanzado está principalmente comprendido entre 45 y 65°C.

Tratado como positivo el calor cedido del agua al aire:

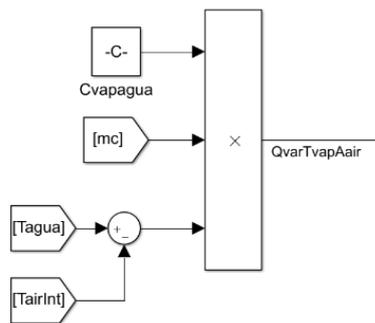


Figura 3.56 Simulink 31. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al calor cedido al vidrio:

$$Q_{varT_{vap}airV} = mc * C_{vapagua} * (T_{air} - T_v) \quad (E-55)$$

Tratado como positivo el calor cedido del agua al vidrio, se puede ver su implementación a Simulink en la figura 3.57.

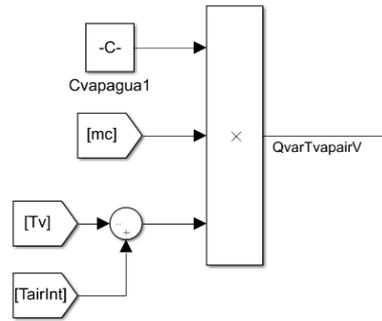


Figura 3.57 Simulink 32. Fuente: Elaboración propia.

A modo de aclaración de los intercambios de calor relacionados con la transferencia de masa vistos anteriormente, se muestra la figura 3.58; referenciada al propio agua y considerando su entrada a la misma temperatura que la adquirida al enfriarse hasta la temperatura de condensación. El objetivo de la figura es por tanto evidenciar la necesidad de los cálculos realizados anteriormente para cumplir con el principio de conservación de la energía.

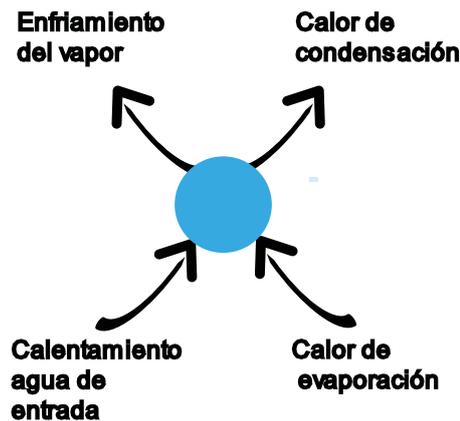
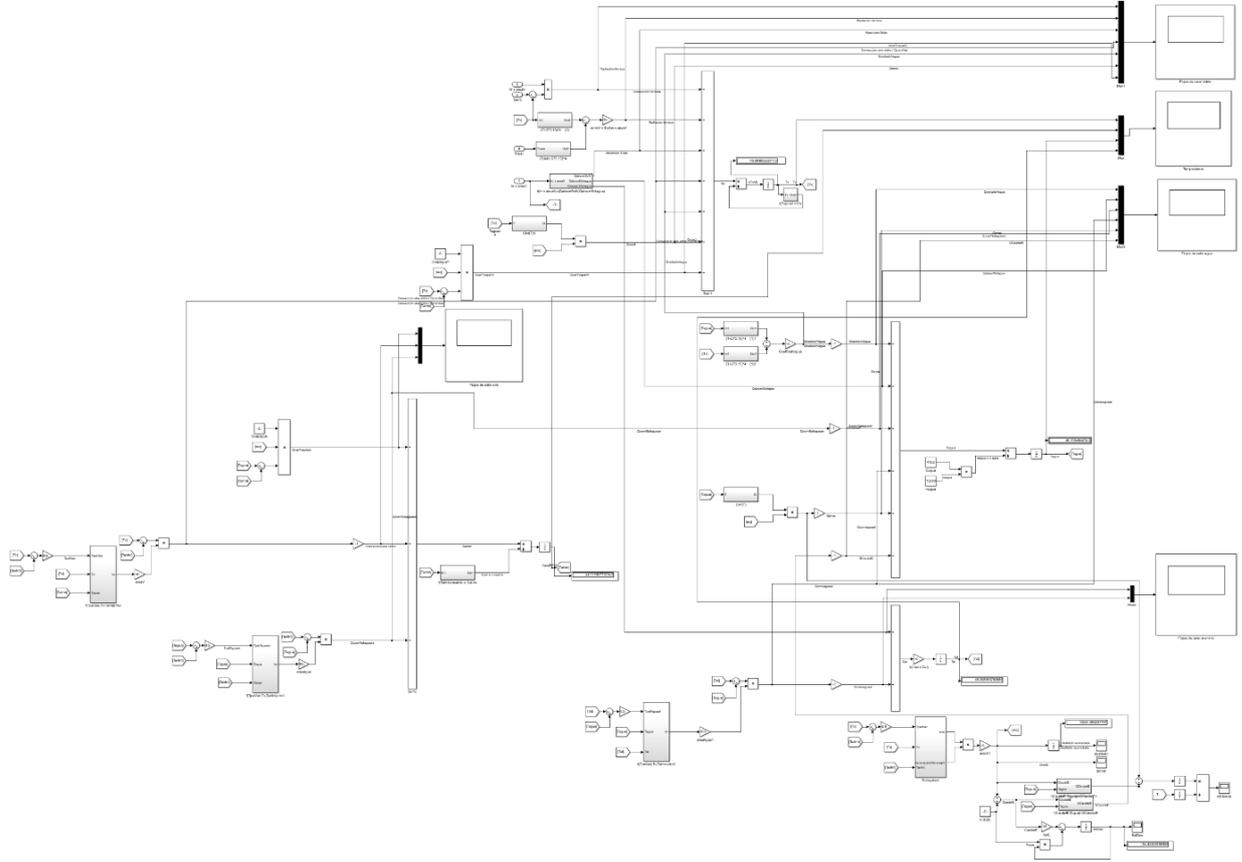


Figura 3.58 Esquema de conservación de la energía agua. Fuente: Elaboración propia.

Como vemos en la figura, si se toma agua a temperatura  $T_v$  y se calienta hasta  $T_{agua}$ , para posteriormente evaporarla, la energía involucrada será la misma que la liberada por el vapor enfriándose hasta  $T_v$  y su posterior condensación.

## Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta

La simulación completa quedará por tanto, incluidos los scopes (generadores de gráficas) y displays (valores de simulación en tiempo real), como se muestra justo a continuación en la figura 3.59.



**Figura 3.59 Simulink 33. Fuente: Elaboración propia.**

### 3.5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

La producción diaria estimada es de aproximadamente **833.5 kg** en las condiciones dadas, lo que supone un rendimiento de aproximadamente un **62,8%**, si se considera como energía útil exclusivamente aquella empleada en la evaporación, de acuerdo a la expresión:

$$\text{Rend} = \frac{\int Q_{\text{evap}} \times dt}{\int I_{\text{rr}} \times \text{area} \times V \times dt} \quad (\text{E-56})$$

A continuación son mostrados los resultados arrojados por la simulación, mostrando siempre la variable mencionada respecto al tiempo en segundos (mostrado en segundos y no horas debido a requerimientos de el sistema de simulación empleado).

Así mismo, para maximizar la precisión frente a problemas relacionados con las primeras aproximaciones realizadas por Matlab al comienzo de la simulación, esta se realizará acerca de 6 días exactamente iguales, de forma que esas imprecisiones se vean totalmente amortiguadas, tomando todos los resultados correspondiente a el último día simulación. Este procedimiento no tiene mayor importancia; se trata de propiciar una situación de partida del día de estudio igual al final del mismo, y eliminar las imprecisiones correspondientes al inicio de una simulación en Simulink.

En la figura 3.60 se puede observar las temperaturas alcanzadas por los elementos del destilador, en °C. En cuanto a las figuras 3.61 y 3.62, relacionadas con la producción de agua destilada en el sistema, vienen dadas en kg, y la figura 3.63, que incluye la salinidad del agua en el destilador, viene dada en tanto por mil (‰). Por otro lado, las figuras 3.64, 3.65, 3.66, 3.67 y 3.68, referentes a los flujos de calor que se dan en el sistema, vienen expresadas en Watios (W).

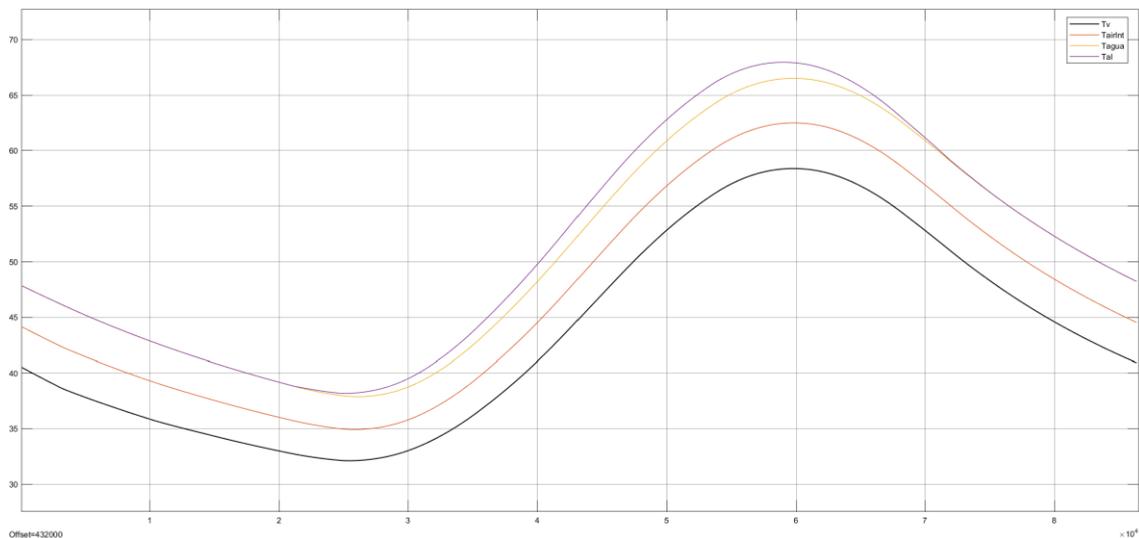
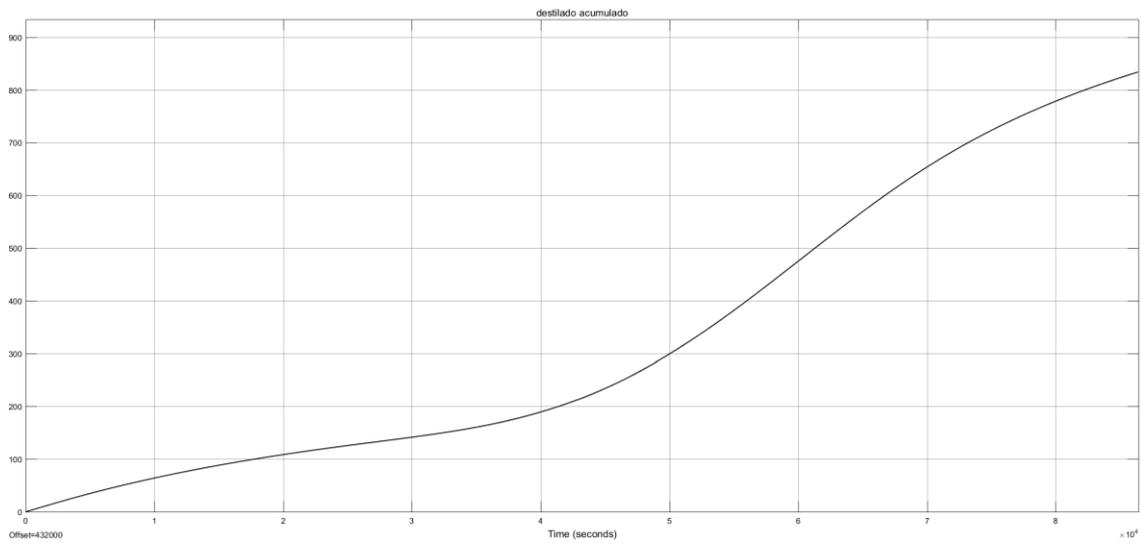
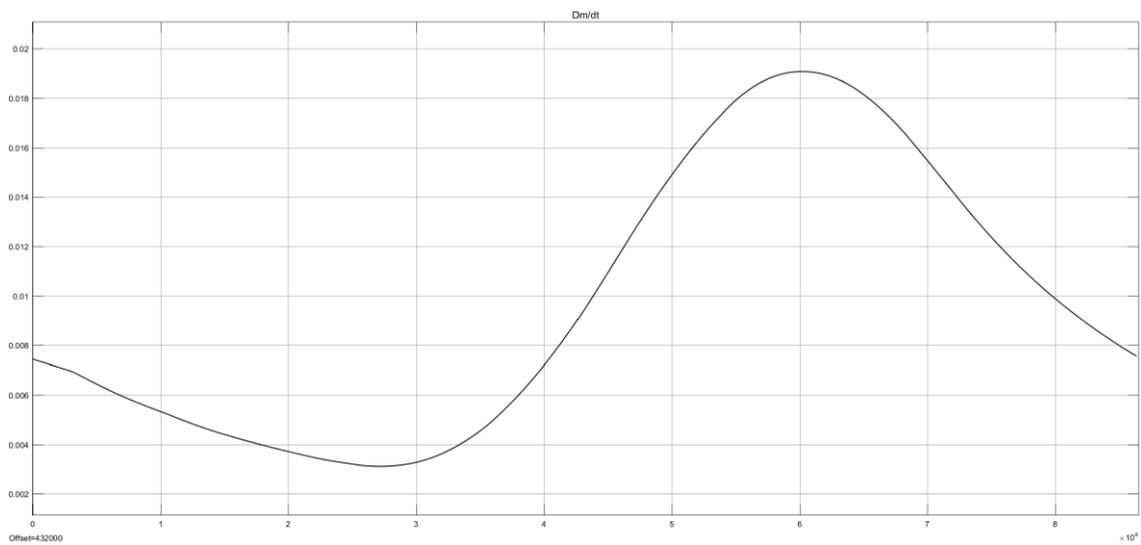


Figura 3.60 Temperaturas alcanzadas por los elementos del destilador. Fuente: Elaboración propia.

## Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta



**Figura 3.61** Producción de agua destilada acumulada. Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3.62** Producción de agua destilada por segundo. Fuente: Elaboración propia.

# Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta

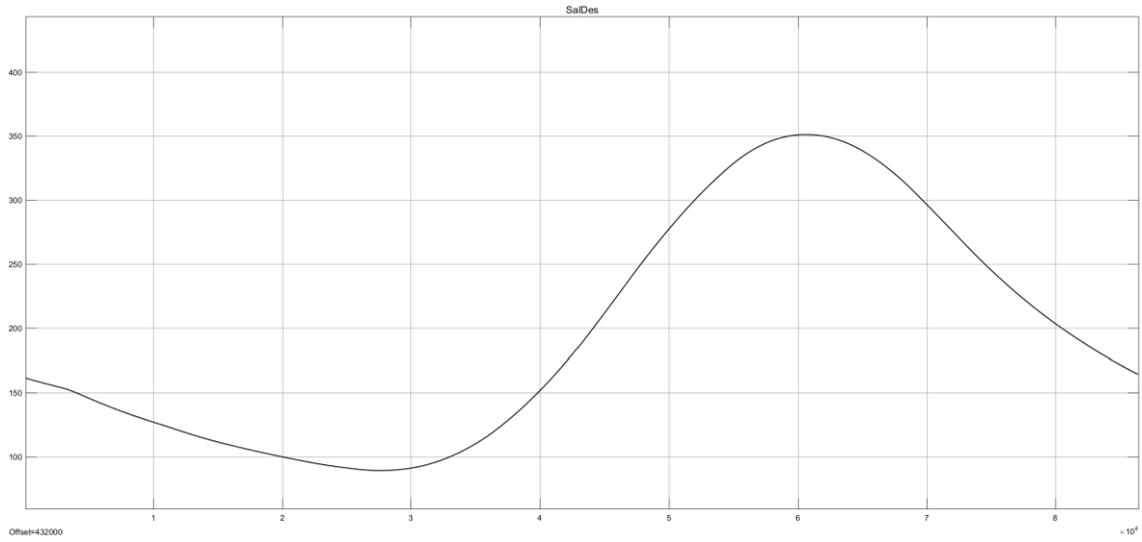


Figura 3.63 Salinidad del agua en el destilador. Fuente: Elaboración propia.

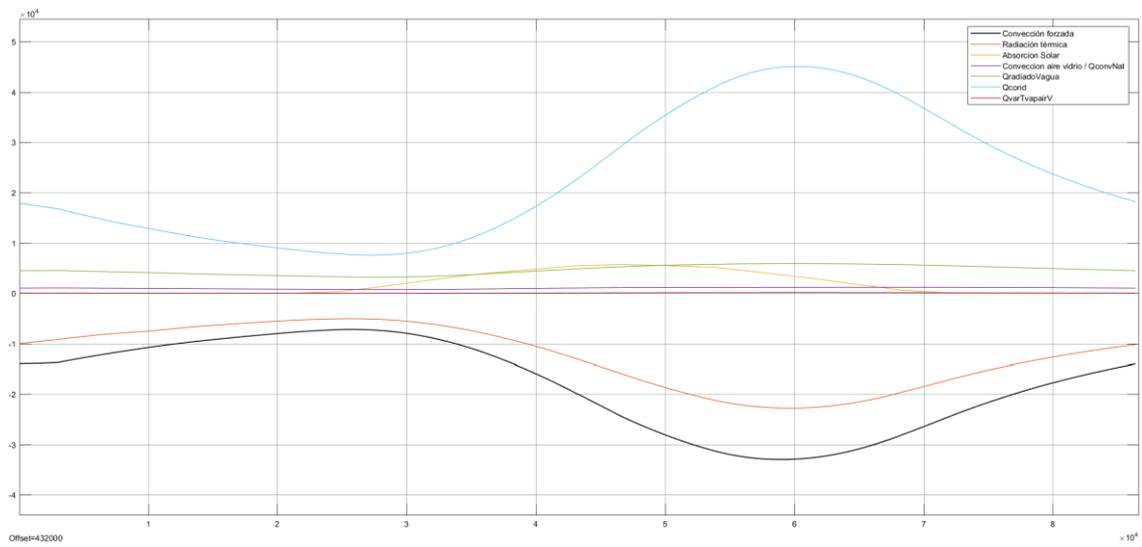


Figura 3.64 Flujos de calor del vidrio. Fuente: Elaboración propia.

## Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta

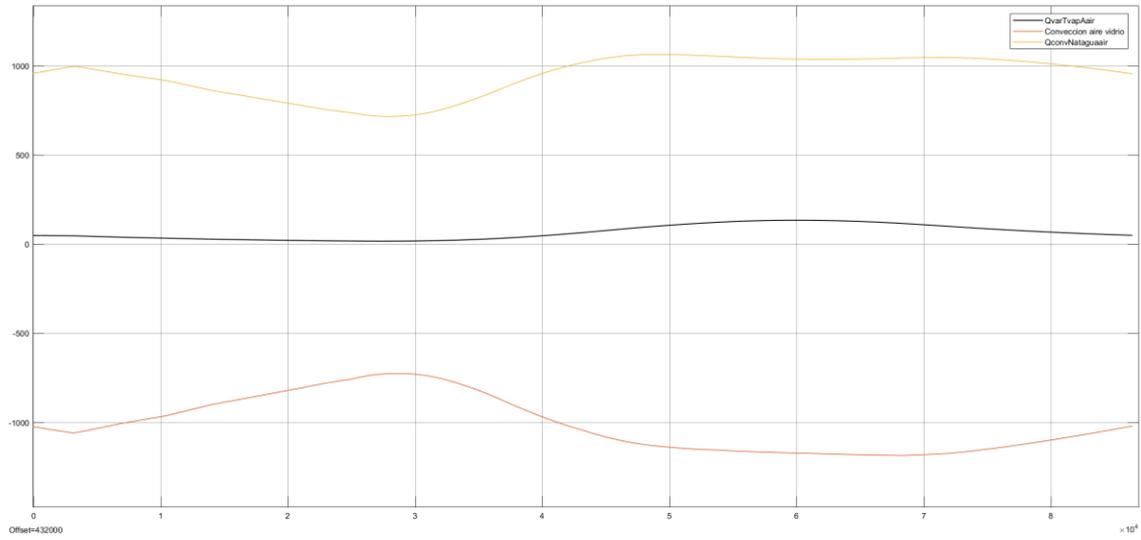


Figura 3.65 Flujos de calor del aire. Fuente: Elaboración propia.

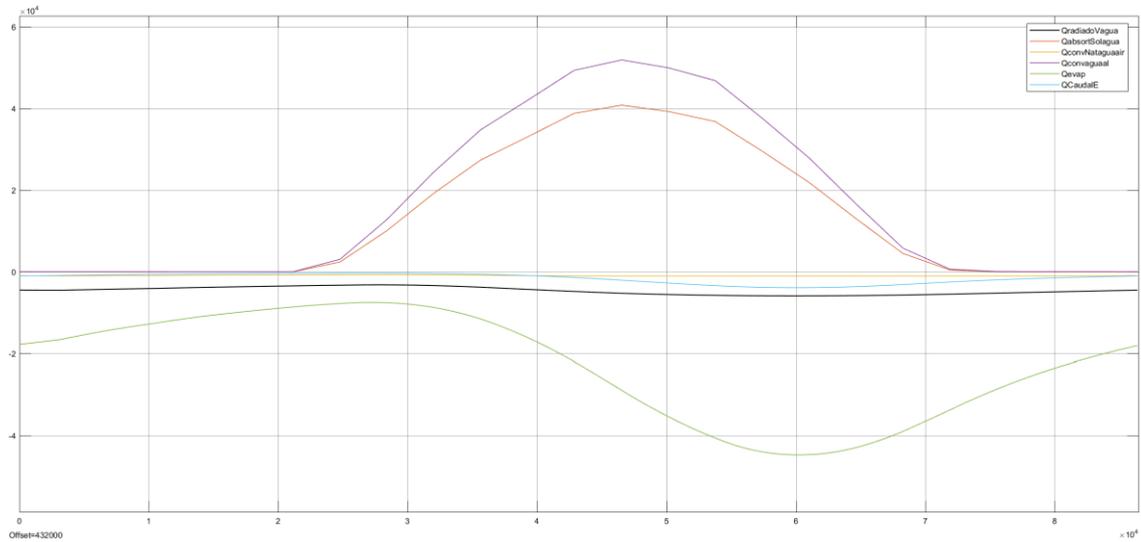


Figura 3.66 Flujos de calor del agua. Fuente: Elaboración propia.

## Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta

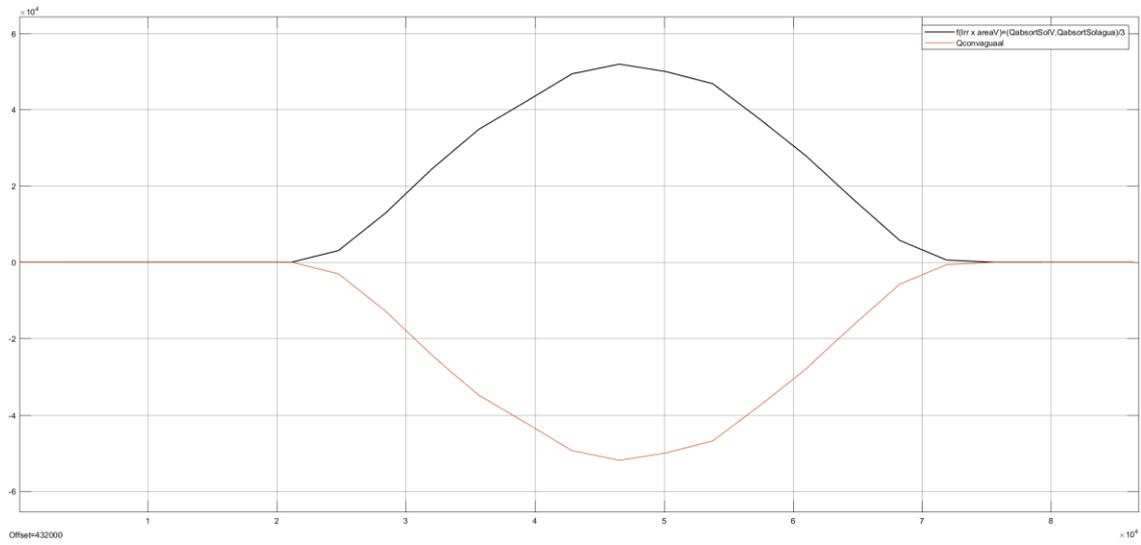


Figura 3.67 Flujo de calor del aluminio. Fuente: Elaboración propia.

### **3.6. EFECTO DE DIFERENTES PARÁMETROS SOBRE LA PRODUCCIÓN DE DESTILADO.**

A continuación se muestra los efectos de diferentes parámetros o modificaciones del sistema sobre la temperatura de los elementos del destilador y la producción de destilado para el caso estudiado, comparándola con el sistema original. Gracias a las siguientes simulaciones se podrá proponer una mejora del sistema coherente con los resultados obtenidos que permita aumentar la producción del destilador.

### 3.6.A. REDUCCIÓN DEL VIENTO QUE ALCANZA EL DESTILADOR .

Reduciendo un 90% el viento incidente sobre la superficie del destilador, se obtienen **864,2 kg** diarios de destilado, al reducir las pérdidas por convección forzada en el vidrio, tal y como se muestra en la figura 3.68.

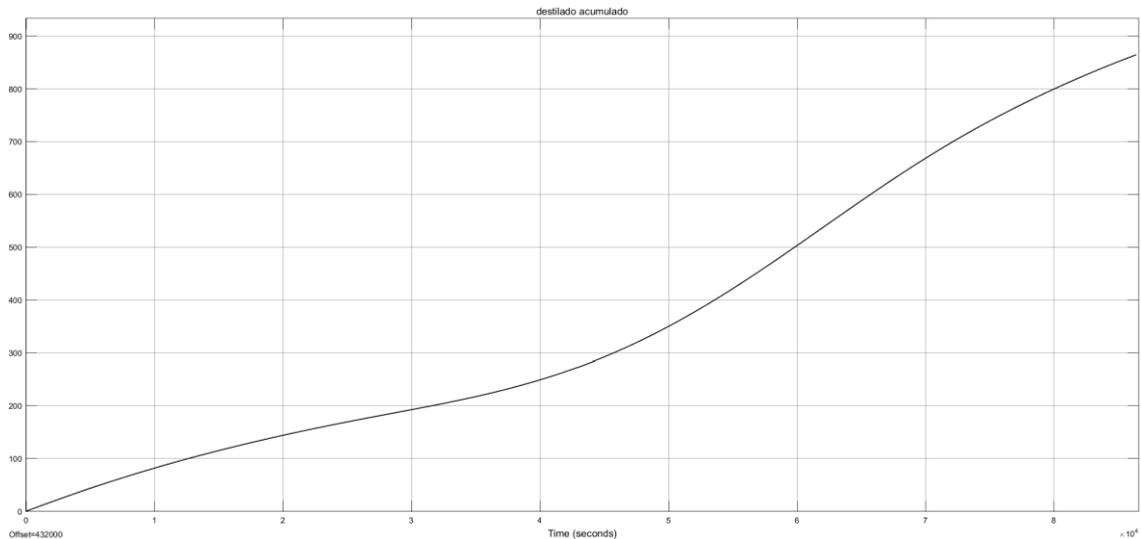


Figura 3.68 Producción de agua destilada acumulada. Fuente: Elaboración propia.

La evolución de las temperaturas, en  $^{\circ}\text{C}$ , se muestra en la figura 3.69.

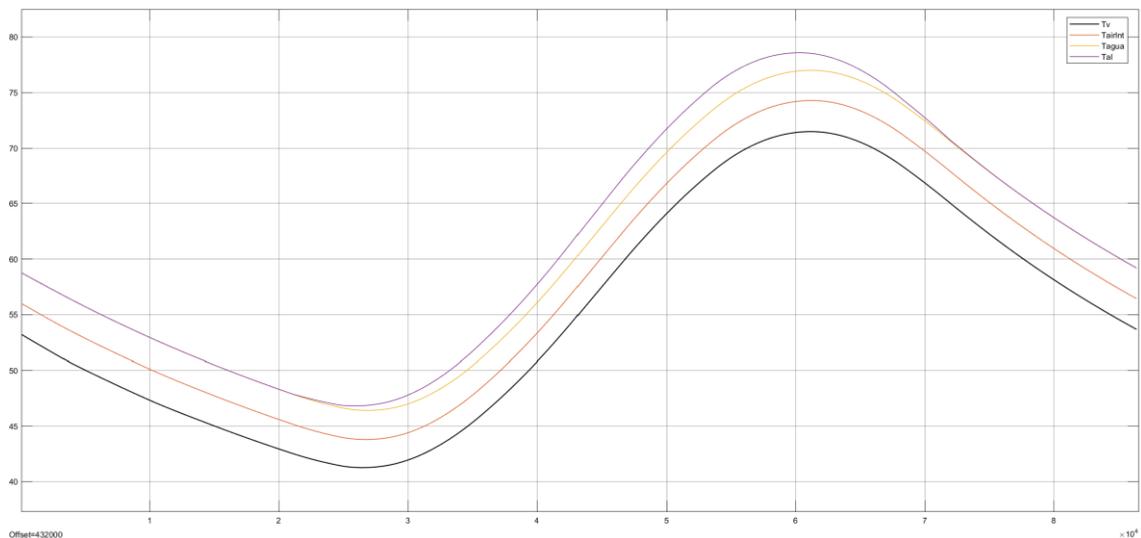


Figura 3.69 Temperaturas alcanzadas por los elementos del destilador. Fuente: Elaboración propia.

Esto supone un incremento sensible de producción y un incremento de las temperaturas, lo cual se puede entender como positivo. Dicho incremento es de aproximadamente 30 kg (3,6%) en la producción. A pesar de ello, se debe tener en cuenta que aumentos puntuales del viento suponen aumentos puntuales de la producción pero a costa de producciones futuras, pues aumenta la condensación pero se reduce significativamente la temperatura del destilador, lo cual tendrá efectos negativos sobre la evaporación.

### 3.6.B. REFRIGERACIÓN DEL VIDRIO, MANTENIENDO $T_V$ CONSTANTE E IGUAL A $30^{\circ}\text{C}$ .

Poco realista pero útil para conocer el efecto de una refrigeración del vidrio sobre la producción de destilado. No se busca centrarse en el procedimiento a través del cual se logra la refrigeración, sino sobre los efectos de la misma, considerando el calor tomado del vidrio como “perdido”, tal y como se ve en la figura 3.70.

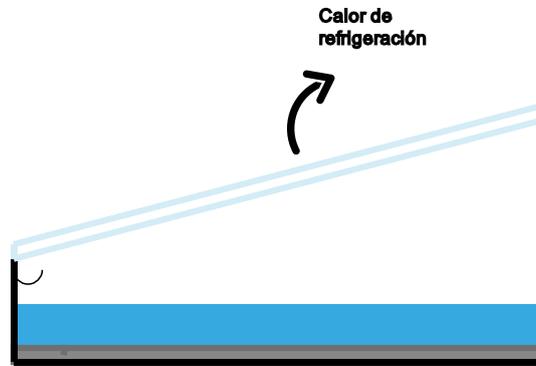


Figura 3.70 Refrigeración del vidrio. Fuente: Elaboración propia.

Producción de destilado total de **756 kg** aproximadamente, con la evolución mostrada en la figura 3.71.

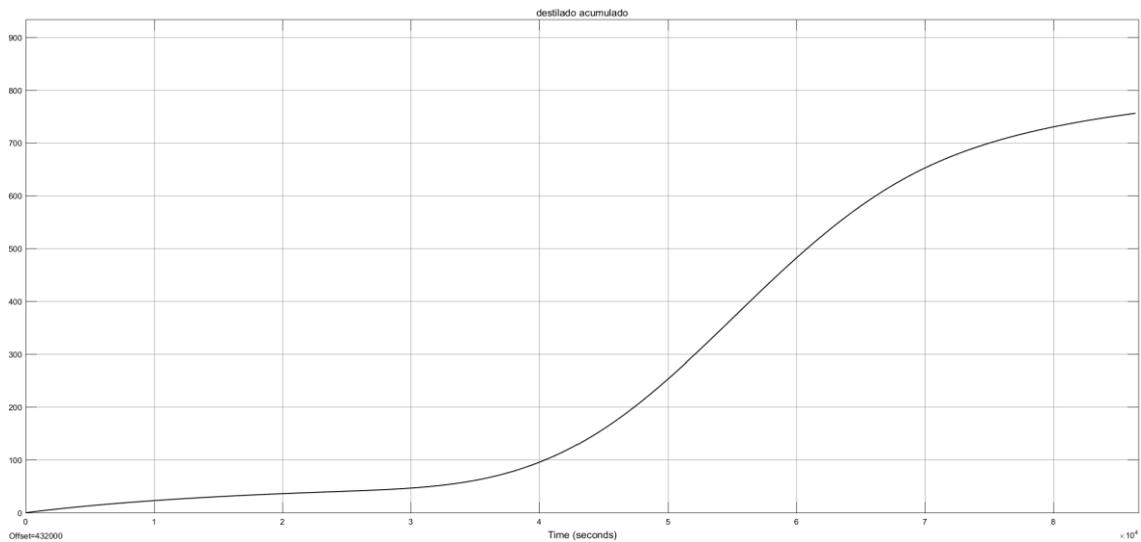
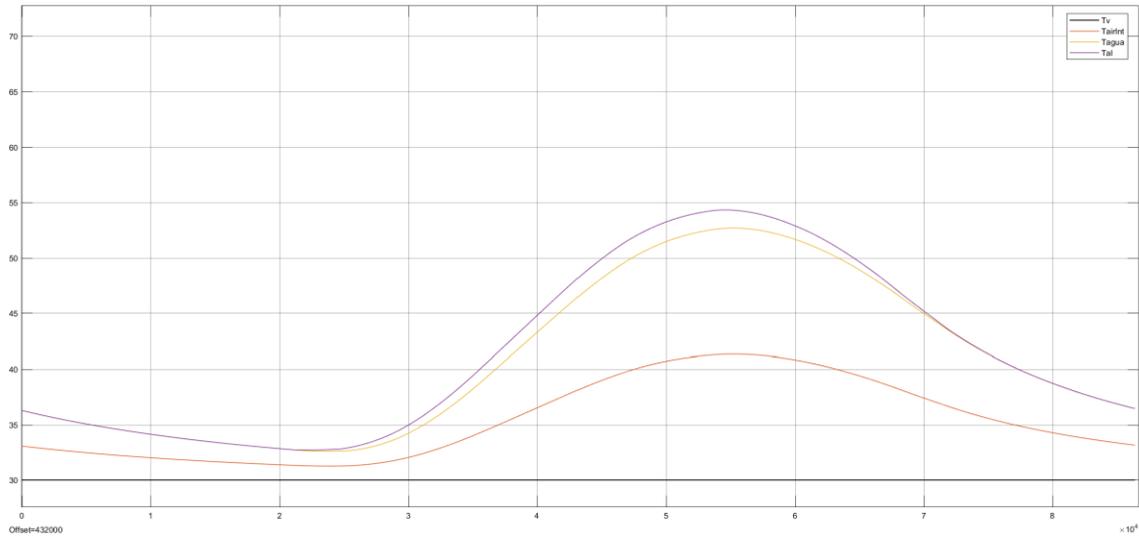


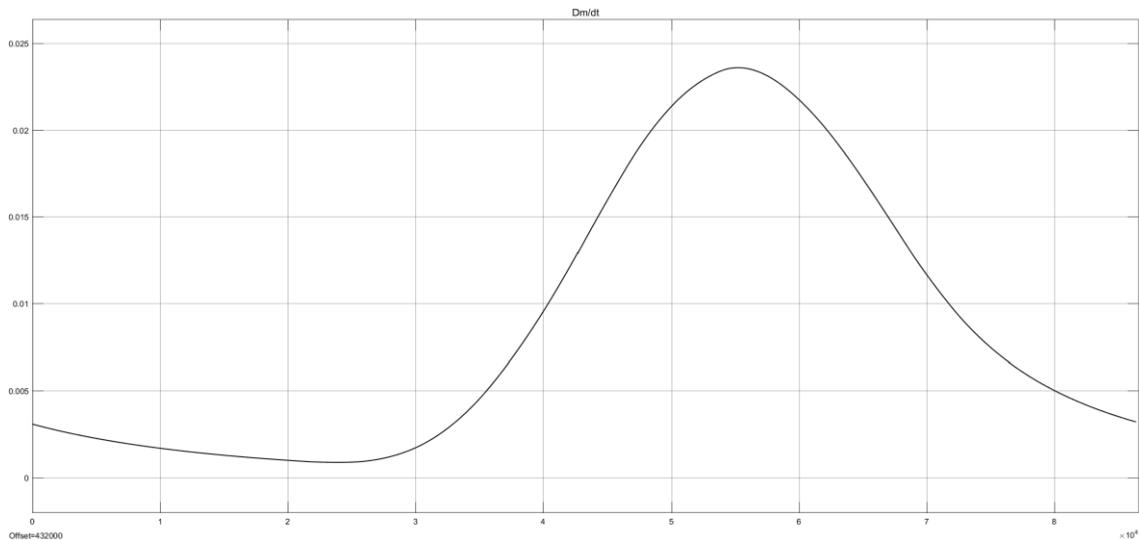
Figura 3.71 Producción de agua destilada acumulada. Fuente: Elaboración propia.

La evolución de las temperaturas, en °C, se muestra en la figura 3.72.



**Figura 3.72** Temperaturas alcanzadas por los elementos del destilador. Fuente: Elaboración propia.

La producción es sensiblemente inferior, de aproximadamente 78,2 kg menos al día (9,4%). Esta se acelera enormemente al elevarse la temperatura del resto de medios, pero el flujo de calor por refrigeración es excesivo y la misma cae rápidamente, tal y como se aprecia en la figura 3.73.



**Figura 3.73** Producción de agua destilada por segundo. Fuente: Elaboración propia.

Por tanto, queda confirmado que la refrigeración del vidrio tiene efectos perjudiciales sobre la producción a medio y largo plazo, pero puede propiciar picos de condensación que en algunas circunstancias pueden ser convenientes, asumiendo el descenso de producción involucrado en el futuro.

### 3.6.C. REDUCCIÓN DE LA PURGA .

Reducción de la purga sin que exista precipitado acumulado al final del día pero aceptando precipitaciones de soluto considerables en momentos puntuales durante el propio día. Tomando una purga de 120 L diarios, es decir, una reducción del 40%, el destilado será de **837,5 kg** diarios, de acuerdo a la figura 3.74.

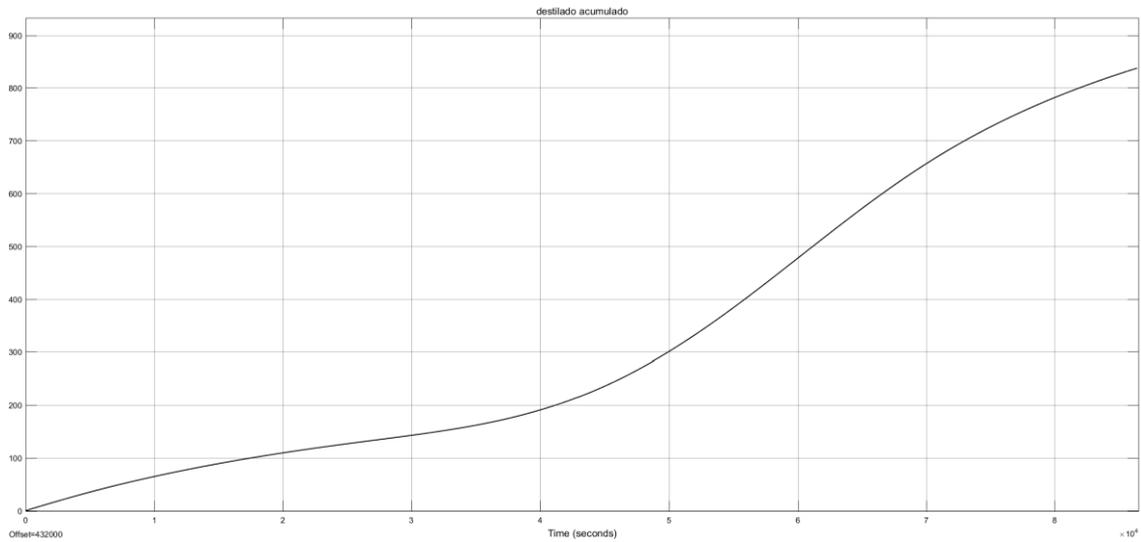


Figura 3.74 Producción de agua destilada acumulada. Fuente: Elaboración propia.

La evolución de las temperaturas, en  $^{\circ}\text{C}$ , se muestra en la figura 3.75.

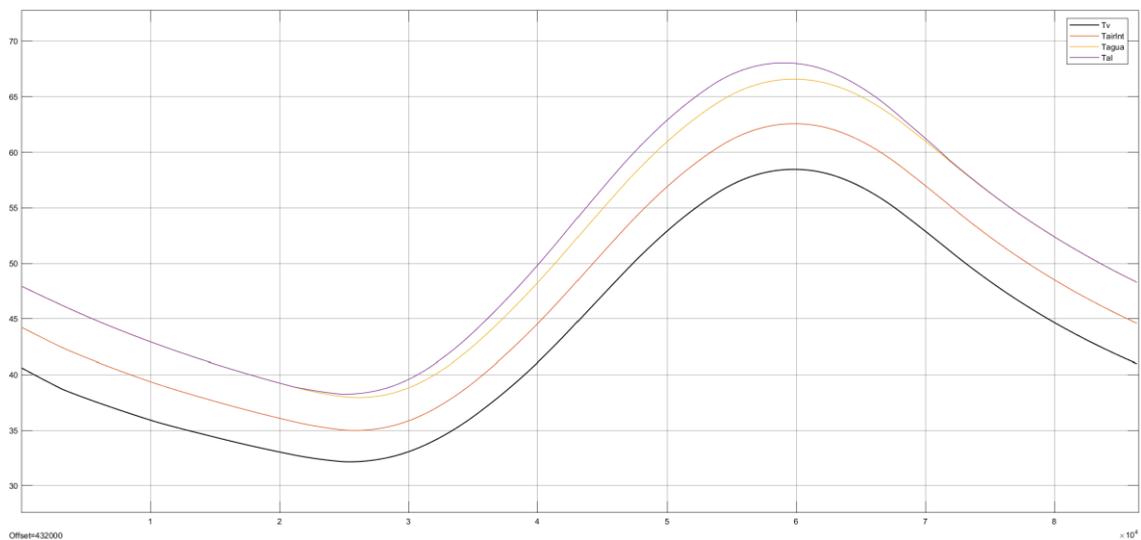
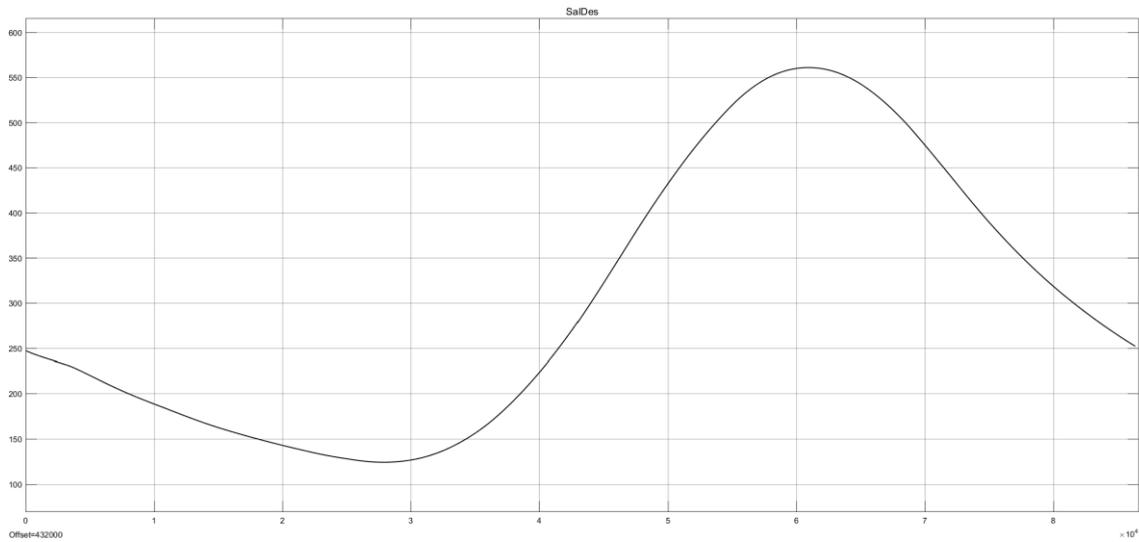


Figura 3.75 Temperaturas alcanzadas por los elementos del destilador. Fuente: Elaboración propia.

## Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta

La salinidad del agua interior (todo aquello que supere la solubilidad para cada temperatura precipitará al fondo del destilador), se muestra en la figura 3.76.



**Figura 3.76 Salinidad del agua en el destilador. Fuente: Elaboración propia.**

Puede intuirse que el funcionamiento del sistema será previsiblemente peor a causa de los precipitados en aquellos días que la producción sea más elevada, y la ganancia es de solo aproximadamente 3,3 kg diarios (0,4%), por lo que no tiene por qué ser conveniente implantar esta “mejora”. Queda así mismo justificada la razón de contar con una purga sensiblemente mayor de la estrictamente necesaria para evitar acumulaciones de precipitado tras un día completo en el destilador.

### 3.6.D. TRATAMIENTO SUPERFICIAL DEL VIDRIO ..

Con un tratamiento superficial del vidrio para reducir su emisividad y absorptividad de onda larga en un 50%, aumenta el destilado hasta aproximadamente **911,1 kg** diarios, como se observa en la figura 3.77.

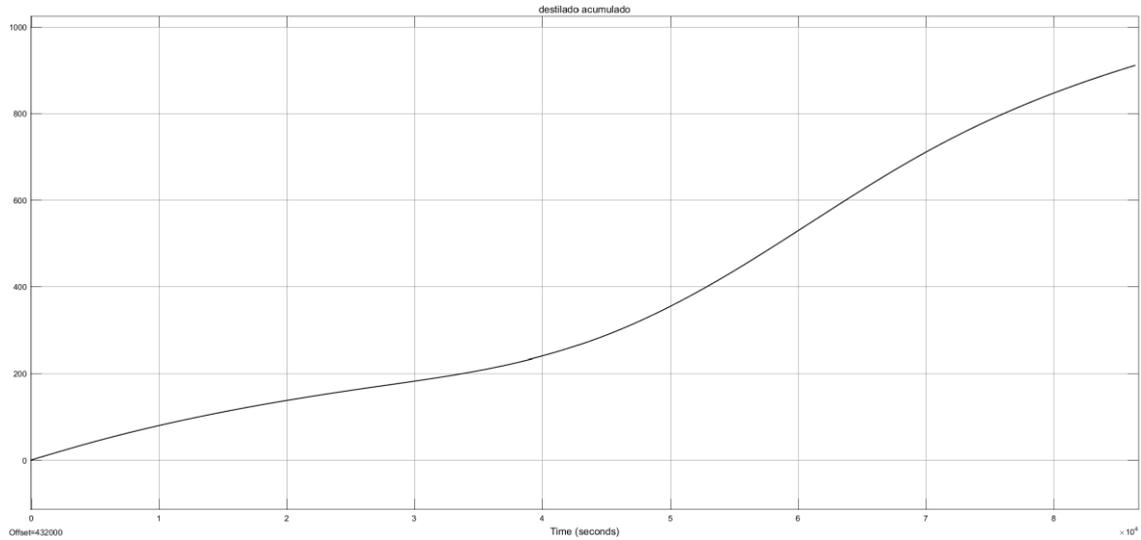


Figura 3.77 Producción de agua destilada acumulada. Fuente: Elaboración propia.

La evolución de las temperaturas, en  $^{\circ}\text{C}$ , se muestra en la figura 3.78.

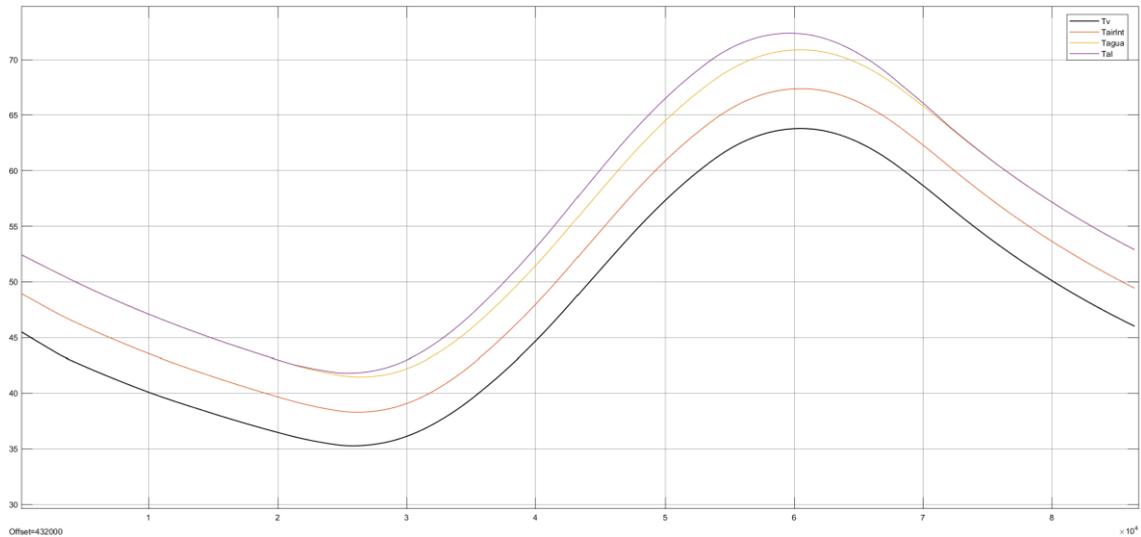


Figura 3.78 Temperaturas alcanzadas por los elementos del destilador. Fuente: Elaboración propia.

Esto supone un aumento de aproximadamente 76,9 L diarios (9,2%), lo cual demuestra que las características ópticas del vidrio resultan de elevado interés.

### 3.6.E. PRECALENTAMIENTO DEL AGUA DE ENTRADA HASTA 32°C. .

Útil para conocer el efecto de un precalentamiento del agua de entrada sobre la producción de destilado. No se busca centrarse sobre el procedimiento a través del cual se logra el precalentamiento, sino sobre los efectos del mismo. El precalentamiento sucede por tanto en el exterior del destilador, sin suponer flujos de calor adicionales en el mismo.

Para una mejor comprensión, puede resultar conveniente imaginarse que el precalentamiento se realiza, por ejemplo, gracias a la quema de combustibles fósiles en una etapa previa a su introducción en el destilador, como se ha mostrado en la figura 3.79.



Figura 3.79 *Precalentamiento del agua de entrada. Fuente: Elaboración propia.*

La producción de destilado será de aproximadamente **848,4 kg** por día, lo que supone un incremento de aproximadamente 14,2 L al día (1,7%), tal y como se muestra en la figura 3.80.

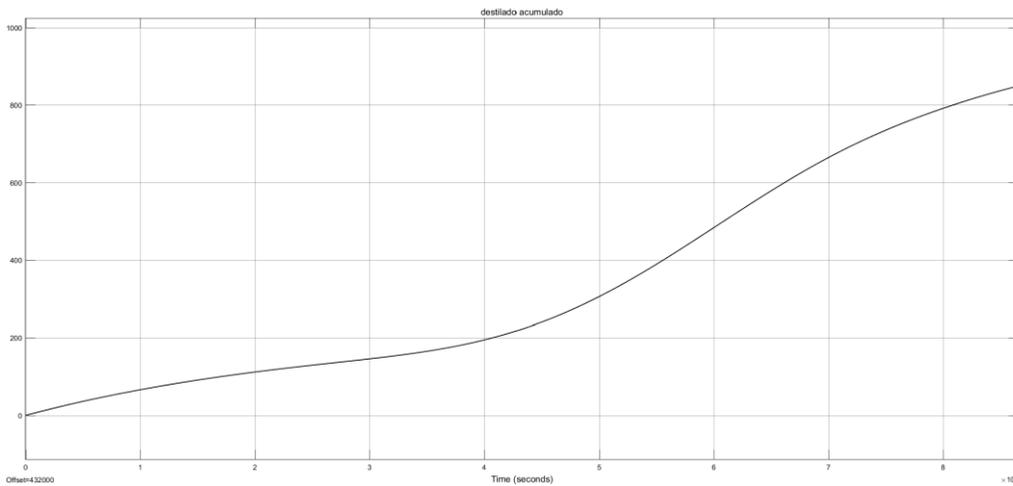


Figura 3.80 *Producción de agua destilada acumulada. Fuente: Elaboración propia.*

La evolución de las temperaturas, en °C, se muestra en la figura 3.81.

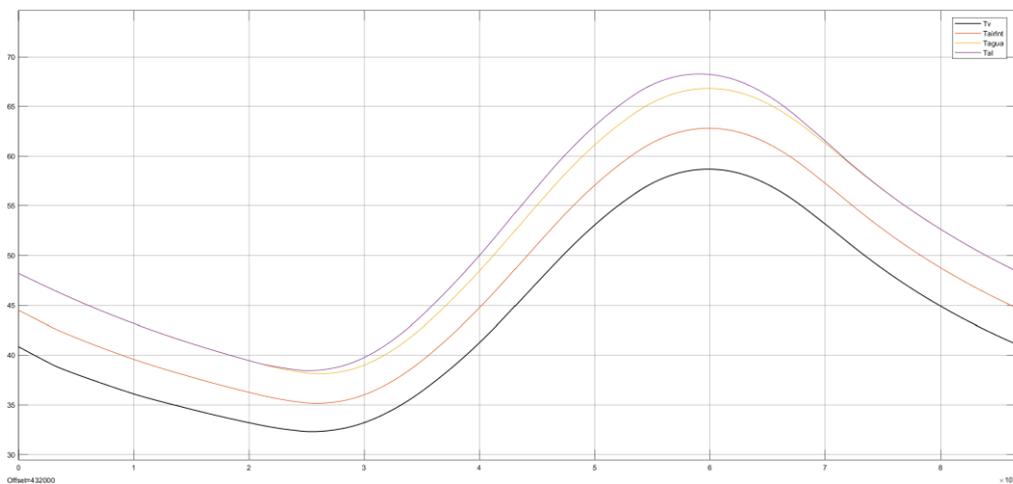
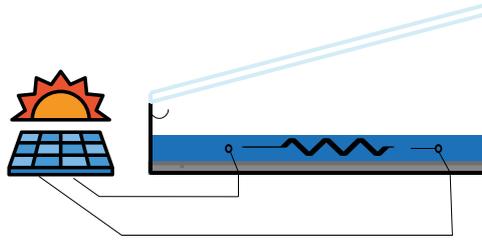


Figura 3.81 *Temperaturas alcanzadas por los elementos del destilador. Fuente: Elaboración propia.*

### 3.6.F. APOORTE DE CALOR MEDIANTE INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA Y RESISTENCIAS .



*Figura 3.82 Calentamiento del agua mediante instalación fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia.*

Como resulta evidente, un aporte calorífico a partir de resistencias en el agua supondrá un incremento de la producción para un mismo espacio de destilador. A pesar de ello, el rendimiento del destilador supera el 60% en el estudio teórico (se puede suponer que el rendimiento real será menor, cercano al 40%), mientras que el de las instalaciones fotovoltaicas ronda un 10-15%. Así, no resulta interesante planificar una instalación de desalación que incorpore paneles fotovoltaicos como potencia a disipar en resistencias inmersas en el agua. A pesar de ello, si contamos con un sistema de bombeo de agua de alimentación al destilador que incorpora ésta tecnología, sí resultaría interesante hacerlo trabajar siempre en su punto de máximo rendimiento, empleando aquella energía no utilizada para el bombeo en las resistencias, de forma que no sea desaprovechada.

### 3.6.G.PRECALENTAMIENTO DEL AGUA DE ENTRADA HASTA TV. .

Al igual que en el caso de precalentamiento hasta  $32^{\circ}\text{C}$ , se busca centrarse en el fenómeno a través del cual se logra el precalentamiento, sino meramente se considera que el agua de entrada se introduce a la temperatura dada.

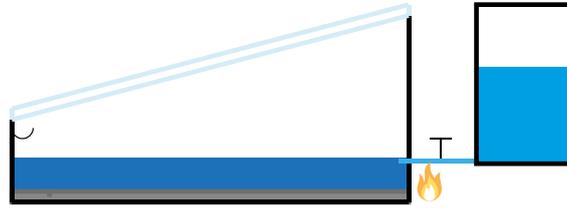


Figura 3.83 Precalentamiento del agua de entrada. Fuente: Elaboración propia.

El destilado a lo largo de un día pasa a ser 875,5 kg aproximadamente, lo que supone un incremento de 41,3kg un 5%, tal y como se muestra en la figura 3.84.

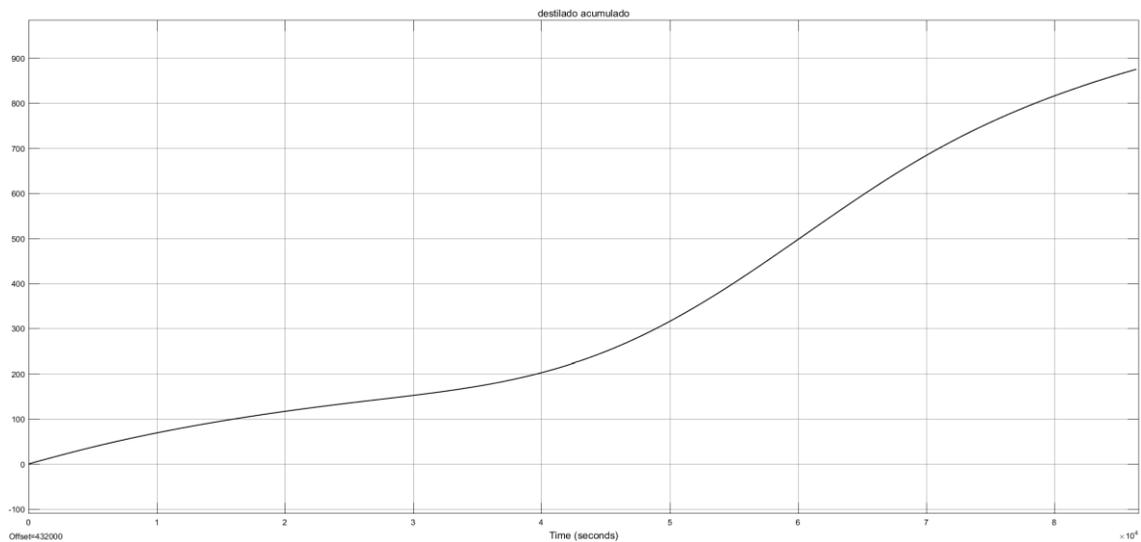


Figura 3.84 Producción de agua destilada acumulada. Fuente: Elaboración propia.

La evolución de las temperaturas, en  $^{\circ}\text{C}$ , se muestra en la figura 3.85.

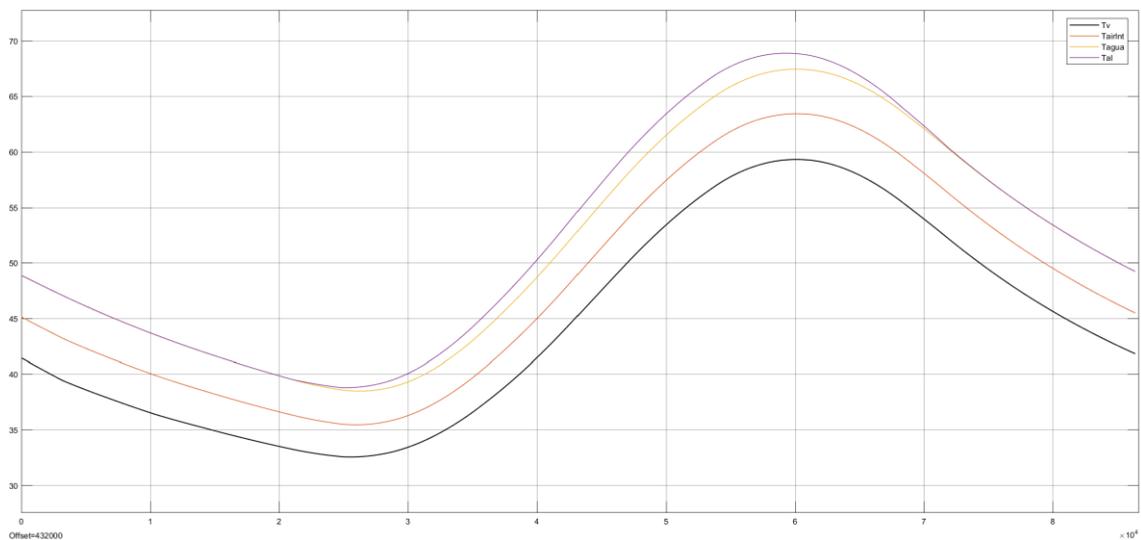


Figura 3.85 Temperaturas alcanzadas por los elementos del destilador. Fuente: Elaboración propia.

### 3.6.H. RESUMEN DE LOS FENÓMENOS DE POSIBLE APLICACIÓN.

Para aumentar la claridad y concentrar los resultados obtenidos en los apartados anteriores, se ha elaborado la tabla 3.1, que engloba todos los fenómenos estudiados, así como el efecto producido sobre la producción de destilado y una breve conclusión obtenida para cada uno de esos fenómenos.

*Tabla 3.1 Resumen de los fenómenos y efectos*

Fenómeno	Efecto sobre destilado	Conclusión
Reducción del viento que alcanza el destilador en un 90%	+3,6%	Interesante y de sencilla aplicación.
Refrigeración del vidrio	Negativo	No es interesante excepto puntualmente si se desea propiciar picos puntuales de producción.
Reducción de la purga en un 40%.	+0,4%	Inconveniente, ganancia muy reducida que aumenta coste, complejidad y mantenimiento.
Tratamiento superficial del vidrio para reducir su emisividad y absortividad de onda larga un 50%.	+9,2%	Elevado interés.
Pre calentamiento del agua de entrada	Un pre calentamiento hasta 32°C supone un incremento del 1,7%. Un pre calentamiento hasta $T_v$ supone un incremento de hasta 5%.	Elevado interés.
Aporte de calor mediante instalación fotovoltaica y resistencias.	Positivo	Reducido interés.

Vistos los efectos de los diferentes fenómenos tratados, se observa que además de intentar proveer a la instalación con vidrios de reducida absortividad y emisividad de onda larga, y la instalación del sistema con pantallas protectoras del viento o en emplazamientos donde el mismo sea reducido, una posible mejora reside en el pre calentamiento del agua de entrada, a costa de refrigerar el vidrio, debido a que los beneficios del pre calentamiento superan a priori los perjuicios de la refrigeración de este.

Es interesante señalar que las tres mejoras mencionadas no son excluyentes entre sí, sino que se espera que su implantación combinada tenga mayores efectos en la producción que su implantación por separado.



---

**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

# **PROPUESTA DE MEJORA Y ANÁLISIS**

#### 4. PROPUESTA DE MEJORA Y ANÁLISIS

De acuerdo a los resultados obtenidos con anterioridad en el capítulo 3, se puede proponer como mejora al sistema original la introducción del agua de alimentación a través del vidrio, precalentándose, antes de su mezcla con el agua del destilador. De ésta forma, el vidrio también resultaría refrigerado (lo cual en principio resulta negativo, esperándose por tanto un incremento de producción ligeramente inferior al 5%). Para facilitar la transmisión de calor y evitar pérdidas de calor al ambiente por evaporación, se propone la existencia de dos planchas de vidrio de la mitad de espesor que la original, entre las cuales circulará una delgada lámina de agua de un espesor de 1mm, de acuerdo a la figura 4.1.

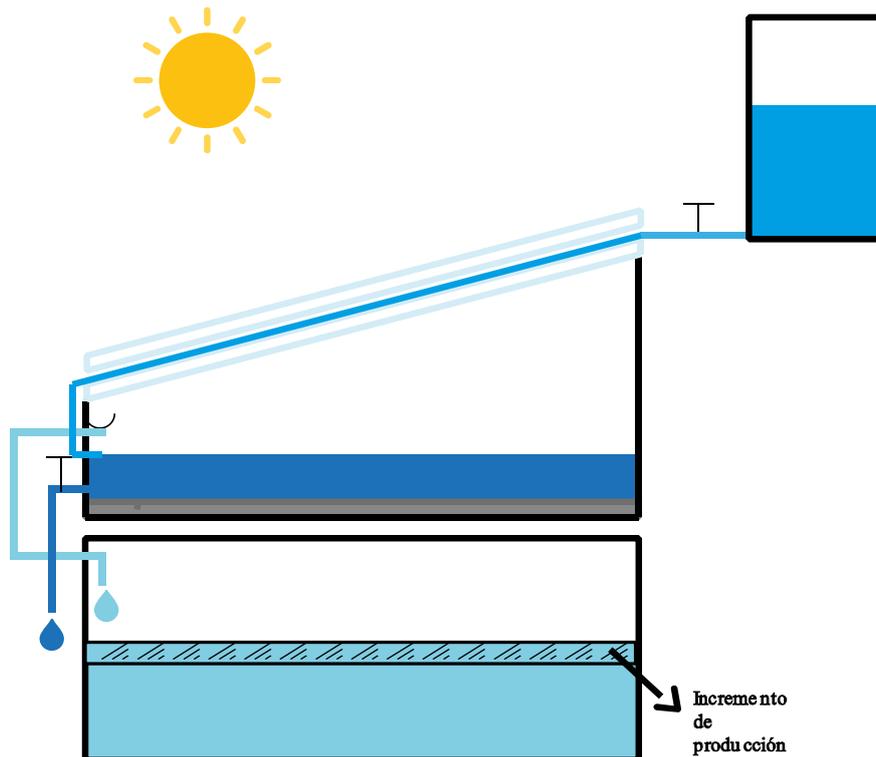


Figura 4.1 Esquema propuesta de mejora. Fuente: Elaboración propia.

El agua saliente de éste espacio hacia en agua del interior del destilador coincide con el agua entrante a 23°C, por lo cual se puede considerar el calor cedido por el conjunto agua-vidrio como el empleado en calentar el agua entrante hasta la  $T_v$ , que se asimilará como temperatura del conjunto.

En total se contará con aproximadamente 108,64 L de agua en el espacio entre láminas de vidrio en cada instante, calculado multiplicando el espesor de la lámina por el área del vidrio.

Éste agua aumentará la inercia térmica del vidrio y debe ser tenida en cuenta por tanto, así como resulta conveniente estudiar si sus efectos ópticos han de ser considerados.

En cuanto al calor específico del conjunto, será calculado como:

$$V_a = \frac{mV \times CV + mA_{\text{agua}} \times C_{\text{agua}}}{mV + mA_{\text{agua}}} = \frac{1086,4 \times CV + 108,64 \times C_{\text{agua}}}{1195,4} \quad (\text{E-57})$$

Su masa será por tanto, y como ya se ha introducido, 1195,4 kg.

Implementado en Simulink, Cva x mva tendrá la apariencia mostrada en la figura 4.2.

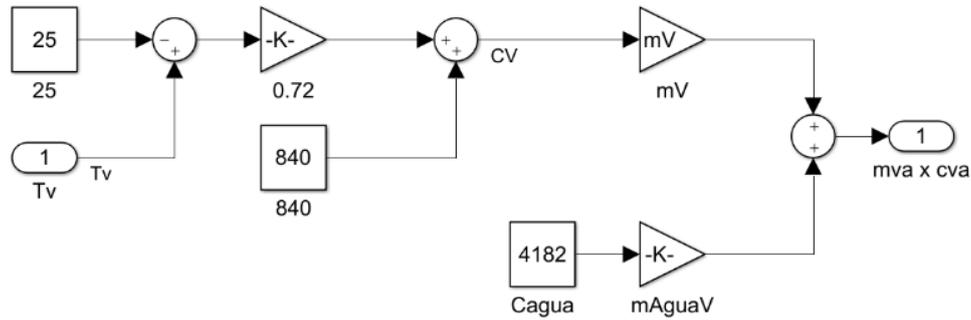


Figura 4.2 Simulink 34. Fuente: Elaboración propia.

Las propiedades ópticas de una lámina de agua de 1mm de espesor serán calculadas a partir de los datos empleados para 10cm (obtenidos de manera experimental y tomados de la fuente (17)), a través de la Ley de Beer, donde:

$$\text{Transmisividad} = 10^{-\alpha \times L} \quad (\text{E-58})$$

Se puede observar que en la anterior expresión L es el espesor, obteniendo así  $\alpha = 2.60427$ .

Para una lámina de 1mm, la transmisividad es de 0.994, muy cercano a la unidad.

Por tanto, dado un error del 0,6%, resulta conveniente considerar que la transmisividad de la lámina de agua es igual a 1, y por lo tanto su emisividad, absortividad y reflectividad son nulas. Esto supone que las propiedades ópticas del vidrio son, a efectos de cálculo, iguales a las del conjunto agua-vidrio, siendo conscientes de haber asumido un ligerísimo error en esta aproximación.

El otro cambio a implementar respecto a la situación original reside en la supresión del flujo de calor negativo del agua del interior del destilador debido a la entrada de agua a 23°C. Éste flujo será ahora correspondiente a la entrada de agua a la temperatura Tv, previamente precalentada a costa de un flujo de calor en el conjunto vidrio-agua; reflejado en la figura 4.3..

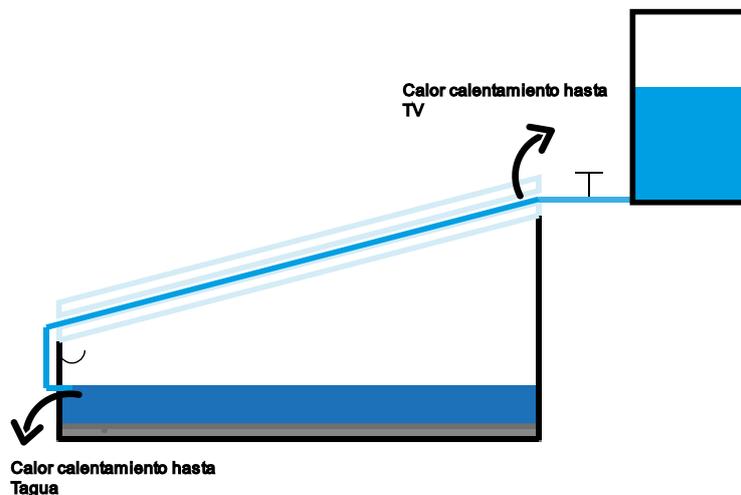


Figura 4.3 Flujos de calor calentamiento agua de entrada. Fuente: Elaboración propia.

## Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta

La implementación del cálculo del flujo de calor perdido por el agua interior para el calentamiento del agua procedente del conjunto agua-vidrio se muestra a continuación en la figura 4.4.

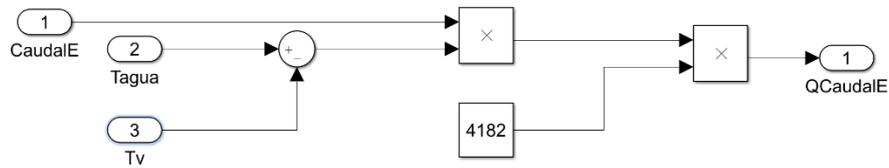


Figura 4.4 Simulink 35. Fuente: Elaboración propia.

Para el caso del flujo de calor perdido por el conjunto agua-vidrio para el calentamiento del agua de toma, a 23°C desde el agua del depósito de agua marina, la implementación de QCaudalEva es la mostrada en la figura 4.5.

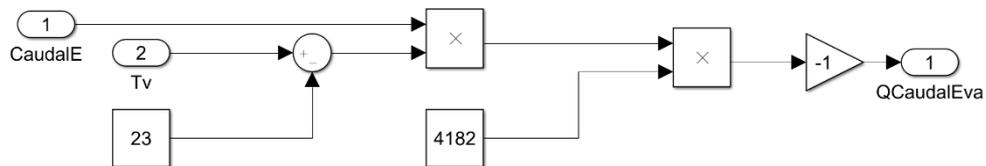


Figura 4.5 Simulink 36. Fuente: Elaboración propia.

El anterior flujo será sumado al cómputo global de flujos absorbidos por el conjunto vidrio-agua mostrados en la figura 3.59.

Se está por tanto en disposición de realizar la simulación, una vez introducidos los cambios mencionados anteriormente, con los resultados detallados a continuación.

Destilado total diario de **872 kg** (incremento de casi un 4,5%; 37,8 kg diarios), tal y como se ve en la figura 4.6, es decir, el precalentamiento del agua de entrada prevalece enormemente sobre la reducción de la producción debido a una ligera refrigeración del vidrio. Su eficiencia, calculada como en el sistema original, es por tanto de aproximadamente el **65,6%**.

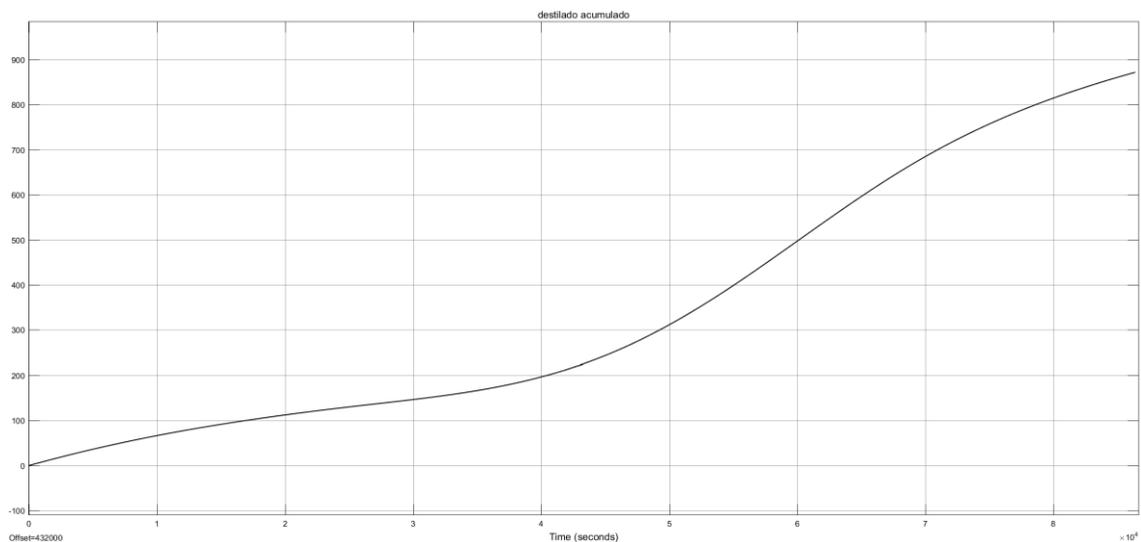


Figura 4.6 Producción de agua destilada acumulada. Fuente: Elaboración propia.

La evolución de las temperaturas, en °C, se muestra en la figura 4.7.

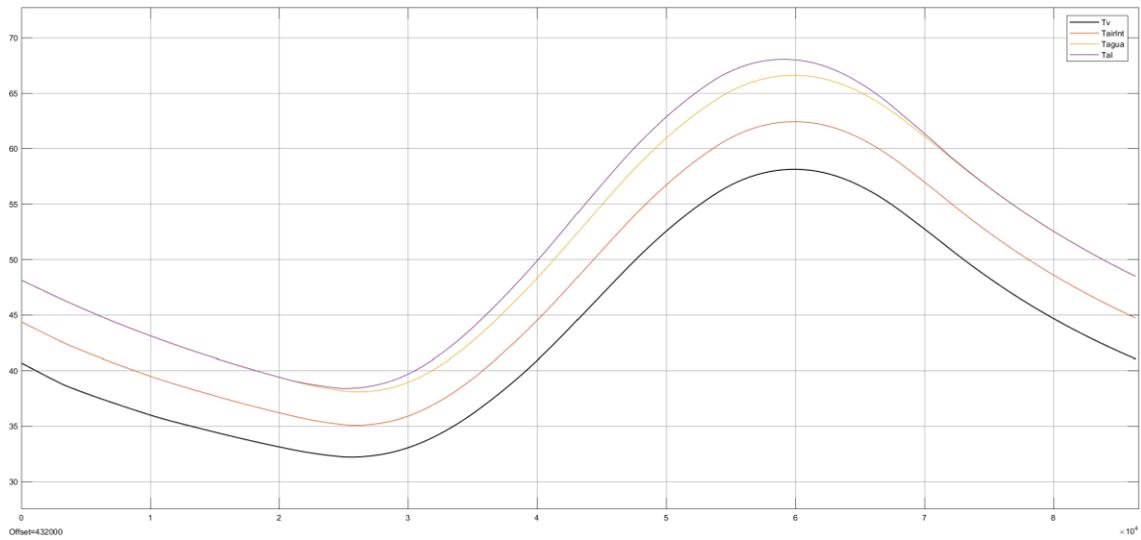


Figura 4.7 Temperaturas alcanzadas por los elementos del destilador. Fuente: Elaboración propia.

A continuación se muestran los flujos de calor involucrados en el sistema, medidos en Watios (W). Los respectivos al conjunto vidrio-agua, es decir, a la cubierta y el agua contenido en la cubierta, se muestran en la figura 4.8. Los del aire interior en la figura 4.9, los del agua interior en la figura 4.10, y los referentes a la placa absorbidora en la figura 4.11.

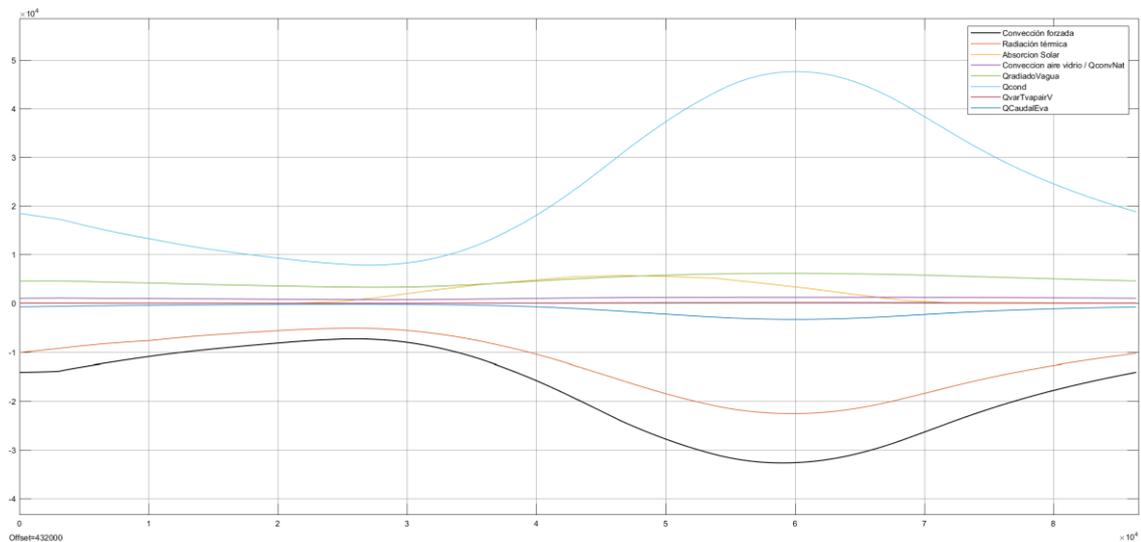


Figura 4.8 Flujos de calor del conjunto vidrio-agua. Fuente: Elaboración propia.

# Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta

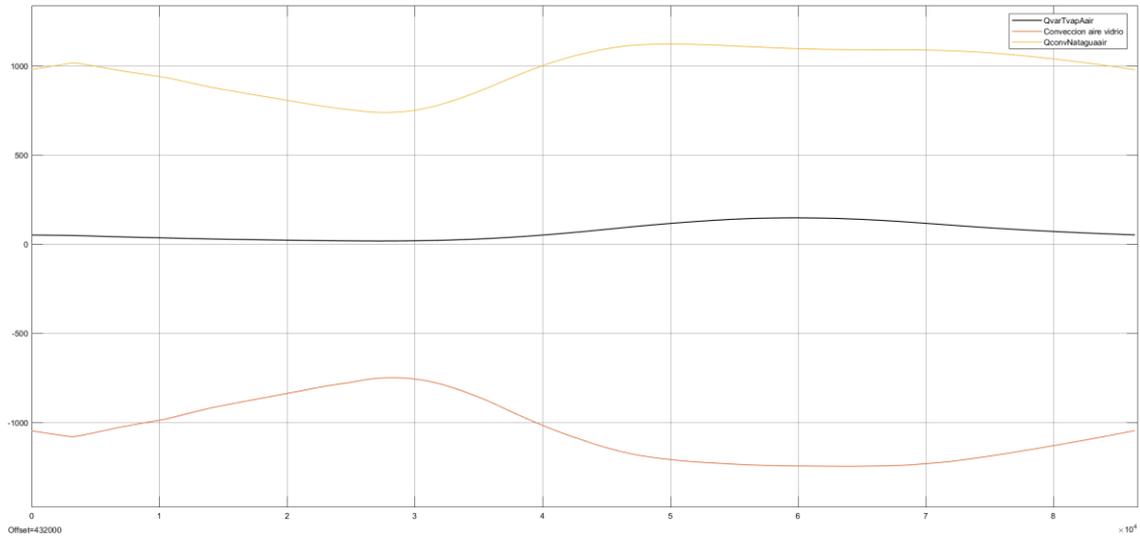


Figura 4.9 Flujos de calor del aire interior. Fuente: Elaboración propia.

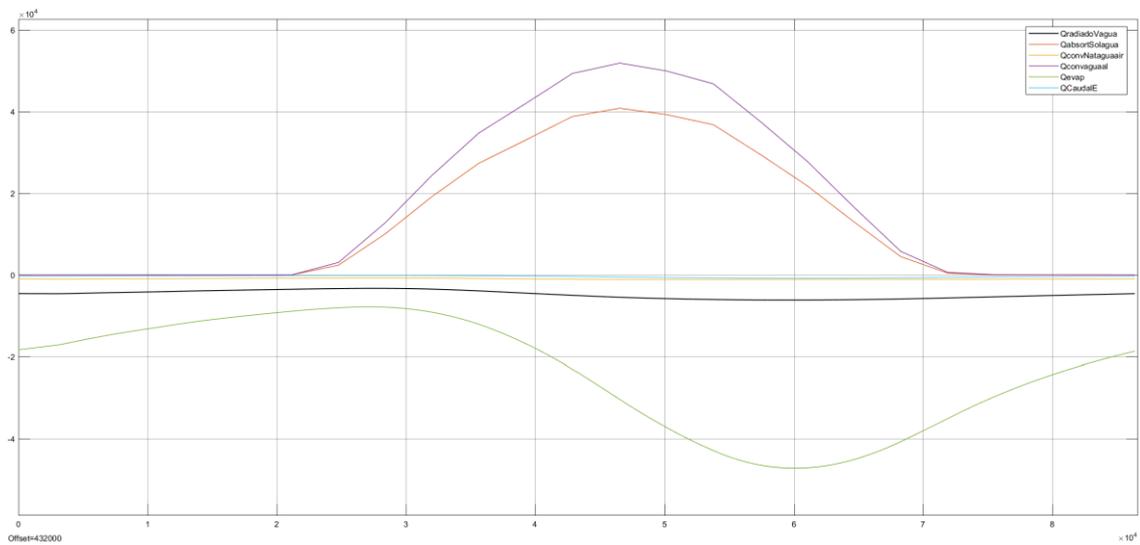


Figura 4.10 Flujos de calor del agua interior. Fuente: Elaboración propia.

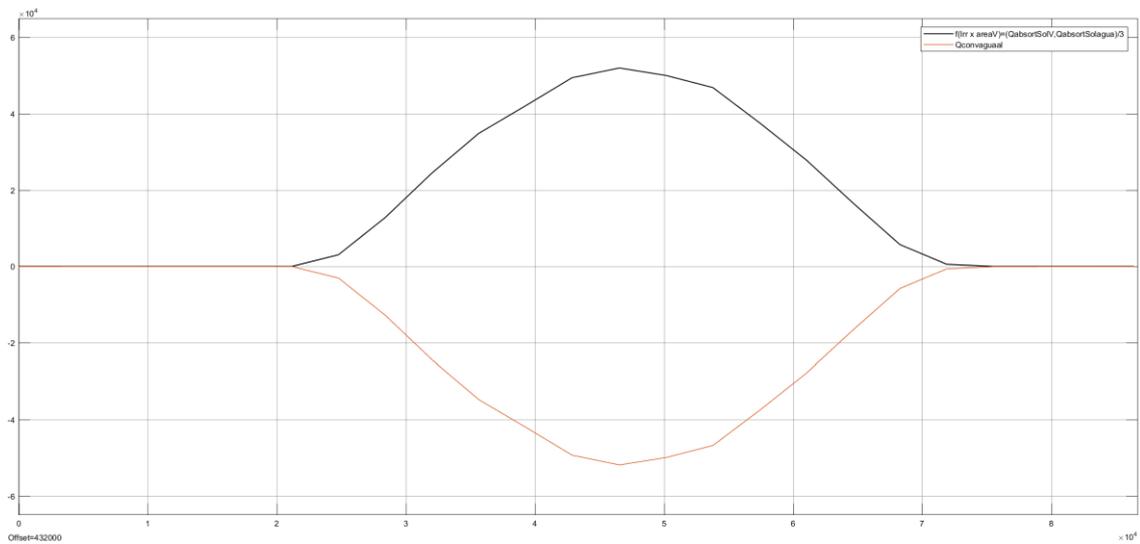
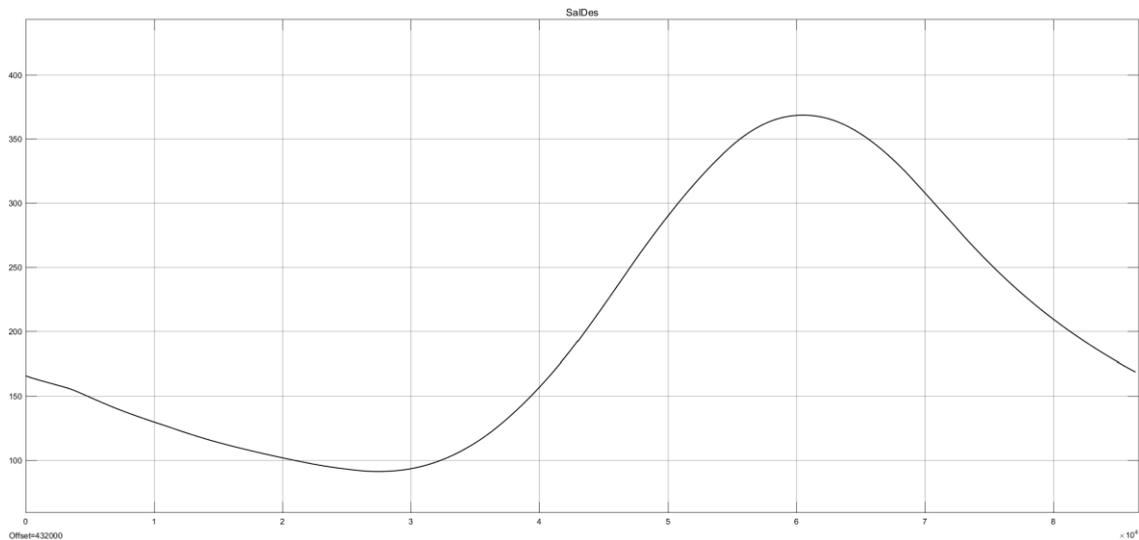


Figura 4.11 Flujos de calor de la placa absorbadora. Fuente: Elaboración propia.

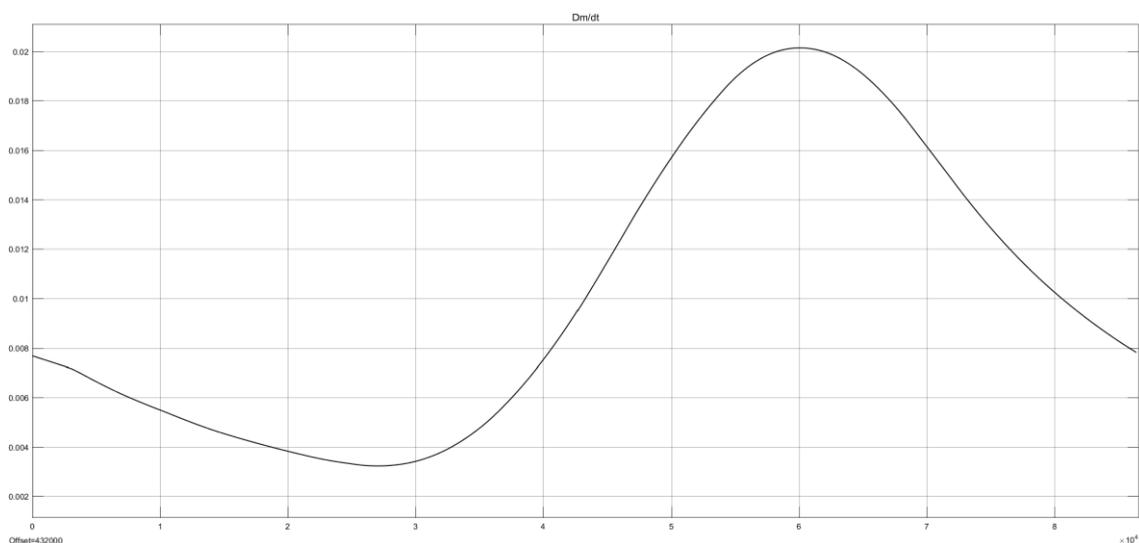
## Simulación dinámica y propuesta de mejora de un destilador solar de tipo caseta

Se puede observar que la salinidad no representa inconvenientes, al no existir precipitación de sales, y existir aún un gran margen frente a acumulaciones de un día para otro, de acuerdo a la figura 4.12, donde la salinidad viene dada en tanto por mil (‰).



**Figura 4.12 Salinidad del agua en el destilador. Fuente: Elaboración propia.**

En cuanto a la velocidad de destilación, se adapta a la siguiente curva, siendo los momentos de mayor producción aproximadamente los mismos que en el sistema original, de acuerdo a la figura 4.13, donde la producción viene dada en kg/s.



**Figura 4.13 Producción de agua destilada por segundo. Fuente: Elaboración propia.**

Como ya fue introducido anteriormente, la aplicación de esta mejora no es excluyente de la aplicación de otras diferentes, sino que pueden ser instaladas de forma complementaria.

En el capítulo 3 se ha puesto en evidencia la importancia de cuidar aspectos como las propiedades ópticas de la cubierta y el viento que alcanza la misma. Tanto es así, que se ha simulado la aplicación conjunta de una reducción de la absorptividad y emisividad térmica del vidrio en un 50% (en beneficio de la reflectividad), junto a una reducción del viento del 90% y la mejora propuesta, obteniendo una producción aproximada de **1018,4 kg/día**, lo cual supone una eficiencia de **75,1%**, poniendo de nuevo de manifiesto el elevado interés de estos factores.





---

**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

# CONCLUSIONES

## 5. CONCLUSIONES

A lo largo del presente documento ha quedado evidenciada la gran utilidad de la simulación dinámica como método de diseño, permitiendo predecir el comportamiento de los sistemas simulados y su interacción con el medio.

El uso de las ecuaciones diferenciales que rigen la naturaleza conlleva en ocasiones una elevada dificultad de aplicación, tendiéndose al uso de sistemas estacionarios, que si bien útiles como primera aproximación, resultan imprecisos y no muestran la evolución temporal de los sistemas. Emplear herramientas como Matlab-Simulink permite facilitar esta tarea, siendo capaces de representar y simular complejos sistemas regidos por ecuaciones diferenciales, que serán tratadas por métodos numéricos.

A partir de la simulación desarrollada, se ha podido observar las limitaciones de la desalación empleando destiladores solares, debido a su escasa producción con respecto al espacio ocupado en comparación con otros métodos más extendidos. A pesar de ello, se ha demostrado que implementando ligeros cambios al sistema y sin aumentar excesivamente la complejidad del mismo, dicha producción se puede ver aumentada sensiblemente; objetivo alcanzado gracias a la comprensión de los fenómenos inherentes al destilador que facilita el uso de una simulación dinámica. Queda por tanto cumplido el principal objetivo del trabajo, enunciado en el apartado 1.2, como: “La realización del trabajo pretende analizar en profundidad los fenómenos que suceden durante la operación de un destilador solar de tipo caseta, haciendo uso de una simulación dinámica, para así evaluar la influencia de ciertos parámetros sobre su producción y proponer de acuerdo a ello una mejora plausible que no suponga una complicación excesiva del sistema.”

A pesar de lo enunciado con anterioridad, debe ser tenido en cuenta que durante la realización de la simulación se han realizado numerosas simplificaciones, enunciadas en el apartado 3.4.A, por lo que los resultados de producción de destilado obtenidos a lo largo del trabajo se verían reducidos sensiblemente en una aplicación real. La validación de resultados fue realizada a partir del artículo de Abhay Agrawal y R. S. Rana (9), incluido en la bibliografía. En dicho artículo realizan una simulación y posterior experimento práctico de un destilador de tipo caseta con características semejantes a las de nuestro estudio, obteniendo rendimientos teóricos semejantes. Si bien algo menores, debido no solo a las diferencias estructurales del sistema, sino también a un claro incremento de la eficiencia de los destiladores ante aumentos de irradiancia, lo cual también se puede comprobar realizando un breve análisis de sus resultados; todos ellos referenciados a días cuya irradiancia solar es menor a la de nuestro estudio.

Para un día soleado de verano con viento moderado y elevadas temperaturas a lo largo de todo el día, la eficiencia teórica obtenida del destilador de caseta estudiado es de aproximadamente un 62,8%, mientras que una vez implementada la mejora propuesta, la eficiencia aumenta al 65,6%. Una aplicación conjunta de esta mejora, junto con reducción del 90% del viento que alcanza el destilador y una mejora sustancial de las propiedades ópticas de la cubierta pueden permitir alcanzar eficiencias cercanas al 75%, lo cual pone de manifiesto el interés por cuidar estos aspectos, siempre y cuando sea económicamente viable.



---

**Universidad de Valladolid**



**ESCUELA DE INGENIERÍAS  
INDUSTRIALES**

# BIBLIOGRAFÍA

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- (1) Cengel, Y., Pérez Castellanos, J. & Enríquez Brito, J., 2007. *Transferencia De Calor Y Masa*. Mcgraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- (2) Rey, J., Velasco, E., San José, J., Tejero, A., Rey, J., Chicote, M. and Galindo, P., 2018. *Manual práctico termodinámica y transmisión de calor*. Universidad de Valladolid.
- (3) Belessiotis, V., Kalogirou, S. and Delyannis, E., 2016. *Thermal Solar Desalination*. Academic Press.
- (4) CIRCE, Universidad de Zaragoza, 2001. *La Desalación Como Alternativa Al PHN*. CIRCE – Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos. Universidad de Zaragoza. Centro Politécnico Superior.
- (5) Ministerio De Sanidad Y Política Social, 2009. *Guía De Desalación: Aspectos Técnicos Y Sanitarios En La Producción De Agua De Consumo Humano*. Ministerio De Sanidad Y Política Social, Secretaría General Técnica Centro de Publicaciones.
- (6) Carrasco, F., Platzer, W., 2017. INFORME2017-PU-002 Estudio De Tecnología De Membranas De Destilación. Fraunhofer Chile Research & CSET.
- (7) Olivares Santiago, M. & Olmo Escribano, R., 1994. Los vidrios de baja emisividad. *Materiales de Construcción*, (Vol. 44, n° 236).
- (8) Hermosillo Villalobos, J., 1989. Destilación Solar. *huella*, (Vol. 16, n° 1031).
- (9) Abhay Agrawal, R. S. Rana. 2019. Theoretical and experimental performance evaluation of single-slope single-basin solar still with multiple V-shaped floating wicks. *Heliyon* 5.
- (10) EU Science Hub - The European Commission's science and knowledge service. *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*. [online] Available at: <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis> [Accessed 19 April 2020].
- (11) Junta de Andalucía. *Análisis De La Sequía En Andalucía. Estudio Comarcal :: Consejería De Medio Ambiente Y Ordenación Del Territorio*. [online] Available at: [http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/portalweb/menuitem.7e1cf46ddf59bb227a9ebe205510e1ca/?vgnnextoid=83b6a563f6da8510VgnVCM2000000624e50aRCRD&vgnnextchannel=76709f5c10bc6410VgnVCM2000000624e50aRCRD&lr=lang\\_es](http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/portalweb/menuitem.7e1cf46ddf59bb227a9ebe205510e1ca/?vgnnextoid=83b6a563f6da8510VgnVCM2000000624e50aRCRD&vgnnextchannel=76709f5c10bc6410VgnVCM2000000624e50aRCRD&lr=lang_es) [Accessed 19 April 2020].
- (12) Chaplin, M., *Water Absorption Spectrum*. [online]. Available at: [http://www1.lsbu.ac.uk/water/water\\_vibrational\\_spectrum.html](http://www1.lsbu.ac.uk/water/water_vibrational_spectrum.html) [Accessed 19 April 2020].
- (13) GLEICH Aluminium. Especificación Técnica EN AW 5754. [online] Available at: [https://gleich.de/files/en\\_aw\\_5754.esp.pdf](https://gleich.de/files/en_aw_5754.esp.pdf) [Accessed 19 April 2020].
- (14) Goodfellow. *Información sobre el Material Aluminio/Magnesio (Al97.5/Mg 2.5)*. [online] Available at: <http://www.goodfellow.com/S/Aluminio-Magnesio.html> [Accessed 19 April 2020].
- (15) Fernández, J., 1994. *DESTILADORES SOLARES DE GRANDES DIMENSIONES PARA AGUA DE MAR*. Ponencia de ingreso a la Academia Mexicana de Ingeniería, 27 de octubre de 1994.
- (16) VASA. *Cristal FLOAT color*. [online] Available at <https://www.vasa.com.ar/wp-content/uploads/2016/06/cristalfloat.pdf> [Accessed 19 April 2020].
- (17) Nandwani, S. & Madriz, R., 2013. Estudio de un Estanque Solar para Almacenar Energía Calórica en Costa Rica. WWEC2013.