

4.1.1. ENSAYOS CON UNO Y DOS VENTILADORES (AGUA DULCE)

El equipo de desalinización cuenta con dos ventiladores interiores de 12 Vdc, cada uno tiene la capacidad de mover un caudal de aire de 0,05 m³/s. Se ha realizado ensayos con uno o dos ventiladores en funcionamiento para comprobar si variando el caudal aumentaba o disminuye el rendimiento.



Figura 77. Ventilador tapado y desconectado para la realización de ensayo

Como se puede apreciar en la figura 77. A la hora de realizar el ensayo con un ventilador, se procede a desconectar uno de los dos que contiene el sistema a la vez que se tapa con cinta de aluminio para evitar que pase el aire a través del ventilador desconectado.

A continuación, se detallan los datos obtenidos de los gráficos realizados en Excel con el uso de uno y dos ventiladores, con el objetivo de conocer el comportamiento del equipo en determinadas condiciones, como la variación de la temperatura de entrada del agua en el evaporador o variando el caudal de aire.

4.1.1.1. CAUDAL DE CONDENSACIÓN

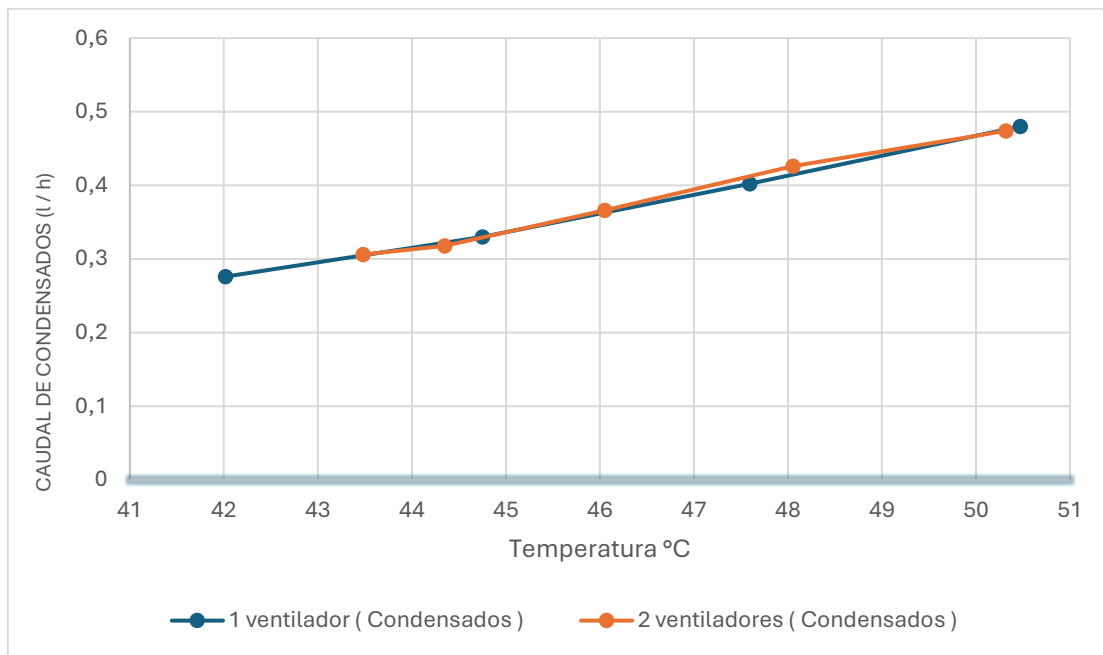


Figura 78. Representación del caudal de condensados cada 10 min

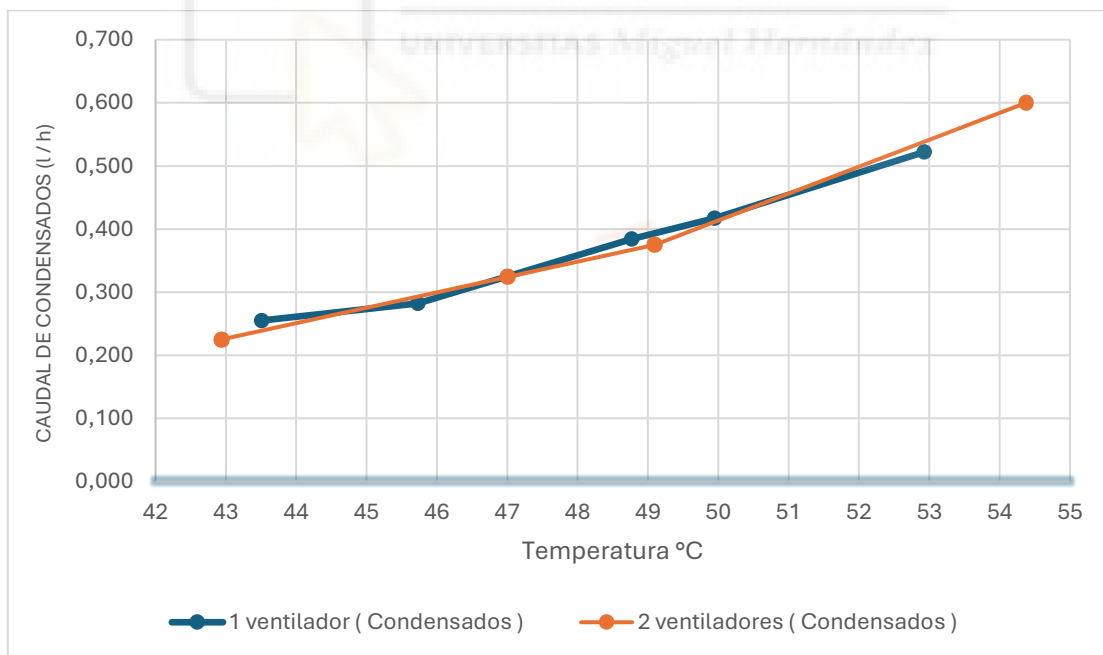


Figura 79. Representación del caudal de condensados cada 20 min

Como se representa en los gráficos 78 y 79, no hay una diferencia significativa a la hora de obtener agua de condensados a partir de 1 o 2 ventiladores, esto demuestra que aumentar el caudal de aire del interior del equipo no aumenta la producción de agua dulce, el sistema produce la misma cantidad en ambas situaciones.

4.1.1.2. PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN EL EVAPORADOR Y CONDENSADOR

Los balances de energía se realizan tanto en el evaporador como en el condensador y se aplican las mismas fórmulas de los balances mencionados anteriormente en el apartado 2.6. En este caso se calcula ambos lados del balance y se evalúa la diferencia, que es la energía se pierde en el intercambiador. A continuación, se muestra un ejemplo de cálculo.

$$\underbrace{\dot{m}_a * (h_7 - h_9 - (h_8 * (w_7 - w_9)))}_{(1)} = \underbrace{\dot{m}_{10} * (h_{10} - h_8)}_{(2)}$$

ENSAYO	TEMPERATURA (°C)	(kW) (1)	(kW) (2)	Δ(kW) (2)-(1)
1	40	0,54	0,78	0,24
2	42	0,56	0,87	0,31
3	45	0,63	1,03	0,40
4	48	0,69	1,30	0,61
5	50	0,73	1,46	0,73
6	54	0,64	1,87	1,23

Tabla 11. Ejemplo de cálculo de balance energético

Los resultados obtenidos en el evaporador son:

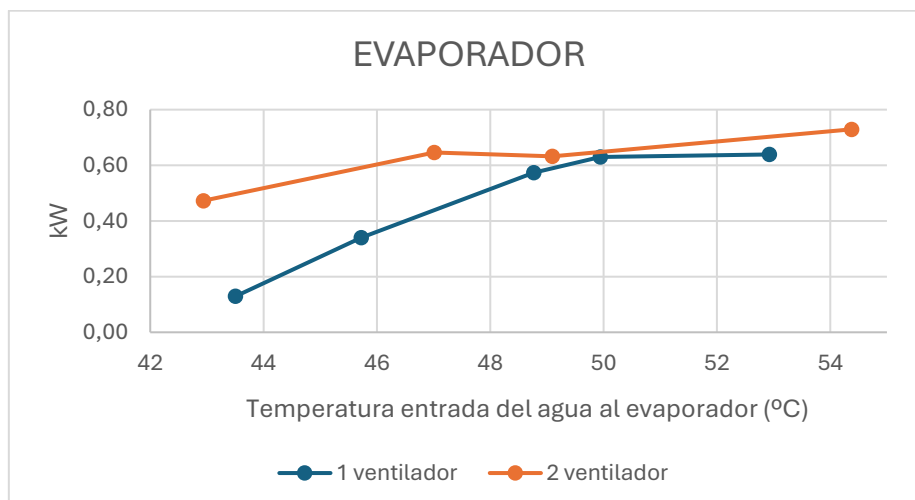


Figura 80. Representación de pérdidas de energía en el evaporador

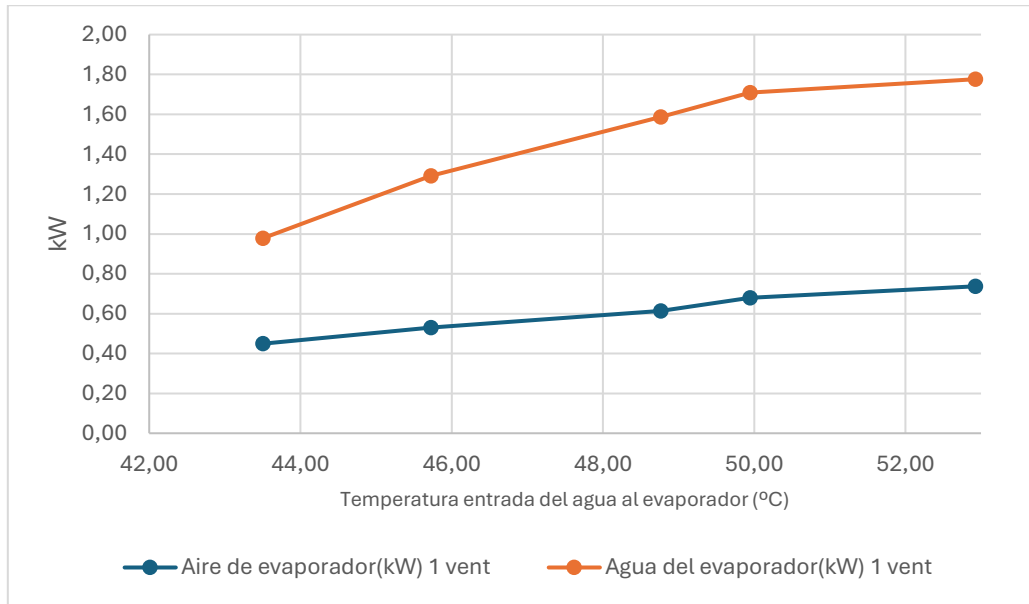


Figura 81. Representación de la energía del agua y aire en el evaporador (1 vent)

Como se observa en la figura 80, hay una mayor pérdida de energía al utilizar dos ventiladores. Esto puede deberse al tiempo de residencia del aire en el panel evaporativo, también al haber una mayor presión en el interior del equipo se aumentan las pérdidas por fugas. En la figura 81, se puede observar cuanta energía del agua se transfiere al aire cuando se utiliza 1 ventilador.

Los resultados obtenidos en el condensador son:

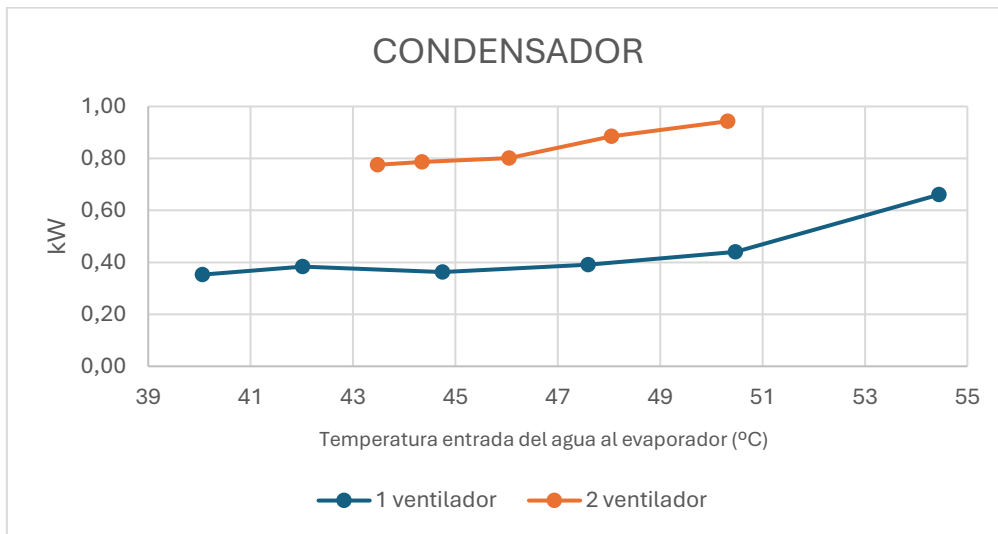


Figura 82. Representación de pérdidas de energía en el condensador

En el condensador se muestra una gran diferencia de pérdidas de energía al utilizar 1 o 2 ventiladores, es evidente que el uso de dos ventiladores aumenta considerablemente las pérdidas en el condensador, esto demuestra que hay una mala transmisión de calor en el panel evaporativo cuando la velocidad del aire es mayor.

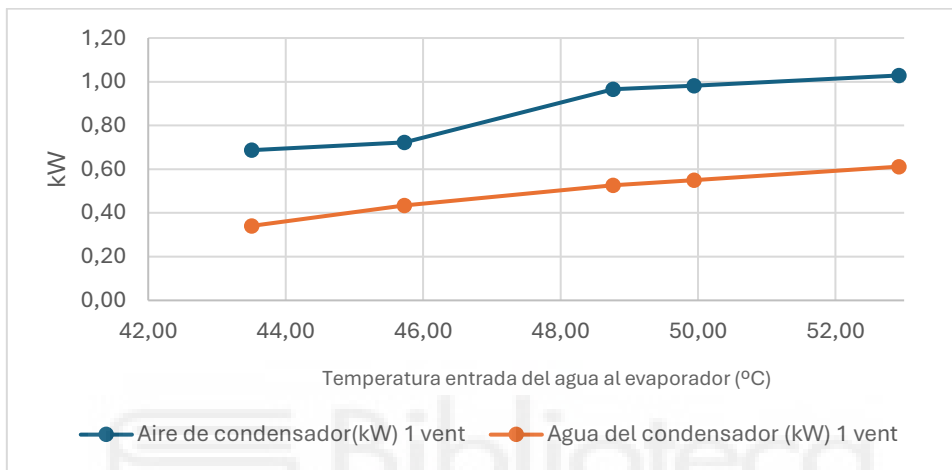


Figura 83. Representación de la energía del agua y aire en el condensador (1 vent)

En la figura 83, se muestra cuanta energía del aire caliente del evaporador absorbe el agua de refrigeración del condensador. Finalmente, se observa que donde mayor son las pérdidas es en el evaporador como se muestra a continuación.

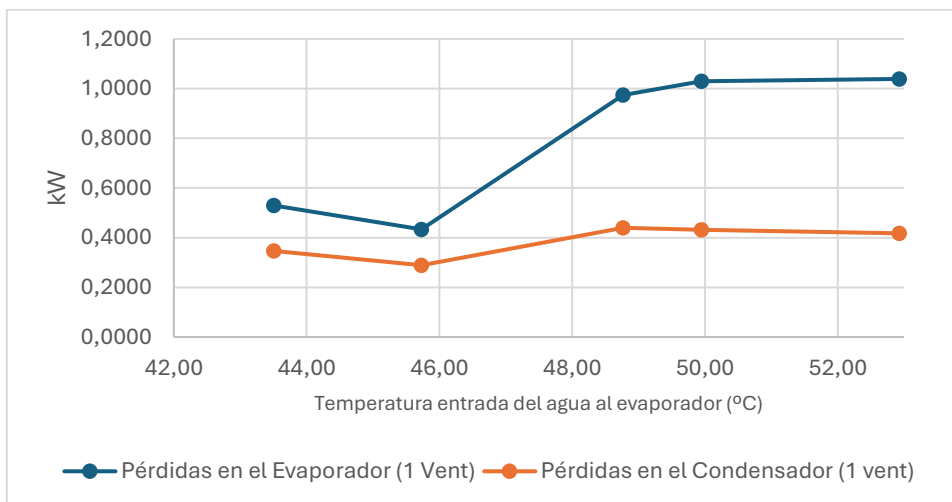


Figura 84. Representación de la energía pérdida en el evaporador y condensador (1 vent)

4.1.1.3. RENDIMIENTO

Para el determinar el rendimiento del sistema de desalinización se ha calculado de forma teórica el caudal de condensados a partir de las temperaturas de bulbo húmedo y seco registradas en cada punto de intercambio. El caudal de condensados se determina con la variación de humedad absoluta entre la entrada y salida de aire del condensador.

$$\dot{m}_c = \dot{m}_a * (w_7 - w_6)$$

ENSAYO	TEMPERATURA (°C)	w6 (kg/kg)	w7(kg/kg)	mc (kg/s)
1	40	0,0275	0,03155	0,00024
2	42	0,0295	0,03395	0,00027
3	45	0,032	0,03735	0,00032
4	48	0,034	0,0404	0,00038
5	50	0,037	0,0441	0,00043
6	54	0,0372	0,0451	0,00047

Tabla 12. Ejemplo de cálculo caudal de condensados

Una vez calculado el caudal de condensados teórico se relaciona con el caudal obtenido en los ensayos y se obtiene el rendimiento.

$$\eta = \frac{\dot{m}_c \text{ experimental}}{\dot{m}_c \text{ teórica}} * 100$$

ENSAYO	TEMPERATURA (°C)	mc Teórico (kg/s)	mc Teórico (l/h)	mc Experimental (l/h)	η (%)
1	40	0,00024	0,8748	0,234	27
2	42	0,00027	0,9684	0,276	29
3	45	0,00032	1,1556	0,33	29
4	48	0,00038	1,38024	0,402	29
5	50	0,00043	1,53576	0,48	31
6	54	0,00047	1,70424	0,57	33

Tabla 13. Ejemplo de cálculo de rendimiento

Los resultados gráficos de rendimiento son los siguientes:

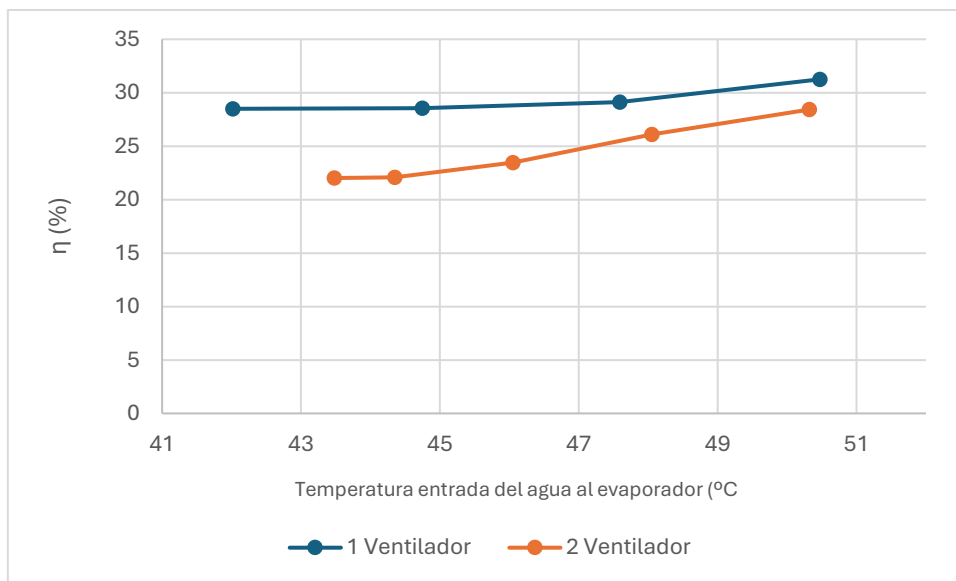


Figura 85. Representación del rendimiento cada 10 min

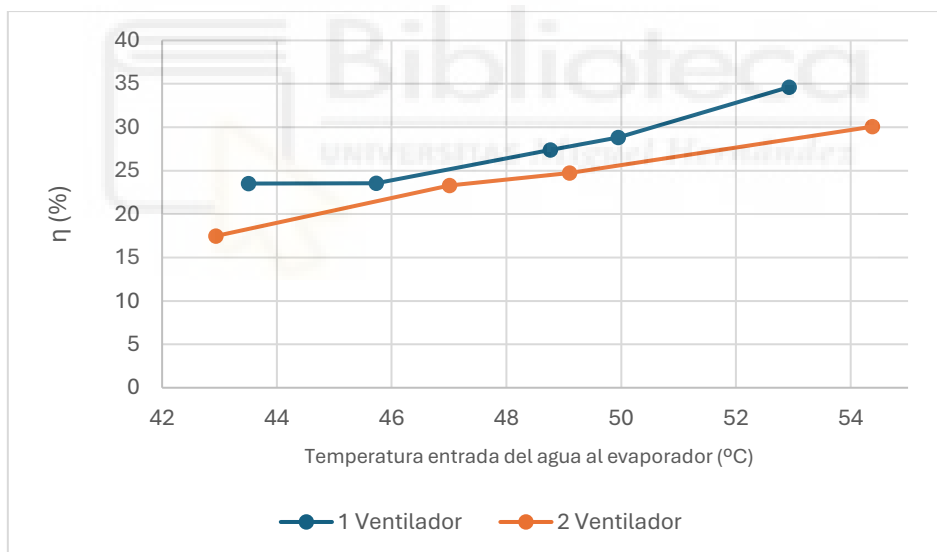


Figura 86. Representación del rendimiento cada 20 min

Los resultados de rendimientos confirman los resultados obtenidos anteriormente con el caudal de condensados y pérdidas de energía, se puede confirmar con estos datos obtenidos que el uso de dos ventiladores empeora el rendimiento del equipo. Puesto que de forma teórica el equipo debe de producir un mayor caudal cuando trabaja con dos ventiladores, como se representa en la siguiente figura.

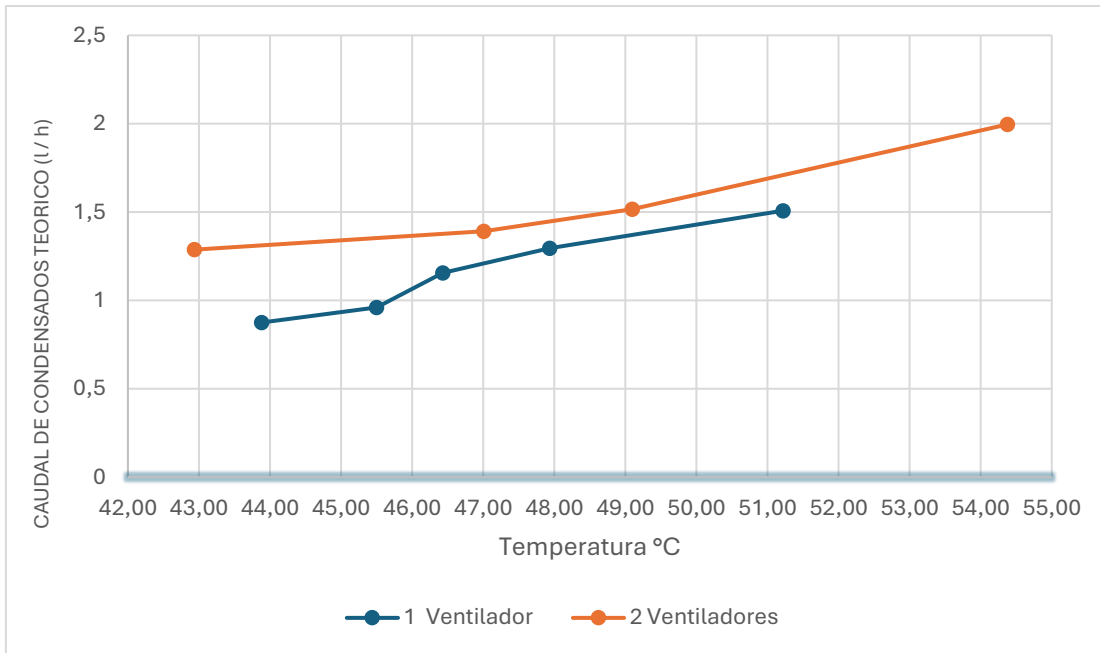


Figura 87. Representación el caudal teórico de condensados

Donde claramente de puede entender por qué el sistema tiene un rendimiento bajo es en grafico de vapor producido respecto al caudal de condensados obtenido, donde se muestra que cantidad de vapor producido teóricamente por el sistema es condensado en forma de agua dulce.

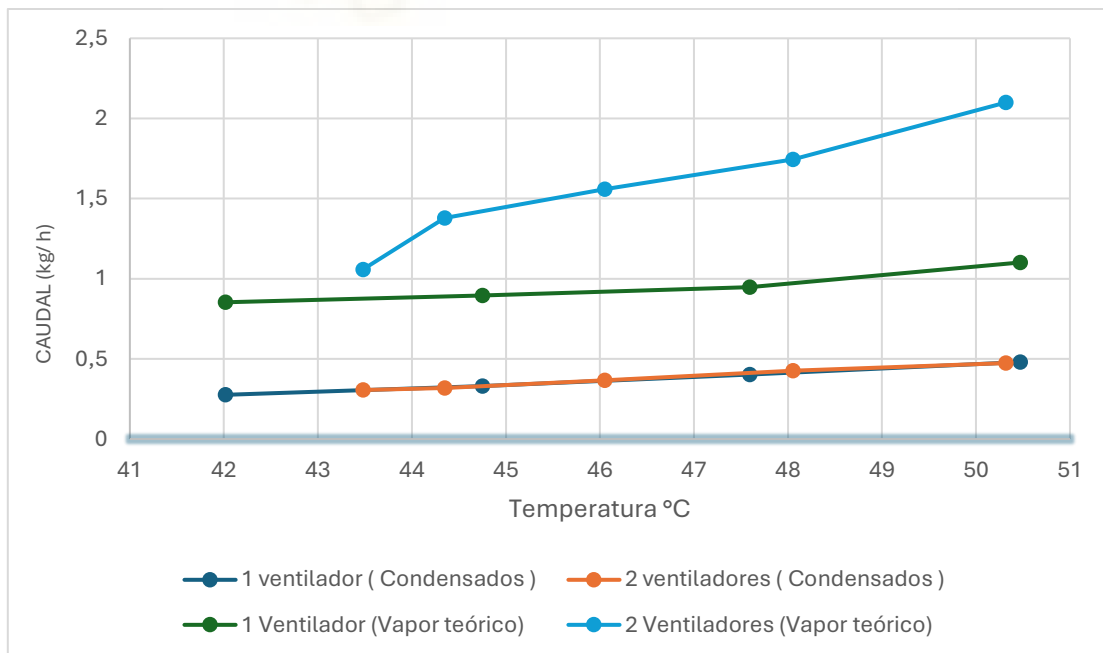


Figura 88. Representación del caudal de vapor teórico y caudal de condensados real

4.1.1.4. EFICIENCIA ENERGÉTICA

La eficiencia del sistema se calcula a partir del término GOR (Gain Output Ratio), es un indicador de eficiencia térmica que expresa cuanta agua destilada se produce por cada unidad de calor suministrado al sistema.

$$GOR = \frac{\dot{m}_c * h_{lg}}{Q_{in}}$$

El calor suministrado (Q_{in}) se calcula con la variación de temperatura del evaporador multiplicado por el caudal másico y calor específico del agua. El caudal de condensados (m_c) es el obtenido en los ensayos y (h_{lg}) es la entalpía de cambio de fase a la temperatura de condensados.

ENSAYO	TEMPERATURA (°C)	Q _{in} (kW)	m _c (kg/s)	h _{lg} (kJ/kg)	m _c * h _{lg} (kW)	GOR
1	40	0,78	0,00007	2426	0,158	0,20
2	42	0,87	0,00008	2424	0,186	0,21
3	45	1,03	0,00009	2420	0,222	0,21
4	48	1,30	0,00011	2417	0,270	0,21
5	50	1,46	0,00013	2414	0,322	0,22
6	54	1,87	0,00016	2413	0,382	0,20

Tabla 14. Ejemplo de cálculo de GOR

Los resultados obtenidos son los siguientes:

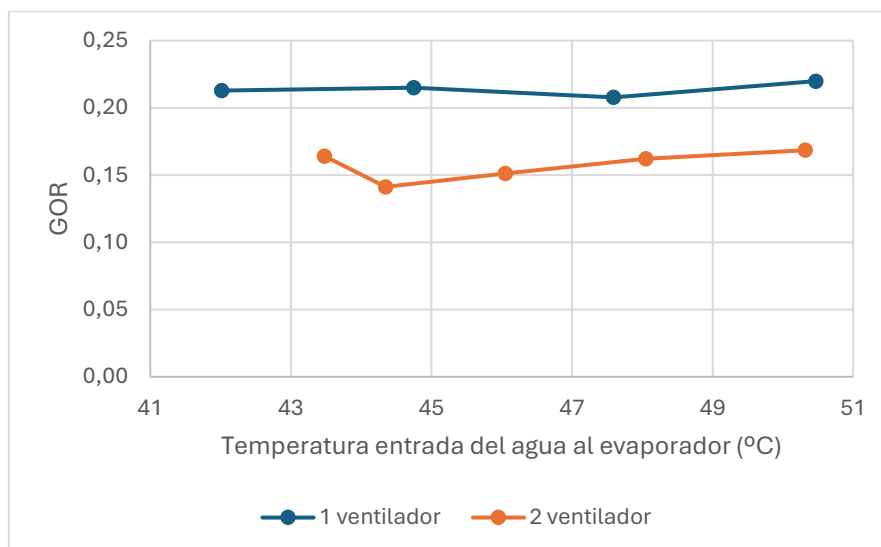


Figura 89. Representación de la eficiencia cada 10 min

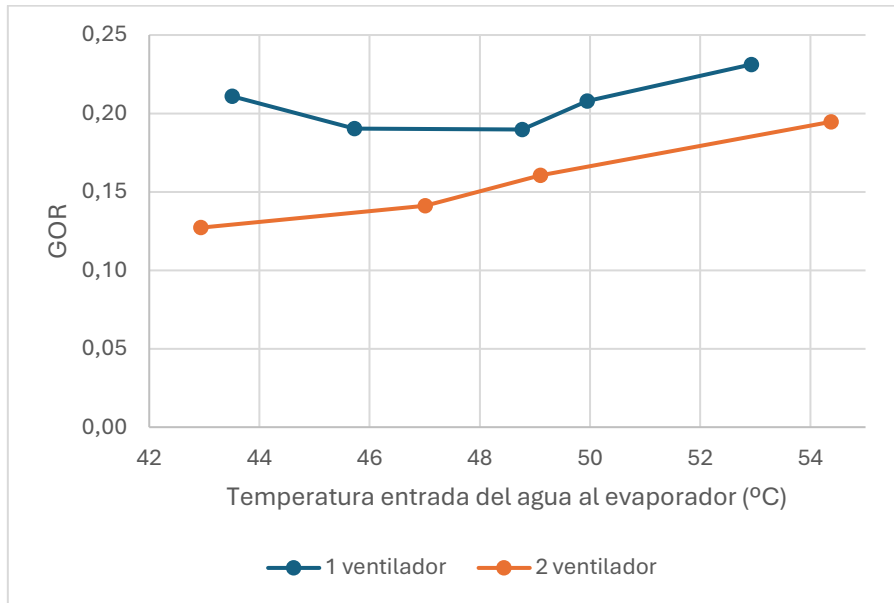


Figura 90. Representación de la eficiencia cada 20 min

Del mismo modo que los anteriores resultados, en cuanto a eficiencia sigue teniendo peores resultados cuando el sistema trabaja con dos ventiladores.

4.1.1.5. FALLO EN LOS VENTILADORES DE LA REFRIGERACIÓN DEL CIRCUITO DEL CONDENSADOR

Se ha estudiado también el comportamiento del sistema en caso de que los ventiladores exteriores del radiador del circuito de refrigeración del condensador dejen de funcionar.

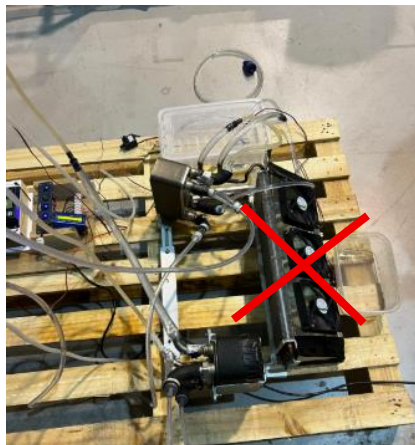


Figura 91. Vista del sistema de refrigeración del condensador

Se ha podido observar en los datos de temperatura registrados en el Data Logger que con los ventiladores apagados la diferencia de temperaturas en la entrada y salida de agua del condensador no varía, esto significa que el agua de recirculación del condensador no intercambia calor con el aire, por lo tanto, el aire humectado no se enfría correctamente, este hecho se traduce en una menor producción de condensación, pérdida de rendimiento y eficiencia.

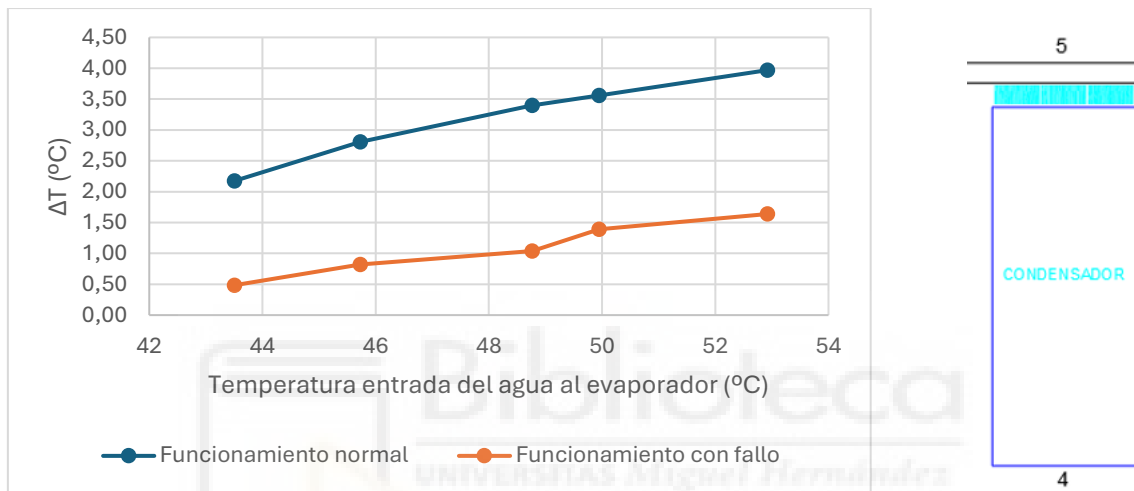


Figura 92. Variación de temperatura de agua entre el punto 5 y 4 del condensador

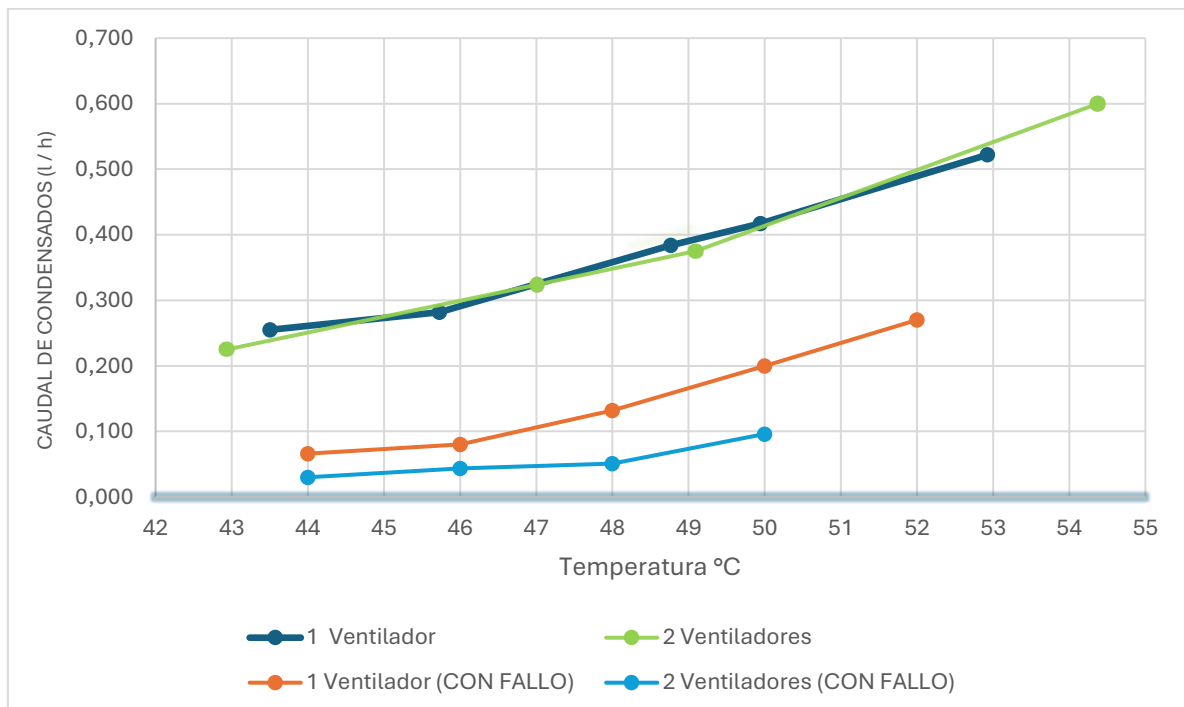


Figura 93. Representación de la comparación de obtención de condensados

En la figura 93, muestra como afecta el tener un problema de refrigeración del agua del condensador sobre la producción de agua de condensados del sistema.

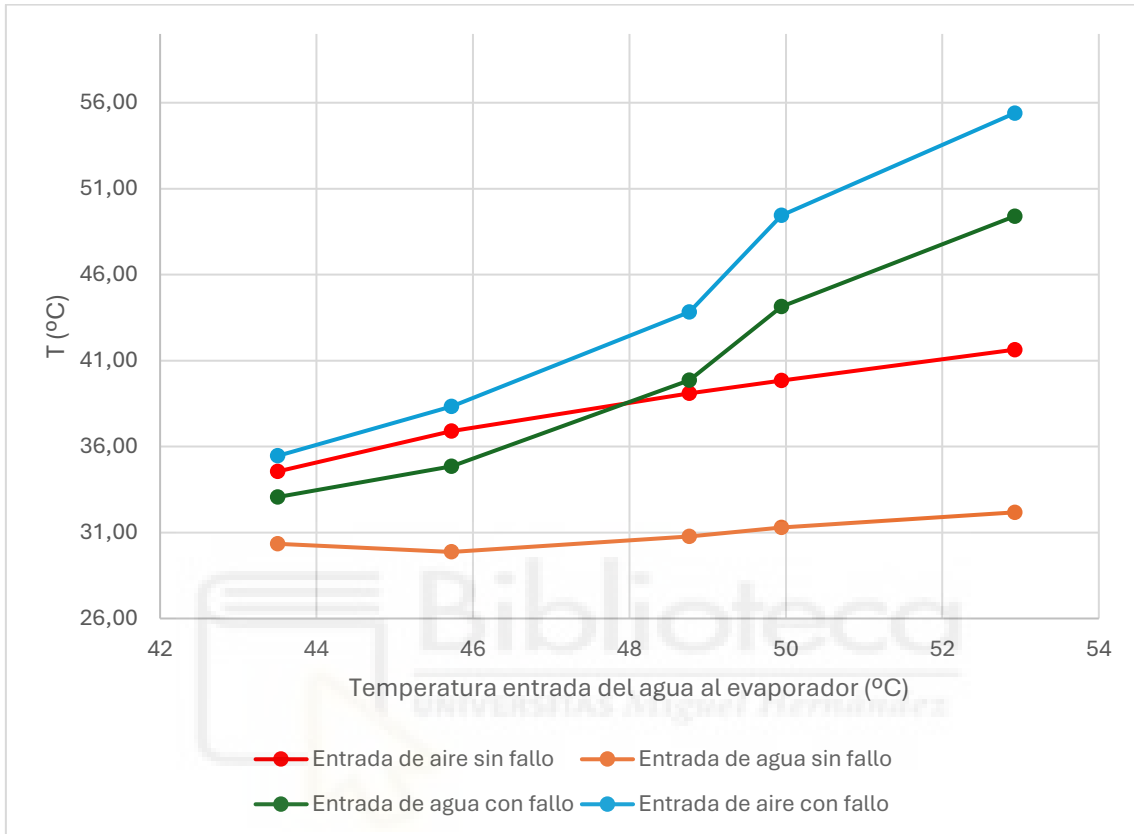


Figura 94. Representación de las temperaturas de entrada de agua y aire en el condensador

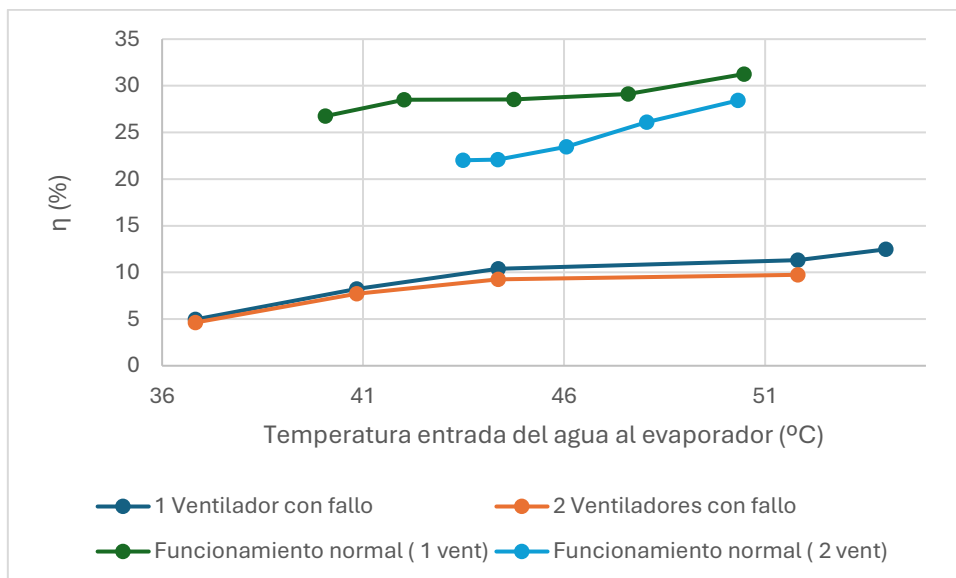


Figura 95. Representación del rendimiento con funcionamiento normal y sin refrigeración

En los gráficos 94 y 95, se puede ver cómo trabaja el sistema cuando el circuito de refrigeración no está funcionando correctamente, en la figura 94, se puede observar como la temperatura del agua y el aire con fallo se encuentran más cerca, lo que dificulta la transferencia de calor entre los dos fluidos. En la figura 95, se puede ver como el rendimiento disminuye cuando no hay una refrigeración del agua de recirculación del condensador.

En definitiva, se ha podido comprobar cómo trabaja el equipo de desalinización cuando está en funcionamiento uno o dos ventiladores. Como se ha podido comprobar en los gráficos, hacer uso de dos ventiladores empeora el rendimiento y eficiencia del sistema, esto puede deberse a varias razones. Una de ellas puede deberse a que el aire se mueve demasiado rápido, esto implica que el aire este menos tiempo en contacto con el agua, lo que provoca que el aire no se humidifique completamente en el evaporador y no se enfría lo suficiente en el condensador.

Otra de las razones puede deberse al bypass generado en los paneles evaporativos del evaporador y condensador, además de las pérdidas de vapor por fugas al exterior debido a que los dos ventiladores generan caudales desiguales, generando diferencias de presión en el interior, lo que genera una pérdida de humedad antes de condensar.

4.1.2. ENSAYOS CON UNO Y DOS VENTILADORES (AGUA SALADA)

Los ensayos anteriores se han realizado con la finalidad de conocer el comportamiento del equipo a partir de diferentes temperaturas de entrada en el evaporador y conocer cuanta cantidad de agua destilada puede condensar en términos ideales. Una vez comprobado el rendimiento del equipo y su eficiencia a partir de agua dulce, se ha llevado a cabo los mismos ensayos con agua salada a diferentes concentraciones, con el objetivo de estudiar el funcionamiento del sistema con agua salada y comprobando si el uso de agua salobre afecta al rendimiento y eficiencia del equipo.

Se ha empleado la misma metodología que en los ensayos anteriores con agua dulce, excepto que en este caso se ha registrado la conductividad del agua en cada punto. Se ha hecho una medición de conductividad en los depósitos del evaporador, condensador y condensados.



Figura 96. Medición de la conductividad del agua del depósito del evaporador

A continuación, se muestran los resultados obtenidos con uno y dos ventiladores con diferentes concentraciones de sal, comparando los resultados con los datos obtenidos de los ensayos realizados anteriormente con agua dulce.

4.1.2.1. CAUDAL DE CONDENSACIÓN

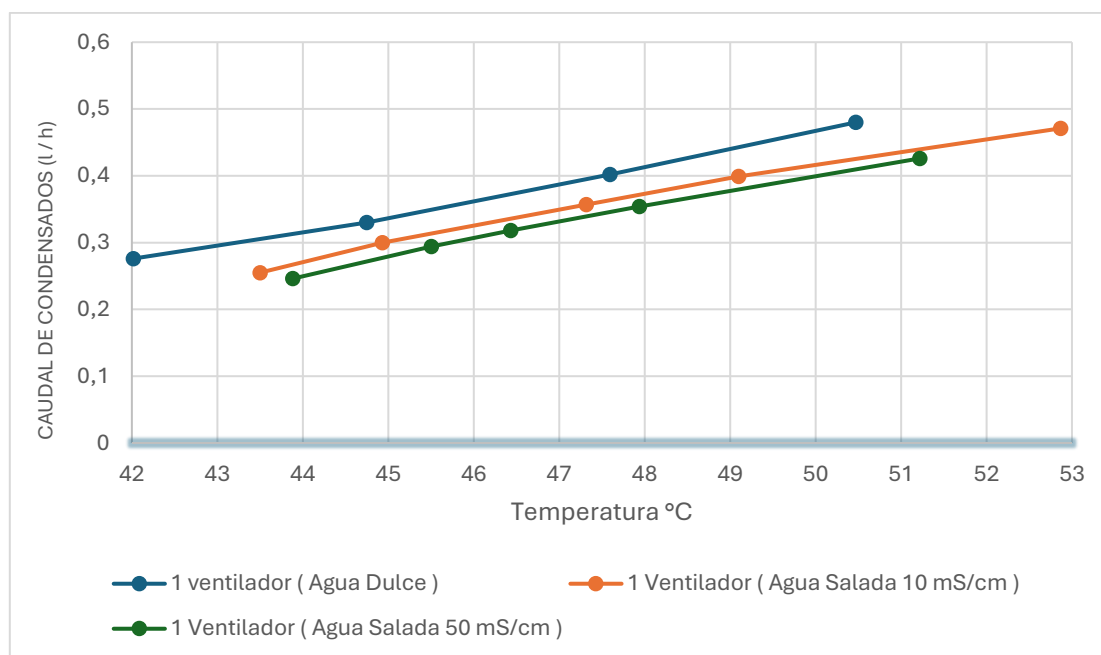


Figura 97. Representación de caudales de condensados con agua salada y dulce

Como se representa en la figura 97, se puede comprobar que el sistema produce una menor cantidad de agua de condensados cuando se hace uso de agua salada. En base a los datos obtenidos, en el ensayo con una conductividad del agua de evaporación a 50 mS se ha obtenido un menor contenido de agua condensada respecto a la de 10 mS.

El motivo por el cual el equipo produce menos agua destilada se debe a que el agua salada tiene un punto de ebullición más alto, esto quiere decir que cuanto más concentración de sal haya en la disolución inicial más energía se necesita para evaporar el agua, o lo que es lo mismo, a la misma temperatura de operación menos agua se evapora. Además, el agua salada tiene una viscosidad mayor y una conductividad térmica menor respecto al agua dulce, haciendo que las moléculas se muevan más lento, reduciendo así la presión de vapor.

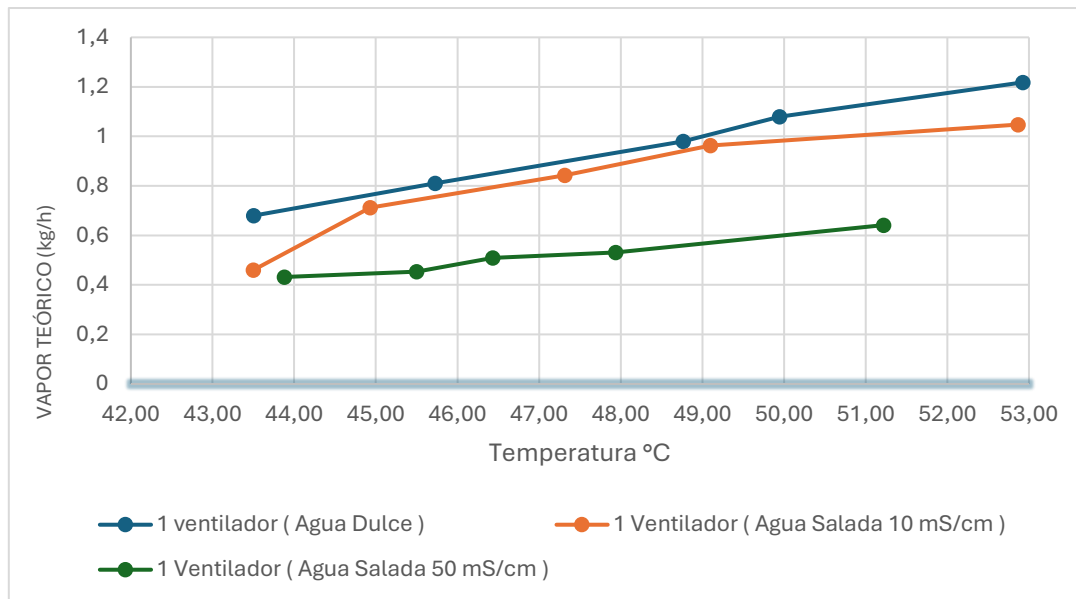


Figura 98. Representación de caudales de vapor teóricos con agua salada y dulce

En la figura 94, se muestra como al aumentar la concentración de sal en la disolución disminuye la producción de vapor en el evaporador, lo que justifica una menor producción de caudal de condensados en el condensador.

4.1.2.2. RENDIMIENTO

A continuación, se mostrará los resultados obtenidos del rendimiento del sistema al utilizar agua salada a diferentes concentraciones, comparando los datos con los ensayos con agua dulce.

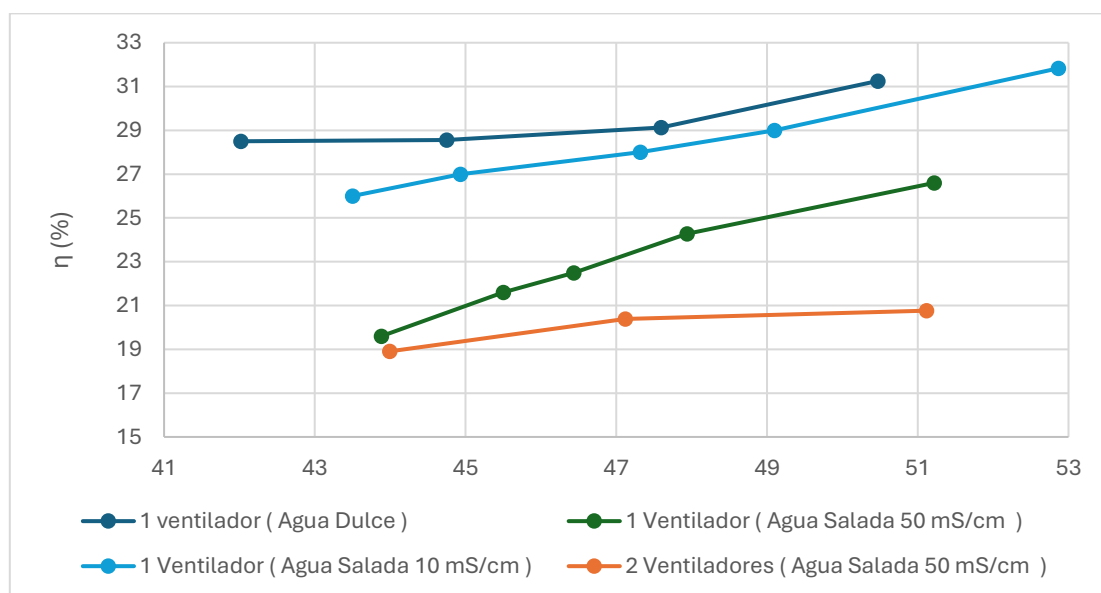


Figura 99. Representación del rendimiento con agua salada y dulce

El rendimiento del equipo se ve afectado al aumentar el grado de concentración de sal en la disolución inicial, según se muestra la figura 95, el ensayo con dos ventiladores en funcionamiento y con una conductividad del agua de 50 Sm se obtiene el peor rendimiento.

El rendimiento también está relacionado con la cantidad de vapor que produce el equipo y del caudal de condensados que se obtiene. Al producir menos vapor, se reduce el caudal de condensados.

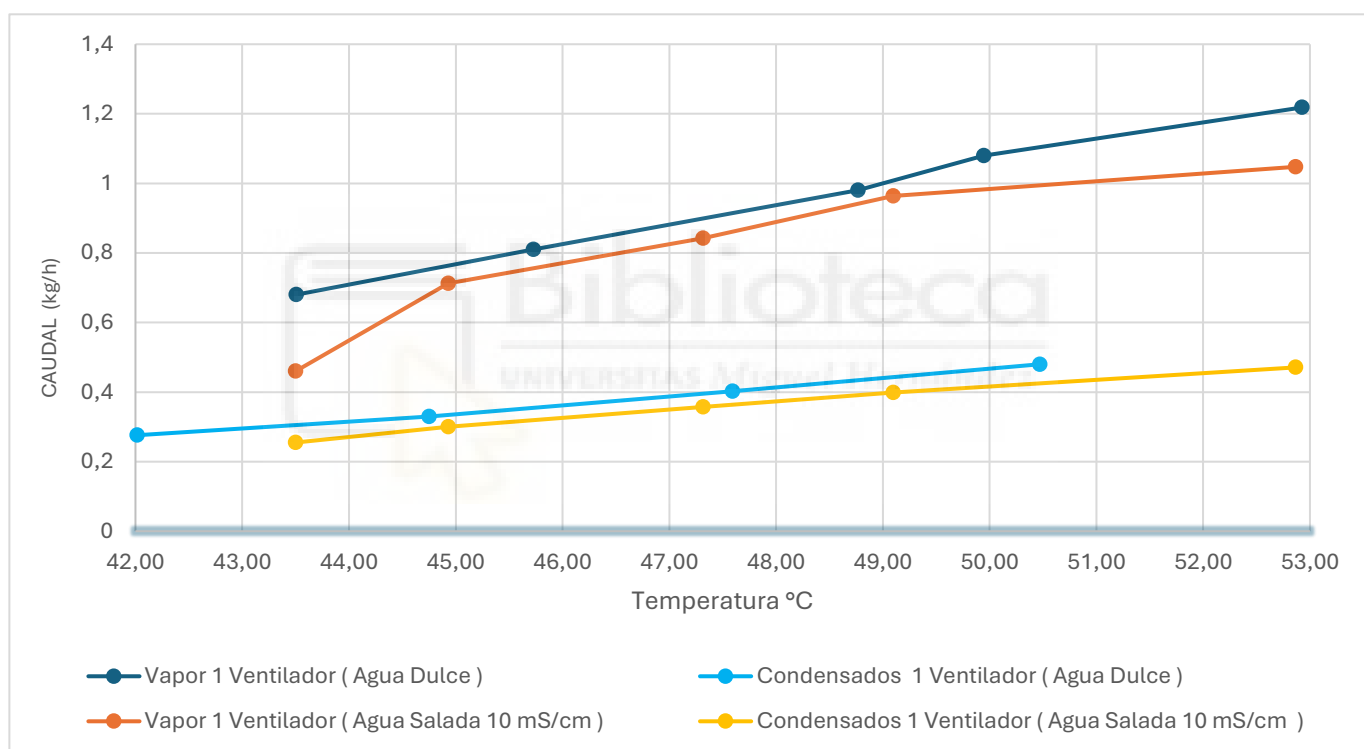


Figura 100. Representación de caudales de vapor y condensados con agua salada y dulce (1 ventilador)

4.1.2.3. EFICIENCIA ENERGÉTICA

Del mismo modo que el cálculo de eficiencia con agua dulce visto anteriormente, se ha calculado la eficiencia del equipo con agua salada, empleando el termino GOR, los datos obtenidos son los siguientes.

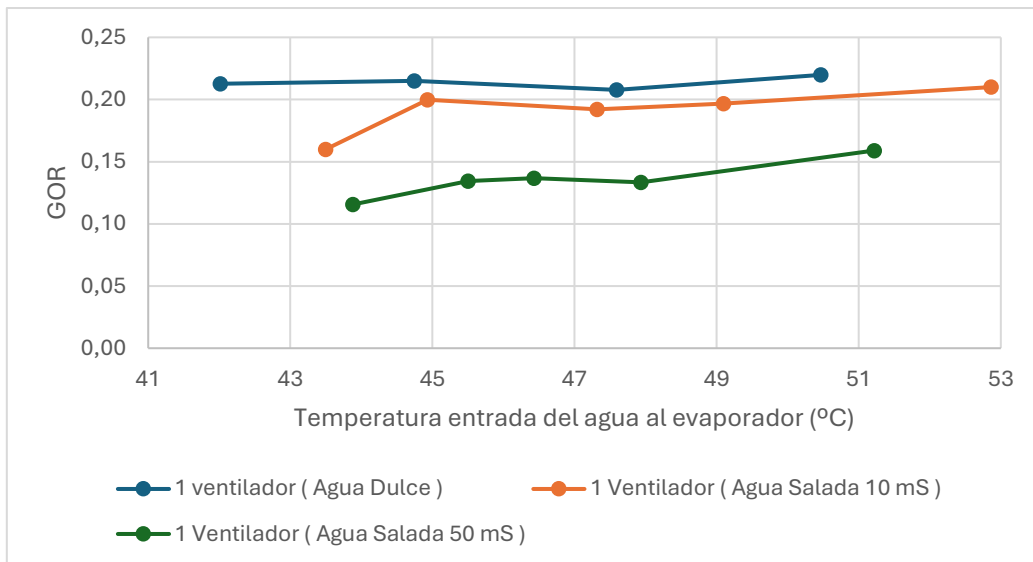


Figura 101. Representación del GOR con agua salada y dulce (1 ventilador)

Con los datos obtenidos se puede afirmar que el sistema tiene peor eficiencia al aumentar la salinidad, esto se debe a lo mencionado con anterioridad a que al aumentar la concentración de sal se produce menos vapor, con la misma cantidad de energía del evaporador se produce un menor caudal de vapor, afectando al caudal de condensados y finalmente a la eficiencia (GOR).

4.1.2.4. ESTUDIO DE LA CONDUCTIVIDAD

En los ensayos realizados con sal se ha hecho una medición de conductividad en cada punto para comprobar si el sistema proporciona agua destilada libre de impurezas de sal.



Figura 102. Medición de la conductividad del agua de condensados

	CONDUCTIVIDAD	
	ENSAYO 1	ENSAYO 2
AGUA GRIFO	950 μ S/cm	950 μ S/cm
AGUA DEPÓSITO EVAPORADOR	10 mS/cm	50 mS/cm
AGUA DEPÓSITO CONDENSADOR	710 μ S/cm	523 μ S/cm
AGUA CONDENSADOS	560 μ S/cm	410 μ S/cm

Tabla 15: Conductividad del agua en cada zona del sistema

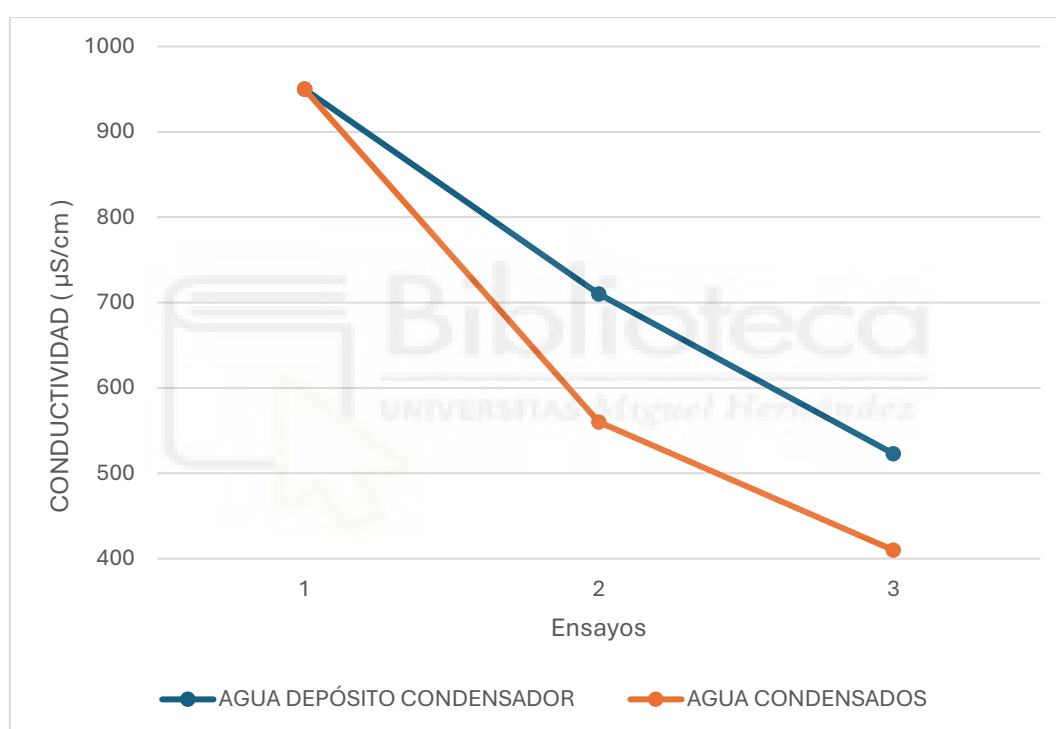


Figura 103. Representación de la conductividad en el condensador y recogida de condensados

Los resultados obtenidos de conductividad demuestran que el sistema produce agua destilada. Es la única manera que se ha podido comprobar, ya que el equipo no está preparado para producir agua destilada por separado, el agua que se condensa se mezcla con el agua del depósito del condensador. Dado que el equipo utilizado para la medición de conductividad tiene una alta sensibilidad y que el agua de inicio del evaporador tiene una gran concentración de sal, se puede confirmar que el sistema es capaz de producir agua destilada.



CAPÍTULO 5: ESTUDIO DE MEJORAS Y
CONCLUSIONES

5.1. PROPUESTAS DE MEJORAS DEL SISTEMA HDH

A continuación, se definirán una serie de propuestas de mejora con el objetivo de mejorar el rendimiento y eficiencia del sistema. Una vez estudiado el comportamiento del equipo en diferentes condiciones se ha llegado a la conclusión de que el equipo tiene grandes pérdidas de calor, por lo que para poder mejorar la producción de agua dulce y aprovechar mejor del calor del evaporador se han propuesto las siguientes mejoras.

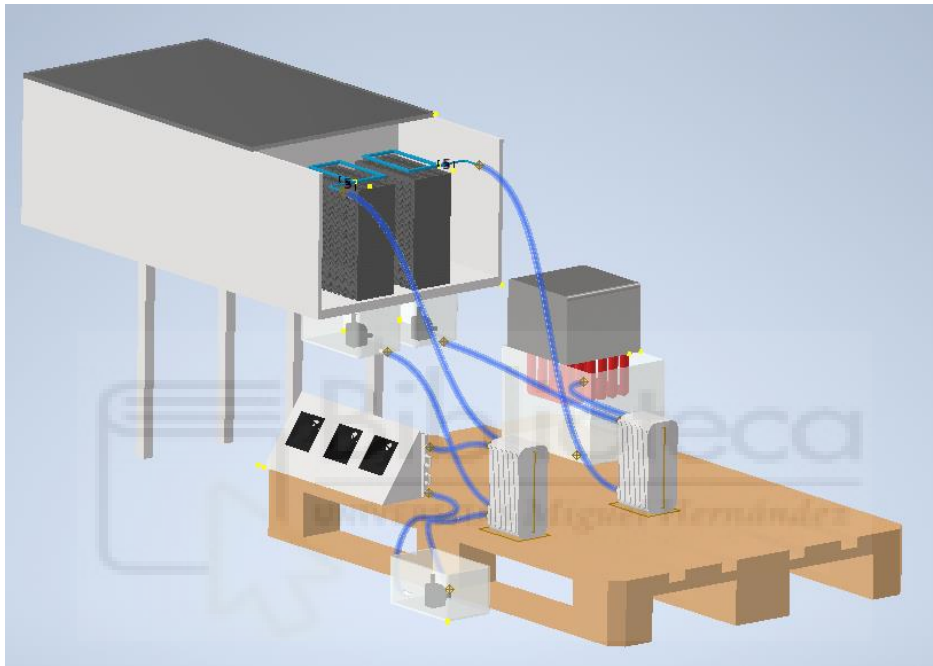


Figura 106. Representación 3D del sistema actual

5.1.1. INTERCAMBIADOR DE CIRCUITO CERRADO EN EL CONDENSADOR

Actualmente, el equipo tiene dos paneles en forma de paneles evaporativos que funcionan como intercambiadores de aire-agua. En el caso del evaporador es una buena opción ya que el contacto directo del agua con el aire produce una mayor humectación. En cambio, en el caso del condensador, una mejor opción es cambiar el panel evaporativo por un intercambiador aire-aire o aire-agua. Uno de los motivos de realizar este cambio es que al inicio de encender el equipo el sistema debe tener los depósitos de la parte inferior llenos (figura 28), el depósito del evaporador es el de agua salada que con el tiempo se va evaporando con lo cual llega un momento que se vacía y la bomba deja de funcionar y no hay recirculación de agua, en este

caso habría que ir rellenando el agua salada en recipiente. Por otro lado, el depósito del condensador tiene un tubo de rebose de condensados en la parte superior del recipiente, con lo que el agua producida de los condensados es una mezcla con el agua introducida de inicio, esta agua podría contener una mayor contaminación.

La idea de cambiar el panel evaporativo por un intercambiador de flujo indirecto tiene como objetivo no tener que depender de tener agua dulce de inicio y que el agua de condensados sea 100% la obtenida en el condensador además de mejorar la eficiencia y aprovechar mejor el calor del evaporador. En este caso se proponen dos posibles opciones de intercambiar para este sistema.

5.1.1.1. INTERCAMBIADOR AIRE- AGUA

Actualmente el sistema tiene en la zona de condensación un panel evaporativo que funciona como intercambiador de calor de circuito abierto, haciendo recircular la misma agua para enfriar el vapor que proviene del evaporador. Además, este método de intercambio no proporciona un contacto uniforme entre el aire humectado y el agua de refrigerada, es decir, el aire caliente que proviene del evaporador al pasar por el panel evaporativo, este aire no entra en contacto con el agua fría en gran parte, con lo que el proceso de condensación se ve afectado.



Figura 107. Intercambiador aire-agua como propuesta de mejora

Para la mejora del equipo, se he optado por diseñar un intercambiador de circuito cerrado aire-agua de tubos con aletas, en este caso, al tratarse de un sistema de

desalinización, el material del intercambiador debe de ser de acero inoxidable para evitar corrosión y posibles complicaciones.

El funcionamiento del intercambiador se basa en la transferencia por convección y conducción a través de una superficie metálica, el aire humectado que proviene del evaporador pasa a través de las aletas del intercambiador provocando la condensación de agua dulce.

En este caso, el intercambiador tiene un circuito de agua que es refrigerado por el mismo método que operaba anteriormente para enfriar el agua del condensador. El objetivo en este caso es separar el agua de condensados con el agua de refrigeración y mejorar el proceso de condensación.

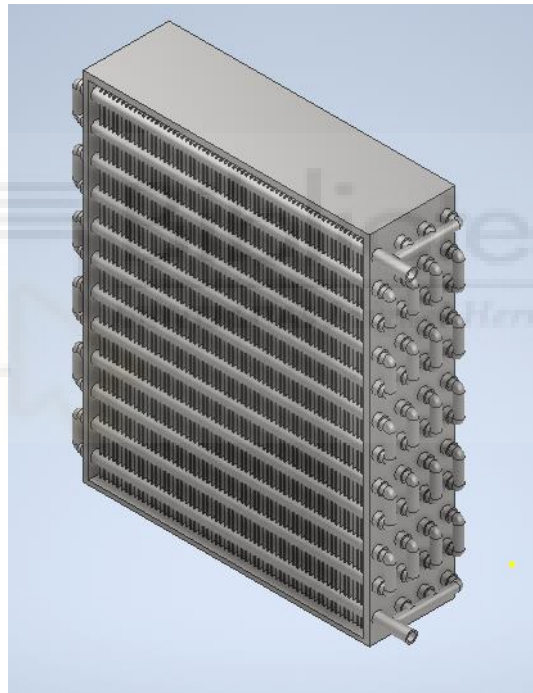


Figura 108. Diseño 3D Intercambiador aire-agua como propuesta de mejora

El intercambiador está formado por 28 tubos de acero inoxidable de 6 mm de diámetro y una longitud de 192 mm. Dando un área de contacto superficial de 3619 mm³. El calor transferido entre los tubos y el aire se calcula con la siguiente formula:

$$Q_T = U * S * \Delta T_{LM}$$

Donde:

- U : Coeficiente de transferencia de calor global
- S : Área de superficie del tubo
- ΔT_{LM} : Diferencia de temperatura media logarítmica

$$\Delta T_{LM} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$$

Al aplicar este cambio se eliminan uno de los intercambiadores de calor y el circuito de recirculación del condensador. En la siguiente figura se muestra el nuevo prototipo con la mejora implantada, donde se puede ver el nuevo intercambiador de acero inoxidable en la zona del panel evaporativo.

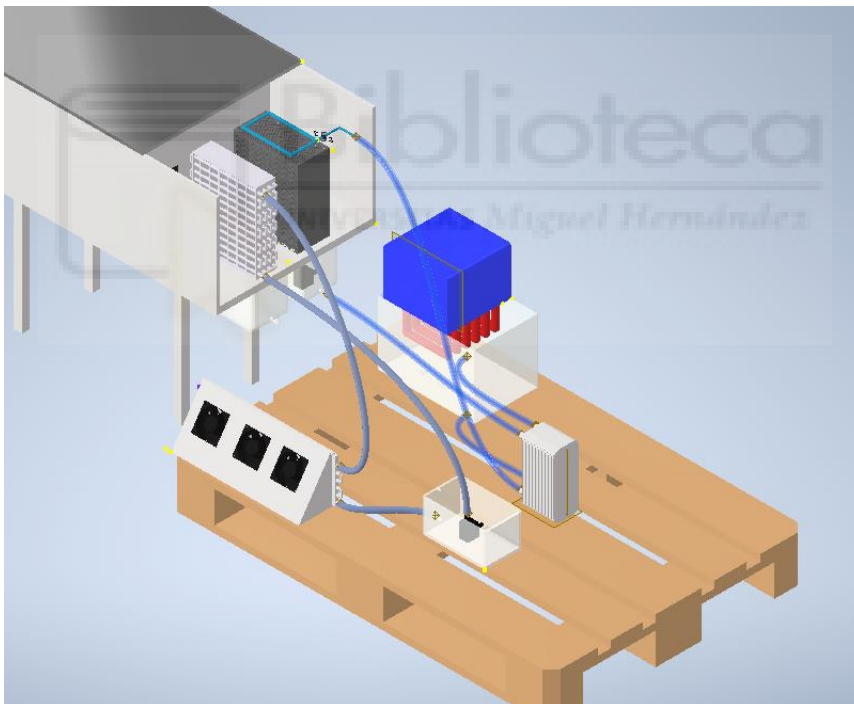


Figura 109. Modelo 3D de la propuesta de mejora con un intercambiador de acero inoxidable

Como se observa en la figura 109, se ha eliminado el panel evaporativo del condensador por un intercambiador de acero inoxidable con las mismas dimensiones. Con ello se pretende mejorar el contacto entre el aire húmedo y el

agua fría del interior de los tubos del intercambiador por aumentar la condensación del aire y con ello lograr un mayor caudal de agua dulce.

Este intercambiador recupera directamente el calor latente de condensación lo que lo hace muy eficiente a la hora de obtener agua dulce.

5.1.1.2. INTERCAMBIADOR AIRE- AIRE

Otra propuesta de mejora que se podría aplicar es añadir un intercambiador aire-aire en la zona de condensación, con ello se consigue eliminar los circuitos de agua y solamente se utilizaría el aire exterior mediante ventiladores para condensar el aire húmedo. Además, el intercambiador está formado por acero inoxidable.

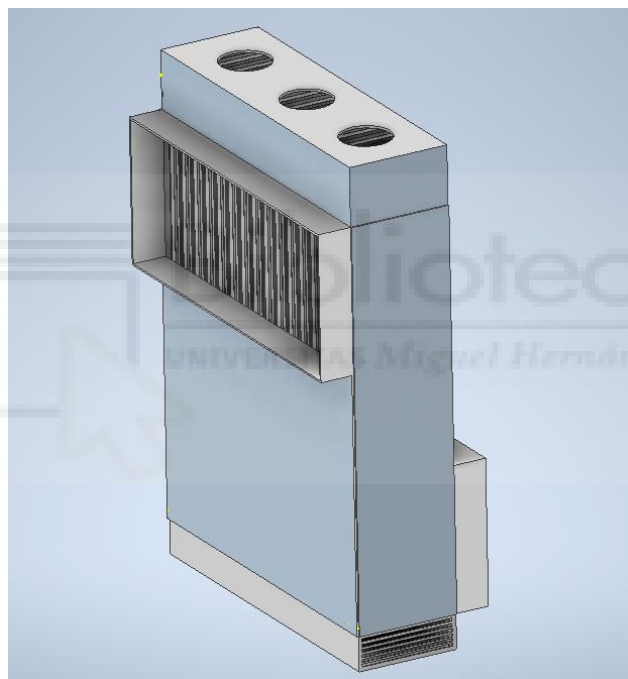


Figura 110. Modelo 3D del intercambiador aire-aire

El funcionamiento del intercambiador es simple, tiene una entrada de aire en los laterales donde entra el aire húmedo del evaporador, en este caso entra por el lado más bajo para que el intercambio sea a contraflujo, en su interior hay 16 tubos rectangulares con aletas, por el interior de los tubos es impulsado aire del exterior mediante ventiladores. En todo momento, no se produce contacto directo entre los dos flujos de aire. Los condensados se acumulan por gravedad en el interior del intercambiador sobre la base donde se extrae el agua dulce.

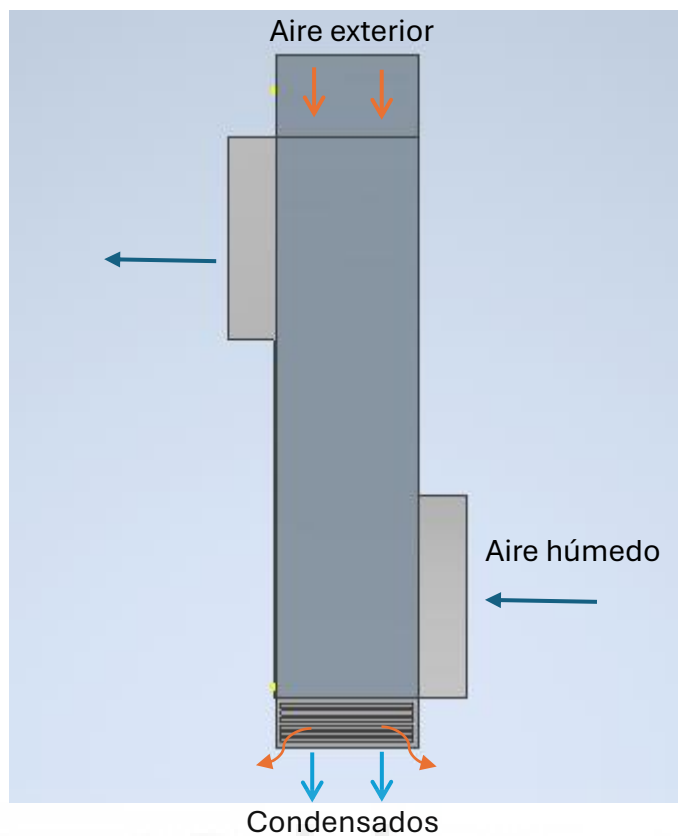


Figura 111. Modelo 3D del intercambiador aire-aire con flujos de aire

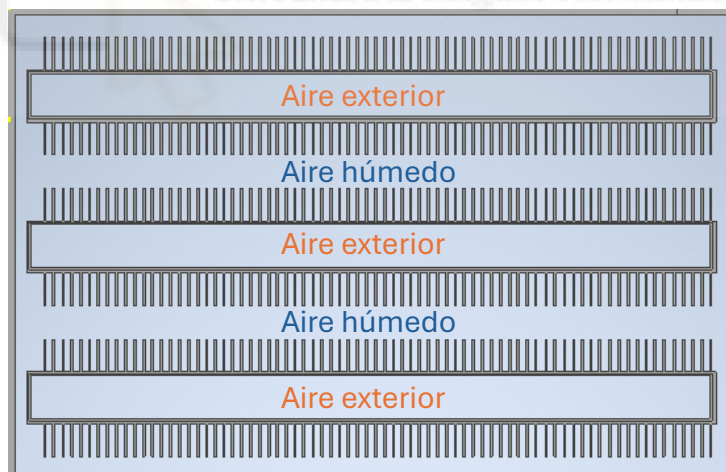


Figura 112. Interior del intercambiador aire-aire con separación de flujos de aire

Como se muestra en la siguiente figura el sistema únicamente tiene un circuito de bombeo de agua en el evaporador. Esto mejora el manejo del equipo y minimizar las averías. Al igual que la anterior propuesta, al añadir el intercambiador aire-aire se consigue aislar el agua dulce de condensados.

Por otro lado, este intercambiador es menos eficiente que el aire-agua ya que el aire es un mal conductor térmico, y el intercambio de calor se ve afectado, además tiene menos capacidad de condensar vapor. En cambio, tiene un fácil mantenimiento y puede mejorar el rendimiento GOR.

El sistema con la propuesta del intercambiador aire-aire se muestra en la siguiente imagen.

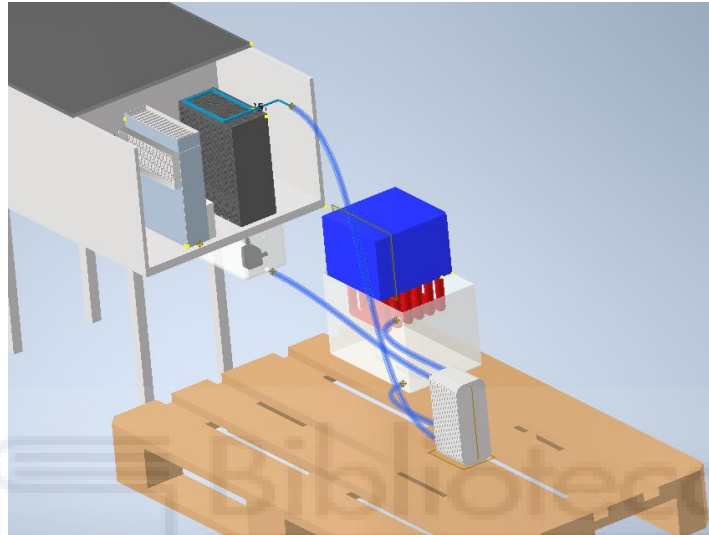


Figura 113. Modelo 3D con el intercambiador aire-aire

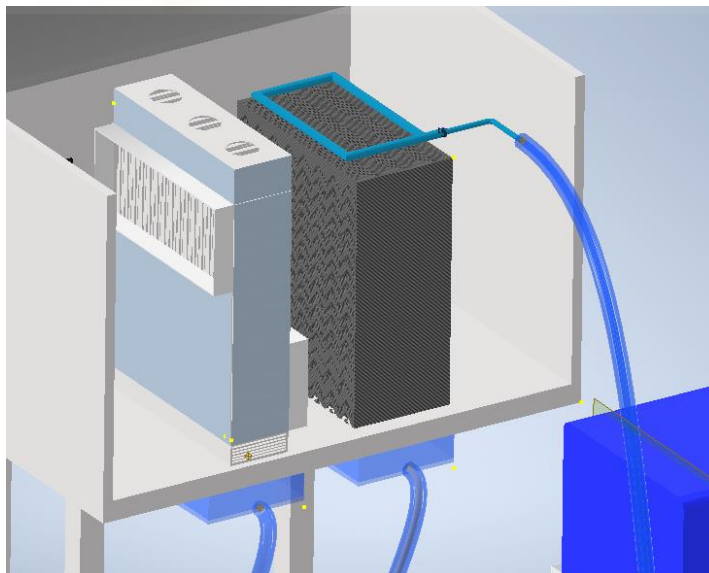


Figura 114. Modelo 3D con el intercambiador aire-aire ampliada

Lo que se quiere lograr con este diseño de intercambiador aire-aire es aumentar la superficie de contacto entre las dos corrientes de aire, se trata de un diseño complejo y costoso, en el mercado existen algunas alternativas más económicas como los intercambiadores estáticos de placas. Están formados por unas placas en este caso de acero inoxidable paralelas entre ellas, en las que alternativamente circulan el flujo de aire de extracción por una cara y el de entrada por la otra.

Existen dos tipos de configuraciones de intercambiadores de placas: de flujo cruzado y a contraflujo.



Figura 115. Intercambiador aire-aire de placas de flujo cruzado

En el intercambiador de flujo cruzado, los flujos de aire de entrada y salida se cruzan en el interior en sentido perpendicular uno del otro. Este tipo de intercambiadores tienen una forma cuadrada de diferentes dimensiones, con un coste moderado y con una eficiencia del 60 al 80%, lo que lo convierte en una buena opción a considerar para introducirlo en el sistema de desalinización.



Figura 116. Intercambiador aire-aire de placas a contraflujo

En intercambiador a contraflujo, los flujos de aire recorren en su interior caminos paralelos y a contracorriente, con lo cual el tiempo de contacto y la superficie de transferencia de calor es mayor, incrementando la capacidad de recuperación. Este

tipo de intercambiadores tienen un coste mayor, pero una mejor eficiencia, entorno al 90 – 95%.

5.1.2. MEJORA DEL AISLAMIENTO Y ESTRUCTURA DEL EQUIPO

Como se ha demostrado en los resultados obtenidos en los ensayos, se ha podido observar que hay una gran pérdida de energía durante el proceso de obtención de agua dulce a partir de la evaporación de agua salada. Una de las posibles causas de esto se puede deber a el mal aislamiento del sistema. El equipo tiene varias zonas por las que se filtra el aire provocando perdidas de calor y un mal funcionamiento el quipo.



Figura 117. Base del equipo despegada

Como se muestra en la figura 117, el equipo tiene numerosas zonas por donde se pierde calor, esto se ha tenido que solucionar mediante cinta adhesiva de aluminio.



Figura 118. Orificios en la superficie del sistema



Figura 119. Filtraciones de aire en las paredes del equipo

La propuesta de mejora es construir una estructura sólida, compacta y hermética, con ello se evitarán que se produzcan fugas del aire interior que puedan afectar al rendimiento del sistema. En este caso, se debería de corregir estas aperturas mediante el cambio de nuevo aislante térmico en las zonas afectas, es recomendable el uso de paneles sándwich con aislante PUR o PIR para mejorar el

aislamiento térmico y con refuerzo interior y exterior de chapa de acero inoxidable. Lo que le aporta al equipo una estructura más sólida, compacta y duradera.

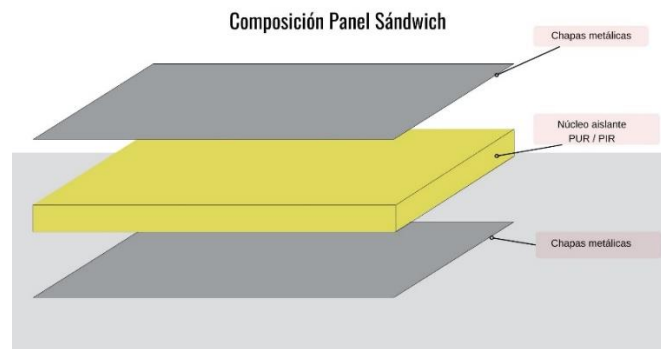


Figura 120. Representación de la propuesta de panel sándwich

Por otro lado, el equipo consume como máximo 31,5 W con los ventiladores y bombas conectadas. Actualmente, la placa solar instalada es de 120W, por lo que para hacer un equipo más compacto sería recomendable instalar una placa solar de 40 W.



Figura 121. Propuesta de placa fotovoltaica de 40W de 50x50cm

Por último, durante los ensayos se ha visto que los depósitos de recolecta de agua en la base del equipo no eran muy eficientes, dado que había que desmontar el equipo para rellenar los depósitos de agua, con las propuestas anteriores se ha eliminado el depósito de recirculación del condensador, únicamente se utiliza para recolectar agua de condensados. Para solucionar el problema con el depósito del

evaporador y además poder mantener un flujo constante de agua salada, se ha propuesto el siguiente modelo.

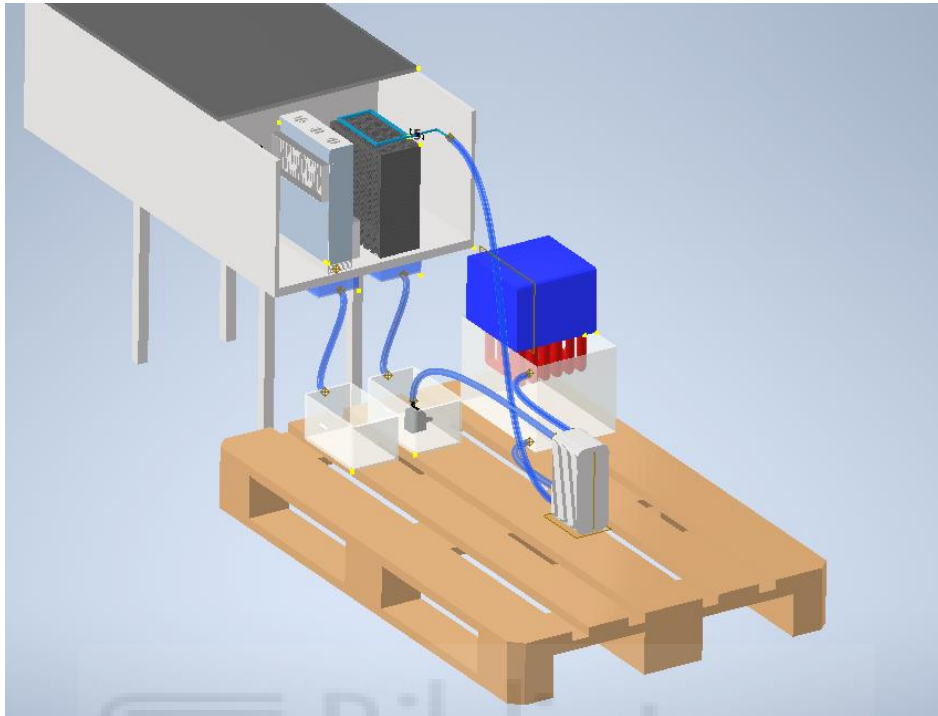


Figura 122. Modelo 3D con depósitos sobre pallet con suministro continuo de agua salada

Como se muestra en la figura 122, se han cambiado los depósitos que se encontraban en la base del equipo y se han puesto en la zona exterior, en este caso se ha añadido dos recipientes de recogida con una pequeña inclinación, este modelo sirve para todas las posibles combinaciones.

5.1.3. MEJORA DE EFICIENCIA CON UNA CONFIGURACIÓN MULTITETAPA

Para aprovechar mejor el calor y mejorar el rendimiento del equipo, una de las posibles opciones es crear un sistema multitapa donde se aprovecha el agua salada caliente del primer equipo para introducirla directamente mediante bombeo en el evaporador del siguiente sistema.

Esta configuración, puede llegar a mejorar la eficiencia del equipo, ya que, con la misma energía de entrada al equipo, se genera más agua condensada. En este caso se tendría que barajar la posibilidad de aplicar esta configuración y estudiar la rentabilidad.

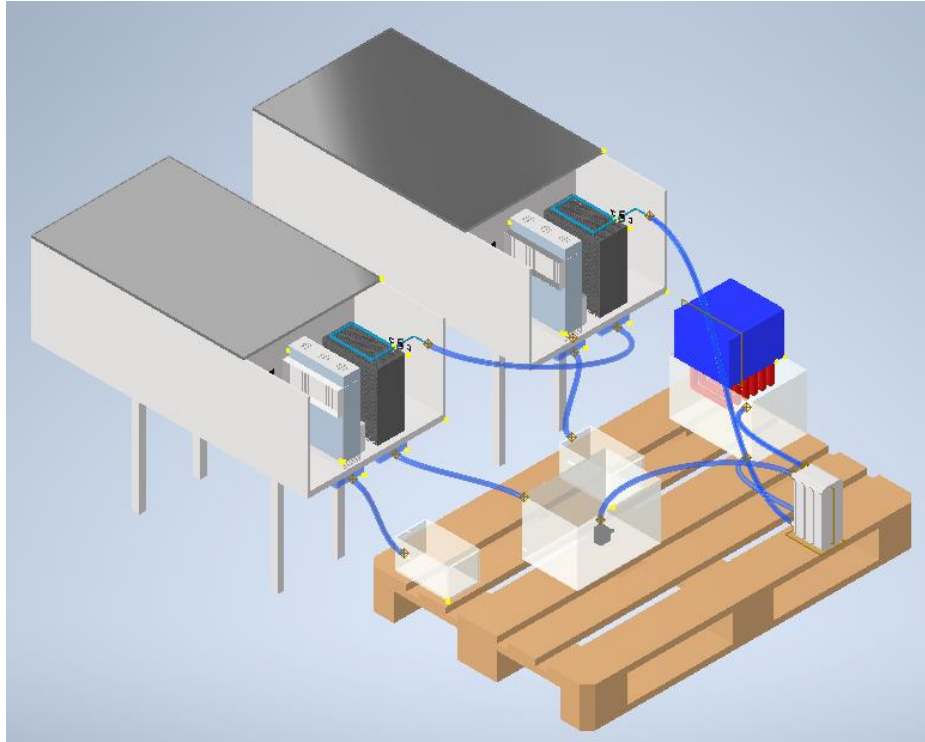


Figura 123. Modelo 3D propuesta de equipo multietapa

En este caso, en la figura 118, se muestra un sistema de 2 etapas, aunque podrían añadirse infinitas etapas, un número razonable de etapas es entre 2 a 4, ya que un número elevado de etapas no se aprovecharía bien la energía térmica. Además, hay que estudiar la viabilidad de la configuración, ya que el añadir etapas se está aumentando considerablemente el coste de equipo.

5.1.4. PROPUESTA DE DISEÑO DE UN SISTEMA HDT CON MEJORAS APLICADAS

A continuación, se presenta una propuesta de diseño de un sistema de desalinización con alguna de las mejoras mencionadas anteriormente, este sistema está pensado para un posible desarrollo a nivel productivo en zonas donde no haya acceso a agua potable.

El sistema de desalinización mejorado está formado por una estructura de acero inoxidable, un evaporador con módulos de intercambio separados por una malla plástica de polipropileno (PP), ya que soporta temperaturas mayores a 100°C, un intercambiador de aire-aire de acero inoxidable, depósitos de agua dulce y salada, un sistema de bombeo y ventiladores de impulsión de aire.

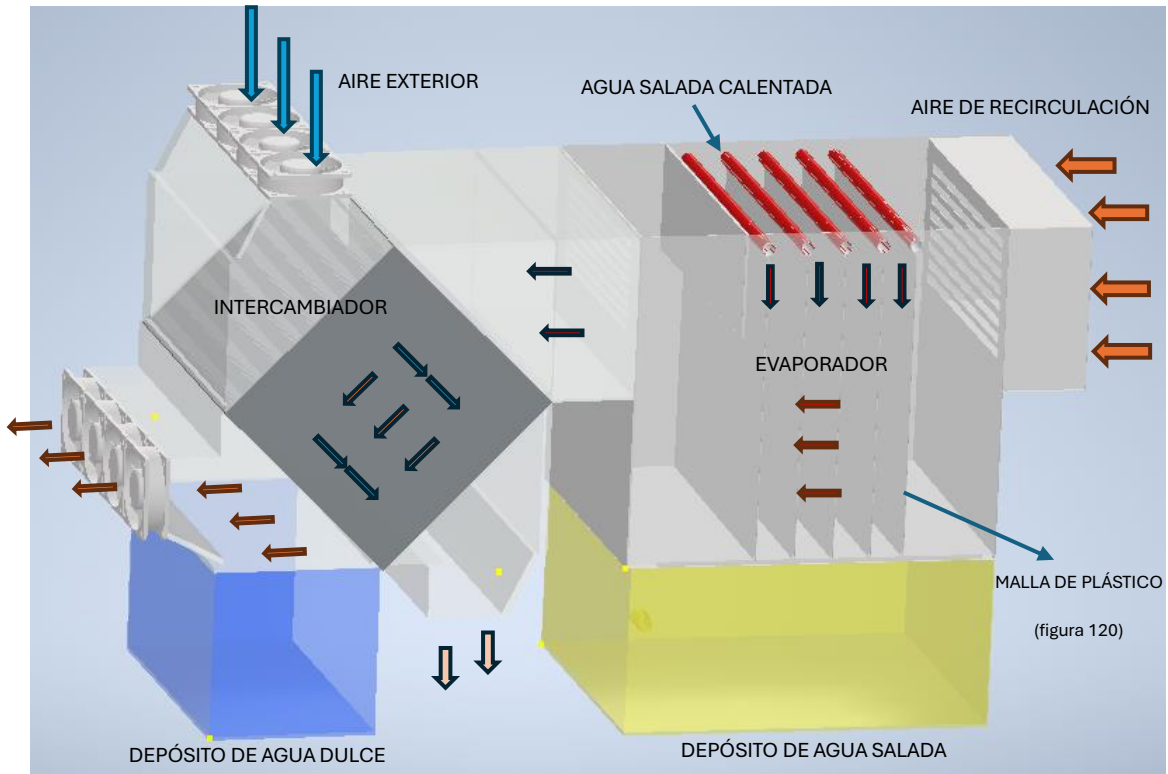


Figura 124. Modelo 3D propuesta de equipo mejorado



Figura 125. Malla de PP como separador de módulos en el evaporador

Como se muestra en la figura 125, el evaporador diseñado está compuesto por varias cámaras de separación, estas están divididas por una malla de PP por donde se obliga a pasar el aire, a la vez que el agua salada calentada es bombeada desde

las tuberías superiores, formando una cortina de agua en la malla de PVC. Esto mejora el intercambio de energía entre los dos fluidos aumentando la temperatura y humedad del aire.

El aire caliente sale del evaporador y entra en el intercambiador aire-aire, donde se enfría y condensa en el depósito de recogida de condensados, el aire condensado es recirculado de nuevo a la entrada del evaporador.

5.2. ESTUDIO DE VIABILIDAD DEL SISTEMA HDT

Para la realización del estudio de viabilidad del sistema de desalinización se ha decidido seleccionar la zona donde se han realizado los ensayos de laboratorio. Este estudio tiene como objetivo calcular los costes que supondría implementar el sistema de desalinización HDT sin mejoras, además de comprobar su viabilidad. Para ello, se ha realizado un presupuesto de fabricación y una estimación de producción según la incidencia solar.

5.2.1. ESTIMACIÓN DE PRODUCCIÓN ANUAL

Para determinar una estimación anual del sistema de desalinización hay que tener en cuenta la incidencia solar anual de la zona donde se instalará el sistema. Para ello se hará uso del Software PVGIS donde se extraerán los resultados de la simulación.

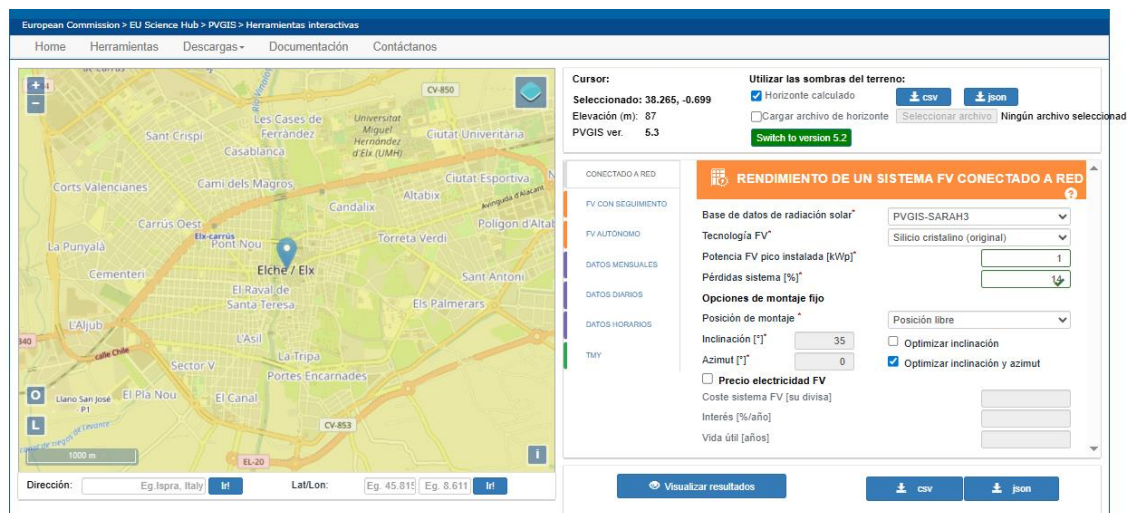


Figura 126. Software PVGIS

Resultados de la simulación:	
Ángulo de inclinación [°]:	24 (opt)
Ángulo de azimut [°]:	-13 (opt)
Producción anual FV [kWh]:	1799.73
Irradiación anual [kWh/m ²]:	2453.28
Variación interanual [kWh]:	18.56
Cambios en la producción debido a:	
Ángulo de incidencia [%]:	-2.31
Efectos espectrales [%]:	-0.44
Temperatura y baja irradiancia [%]:	-12.29
Pérdidas totales [%]:	-26.64

Figura 127. Resultados del Software PVGIS

A continuación, a partir de los datos obtenidos de PVGIS y de los ensayos se calcula el colector solar que tendrá como objetivo calentar el agua salada para evaporarla. Según los resultados de los ensayos, se ha obtenido diferentes graficas donde se muestra cuanta energía necesita el sistema para producir agua destilada.

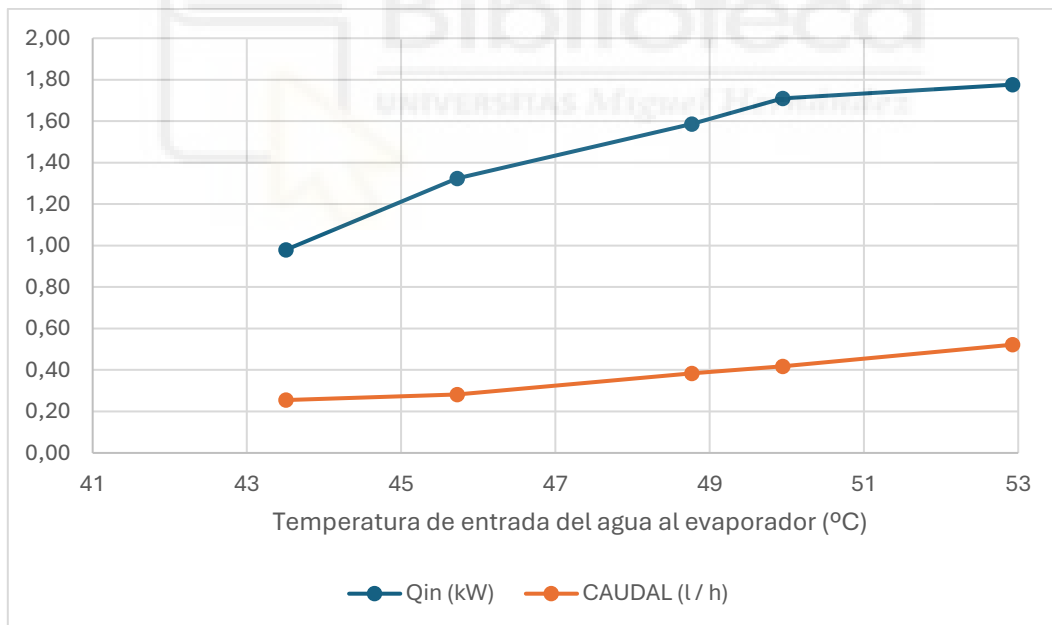


Figura 128. Resultados de energía necesaria para producir condensados

Como se observa en la figura 128, para producir 0,5 l/h se necesitan 1,8 kW. Esto se traduce a que el sistema consume 3.6 kWh para producir 1 litro de agua dulce.

Elche tiene una media de 7-8 h de sol diarias, suponiendo que la suma de horas de mayor incidencia es de 8h, el sistema produce 4 litros consumiendo 14,4 kwh.

Al año el equipo puede generar 1460 litros/año, con un consumo anual de 5256 kWh/año. Con estos datos se calcula el área del colector solar necesario para satisfacer la demanda anual.

$$A(m^2) = \frac{\text{Demanda anual}}{\text{Irradiancia solar anual}}$$

$$A(m^2) = \frac{5256 \text{ kWh/año}}{0.8 (\text{Rendimiento}) * 2453 \frac{\text{kWh}}{m^2 * \text{año}}} * 1.2 (\text{pérdidas}) = 3.2 m^2$$

Se ha seleccionado un colector solar de 18 tubos con una superficie de 3,26 m².

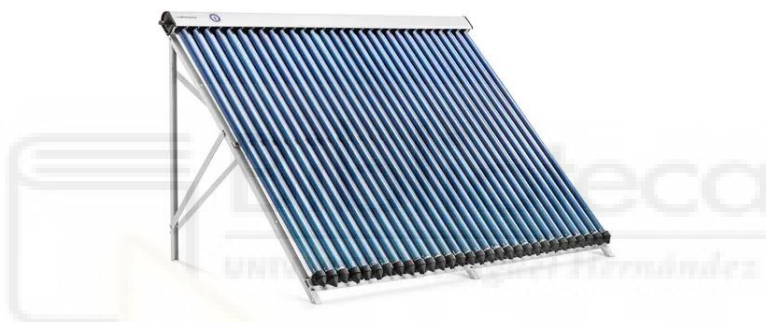


Figura 129. Colector solar de 3,26 m²

5.2.2. ESTIMACIÓN DE PRESUPUESTO

Para el cálculo del costo de fabricación se ha tenido en cuenta el modelo de la figura 101, la placa fotovoltaica de 40W y el colector solar de la figura 123.

COSTE DE MATERIALES	PRECIO	UNIDADES	TOTAL
Estructura XPS	4,2 € / m ²	4	16,80 €
Separadores de gotas	100 € / m ²	0,2	20,00 €
Ventiladores	6 € / Ud	5	30,00 €
Intercambiadores	300€ / Ud	2	600,00 €
Tubería PVC	1€ / m	2	2,00 €
Dosificadores	10€ / Ud	2	20,00 €
Bombas 12 Vdc	6€ / Ud	5	30,00 €
Depósitos de recogida	2€ / Ud	3	6,00 €
Placa solar 40W	50€ / Ud	1	50,00 €
Cableado	12€ / Ud	1	12,00 €

Colector solar	1150€/ Ud	1	1.150,00 €
MANO DE OBRA			
Ingeniería	45€/ h	10	450,00 €
Montaje y ensamblaje	15€/ h	15	225,00 €
Pruebas y puesta en marcha	25€/ h	30	750,00 €
TOTAL COSTE DE PRODUCCIÓN (SIN IVA)			3.361,80 €
TOTAL COSTE DE PRODUCCIÓN (IVA)			4.067,78 €
TOTAL PRECIO DE VENTA (35% margen de venta)			5.491,50 €

Tabla 16: Presupuesto estimado del equipo HDT

El equipo tiene un coste total de venta estimado de 5491,50€. A continuación, se hace un cálculo de rentabilidad de retorno de inversión (TRS) en la zona de Elche. No se ha tenido en cuenta el precio del agua en zonas donde no hay acceso a agua potable.

El sistema sin mejoras produce al año 1460 litros de agua dulce, suponiendo un precio de venta del litro de agua desalada en España es de 0,0010 €, el sistema produce un beneficio de 1.46 €/año con un caudal de producción de condensados de 0,5 l/h, dando una tasa de retorno de inversión excesiva (Tabla 16.).

$$TRS = \frac{\text{inversión}}{\text{beneficio}} = \frac{\text{Inversión inicial (5491,50€)}}{\text{Producción anual de agua (l)}} \text{ (años)}$$

Caudal de condensados (l/h)	Producción anual (l)	Beneficio anual (€)	TRS (años)
0,5	1460	1,46	3761
1,5	4380	4,38	1254
4,5	13140	13,14	418
44,5	129940	129,94	42
114,5	334340	334,34	16
214,5	626340	626,34	9

Tabla 16: Caudal estimado de rentabilidad del sistema

5.3. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos se ha logrado determinar el comportamiento del equipo de desalación en diferentes condiciones de funcionamiento, variando el caudal de aire de intercambio, la concentración de sal y la temperatura de entrada en el evaporador. De esta manera se ha podido estudiar las diferentes configuraciones y parámetros característicos. Además, pese a no tener la instrumentación necesaria se ha podido identificar de forma clara los problemas que presenta el equipo y en qué condiciones se producen mayores pérdidas. Para poder obtener unos datos con mayor precisión, es conveniente la utilización de mayor numero de termopares (malla de sensores), sensores de humedad, mediciones continuas y materiales preparados para soportar temperaturas superiores a 60°C para evitar fugas y detenciones de los ensayos.

Como se ha podido demostrar en los datos obtenidos de los ensayos, el sistema es muy poco eficiente, debido a que gran parte de la energía que recibe el sistema se pierde y no se transforma en energía de condensación que es el objetivo de este equipo, por una parte, el problema se relaciona con los paneles evaporativos, este elemento de intercambio de calor entre el aire y agua está provocando que el equipo tenga perdidas de energía. En el evaporador, por ejemplo, se necesita mucha energía para calentar el aire y humedecerlo, en la siguiente figura se muestra la temperatura de entrada del agua al evaporador y la salida del aire.

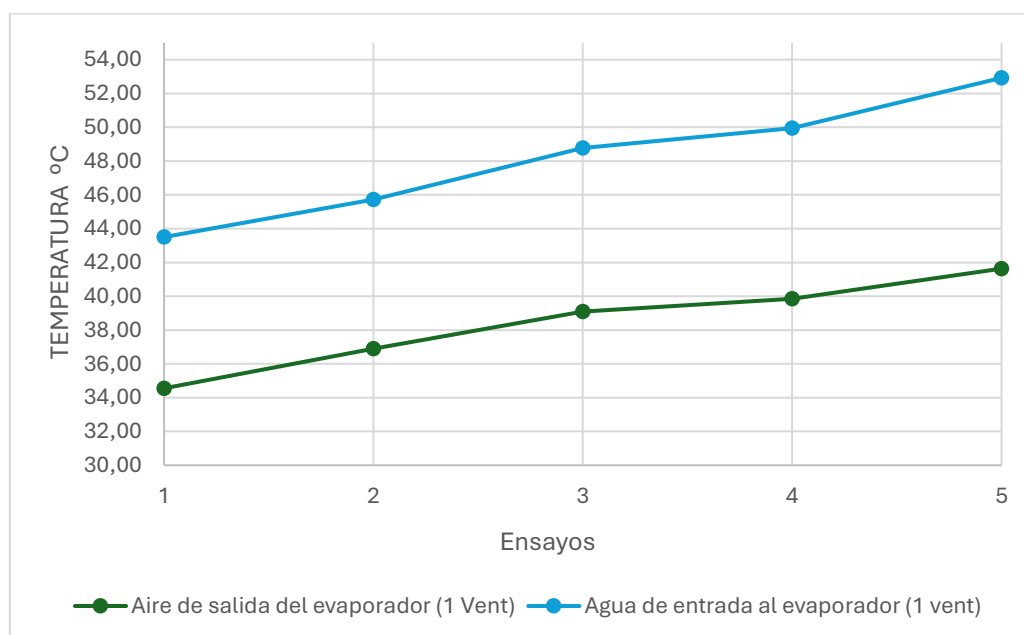


Figura 104. Representación de la temperatura de entrada del agua y salida del aire del evaporador

Como puede observar en la figura 104, hay una separación notable entre la temperatura del agua y del aire de salida, este gráfico deja claro que en los paneles evaporativos se pierde energía.

En cuanto a los resultados obtenidos de eficiencia (GOR) se ha podido observar unos resultados muy bajos respecto a otros sistemas con el mismo funcionamiento que se han podido estudiar, en términos generales un sistema de este tipo debería estar en valores de GOR entre 1 y 2, en este caso se han obtenido valores de 0,2 – 0,3, esto demuestra la ineficiencia del equipo.

En la siguiente figura se observa que parte de la energía que entra al equipo se convierte en energía útil.

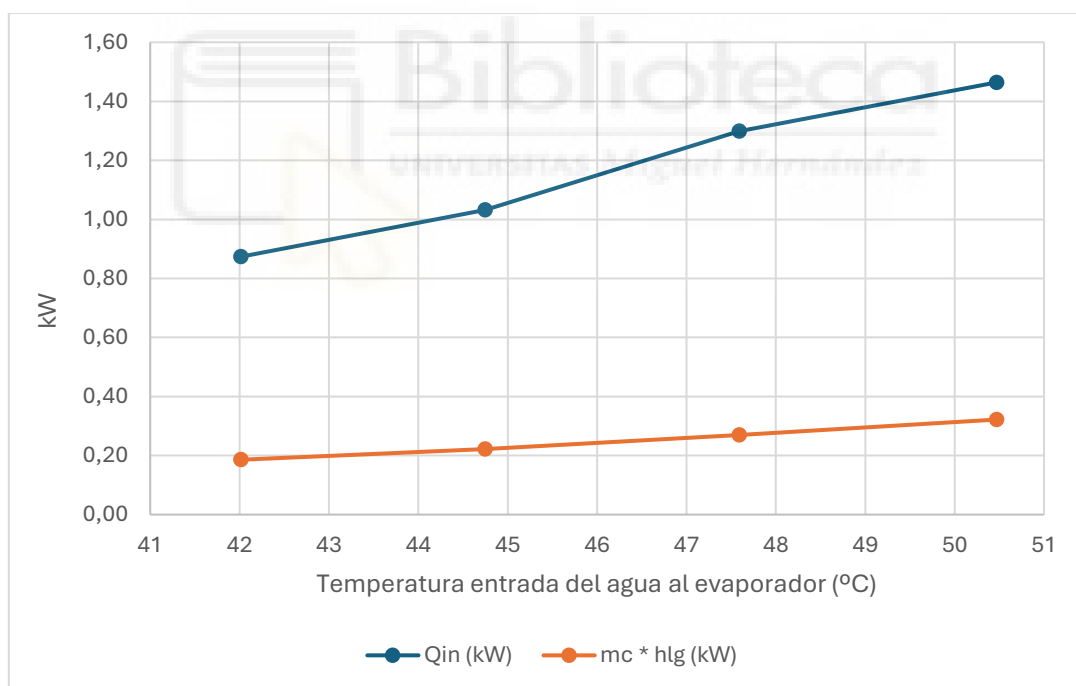


Figura 105. Representación de la energía de entrada y salida del sistema

Por otro lado, se han realizado análisis de balances de energía y masa de un sistema HDT determinando así las condiciones y variables de operación deseadas. También, se ha realizado una comprobación de la conductividad del agua en cada

punto de interés, pudiendo verificar que el sistema produce agua destilada. Con los datos obtenidos, se ha procedido a estudiar posibles mejoras y configuraciones que pueden ayudar a mejorar el sistema como se ha visto en el capítulo 5.

En definitiva, según la estimación de rentabilidad, se trata de un equipo costoso en relación el beneficio que se obtiene si se comercializara en España, habría que considerar también aplicar alguna de las mejoras mencionadas anteriormente, reduciendo el consumo energético y mejorando la producción de agua de condensados. En zonas con uso acceso a agua potable, para que el equipo tenga rentabilidad debería de producir mínimo 200 l/h (Tabla 16.), algo fuera del alcance para este tipo de sistema.

En consecuencia, dado que en este proyecto no se ha podido comprobar el funcionamiento del sistema con paneles fotovoltaicos y colectores solares, se puede considerar la opción de poder diseñar un equipo con resistencia eléctrica para zonas con poca radiación solar y un equipo con placas solares con menor rendimiento ya que dependería de la energía del sol. Además, en zonas con gran cantidad de irradiancia solar existe la posibilidad de eliminar el colector solar y alimentar el sistema y la resistencia eléctrica (calentador de agua) únicamente mediante paneles fotovoltaicos.

El equipo está pensado para un uso en zonas con dificultad a agua potable, como por ejemplo en zonas de África o Arabia saudí, al tratarse de un equipo pequeño es fácil de transportarlo, como en misiones del ejército en zonas áridas o trasladar el sistema por pueblos de difícil acceso para proporcionar agua dulce. En este estudio no se ha tenido en cuenta los tratamientos posteriores que debe de pasar el agua destilada obtenida del sistema de desalación para su uso. En principio el agua destilada obtenida directamente del equipo se puede utilizar para el regadío del cultivo. En caso de que su uso fuera para consumo humano, el agua destilada tendría que ser filtrada, desinfectada, reajustar el PH y minerales y por último hacer pruebas de controles de calidad.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/0fe2db7b-e763-4674-a347-9bf2b240878d/content>
- [2] <https://www.aquapro-la.com/-que-es-osmosis-inversa-.html>
- [3] <https://waterstation.mx>
- [4] <https://grupoacura.com/es/blog/osmosis-inversa/>
- [5] <https://www.carbotecnia.info/aprendizaje/electrodeionizacion-edi/que-es-la-electrodeionizacion/>
- [6] https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1007/3589/1/tesis_Jos%C3%A9%20Aguilar%20Castro_10%20ago%202021.pdf
- [7] [file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/Dialnet-DesalinizacionDelAguaDelMarMedianteEnergiasRenovab-566687%20\(3\).pdf](file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/Dialnet-DesalinizacionDelAguaDelMarMedianteEnergiasRenovab-566687%20(3).pdf)
- [8] https://www.gemina.es/files/catalogue/view/18_Evaporadores_circulacion_inversa/pdf/18_Evaporadores_circulacion_inversa.pdf
- [9] <https://rinconeducativo.org/es/recursos-educativos/tecnicas-desalinizacion/>
- [10] https://ecoagua.com/wp-content/uploads/2016/12/Art_tecnico_ecoagua_7.pdf
- [11] <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/8569/3/CD-5778.pdf>
- [12] [file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/250CORR%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/250CORR%20(1).pdf)
- [13] <https://atriainnovation.com/blog/desalinizar-el-agua-de-mar-15-veces-mas-barato/>
- [14] https://www.researchgate.net/figure/Figura-32-Proceso-de-desalacion-por-congelacion_fig1_361909877
- [15] <https://www.noticiasrenovables.com/2021/06/el-destilador-solar-inverso-nueva.html>
- [16] <https://rita.udistrital.edu.co/procoler2/index.php/secciones/fuentes-renovables/energia-solar/energia-solar-termica?start=4>
- [17] [file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/Dialnet-DesalinizacionDelAguaDelMarMedianteEnergiasRenovab-566687%20\(3\).pdf](file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/Dialnet-DesalinizacionDelAguaDelMarMedianteEnergiasRenovab-566687%20(3).pdf)
- [18] https://www.researchgate.net/figure/Multi-stage-evacuated-solar-desalination-system-coupled-with-fl-at-plate-collectors_fig1_277668056
- [19] http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/410/1/Maldonado_Valderrama_Camilo_Roberto.pdf
- [20] <https://energia.jcyl.es/web/es/energias-renovables-ordenacion-energetica/captador-solar.html>
- [21] https://www.researchgate.net/publication/338254329_COLECTORES_SOLARES_TERMICOS
- [22] <https://hansa-engineering.se/losningar/droppavskiljning/>
- [23] <https://www.alfalaval.es/productos-y-soluciones/transferencia-de-calor/intercambiadores-de-calor-de-placas/intercambiador-de-calor-definicion-funcionamiento-tipos-y-aplicaciones/>

- [24] https://personales.upv.es/vsoto/index_archivos/FTP/TC/Intercambiadores%20de%20calor.pdf?fbclid=IwAR2r72R974ul2FfVlbdA2LMPq3cod7lZ4Lg9cE2jMwM-m35YfpL_RgUVrG8
- [25] <https://www.urbipedia.org/hoja/Psicometr%C3%ADa>
- [26] <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/8569/3/CD-5778.pdf>
- [27] <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/54455/-1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [28] <https://iestpcabana.edu.pe/wp-content/uploads/2021/11/BALANCE-DE-MATERIA.pdf>

