

UNIVERSIDAD MIGUEL HERNÁNDEZ DE ELCHE
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ELCHE
MÁSTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL



"Estudio, ensayos y propuesta de mejoras
sobre un prototipo de equipo de
desalinización de agua por
humidificación/deshumidificación de aire
mediante paneles evaporativos y con el uso
de energía solar"

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Diciembre –2025

AUTOR: Iván Sierra Vallés

DIRECTOR/ES: Antonio Jaén
González

AGRADECIMIENTOS:

Quiero agradecer a Antonio Jaén y Sebastián de la Coba por su seguimiento, orientación, disponibilidad y consejos a lo largo de la realización del proyecto.

También agradezco enormemente a mi familia por su apoyo constante y comprensión por el tiempo que no le he dedicado a ellos.

RESUMEN

El objetivo de este proyecto es el estudio de un sistema de desalinización de agua, con la finalidad de estudiar el comportamiento del equipo variando las condiciones de trabajo. Los ensayos se han llevado a cabo en el laboratorio de máquinas térmicas del edificio Altet de la Universidad Miguel Hernández.

En primer lugar, se ha instalado en el equipo la instrumentación necesaria para obtención de datos que permiten hacer un correcto análisis del funcionamiento del sistema. Empezando desde la instalación de termopares en los puntos de interés donde se obtienen las temperaturas hasta la utilización de una báscula para medir condensados, anemómetro, resistencia variable, etc. El sistema de desalinización incluye una carcasa de aislamiento XPS, dos ventiladores, dos paneles evaporativos que trabajan como evaporador y condensador. Tanto el evaporador como el condensador están unidos a un circuito independiente el cual mediante bombas de 12 Vdc se impulsa el agua haciéndola pasar por un intercambiador de calor.

Este sistema de desalinización de agua está pensado para ser un equipo versátil, compacto y capaz de poder usarse en zonas de escasez de agua con acceso a agua salada. En principio el equipo está preparado para trabajar con un colector solar, en cambio, se sustituirá el captador solar por una fuente de calor (baño termostático) mediante resistencia eléctrica que nos permita, además, mantener constante la temperatura del agua caliente.

NOMENCLATURA

\dot{m}_a	Caudal másico de aire seco
\dot{m}_v	Caudal másico de vapor de agua
\dot{m}_c	Producción de agua destilada
T_a	Temperatura del aire seco
ω	Humedad Absoluta del aire
$c_{p,a}$	Calor específico del aire seco
\dot{Q}	Flujo de calor total transferido
\dot{Q}_{eva}	Calor en el evaporador / humidificador
\dot{Q}_{cond}	Calor en el condensador / deshumidificador
ΔT	Diferencia de temperaturas

HDT: Tecnología de humidificación y deshumidificación, traducido del inglés (Humidification-Dehumidification-Technology)

Salobre: Agua que tiene un nivel de salinidad intermedio entre el agua dulce y el agua de mar, entre 0,5 y 30 gramos de sal por litro (Aprox entre 500 y 30000 ppm)

GOR: Gain Output Ratio

ÍNDICE

RESUMEN	X
NOMENCLATURA	X
LISTADO DE FIGURAS	1
LISTADO DE TABLAS	7
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	8
1.1. SITUACIÓN INICIAL	2
1.2. MOTIVACIÓN.....	4
1.3. OBJETO.....	4
1.4. ALCANCE.....	4
1.5. TECNOLOGÍAS DE DESALINIZACIÓN DEL AGUA.....	4
1.6. PROCESOS DE DESALINIZACIÓN POR MEMBRANAS.....	6
1.6.1. ÓSMOSIS INVERSA.....	8
1.6.2. ELECTRODESIONIZACIÓN (EDI)	11
1.7. PROCESOS DE DESALINIZACIÓN POR DESTILACIÓN TÉRMICA	13
1.7.1. DESTILACIÓN SÚBITA MULTITAPA (MSF)	13
1.7.2. DESTILACIÓN MULTIEFECTO (MED)	15
1.7.3. COMPRESIÓN DE VAPOR.....	19
1.7.4. DESTILACIÓN POR HUMIDIFICACIÓN Y DESHUMIDIFICACIÓN (HDH).....	20
1.7.5. DESTILACIÓN POR CONGELACIÓN	23
1.7.6. DESTILACIÓN POR RADIACIÓN SOLAR.....	24
1.7.6.1. DESTILACIÓN SOLAR DIRECTA.....	25
1.7.6.2. DESTILACIÓN SOLAR INDIRECTA	27
CAPÍTULO 2 : INTRODUCCIÓN AL SISTEMA DESALINIZADOR HDT	30
2.1. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DESALINIZADOR HDT.....	31
2.2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO HDT	32
2.3. COMPONENTES Y MATERIALES PRINCIPALES.....	37
2.3.1. COLECTOR SOLAR	38
2.3.2. PANELES DE EVAPORACIÓN	40
2.3.3. BOMBAS DE AGUA	42
2.3.4. INTERCAMBIADORES DE CALOR.....	42
2.3.5. VENTILADORES.....	46
2.4. FUNDAMENTOS DE PSICROMETRÍA	47
2.4.1. DIAGRAMA PSICROMÉTRICO	47
2.4.2. MEZCLA AIRE – VAPOR DE AGUA	48
2.4.3. TEMPERATURA DE BULBO SECO	49
2.4.4. TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO	49
2.4.5. PUNTO DE ROCÍO	49

2.4.6. HUMEDAD ABSOLUTA	49
2.4.7. HUMEDAD RELATIVA	50
2.4.8. ENTALPÍA ESPECÍFICA	50
2.4.9. CALOR LATENTE Y SENSIBLE DE LA MEZCLA AIRE-VAPOR	50
2.4.10. CALENTAMIENTO SENSIBLE DEL AIRE	52
2.4.11. HUMIDIFICACIÓN DEL AIRE HÚMEDO	54
2.4.12. ENFRIAMIENTO Y DESHUMIDIFICACIÓN	55
2.5. BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA	56
2.5.1. BALANCE DE MATERIA	57
2.5.2. BALANCE DE ENERGÍA	58
2.6. CÁLCULO DE BALANCES DEL PROTOTIPO HDT	59
2.6.1. BALANCE DEL INTERCAMBIADOR	60
2.6.2. BALANCE DEL EVAPORADOR	62
2.6.3. BALANCE DEL CONDENSADOR	63
2.6.4. PARÁMETROS DE CÁLCULO DE EFICIENCIA	64
CAPÍTULO 3: MONTAJE EXPERIMENTAL	65
3.1. PROCESO DE PREPARACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS	66
3.2. CALIBRACIÓN DE TERMOPARES	74
CAPÍTULO 4: RESULTADOS DE LABORATORIO	81
4.1. RESULTADOS OBTENIDOS DE ENSAYOS CON CORRECCIONES	82
4.1.1. ENSAYOS CON UNO Y DOS VENTILADORES (AGUA DULCE)	85
4.1.1.1. CAUDAL DE CONDENSACIÓN	86
4.1.1.2. PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN EL EVAPORADOR Y CONDENSADOR	87
4.1.1.3. RENDIMIENTO	90
4.1.1.4. EFICIENCIA ENERGÉTICA	93
4.1.1.5. FALLO EN LOS VENTILADORES DE LA REFRIGERACIÓN DEL CIRCUITO DEL CONDENSADOR	94
4.1.2. ENSAYOS CON UNO Y DOS VENTILADORES (AGUA SALADA)	97
4.1.2.1. CAUDAL DE CONDENSACIÓN	99
4.1.2.2. RENDIMIENTO	100
4.1.2.3. EFICIENCIA ENERGÉTICA	101
4.1.2.4. ESTUDIO DE LA CONDUCTIVIDAD	102
CAPÍTULO 5: ESTUDIO DE MEJORAS Y CONCLUSIONES	104
5.1. PROPUESTAS DE MEJORAS DEL SISTEMA HDH	105
5.1.1. INTERCAMBIADOR DE CIRCUITO CERRADO EN EL CONDENSADOR	105
5.1.1.1. INTERCAMBIADOR AIRE- AGUA	106
5.1.1.2. INTERCAMBIADOR AIRE- AIRE	109
5.1.2. MEJORA DEL AISLAMIENTO Y ESTRUCTURA DEL EQUIPO	113
5.1.3. MEJORA DE EFICIENCIA CON UNA CONFIGURACIÓN MULTITETAPA	116
5.1.4. PROPUESTA DE DISEÑO DE UN SISTEMA HDT CON MEJORAS APLICADAS	117
5.2. ESTUDIO DE VIABILIDAD DEL SISTEMA HDT	119
5.2.1. ESTIMACIÓN DE PRODUCCIÓN ANUAL	119
5.2.2. ESTIMACIÓN DE PRESUPUESTO	121

5.3. CONCLUSIONES.....	123
BIBLIOGRAFÍA.....	126



LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Esquema la empresa Soldesal	2
Figura 2. Ubicación del edificio Altet	3
Figura 3. Fachada exterior edificio Altet	3
Figura 4. Clasificación de tecnologías de desalinización	5
Figura 5. Esquema de los procesos de desalinización	6
Figura 6. Membrana tubular	7
Figura 7. Esquema de diferentes tecnologías de membrana y su filtrado	8
Figura 8. Proceso de ósmosis natural	9
Figura 9. Proceso de ósmosis inversa	9
Figura 10. Sistema de ósmosis inversa	10
Figura 11. Esquema del proceso de electrodesionización	12
Figura 12. Esquema del proceso de destilación súbita multietapa (MSF)	14
Figura 13. Esquema del proceso de destilación simple con un solo efecto	16
Figura 14. Representación del proceso de destilación multiefecto (MED)	17
Figura 15. Descripción gráfica del proceso de destilación multiefecto (MED)	18
Figura 16. Representación del proceso de destilación por compresión de vapor	19
Figura 17. Representación del proceso de destilación por humidificación y deshumidificación	21
Figura 18. Diagrama del proceso de destilación por humidificación y deshumidificación	22
Figura 19. Diagrama del proceso de destilación por congelación	24
Figura 20. Esquema del proceso de destilación solar directa en caseta	26
Figura 21. Diagrama del proceso de destilación por solar directa con forma de escaleras	26
Figura 22. Esquema planta de destilación solar multi-efecto	28
Figura 23. Esquema planta de destilación solar multi-efecto	29
Figura 24. Equipo completo de desalinización por humidificación y deshumidificación	31

Figura 25. Diseño 3D del sistema de desalinización y vista interior	32
Figura 26. Representación del agua de condensación según la temperatura	33
Figura 27. Diagrama del proceso del sistema de desalinización.....	34
Figura 28. Descripción del sistema de desalinización	35
Figura 29. Descripción del circuito interior del sistema de desalinización.....	35
Figura 30. Descripción del circuito de bombeo interior	36
Figura 31. Vista del sistema de refrigeración del intercambiador del condensador mediante un radiador unido a 3 ventiladores de 12 V	37
Figura 32. Vista interior del sistema de dosificación del condensador	37
Figura 33. Esquema de energía de un colector solar	38
Figura 34. Descripción de los componentes un colector solar	38
Figura 35. Balance de energía de un colector solar.....	39
Figura 36. Panel evaporativo	41
Figura 37. Representación del funcionamiento del panel de evaporación	41
Figura 38. Descripción del intercambio de calor del sistema	43
Figura 39. Representación de la dirección de los fluidos en el interior de un intercambiador a contraflujo	44
Figura 40. Representación de temperaturas y flujo másico de los fluidos.....	44
Figura 41. Descripción de los componentes de enfriamiento del circuito del condensador ...	46
Figura 42. Gráfico psicrométrico	47
Figura 43. Descripción de las propiedades del diagrama psicrométrico	48
Figura 44. Representación de las propiedades de calor latente y sensible del diagrama psicrométrico.....	52
Figura 45. Representación de las propiedades del proceso de calentamiento sensible de aire de un intercambiador de flujo cerrado	53
Figura 46. Representación de las propiedades psicrométricas del proceso de calentamiento sensible del aire	53
Figura 47. Representación de las propiedades del proceso de humidificación del aire húmedo en un intercambiador de flujo abierto.	54

Figura 48. Representación de las propiedades psicrométricas del proceso de humidificación del aire	55
Figura 49. Representación de las propiedades del proceso de enfriamiento y deshumidificación del aire húmedo en un intercambiador de flujo cerrado.	55
Figura 50. Representación de las propiedades psicrométricas del proceso de enfriamiento y deshumidificación en un intercambiador de flujo abierto.	56
Figura 51. Representación de los intercambiadores y numeración de termopares del interior del sistema.....	60
Figura 52. Representación del intercambiador de calor del circuito del evaporador con la resistencia térmica.	60
Figura 53. Representación del intercambiador de calor del circuito del condensador con el radiador unido a ventiladores.	61
Figura 54. Representación del evaporador del sistema	62
Figura 55. Representación del evaporador del sistema	63
Figura 56. Vista completa del sistema a analizar.....	66
Figura 57. Dispositivos medidores de temperatura manuales mediante termopares	67
Figura 58. Dispositivo medidor de temperatura conectado al evaporador	67
Figura 59. Probeta graduada para la medición del caudal de condensados	68
Figura 60. Báscula digital para la medición del caudal de condensados.....	68
Figura 61. Dispositivo de registro de temperaturas Data Logger	69
Figura 62. Termopares conectados en el interior del equipo	69
Figura 63. Medición del caudal de aire interior	70
Figura 64. Medidor de humedad Kreiberg	72
Figura 65. Representación de las zonas del interior del sistema	72
Figura 66. Representación psicrométrica punto 1	73
Figura 67. Representación psicrométrica punto 2	73
Figura 68. Representación psicrométrica punto 3	74
Figura 69. Representación de los 10 termopares interiores	75
Figura 70. Vista de los 10 termopares introducidos dentro de un baño termo regulable	76
Figura 71. Gráfico de calibración del agua	78

Figura 72. Gráfico de calibración del aire	78
Figuras 73 y 74. Gráficos de calibración del aire del evaporador y condensador	79
Figura 75. representación del registro de temperaturas del Data Logger	82
Figura 76. Software para cálculo de humedad absoluta y entalpía	84
Figura 77. Ventilador tapado y desconectado para la realización de ensayo	85
Figura 78. Representación del caudal de condensados cada 10 min	86
Figura 79. Representación del caudal de condensados cada 20 min	86
Figura 80. Representación de pérdidas de energía en el evaporador	88
Figura 81. Representación de la energía del agua y aire en el evaporador (1 vent)	88
Figura 82. Representación de pérdidas de energía en el condensador	89
Figura 83. Representación de la energía del agua y aire en el condensador (1 vent)	89
Figura 84. Representación de la energía pérdida en el evaporador y condensador (1 vent)	89
Figura 85. Representación del rendimiento cada 10 min	91
Figura 86. Representación del rendimiento cada 20 min	91
Figura 87. Representación el caudal teórico de condensados.....	92
Figura 88. Representación del caudal de vapor teórico y caudal de condensados real.....	92
Figura 89. Representación de la eficiencia cada 10 min.....	94
Figura 90. Representación de la eficiencia cada 20 min.....	94
Figura 91. Vista del sistema de refrigeración del condensador	95
Figura 92. Variación de temperatura de agua entre el punto 5 y 4 del condensador	95
Figura 93. Representación de la comparación de obtención de condensados	96
Figura 94. Representación de las temperaturas de entrada de agua y aire en el condensador	96
Figura 95. Representación del rendimiento con funcionamiento normal y sin refrigeración ...	97
Figura 96. Medición de la conductividad del agua del depósito del evaporador	98
Figura 97. Representación de caudales de condensados con agua salada y dulce	99
Figura 98. Representación de caudales de vapor teóricos con agua salada y dulce	100
Figura 99. Representación del rendimiento con agua salada y dulce.....	101

Figura 100. Representación de caudales de vapor y condensados con agua salada y dulce (1 ventilador).....	101
Figura 101. Representación del GOR con agua salada y dulce (1 ventilador)	102
Figura 102. Medición de la conductividad del agua de condensados	103
Figura 103. Representación de la conductividad en el condensador y recogida de condensados.....	103
Figura 104. Representación de la temperatura de entrada del agua y salida del aire del evaporador	124
Figura 105. Representación de la energía de entrada y salida del sistema	124
Figura 106. Representación 3D del sistema actual	105
Figura 107. Intercambiador aire-agua como propuesta de mejora.....	106
Figura 108. Diseño 3D Intercambiador aire-agua como propuesta de mejora	107
Figura 109. Modelo 3D de la propuesta de mejora con un intercambiador de acero inoxidable	108
Figura 110. Modelo 3D del intercambiador aire-aire	109
Figura 111. Modelo 3D del intercambiador aire-aire con flujos de aire.....	110
Figura 112. Interior del intercambiador aire-aire con separación de flujos de aire.....	110
Figura 113. Modelo 3D con el intercambiador aire-aire.....	111
Figura 114. Modelo 3D con el intercambiador aire-aire ampliada.....	111
Figura 115. Intercambiador aire-aire de placas de flujo cruzado	112
Figura 116. Intercambiador aire-aire de placas a contraflujo	112
Figura 117. Base del equipo despegada	113
Figura 118. Orificios en la superficie del sistema	114
Figura 119. Filtraciones de aire en las paredes del equipo	114
Figura 120. Representación de la propuesta de panel sándwich	115
Figura 121. Propuesta de placa fotovoltaica de 40W de 50x50cm	115
Figura 122. Modelo 3D con depósitos sobre pallet con suministro continuo de agua salada	116
Figura 123. Modelo 3D propuesta de equipo multietapa	117
Figura 124. Modelo 3D propuesta de equipo mejorado	118

Figura 125. Malla de PP como separador de módulos en el evaporador	118
Figura 126. Software PVGIS	119
Figura 127. Resultados del Software PVGIS.....	120
Figura 128. Resultados de energía necesaria para producir condensados	120
Figura 129. Colector solar de 3,26 m²	121



LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Datos de partida para el cálculo de caudal de aire.....	71
Tabla 2. Caudales de agua de los circuitos del equipo.....	71
Tabla 3. Temperaturas de bulbo húmedo y seco en las zonas del sistema	72
Tabla 4. Humedades absolutas obtenidas del ejemplo de cálculo psicrométrico	74
Tabla 5. Clasificación de los termopares de aire y agua.....	75
Tabla 6. Registro de temperaturas de calibración.....	77
Tabla 7. Registro de temperaturas de calibración.....	77
Tabla 8. Calibración final de los termopares	80
Tabla 9. Ejemplo de registro de temperatura del Data Logger	83
Tabla 10. Propiedades y caudales de cálculo	84
Tabla 11. Ejemplo de cálculo de balance energético	87
Tabla 12. Ejemplo de cálculo caudal de condensados.....	90
Tabla 13. Ejemplo de cálculo de rendimiento.....	90
Tabla 14. Ejemplo de cálculo de GOR	93
Tabla 15: Conductividad del agua en cada zona del sistema	103
Tabla 16: Presupuesto estimado del equipo HDT	122
Tabla 16: Caudal estimado de rentabilidad del sistema	122



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Biblioteca
UNIVERSITAS Miguel Hernández

1.1. SITUACIÓN INICIAL

El proyecto centra en el estudio de un equipo prototipo de desalinización por humidificación/deshumidificación mediante paneles evaporativos alimentado por energía solar. El prototipo está diseñado y fabricado por la empresa Soldesal. El objetivo de este proyecto es conocer el comportamiento de este prototipo mediante ensayos, donde se estudiará y se comprobará cuáles son las mejores condiciones de trabajo del equipo y comparar los resultados con los cálculos teóricos. Finalmente, se definirán diferentes opciones de mejora con las que se busca un mayor rendimiento del sistema.

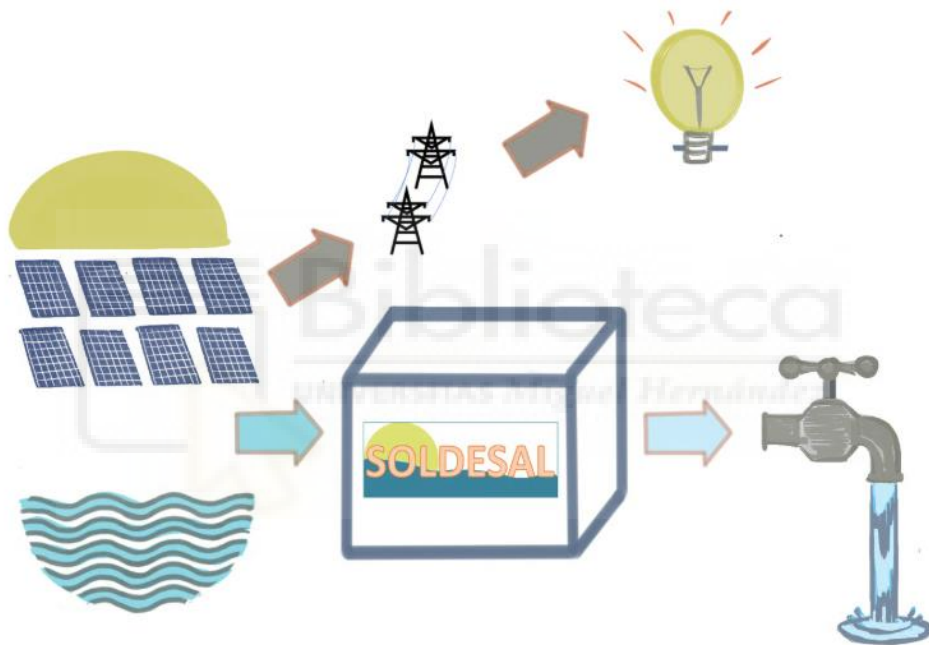


Figura 1. Esquema la empresa Soldesal

Los ensayos se han realizado en el laboratorio de máquinas térmicas del edificio Altet, donde se obtendrán los resultados del estudio empírico. El edificio está ubicado en la Universidad Miguel Hernández de Elche, entre el edificio Altabix y Arenals.



Figura 2. Ubicación del edificio Altet

Los ensayos se realizan dentro de las instalaciones, en recinto cerrado, a pesar de que el equipo está diseñado para trabajar con energía solar. Sin embargo, para poder realizar los ensayos sin tener que depender de la luz solar, se ha optado por el uso de una resistencia eléctrica como fuente de calor térmico para el calentamiento del agua salada y una fuente de alimentación DC para alimentar los ventiladores y bombas, por lo tanto, se evita depender de la climatología exterior y de la irradiancia solar para poder estudiar el proceso de humectación y deshumectación del equipo a diferentes temperaturas de ensayo.



Figura 3. Fachada exterior edificio Altet

1.2. MOTIVACIÓN

La idea de estudiar el comportamiento de un desalinizador por evaporación mediante el calentamiento con colectores solares viene dada con la finalidad de poder desarrollar un equipo capaz de obtener agua dulce para posteriormente potabilizarla para su consumo. De esta manera, se quiere analizar el desempeño de este equipo con el fin de optimizar su funcionamiento proponiendo mejoras con el objetivo de hacer viable su fabricación para la obtención de agua desalinizada a pequeña escala y que sea posible su uso en lugares donde el acceso a agua potable este limitado.

1.3. OBJETO

En el siguiente proyecto, se estudia y analiza el comportamiento de un sistema de desalinización por evaporación para la obtención de agua dulce a partir de agua salada.

Una vez obtenido los resultados de los ensayos, el objetivo es la optimización del sistema, definiendo las mejores condiciones de trabajo.

Por último, se propondrán posibles mejoras en el diseño del equipo de desalinización con el fin de obtener mejores resultados y un mayor rendimiento.

1.4. ALCANCE

El presente proyecto, consiste en la realización de ensayos empíricos del equipo de desalinización, variando las temperaturas y las condiciones de trabajo el sistema. Los datos se recogerán mediante un Data Logger a partir de termopares que se instalarán en cada punto del ciclo. Una vez obtenido los resultados se compararán con los resultados teóricos y se determinará cuanto se desvía de lo ideal.

1.5. TECNOLOGÍAS DE DESALINIZACIÓN DEL AGUA

El agua resulta fundamental para la vida y el bienestar de los seres humanos, así como para la preservación de la biodiversidad, la salud del medio ambiente y la existencia de todas las formas de vida del planeta. La gestión del agua se enfrenta a desafíos críticos, como la escasez de recursos hídricos debido al cambio

climático, la sobreexplotación de acuíferos, la contaminación de fuentes de agua por actividades industriales y agrícolas. Además, la creciente demanda urbana y agrícola exige innovaciones en la conversación y reciclaje del agua.

Actualmente, la escasez de agua afecta a más del 40% de la población mundial. Un dato que ha hecho saltar las alarmas y que impulsa la búsqueda de soluciones. Una de ellas, y no precisamente nueva, es la desalinización.

La desalinización es el proceso utilizado para reducir la cantidad de sólidos disueltos presentes en el agua salada. La desalinización simplemente genera agua potable a partir de agua de mar o agua salobre, ayudando a disminuir el impacto sobre las fuentes de agua dulce. Los métodos de desalinización actuales son altamente avanzados y eficaces, se dividen en dos grandes grupos: Evaporación o destilación y membranas.

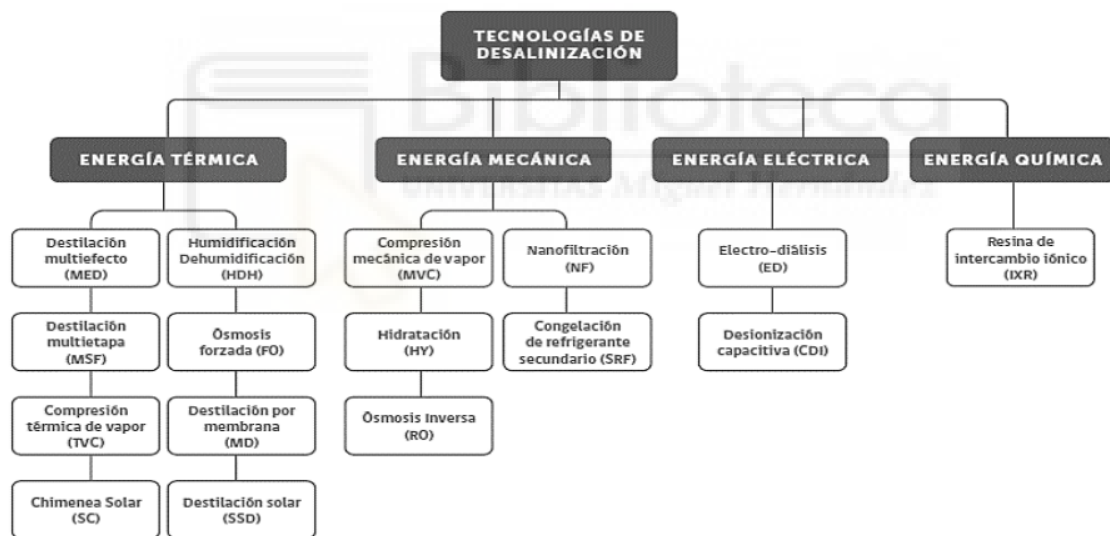


Figura 4. Clasificación de tecnologías de desalinización

La desalinización por evaporación es un mecanismo de generación de agua dulce que imita el proceso de formación de lluvia. Al calentar agua salada a baja presión, se produce una evaporación irreversible, dejando sólidos disueltos, ya que no pueden convertirse en vapor. En consecuencia, el vapor se condensa y finalmente se recoge en un recipiente aparte como agua dulce.

Dentro de los procesos de evaporación, encontramos las siguientes técnicas: Evaporación Instantánea Multietapa (MSF), la Destilación Multiefecto (MED) y la compresión por vapor. Al integrar energías renovables, esta técnica de desalinización por evaporación se ha convertido en una solución rentable y fiable para el tratamiento del agua en países costeros y áridos. [1]

La técnica más utilizada a nivel mundial para desalar agua es la Ósmosis Inversa, que alcanza casi el 70% del total; seguida de la MSF (18%), la MED (7%), la Nanofiltración (3%) y por último la Electrodiálisis (2%).

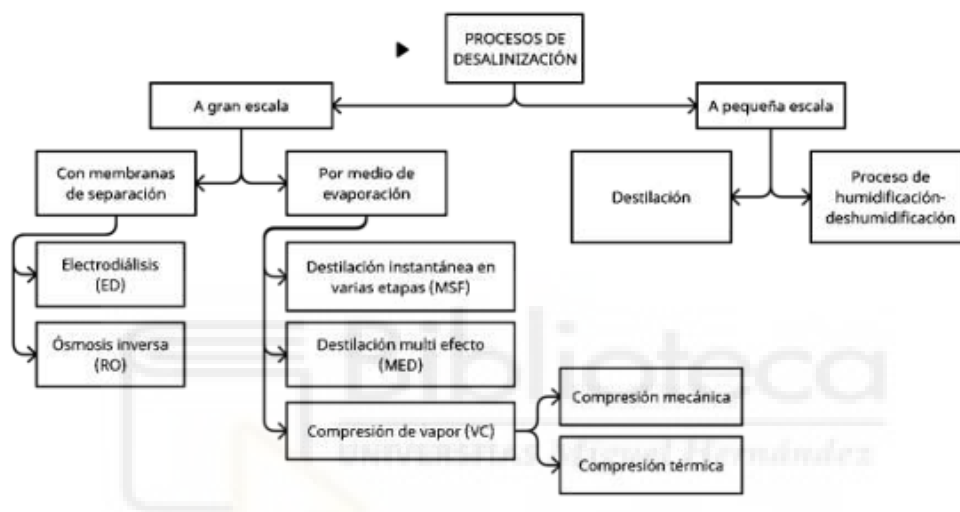


Figura 5. Esquema de los procesos de desalinización

1.6. PROCESOS DE DESALINIZACIÓN POR MEMBRANAS

Una membrana puede definirse como una película delgada que separa dos fases y que actúa como una barrera selectiva en el transporte de materia. En otras palabras, son barrera semipermeable que restringen el paso de determinadas sustancias en función del corte molecular de la misma y la tecnología que estén integradas. Las membranas están hechas de capas a base de polímeros, cerámica y otros materiales.



Figura 6. Membrana tubular

*"Por lo general, los procesos de membrana ofrecen la posibilidad de separar agua de varios tipos de solutos y de separar solutos ya sea por su tamaño o porque algunos están ionizados y otros no. Además de estos casos en los que se logra un alto grado de separación, hay muchos casos en los que se altera la composición del material disuelto. Un ejemplo es la ósmosis inversa, donde el permeado tiene un contenido de sal considerablemente reducido"*¹

Actualmente no existe una única clasificación de los distintos tipos de membrana, en cambio sí existe distintos tipos de criterios para poder clasificarlas, lo que ayuda a comprender mejor el funcionamiento de los procesos de filtración por membrana para el tratamiento de agua, uno de estos criterios es la estructura, tanto a nivel microscópica como macroscópica.

La filtración por membrana se utiliza en la desalinización del agua del mar, la reutilización del agua y otros procesos de gestión de agua. Se utilizan diferentes métodos de filtración, dependiendo del tamaño de las partículas y de la finalidad de la aplicación.

Esta tecnología de membranas es capaz de eliminar las bacterias, los microorganismos, las partículas perjudiciales y materia orgánica del agua forzándola a pasar por un filtro. El tamaño de las partículas que se pueden eliminar en el

¹ David C. Sammon, MEMBRANE PROCESSES, 1974, pág. 420.

proceso depende del tamaño de los poros del filtro. Existen cuatro tipos de filtros de membrana en función del tamaño de los residuos que se quieren eliminar, entre ellos se encuentran la microfiltración, nanofiltración, ultrafiltración y la ósmosis inversa. [2]

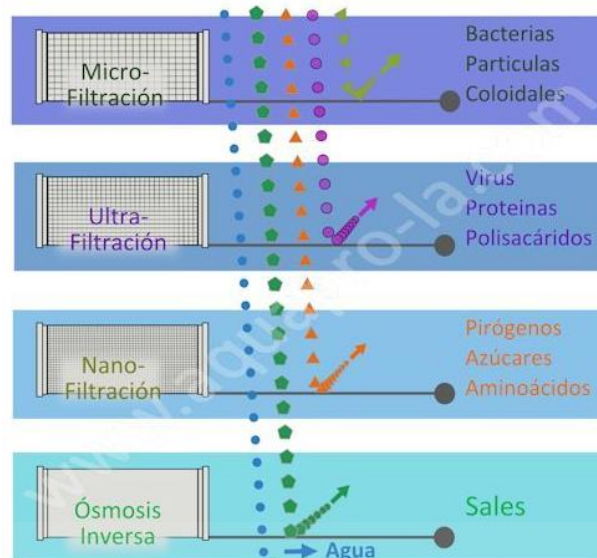


Figura 7. Esquema de diferentes tecnologías de membrana y su filtrado

Actualmente, los principales procesos de desalinización por membrana son la ósmosis inversa y la electrodesionización.

1.6.1. ÓSMOSIS INVERSA

Actualmente la ósmosis inversa (OI) se utiliza en sistemas de purificación de agua para empresas, para el hogar o a escala industrial en diversos sectores. Los filtros de agua de ósmosis inversa tienen muchas ventajas, pero también algún inconveniente. Como método de purificación de agua para usos industriales, su rendimiento y efectividad son incuestionables. En cambio, hay un largo debate sobre la calidad del agua tratada para su consumo humano. [3]

A la hora de aplicar este proceso es necesario llevar a cabo el proceso contrario al de la ósmosis convencional. El proceso natural o convencional aparece cuando se tiene una solución salina menos concentrada y una más concentrada, la de menor salinidad tenderá a migrar a la solución con mayor porcentaje de sal, se trata de un proceso natural.

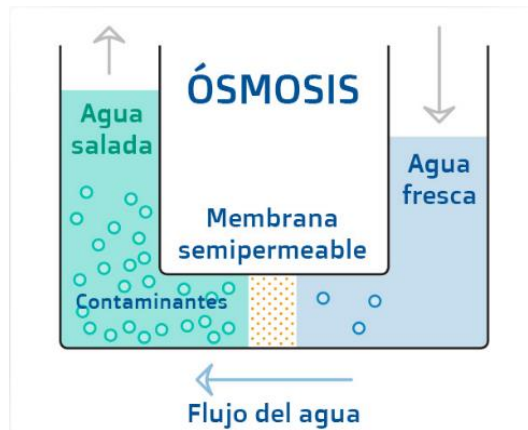


Figura 8. Proceso de ósmosis natural

Mientras que la ósmosis convencional se produce de forma natural sin necesidad de aportar energía, para revertir el proceso será necesario aplicar una presión en la solución más salina.

Los filtros de ósmosis inversa es una tecnología que se utiliza para la purificación de agua en la que se hace uso de una membrana semipermeable para remover minerales y eliminar iones del agua, con el objetivo de eliminar las partículas de gran tamaño. Esta tecnología funciona aplicando presión de agua para empujarla a través de una membrana de ósmosis semipermeable para filtrarla.

Esta membrana deja que ciertas moléculas o iones pasen a través de ella por difusión. El índice del flujo de paso depende de la presión osmótica, la concentración, el gradiente electroquímico y la temperatura de las moléculas, así como la permeabilidad de la membrana para cada soluto.

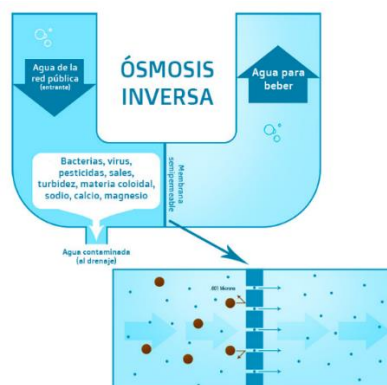


Figura 9. Proceso de ósmosis inversa

La ósmosis inversa puede eliminar muchos tipos de moléculas y iones del agua, incluidas las bacterias, y se utiliza tanto en procesos industriales como en la producción de agua potable. El resultado de este proceso es que el soluto se retiene en el lado presurizado de la membrana y el agua pura puede pasar al otro lado.

Para que el proceso sea selectivo la membrana debe evitar el paso de partículas grandes a través de los poros y dejar pasar libremente los componentes más pequeños de la solución.

La función de la bomba es forzar el paso del agua a través de la membrana de ósmosis semipermeable para que alrededor de 95% a 99% de las sales disueltas sean dirigidas al drenaje en el flujo de rechazo. La presión que debe aportar la bomba depende de la concentración de sal en el agua que alimenta el sistema, a mayor concentración mayor nivel de presión osmótica requiere. [4]

El resultado del filtrado por ósmosis inversa son dos flujos de agua. En primer lugar, se encuentra el agua filtrada (permeado) y, en segundo lugar, se encuentra el flujo que transporta contaminantes concentrados, que llegaron a pasar a través de la membrana, se le conoce como corriente de rechazo, la cual se desecha mediante un drenaje.



Figura 10. Sistema de ósmosis inversa

Finalmente, la ósmosis inversa, es más comúnmente conocida por su uso en la purificación de agua potable a partir de agua de mar, eliminando la sal y otros

materiales. Es capaz de eliminar hasta el 99% de las sales disueltas, así mismo, cuanto mayor sea la carga iónica del contaminante, es más probable que no pueda atravesar la membrana.

Algunos ejemplos de industrial que utilizan esta técnica de filtración son las farmacéuticas, industrias para alimentar calderas, alimentos y bebidas, acabado de metales y fabricación de semiconductores.

1.6.2. ELECTRODESIONIZACIÓN (EDI)

Este proceso de desalinización es una nueva tecnología que combina la electrodiálisis con el intercambio iónico. Se hace uso de membranas y electricidad para eliminar los iones y contaminantes disueltos en el agua, produciendo agua dulce de alta calidad.

La tecnología está formada por una combinación de resinas de intercambio iónico, tanto catiónicas como aniónicas, membranas ion-selectivas, un ánodo, un cátodo y la aplicación cíclica de un potencial eléctrico.

En combinación con ósmosis inversa (OI), la EDI como última etapa, permite obtener agua desionizada con una menor concentración de sales que la que produce la osmosis. Con este proceso, se remplazan las resinas mixtas que se han usado hasta día de hoy. Esto significa sustituir los productos químicos requeridos para generar resinas por corriente eléctrica.

La EDI es una tecnología avanzada que se utiliza en plantas de desalinización y en aplicaciones industriales para tratar agua de mar, agua salobre y otros tipos de aguas salinas. Además, se trata de un proceso de desalinización eficiente y continuo, ya que no requiere una regeneración química periódica, como en el caso de la desalinización por intercambio iónico tradicional. Por lo que, tiene la ventaja de producir agua dulce sin la necesidad de productos químicos adicionales. [5]

Las resinas que se utilizan en este proceso retienen los cationes y aniones presentes, y simultáneamente liberan H^+ y OH^- . Las resinas actúan como un conductor. Como parte del ciclo se regeneran y los cationes y aniones liberados

traspasan las membranas y se desplazan hacia el ánodo o al cátodo, donde un flujo de rechazo los arrastra.

A diferencia de la deionización, en este proceso, el agua se introduce en una cámara que contienen las resinas mencionadas anteriormente, y que se encuentran delimitadas por membranas selectivas, aniónica en un extremo y catiónica en el otro. Al mismo tiempo, una fuente externa de corriente suministra un campo eléctrico continuo por medio de unos electrodos colocados en los extremos.

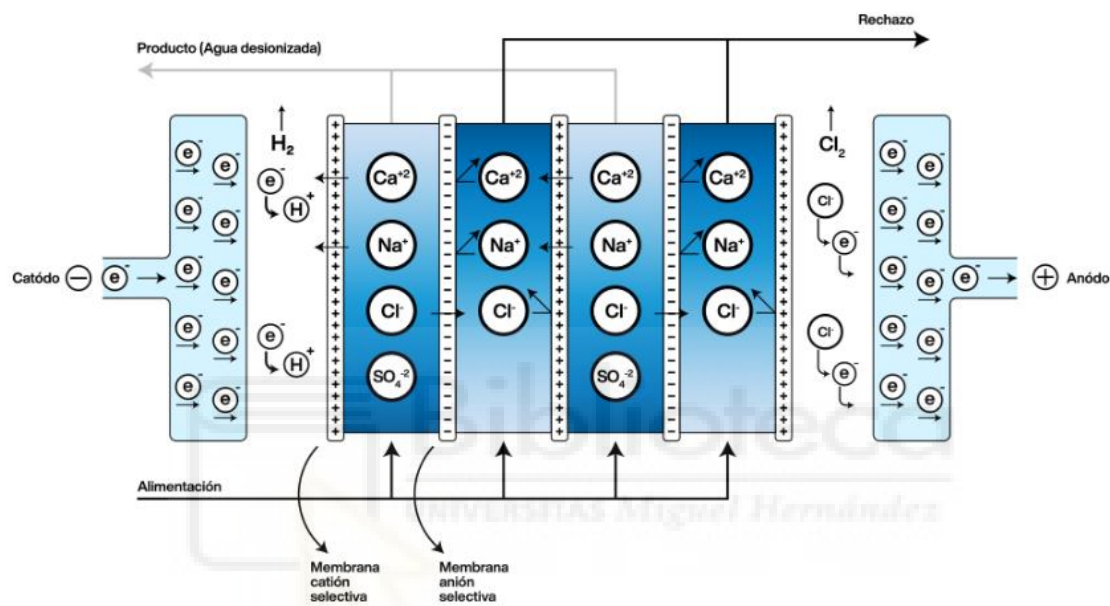


Figura 11. Esquema del proceso de electrodesionización

El movimiento queda determinado por la fuerza de atracción del ánodo y cátodo. Esto permite que los iones cargados positivamente, sean atraídos por el cátodo y los de carga negativa por el ánodo. Las resinas están separadas por membranas semipermeables ajustadas a la polaridad de los iones, facilitando así el desplazamiento en la dirección correcta.

La corriente de rechazo es el concentrado. Se trata de una corriente de agua que arrastra las sustancias suprimidas del agua pura. Este flujo concentrado, puede ser empleado en industrias donde la calidad del agua no deba ser tan alta. Por otro lado, este flujo de rechazo puede volver a ser tratado mediante osmosis, consiguiendo así un mayor porcentaje de agua pura.

1.7. PROCESOS DE DESALINIZACIÓN POR DESTILACIÓN

TÉRMICA

La desalación por destilación térmica es una tecnología que imita el ciclo natural del agua. Este método consiste en calentar el agua salada hasta que se evapore y luego enfriar el vapor para obtener agua desalada, dejando la sal y demás sólidos disueltos como residuo. Este proceso de desalación es efectivo ya que la mayoría de los elementos que se encuentran en el agua salada no son volátiles a las temperaturas empleadas, y por lo tanto permanecen en la salmuera no evaporada.

La desalación obtenida por destilación consiste en evaporar agua para obtener vapor que no contenga sales. El vapor se condensa en el interior o exterior de los tubos de la instalación. Los sistemas desalinizadores por destilación térmica suelen trabajar por debajo de la presión atmosférica con el fin de reducir el consumo energético, por lo que se necesita un sistema de vacío y la extracción de gases no condensables.

La desalación se realiza mediante varias etapas, en cada una el agua se condensa y se evapora en agua dulce. La presión y temperatura van descendiendo en cada etapa lográndose la concentración de la salmuera resultante. El calor obtenido de la condensación sirve para calentar de nuevo el agua que hay que destilar.

Este método es muy utilizado en Oriente Medio, ya que está indicado especialmente para aguas con alta salinidad y temperatura. Pero el inconveniente es que el consumo de energía es muy elevado respecto a otros tipos de desalinización, por lo que la opción sería viable en países con energía barata. Sin embargo, esta tecnología resulta especialmente eficaz para tratar aguas con alta salinidad o contaminantes que dificultan otros métodos. Entre sus principales variantes destacan la destilación multietapa (MSF), la destilación de múltiple efecto (MED) y la compresión de vapor (MVC), todas diseñadas para optimizar el uso de energía y maximizar la producción de agua dulce.

1.7.1. DESTILACIÓN SÚBITA MULTIIETAPA (MSF)

El proceso de evaporación súbita multietapa, conocido también como proceso multietapa flash, es el método de destilación más antiguo en el ámbito industrial, y

actualmente muy extendido en todo el mundo en cuanto a capacidad de producción. El proceso se basa principalmente en la ebullición del agua en un evaporador de numerosas cámaras que operan a temperaturas y presiones de forma decreciente. Por lo que, se consigue evaporar agua en cada una de las etapas para formar el conjunto de la producción total.

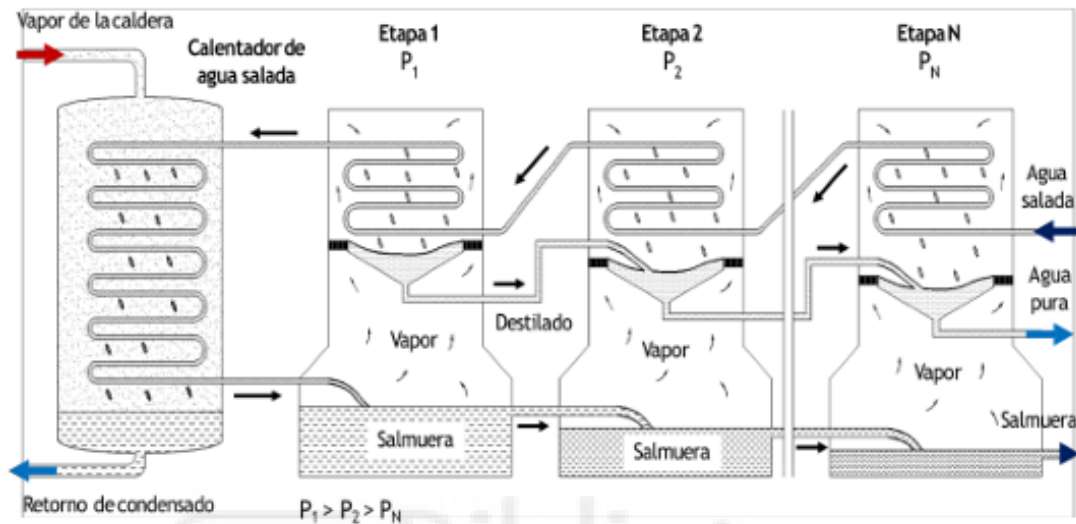


Figura 12. Esquema del proceso de destilación súbita multietapa (MSF)

Este proceso opera reduciendo de manera brusca la presión del agua de mar hasta un nivel inferior a su presión de vapor en equilibrio, lo que provoca una evaporación instantánea o ebullición rápida. Solo una fracción del agua se transforma en vapor en cada etapa, por lo que la producción total se alcanza mediante una serie de cámaras que trabajan a presiones progresivamente menores. [6]

Para lograr que se produzca este proceso, el agua de mar, previamente calentada hasta su temperatura de ebullición, se introduce en una cámara “flash” a través de una boquilla u orificio. Esto provoca una caída de presión lo suficientemente grande para situarse por debajo de la presión de saturación correspondiente a esa temperatura, causando que parte del agua se evapore. La evaporación ocurre de forma intensa y turbulenta, lo que incrementa el área de superficie del agua expuesta y favorece la generación de vapor. El vapor resultante pasa a través de paneles que retienen las gotas de salmuera, y posteriormente se condensa sobre la superficie de tubos por los que circula el agua de mar de alimentación. De esta

manera, el calor liberado durante la condensación del agua dulce se aprovecha para precalentar el agua de mar que ingresa a la planta desalinizadora.

Las tecnologías MSF, pueden ser menos eficiente en términos de energía en comparación con otros procesos. Ya que no recicla el calor latente del vapor y la presurización y despresurización repetitivas pueden llegar a generar pérdidas de energía, y además la recuperación de calor está limitada. Por lo que, la desalinización multietapa es comúnmente utilizada en plantas de desalinización a gran escala, especialmente en aplicaciones que requieren una producción significativa de agua dulce

1.7.2. DESTILACIÓN MULTIEFECTO (MED)

Este método de desalación térmica emplea una serie de etapas sucesivas de evaporación y condensación para transformar el agua de mar en agua apta para consumo. Su eficiencia se debe a que reutiliza el calor latente liberado durante la condensación del vapor para calentar el agua en la siguiente fase de evaporación.

Es considerado uno de los sistemas más eficaces para obtener agua dulce a partir del mar, y su versatilidad permite aplicarlo tanto en plantas de gran capacidad donde la eficiencia energética es un factor clave como en instalaciones de menor tamaño.

Para obtener agua destilada, es necesario producir vapor primero y condensarlo después. En la siguiente figura se muestra el flujo de una planta de destilación simple con un solo efecto. Los dos elementos básicos de esta planta son el evaporador y el condensador. [7]

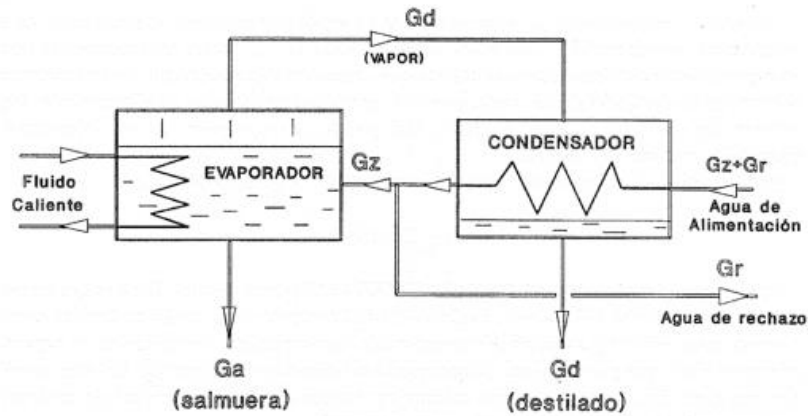


Figura 13. Esquema del proceso de destilación simple con un solo efecto

Como consecuencia del aporte térmico que se realiza en el evaporador, una parte del agua que se encuentra en el de evapora y pasa al condensador. una vez en el condensador, este vapor se condensa gracias al agua de refrigeración que circula por el interior.

En el proceso de destilación de múltiple efecto, el equipo se compone de varias unidades dispuestas en serie, denominadas “efectos”, cada una formada por un evaporador y un condensador. El agua de mar se introduce en el primer efecto, donde se calienta y parte de ella se evapora. El vapor generado se dirige al condensador de esa misma etapa, donde se enfría para convertirse en agua dulce. Este mecanismo se repite en las etapas siguientes, operando cada una a menor presión y temperatura que la anterior, lo que optimiza el aprovechamiento del calor.

La característica distintiva de este sistema es que el vapor condensado en la primera etapa no se desperdicia, sino que se utiliza como fuente de calor para la siguiente, permitiendo así continuar el proceso de evaporación de manera más eficiente.[8]

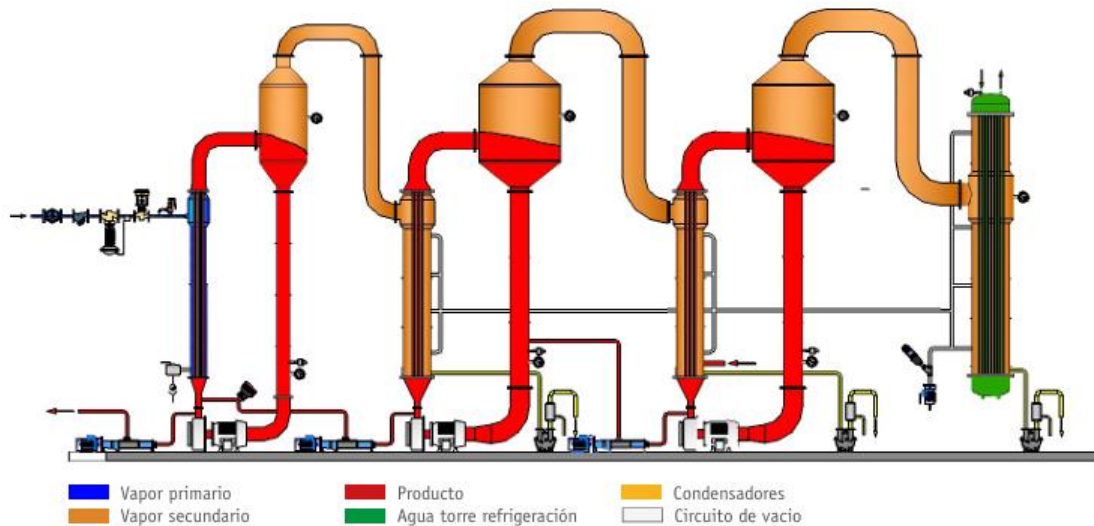


Figura 14. Representación del proceso de destilación multiefecto (MED)

La principal diferencia entre el sistema MED y el MSF está en el modo en que se realiza la evaporación. En las instalaciones MED se emplean varios evaporadores de tipo película delgada, lo que permite alcanzar coeficientes de transferencia de calor superiores a los obtenidos en las plantas MSF, donde la evaporación ocurre de manera súbita y directa.

En el proceso MED, el agua de mar se precalienta en la etapa de condensación del vapor generado en el último efecto y luego pasa al primer efecto, donde se eleva su temperatura hasta el punto de ebullición mediante vapor de calefacción. Allí, el agua se distribuye en forma de rocío sobre la superficie externa de los tubos del evaporador, formando una fina película que facilita una rápida ebullición y evaporación. El vapor producido se recoge y se conduce al interior de los tubos del siguiente efecto, que trabaja a menor temperatura y presión que el anterior. [9]

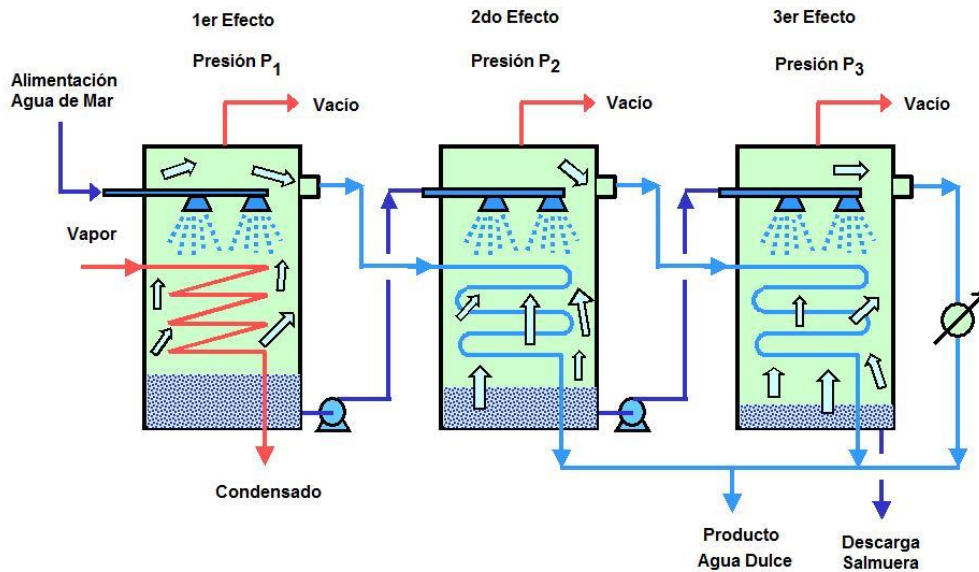


Figura 15. Descripción gráfica del proceso de destilación multiefecto (MED)

En el primer efecto, el agua de mar se calienta con vapor externo a temperaturas cercanas a 70–80 °C. En las etapas siguientes, el calor necesario proviene del vapor generado en la etapa anterior, aprovechando su calor de condensación. De este modo, la temperatura del agua de mar, que inicialmente es de unos 22 °C, se incrementa progresivamente entre 2 y 3 grados en cada etapa, hasta alcanzar la temperatura del vapor de alimentación. Paralelamente, el agua condensada (ya desalada) va enfriándose hasta igualarse, al final del proceso, con la temperatura del mar. Todo el procedimiento se lleva a cabo manteniendo un vacío constante en todas las etapas, cercano a 0,05 kg/cm², lo que corresponde a un punto de ebullición de aproximadamente 33 °C.

La salmuera que queda del primer efecto también se dirige al siguiente, donde vuelve a rociarse sobre los tubos recorridos por el vapor procedente de la etapa anterior, repitiendo así el ciclo de evaporación. El vapor generado en cada etapa se condensa en el evaporador del efecto siguiente, transformándose en agua dulce. Este proceso se repite tantas veces como efectos tenga el sistema. En muchos casos, se incluyen además cámaras flash que aprovechan la menor presión de los efectos posteriores para evaporar una fracción adicional del agua salada que avanza en el proceso.

1.7.3. COMPRESIÓN DE VAPOR

El sistema de compresión de vapor opera evaporando el agua de mar y elevando la temperatura de condensación del vapor mediante un compresor, para luego condensarlo en un intercambiador de calor enfriado con la propia agua previamente evaporada. La evaporación se lleva a cabo en la zona inferior de la cámara, tras la extracción de los gases no condensables (principalmente aire) mediante una bomba o un eyector de vacío.

El vapor generado es conducido hacia el compresor, que lo impulsa a través de los tubos del condensador. Durante la compresión, la temperatura de condensación del vapor aumenta, y al enfriar el condensador con el agua evaporada, este se condensa, obteniéndose así agua dulce. Posteriormente, una bomba extrae esta agua del evaporador.

Para mantener estable la salinidad dentro del evaporador, parte de la salmuera de refrigeración se descarga nuevamente al mar. A su vez, para compensar tanto la salmuera como el agua dulce extraída, se introduce agua de mar fresca. Dado que esta última se encuentra fría y tanto la salmuera como el agua dulce están calientes, se hace circular ambos flujos a través de un intercambiador de calor, lo que permite recuperar una parte significativa de la energía térmica. [10]

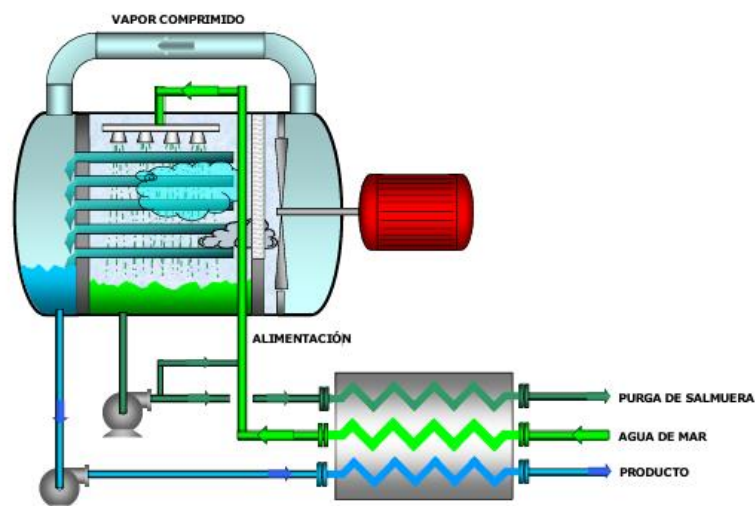


Figura 16. Representación del proceso de destilación por compresión de vapor

En este método de destilación, el principio físico utilizado no es el mismo que en los procesos previamente descritos. El vapor generado durante la evaporación del agua de mar se encuentra sobrecalentado debido al efecto de elevación del punto de ebullición. Esto implica que dicho vapor condensa a una temperatura inferior a la temperatura de ebullición del agua de mar.

Si este vapor se somete a un proceso de compresión, su presión y temperatura aumentan como resultado del aporte de energía. Al incrementar estos parámetros lo suficiente, el vapor puede emplearse como fuente de calor para evaporar nuevamente el agua de mar. En el evaporador, el vapor circula por el interior de un intercambiador tubular, transfiriendo su calor latente al condensarse, lo que provoca la generación de una cantidad adicional de vapor.

Dado que el calor latente de vaporización y el de condensación son prácticamente equivalentes, la energía necesaria para mantener el sistema operativo corresponde únicamente a la requerida para compensar la elevación del punto de ebullición y para generar un pequeño salto térmico que garantice el flujo de vapor, normalmente esta diferencia de temperatura es de alrededor de 4 a 5 °C.

1.7.4. DESTILACIÓN POR HUMIDIFICACIÓN Y DESHUMIDIFICACIÓN (HDH)

El proceso HDH es una alternativa a las técnicas de desalación que existen actualmente. Esta tecnología destaca por no necesitar una fuente con alta temperatura ni un sistema de vacío para aprovechar la evaporación. Esta metodología hace uso de aire a presión atmosférica para transportar vapor de agua de un humidificador a un deshumidificador.

La humidificación es el proceso por el cual un compuesto en fase líquida se trasfiere a una mezcla de gas y vapor, mientras que la deshumidificación es el proceso inverso, es decir el vapor se trasfiere del estado gaseoso al estado líquido. Normalmente se hace referencia a las mezclas de aire y vapor de agua por sus amplias aplicaciones en tecnologías de secado y acondicionamiento de aire. [11]

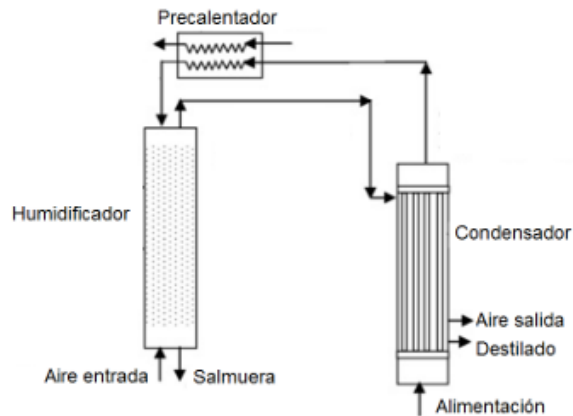


Figura 17. Representación del proceso de destilación por humidificación y deshumidificación

Para entender el funcionamiento de estos sistemas es necesario conocer los componentes principales y la configuración de estos. En la figura anterior, se observa que los principales componentes son el deshumidificador, el humidificador y el calentador de agua. Existen componentes adicionales como la bomba que lleva el agua al deshumidificador, el ventilador que permite la circulación de aire y un tanque colector de agua pura.

El humidificador de aire es un sistema de transferencia de masa, como un panel evaporativo, que proporciona una amplia área de contacto entre el aire y el agua. El condensador en cambio suele ser un intercambiador de calor en el que circula a través de tubos de agua de alimentación y en lado de la coraza del aire húmedo.

En este sistema se recupera calor de condensación y se precalienta el agua. la función del precalentador es aumentar la temperatura del agua antes de ingresar en el humidificador y por tanto su energía puede ser suministrada por colectores solares, resistencias eléctricas o vapor generado por otras fuentes. [12]

“Cuando una corriente de aire entra en contacto con agua salada, el aire extrae una cierta cantidad de vapor a expensas del calor sensible del agua salada provocando su enfriamiento. Por otro lado, el agua de recupera manteniendo el aire caliente húmedo en contacto con una superficie de enfriamiento, causando la condensación de una parte del vapor mezclado con el aire. El aire en estos sistemas

se puede hacer circular por convección natural o forzada empleando sopladores mecánicos”.²

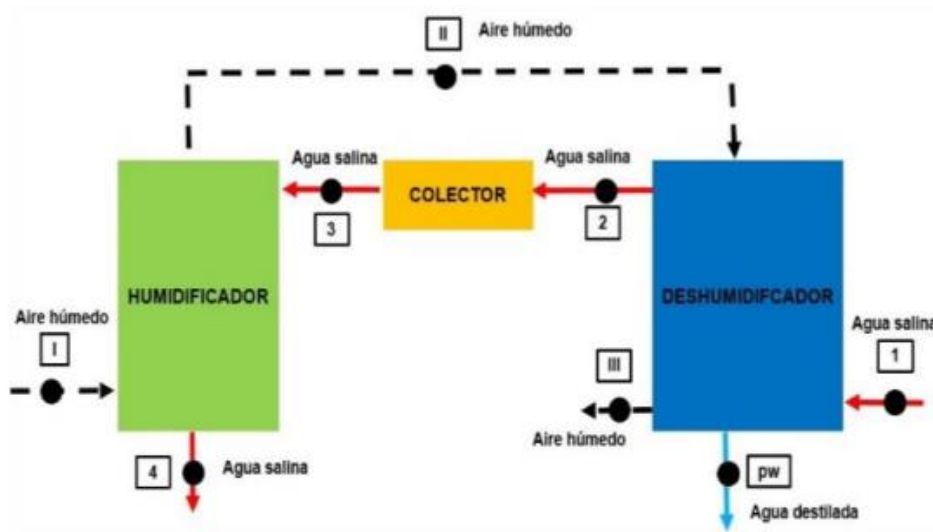


Figura 18. Diagrama del proceso de destilación por humidificación y deshumidificación

El funcionamiento del proceso se inicia con la entrada del aire atmosférico (I) y el agua salina (3) al humidificador. El contacto del aire con el agua salina provoca evaporación de esta por lo que el aire aumenta su temperatura y su contenido de humedad absoluta (II). Para extraer el vapor de agua, contenida dentro del aire, se procede a provocar la condensación dentro del deshumidificador donde se produce el intercambio de calor con el agua salina que se encuentra a menor temperatura (1). El agua salina absorbe la energía calorífica del aire y elevando así su temperatura (2). Al final del proceso, en el deshumidificador, el aire se lo rechaza al ambiente (estado III) y se obtiene agua desalinizada (pw). El agua salina del estado 4 vuelve al lugar de extracción.

El rendimiento del sistema está condicionado por aspectos como la temperatura del agua de entrada, la humedad relativa inicial del aire y la energía disponible para su calentamiento. Este método resulta especialmente apropiado en zonas con alta radiación solar, ya que permite utilizar dicha energía como fuente renovable y sostenible para calentar el aire.

² (Bourouni, 2001, p. 168)

Actualmente, los sistemas HDH utilizan evaporadores y condensadores compactos elaborados a partir de resina y poliéster, se trata de materiales ligeros, con un bajo coste, limpieza y resistencia a la corrosión. La tecnología HDH es vista como una propuesta prometedora pues trabaja a temperatura menores a la de ebullición y a presión atmosférica y puede acoplarse con fuentes renovables.

1.7.5. DESTILACIÓN POR CONGELACIÓN

Este es un método similar al de destilación convencional, pero con el cambio de fase en sentido contrario, ya que se basa en bajar la temperatura del agua hasta congelarla para desalinizarla. Para ello se pulveriza el agua de mar dentro de una cámara frigorífica que se encuentra a baja presión, provocando que se formen cristales de hielo puro que pueden ser recogidos y convertidos en agua líquida potable al calentarlos. [13]

Esta tecnología de destilación podría describirse como un proceso mediante el cual el agua de mar es llevada a un estado termodinámico en el cual el componente con el punto de congelación más alto se separa mediante cristianización, en este caso el agua al tener un mayor punto de congelación se va separando de la sal y otros sólidos dentro de la misma solución salina, la cual se va concentrando con forme se vaya separando el agua dulce.

Esta concentración creciente del agua de mar que está en fase líquida hace disminuir su punto de congelación. Por otro lado, los cristales de agua dulce son lavados y extraídos. [14]

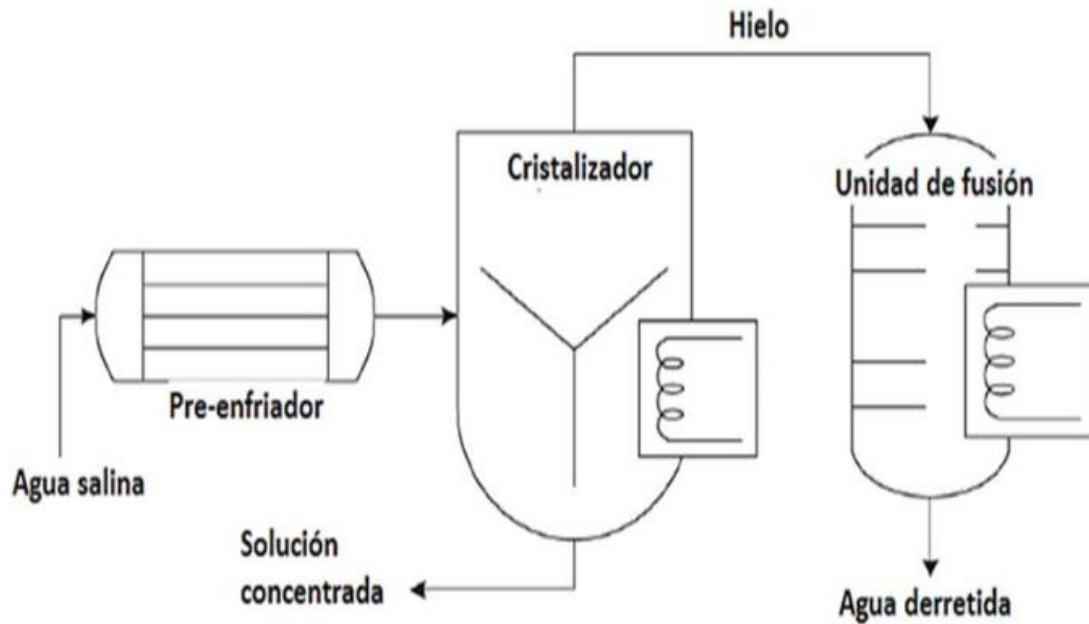


Figura 19. Diagrama del proceso de destilación por congelación

El agua primero se separa por congelación al bajar la temperatura. Además, al ir reduciendo la temperatura, la sal también empieza a cristalizar. Por este motivo, la temperatura típica de trabajo en este tipo de proceso es de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a temperatura ambiente. Actualmente, esta tecnología de desalación no tiene una gran implantación en plantas desaladoras y todavía no está bien definida. El dato más característico de este proceso es que la energía requerida para congelar un Kg de agua es aproximadamente igual a la sexta parte de la que se necesita para evaporarla.

1.7.6. DESTILACIÓN POR RADIACIÓN SOLAR

La utilización de energía solar en la desalinización puede llevarse a cabo de distintas formas. La energía solar fotovoltaica (PV) es capaz de suministrar electricidad a las bombas y equipos que requiere la ósmosis inversa, mientras que la energía solar térmica se aprovecha para aportar calor al agua en los procesos de destilación. Incorporar estas tecnologías disminuye la necesidad de combustibles fósiles y contribuye a reducir los costos de operación a largo plazo.

La destilación solar es un proceso que permite purificar el agua basándose en las diferencias de volatilidad, haciendo uso de la energía solar. La aplicación que más

se le ha otorgado al proceso de destilación solar, es la obtención de agua dulce a partir de agua salobre. El proceso se realiza de una forma totalmente diferente a otros métodos de purificación. Por un lado, se encuentran los procesos que mantienen una producción constante de agua durante todo el día y durante todo el año. En cambio, este método tiene el inconveniente que depende de la luz solar, por lo que la producción está limitada. Por lo que el agua producida varía de un mínimo cerca de cero hasta un máximo que se alcanza en las horas de mayor irradiación solar.

Actualmente existen varios tipos de prototipos de destiladores solares, la diferencia entre ellos radica en los materiales utilizados y la geometría, pero en todos ellos el proceso de obtención de agua es el mismo. Las partes fundamentales de este tipo de destiladores son el colector solar, que es la parte diseñada para la captación solar, el evaporador, que es la zona donde se lleva a cabo la evaporación a partir de agua salobre, y, por último, el condensador en el cual se condensa el vapor y se obtiene el agua desalada.

1.7.6.1. DESTILACIÓN SOLAR DIRECTA

Se trata de un proceso de desalinización que utiliza la energía solar, aprovechando en particular el fenómeno conocido como “efecto invernadero”, para provocar la evaporación del agua. Los componentes esenciales de la destilación solar son un estanque o depósito y una cubierta. En el estanque se almacena el agua salada que se desea purificar, mientras que la cubierta está formada por una superficie transparente situada sobre él. [15]

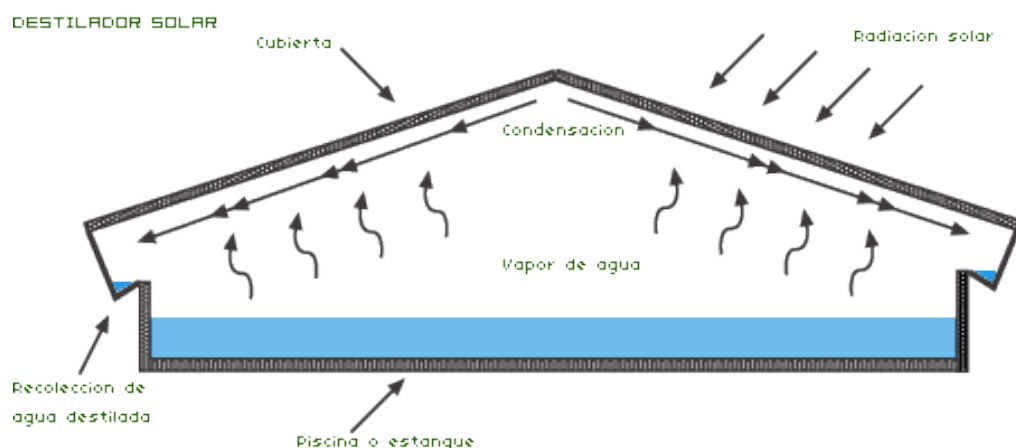


Figura 20. Esquema del proceso de destilación solar directa en caseta

El proceso comienza cuando la radiación del sol atraviesa dicha cubierta y es absorbida por el agua del estanque. Al tener una longitud de onda mayor tras ser absorbida, la radiación ya no logra salir a través de la cubierta, quedando retenida y elevando la temperatura interna. Este incremento de calor provoca que una parte del agua se evapore; luego, el vapor se condensa al entrar en contacto con la cara interna más fría de la cubierta. Las gotas resultantes de agua dulce se agrupan y descienden por la pendiente de la cubierta hasta llegar a unos canales colectores, que las conducen hacia un depósito de almacenamiento. [16]

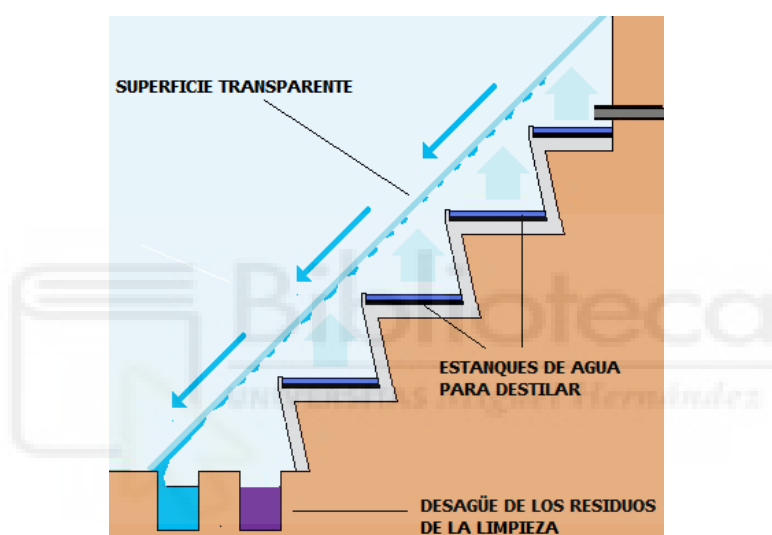


Figura 21. Diagrama del proceso de destilación por solar directa con forma de escaleras

Entre las desventajas de este método se encuentra su baja capacidad de producción de agua destilada por unidad de superficie, ya que genera entre 1 y 4 litros diarios por metro cuadrado de cubierta. Además, presenta pérdidas inevitables de vapor y agua ya destilada, lo que obliga a realizar un mantenimiento continuo para asegurar su buen funcionamiento.

Pese a sus limitaciones, este proceso puede emplearse en instalaciones de pequeña escala, sobre todo en zonas aisladas con recursos energéticos limitados, pero con alta disponibilidad de radiación solar. Algunos modelos más avanzados

de captadores solares buscan optimizar el rendimiento añadiendo un segundo efecto dentro de la cubierta.

1.7.6.2. DESTILACIÓN SOLAR INDIRECTA

Dentro de las aplicaciones de la energía solar térmica en los procesos de desalación, los sistemas directos en forma de caseta representan la mejor alternativa, en el caso de que la demanda de agua dulce sea baja. En cambio, para abastecer altas demandas de agua dulce es necesario recurrir a plantas convencionales de destilación únicas a un sistema solar térmico. Este tipo de procesos se conocen como desalación solar indirecta. Los métodos de destilación empleados en este tipo de procesos de desalación solar indirecta son la destilación súbita-multietapa (MSF) y la destilación multi-efecto (MED). La tecnología MED fue la predecesora de la tecnología MSF y es un proceso más eficiente desde el punto de vista termodinámico.

➤ **Destilación solar Multi-Efecto**

La desalación mediante destilación multi-efecto haciendo uso de energía solar (MED-solar) consiste en un proceso térmico donde el agua de mar se hace pasar por sucesivos ciclos de evaporación y condensación en varias etapas llamadas efectos. En cada efecto se va variando la presión y la temperatura, lo que mejora el aprovechamiento del calor liberado al condensarse el vapor, de esta forma se produce una nueva evaporación en la siguiente fase, aumentando así la eficiencia global del sistema.

La fuente de energía térmica proviene de colectores solares térmicos, que pueden ser planos o de concentración, los cuales capturan la radiación solar y transfieren el calor directamente al agua salada o fluido del intercambiador. El procedimiento comienza con el precalentamiento del agua marina, que después entra en el primer efecto, donde una parte se evapora. El vapor pasa a un segundo efecto donde se condensa en la superficie, liberando así energía que provoca más evaporación, repitiéndose este proceso a lo largo de todas las etapas. [17]

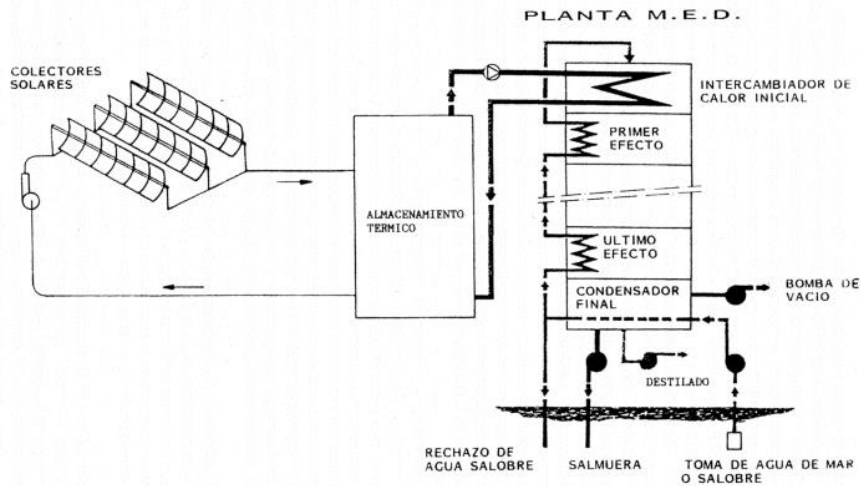


Figura 22. Esquema planta de destilación solar multi-efecto

➤ Destilación solar Multi-Etapa (MSF-PV)

Un sistema de desalinización solar multietapa es una combinación de colectores planos y una unidad de evaporador-condensador. El sistema recibe calor adicional a través de los colectores planos, lo que lo convierte en un sistema “activo” para incrementar la producción de destilado. Cada unidad de evaporador-condensador está formada por una bandeja inferior y una bandeja superior que funcionan como superficies de evaporación y condensación, respectivamente. Una de estas unidades se denomina etapa, y el sistema de desalinización multietapa está compuesto por varias de estas etapas apiladas una sobre otra. La superficie del condensador en la parte inferior de una etapa actúa como superficie de evaporador para la etapa superior. [18]

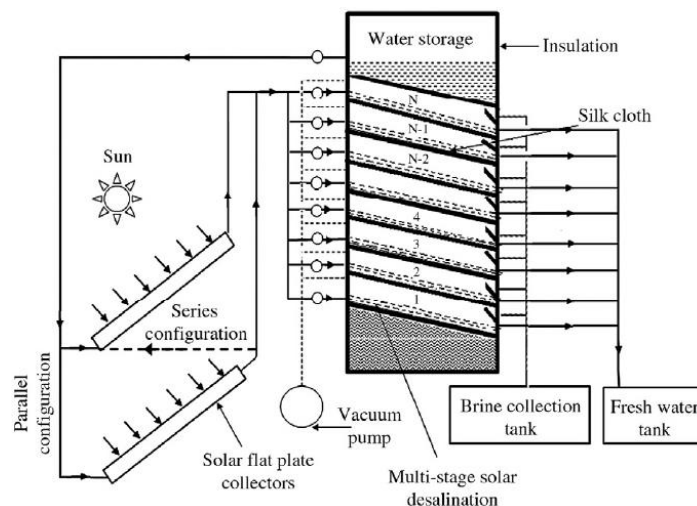


Figura 23. Esquema planta de destilación solar multi-efecto

El agua evaporada de la primera etapa se condensa en la parte inferior de la bandeja superior, liberando así el calor latente de condensación hacia la siguiente etapa. En la segunda etapa, por tanto, recibe calor adicional proveniente del calor latente de la etapa anterior, además del agua caliente entrante, lo que produce mayor evaporación y condensación. Las últimas etapas generan así una mayor cantidad de destilado en comparación con las primeras etapas. Aparte, el agua condensada cae en un canal de recolección situado debajo del condensador. En este proceso, tanto el agua dulce condensada como el agua sobrante de cada etapa se recolectan por separado.

Esta tecnología de desalinización destaca por su eficiencia energética, ya que se reutiliza el calor en cada etapa, por su capacidad de funcionar a bajas temperaturas, lo que facilita la integración con la energía solar, y por la reducción del uso de combustibles fósiles, lo que la hace una gran alternativa para reducir el impacto medioambiental. Sin embargo, para este tipo de procesos se necesitan amplias áreas para los captadores solares y la dependencia de la radiación solar, lo que en muchos casos hace recomendable contar con sistemas de almacenamiento de calor o respaldo energético.



**CAPÍTULO 2 : INTRODUCCIÓN AL SISTEMA
DESALINIZADOR HDT**

2.1. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DESALINIZADOR HDT

En este proyecto se ensayará el equipo prototipo de desalinización por humidificación/deshumidificación. Este equipo está fabricado y diseñado por la empresa Soldesal. Se trata de una tecnología que aprovecha las propiedades psicrométricas del aire para obtener agua dulce a partir de una solución salina.

El equipo de desalinización Soldesal combina la tecnología de los sistemas HDT visto anteriormente con fuentes renovables. El aporte de energía térmica se genera mediante un colector termo solar y el aporte eléctrico proviene de una placa fotovoltaica.

Como se muestra en la siguiente figura este prototipo de desalinización está dividido en dos partes. La primera es la zona externa donde se ubica el colector térmico junto a los intercambiadores, por otro lado, se encuentra el sistema HDT donde se produce el intercambio de energía entre la masa de aire y agua.

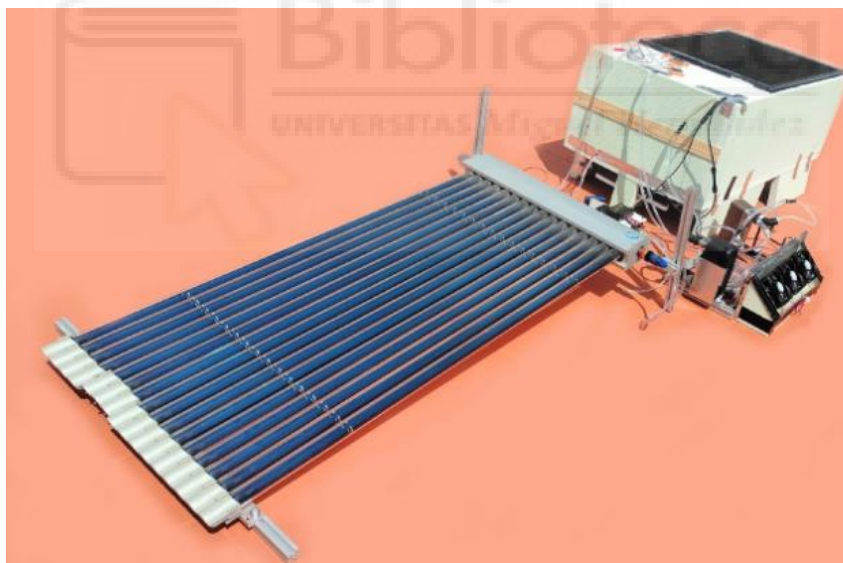


Figura 24. Equipo completo de desalinización por humidificación y deshumidificación

Para hacer más dinámico los ensayos empíricos de este proyecto se ha simplificado el equipo. En este caso, se ha decidido cambiar el colector térmico por una resistencia eléctrica y la placa fotovoltaica por una fuente de alimentación. Con ello se evita tener que depender de la energía solar para poder realizar los ensayos. La finalidad de este estudio es calcular la eficiencia del sistema variando

las condiciones de trabajo, comprobando mediante análisis de datos lo que sucede en el interior del equipo HDT.



Figura 25. Diseño 3D del sistema de desalinización y vista interior

Como se representa en la figura 25, el equipo HDT está formado por una estructura de aislante térmico XPS, dos ventiladores que fuerzan la circulación de aire en el interior, dos paneles evaporativos que hacen la función de evaporador y condensador. En la zona de debajo de los paneles hay dos depósitos de agua, uno de agua salada (evaporador) y el otro de agua dulce (condensador). Ambos depósitos deben de contener agua desde el inicio para poder realizar el ciclo en cada circuito.

2.2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL EQUIPO HDT

El sistema propuesto imita y mejora el ciclo natural del agua de lluvia. Este ciclo requiere grandes áreas para funcionar, mientras que esta tecnología mejora su eficiencia al operar a temperaturas más altas. La eficiencia por área seguirá siendo baja, pero puede producir agua dulce en regiones costeras con escasas o nulas precipitaciones.

Combinando este proceso con otros, y considerando que prácticamente no consume energía externa ni consumibles, y que utiliza únicamente sustancias naturales, podría ser una alternativa o complemento interesante y totalmente sostenible.

Temperatura	25	40	60	°C
Agua de condensación	24	55	150	$\frac{\text{g}_{\text{agua}}}{\text{m}^3_{\text{aire}}}$

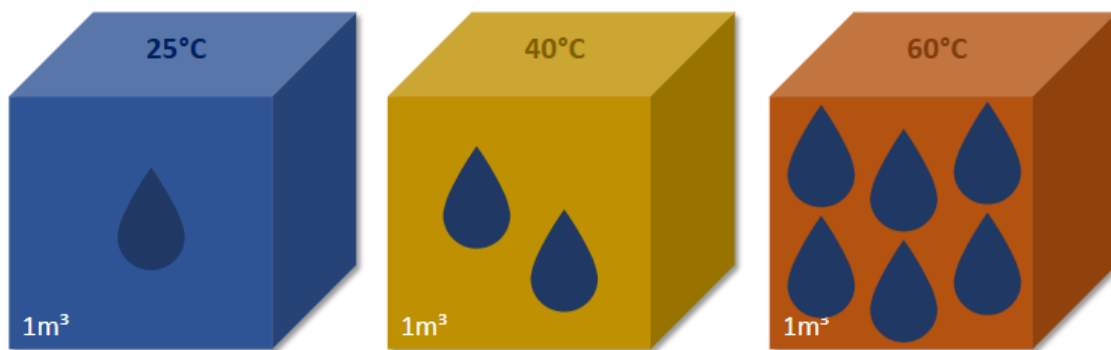


Figura 26. Representación del contenido agua del aire saturado según la temperatura

Aumentar la temperatura del proceso incrementa la eficiencia volumétrica: un metro cúbico de aire puede contener el doble de vapor de agua a 40 °C que a 25 °C. A 60 °C, es seis veces más.

El aire actúa como absorbente, absorbiendo la mayor cantidad de agua posible hasta alcanzar la saturación. Gracias a este efecto, el agua puede evaporarse a bajas temperaturas. Si se utiliza agua de mar, solo se evaporará agua sin sales. Este vapor puede condensarse, produciendo agua pura. Además, el proceso no utiliza sustancias químicas, combustibles ni energía externa, solo tecnologías básicas y no requiere pretratamiento del agua.

Previamente a la entrada del evaporador, se encuentra el panel fotovoltaico, del cual se aprovecha parte de tu calor para aumentar la temperatura del aire interno, por lo que en este caso al estar a menor temperatura el aire del interior, se produce un enfriamiento del panel mejorando su eficiencia y además aumenta la temperatura del aire de entrada al evaporador necesitando menos energía para realizar el proceso de calentamiento del evaporador. En la desalinización, el aire se

utiliza como absorbente en un ciclo cerrado para evaporar y condensar el agua a baja temperatura. En la fotovoltaica, el enfriamiento evaporativo se utiliza para mantener baja la temperatura de las células y, por lo tanto, su eficiencia alta.

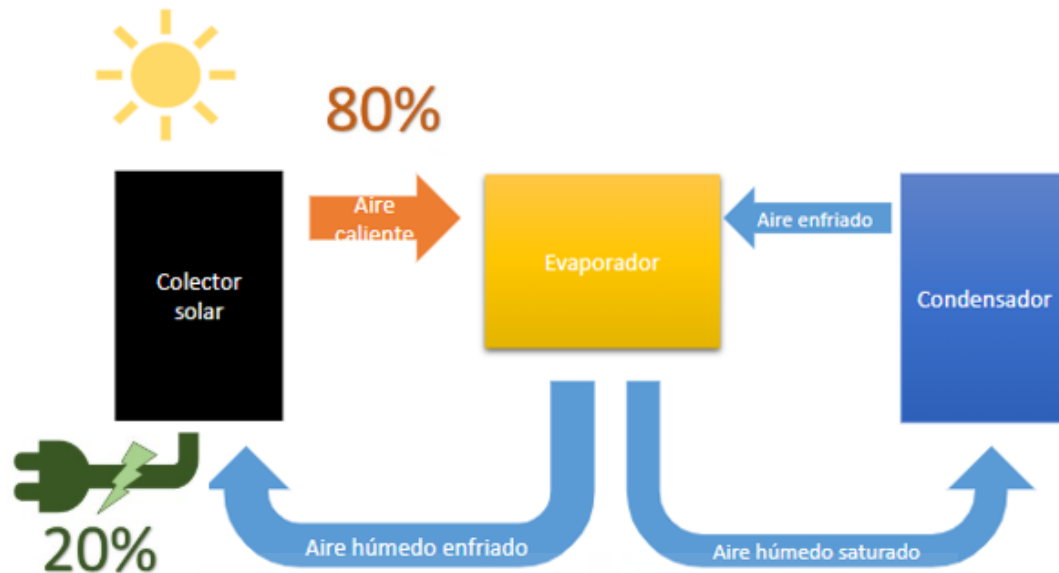


Figura 27. Diagrama del proceso del sistema de desalinización

Considerando que solo aproximadamente el 20% de la radiación solar se convierte en electricidad, el resto se transforma en calor, que suele perderse. Este calor, si se aprovecha de forma inteligente, puede producir agua dulce a partir de agua de mar o salobre.

El principio de funcionamiento del sistema HDT es simple, el equipo cuenta con dos circuitos de agua, uno de ellos se encarga de calentar el agua, en este caso mediante una resistencia eléctrica con una bomba integrada que se conecta al intercambiador del circuito del evaporador. Por otro lado, el segundo circuito se encarga de enfriar el agua del circuito del condensador mediante un intercambiador que está conectado a un sistema de refrigeración de tubo de cobre con disipador de calor unido a un sistema en serie de ventiladores. Ambos circuitos son cerrados.

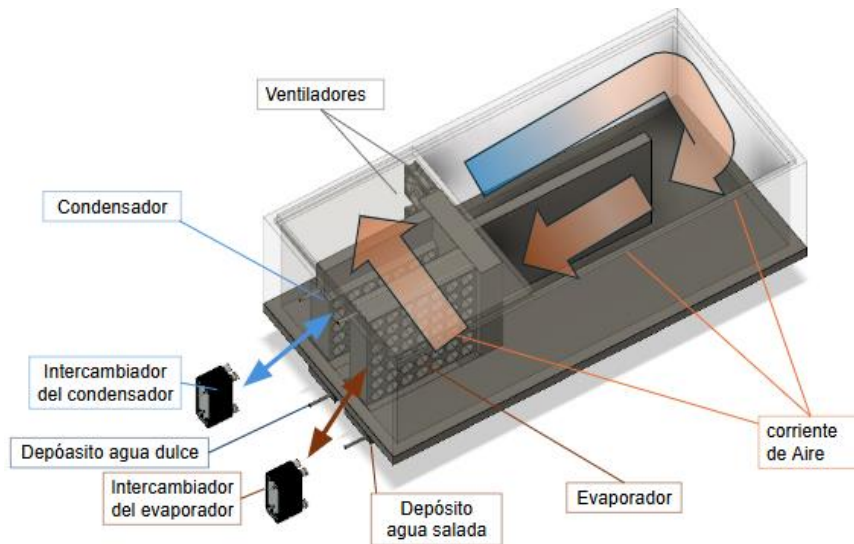


Figura 28. Descripción del sistema de desalinización

La primera acción en la puesta en marcha del equipo es el llenado de los dos depósitos hasta que rebosen por los conductos instalados en la zona alta de cada uno de ellos. De esta forma se garantiza que las bombas de cada depósito tengan siempre la cantidad de agua necesaria, así se evita que las bombas trabajen en vacío.

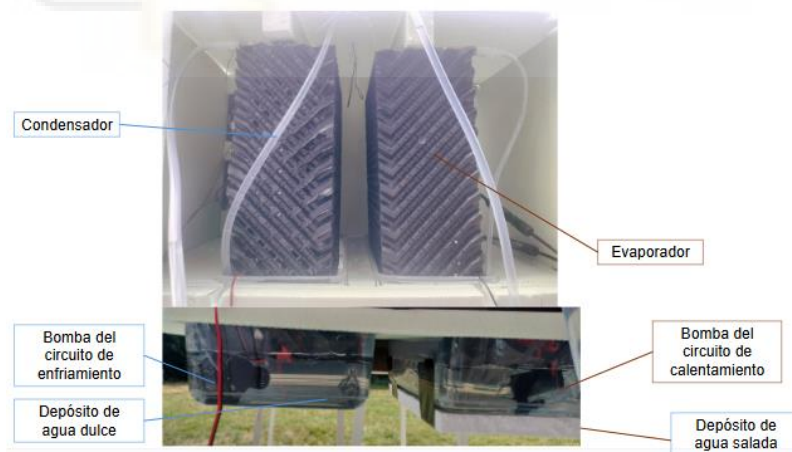


Figura 29. Descripción del circuito interior del sistema de desalinización

En este prototipo, el depósito que se vacía con el tiempo es el del evaporador ya que lo que se pretende es evaporar la mayor cantidad de agua salada, por lo que hay que controlar el nivel de agua salada durante el proceso. En cambio, el depósito de agua dulce se irá llenando debido al condensado que se produce en el

condensador, al estar el depósito de agua dulce desde el inicio justo al nivel de rebose, todo lo que se exceda de agua dulce será por tanto el agua condensada del vapor que proviene del evaporador, el agua condensada por tanto caerá por el tubo de rebose por diferencia de altura a un recipiente que está encima de una báscula donde se podrá determinar el caudal de condensado de cada ensayo.

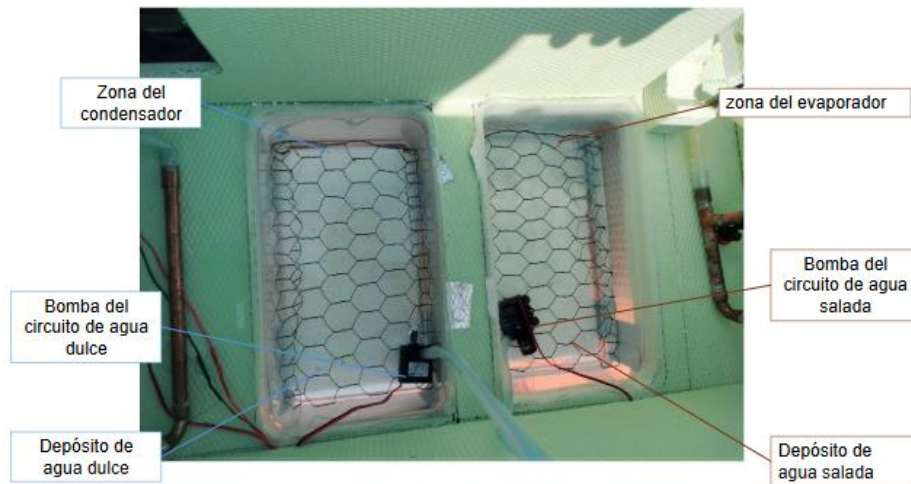


Figura 30. Descripción del circuito de bombeo interior

El proceso del equipo comienza con la entrada de agua salada previamente calentada en el intercambiador al evaporador por una tubería de cobre con agujeros, por lo tanto, el agua salada se dosifica en el panel evaporativo por goteo.

En el evaporador conforme cae el agua caliente por el panel evaporativo, intercambia calor con el aire del interior del equipo que viene de la zona de los ventiladores.

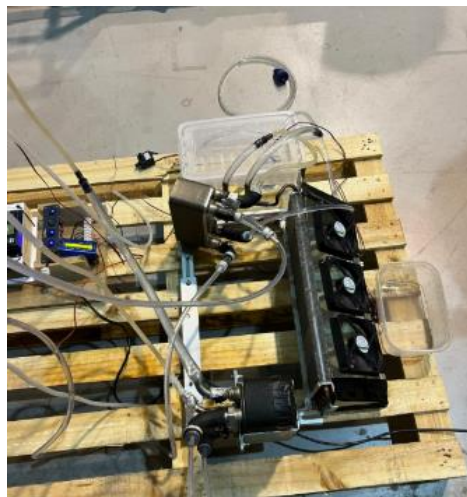


Figura 31. Vista del sistema de refrigeración del intercambiador del condensador mediante un radiador unido a 3 ventiladores de 12 V

El aire que sale del evaporador al mezclarse con el agua caliente aumenta su temperatura convirtiéndose en un aire húmedo, a continuación, entra en el condensador donde igual que en el evaporador se dosifica en forma de gotas agua dulce enfriada previamente en el intercambiador de frío. Por lo tanto, el aire húmedo calentado cuando entra en contacto con el agua fría, este se condensa en agua dulce que se irá acumulando junto con el agua dulce que se dosifica en la parte alta del condensador. Por lo que el depósito se ira llenando en exceso, lo que provocará un rebose que coincidirá con el agua condensada.

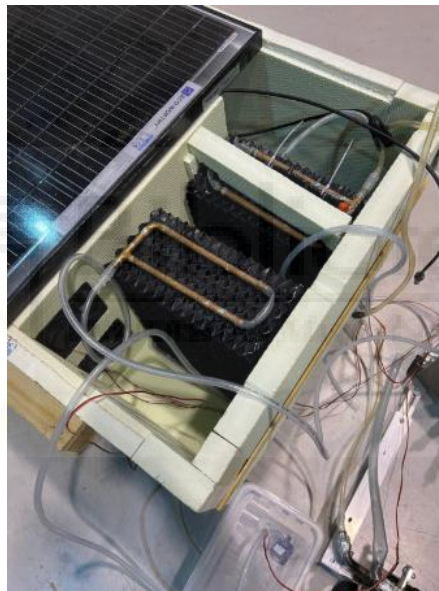


Figura 32. Vista interior del sistema de dosificación del condensador

2.3. COMPONENTES Y MATERIALES PRINCIPALES

El equipo de desalación por humidificación y deshumidificación está formado por una serie componentes que hacen posible que se produzca el proceso de obtención de agua dulce a partir de la evaporación de agua salada.

A continuación, se detallará cada uno de los componentes que forman parte del equipo y su funcionalidad.

2.3.1. COLECTOR SOLAR

Un colector solar térmico es un dispositivo especial de intercambio de calor que transforma la radiación solar que incide sobre la superficie de este en energía térmica útil. [19]

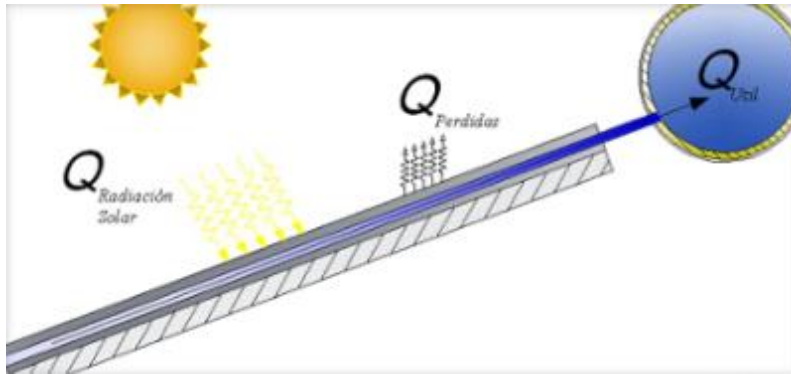


Figura 33. Esquema de energía de un colector solar

$$q_{\text{radiación}} - q_{\text{pérdidas}} = q_{\text{útil}}$$

Su principio de funcionalidad se basa en la captación de la radiación solar gracias a una superficie absorbente que convierte la luz en calor y lo transfiere a un fluido. Dentro del colector solar se produce la absorción de la radiación solar por un material metálico, el cual se calienta y cede el calor al fluido que circula por su interior. [20]

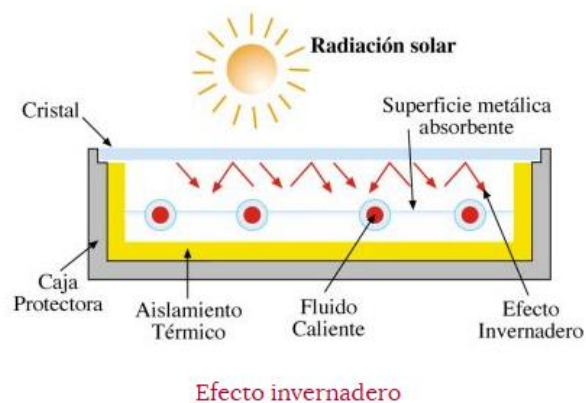


Figura 34. Descripción de los componentes un colector solar

Los captadores más comúnmente utilizados son los que calientan el agua y, atendiendo a su estructura pueden ser de caucho, de placa plana, tubos de vacío, heat-pipe, cilindro parabólico, etc. Independientemente de su forma constructiva y materiales, los captadores solares se definen por su tamaño y curva de rendimiento. Lógicamente la cantidad de agua que puede calentar un colector térmico depende de la radiación solar incidente, de la temperatura del aire exterior y de la temperatura a la que se quiera calentar el agua, por lo tanto, la energía útil que puede aportar un colector solar se define como el producto de la irradiancia solar por el rendimiento y la superficie útil.

$$Q_u = G_t * A * \eta_t$$

Donde:

$G_t =$ Irradiancia solar (W/m^2)

$A =$ Superficie del colector (m^2)

$\eta_t =$ Rendimiento del colector

El balance de energía de un colector solar en estado estacionario se puede plantear de la siguiente forma. [21]

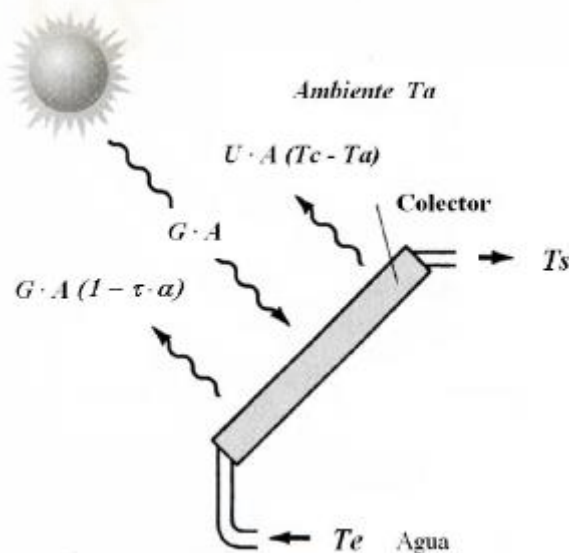


Figura 35. Balance de energía de un colector solar

El flujo de calor útil viene dado por:

$$Q_u = \dot{m} * c_p * (T_s - T_e)$$

Donde:

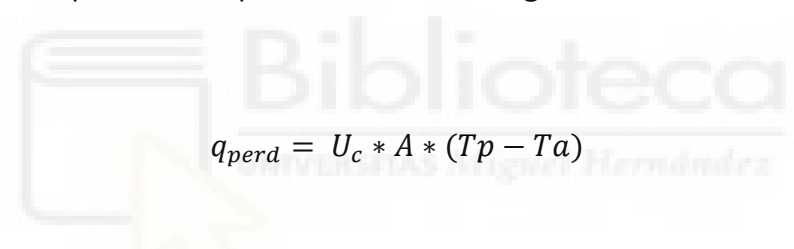
\dot{m} = Gasto másico del fluido $\left(\frac{kg}{s}\right)$

c_p = Calor específico del fluido $\left(\frac{kJ}{kg * K}\right)$

T_s = Temperatura de salida del fluido calentado

T_e = Temperatura de entrada del fluido calentado

El valor de las pérdidas de calor del colector se puede poner en función del coeficiente global de transmisión de calor de las pérdidas de calor del colector U_c . En este caso, si se conoce U_c y la placa del colector tiene una temperatura media T_p , el valor de las pérdidas se puede definir de la siguiente manera:


$$q_{perd} = U_c * A * (T_p - T_a)$$

Donde:

U_c = Coeficiente global de transferencia de calor $\left(\frac{W}{m^2 * K}\right)$

A = Superficie del colector (m^2)

T_p = Temperatura media del fluido en el colector

T_a = Temperatura ambiente

2.3.2. PANELES DE EVAPORACIÓN

Los paneles evaporación están diseñados para crear una superficie de contacto directo entre aire/agua lo más grande posible y humedecer el aire.

Estos separadores están fabricados con materiales plásticos o celulosa resistentes a la corrosión y permiten obtener un flujo de aire seco y limpio, evitando problemas de contaminación en las siguientes etapas.



Figura 36. Panel evaporativo

En el sistema de desalación HDT el panel evaporativo cumple la función tanto de evaporador como de condensador. La finalidad de este componente es calentar y enfriar el aire que circula en el interior del equipo mediante el intercambio de calor del fluido que se dosifica en la zona de arriba del panel evaporativo. De esta forma lo que se intenta es obtener un aire seco enfriado o calentado separado del fluido de intercambio de energía térmica. [22]

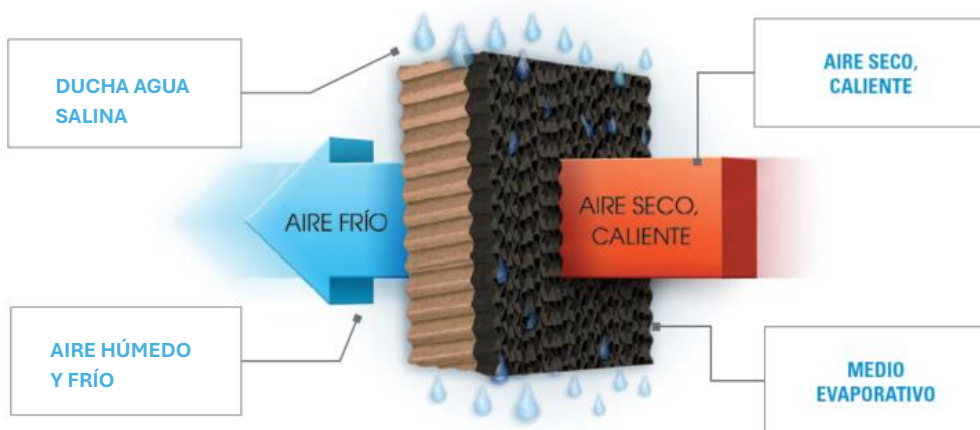


Figura 37. Representación del funcionamiento del panel de evaporación

2.3.3. BOMBAS DE AGUA

El sistema de bombeo del equipo está formado por 4 bombas de 12 Vdc, cada una está conectada a un circuito. Su función es hacer circular el agua por los circuitos del equipo. En total hay dos circuitos cerrados y dos abiertos.

Haciendo una medición se ha determinado que el caudal de dosificación de las bombas tanto en el evaporador como condensador es de 120 l/h.

2.3.4. INTERCAMBIADORES DE CALOR

Los intercambiadores de calor son uno de los dispositivos de mayor uso en la industria. Son elementos básicos en las instalaciones de refrigeración y calefacción. Un intercambiador de calor está diseñado para que dos fluidos a temperatura distinta entren en contacto, directa o indirectamente, con el fin de que se produzca una transferencia de calor entre ambos.

El principio de funcionamiento de un intercambiador se basa en las leyes de la termodinámica, cuando dos objetos a distinta temperatura entran en contacto se produce una transferencia de calor entre ambos hasta que se llega al equilibrio térmico, dicho de otra forma, hasta que las temperaturas se iguales. Esto está relacionado con la ley de la conservación de la energía, donde el flujo de calor fluye hacia el elemento con menor temperatura.

En los intercambiadores de calor, por lo general, se llevan a cabo tres fases de transferencia de energía térmica:

- Convección interna: el fluido transfiere energía a la superficie interior del tubo o placa.
- Conducción: el calor atraviesa el material del propio tubo o placa.
- Convección externa: la energía se transmite desde la superficie externa del tubo o placa hacia el fluido con menor temperatura.

De esta forma, el fluido con mayor temperatura va perdiendo calor progresivamente a lo largo de su recorrido dentro del equipo. Esto provoca que el coeficiente de transferencia convectiva no sea constante, este va cambiando en cada punto, lo que también provoca una variación del coeficiente global de transmisión de calor.

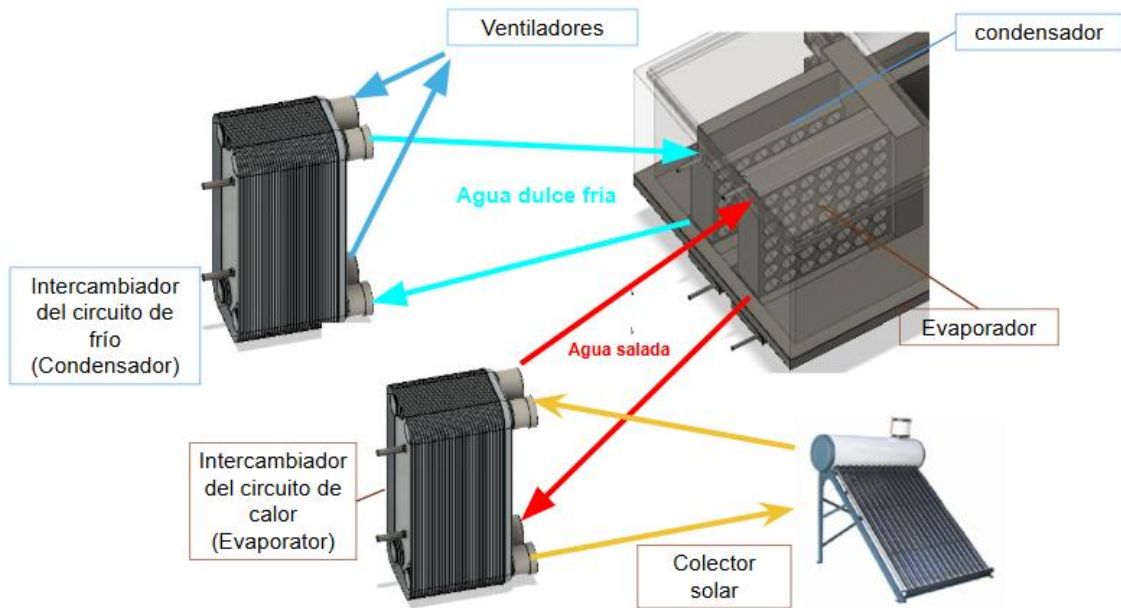


Figura 38. Descripción del intercambio de calor del sistema

En el equipo de desalinización HDT hay dos intercambiadores de calor en cada circuito, cada uno de ellos se encarga de calentar agua (Evaporador) y enfriarla (Condensador), el tipo de intercambiador que se utiliza es el de placas.

Los intercambiadores de placas están constituidos por un conjunto de láminas metálicas con diferentes geometrías, que se disponen en serie y se sellan mediante juntas.[23]

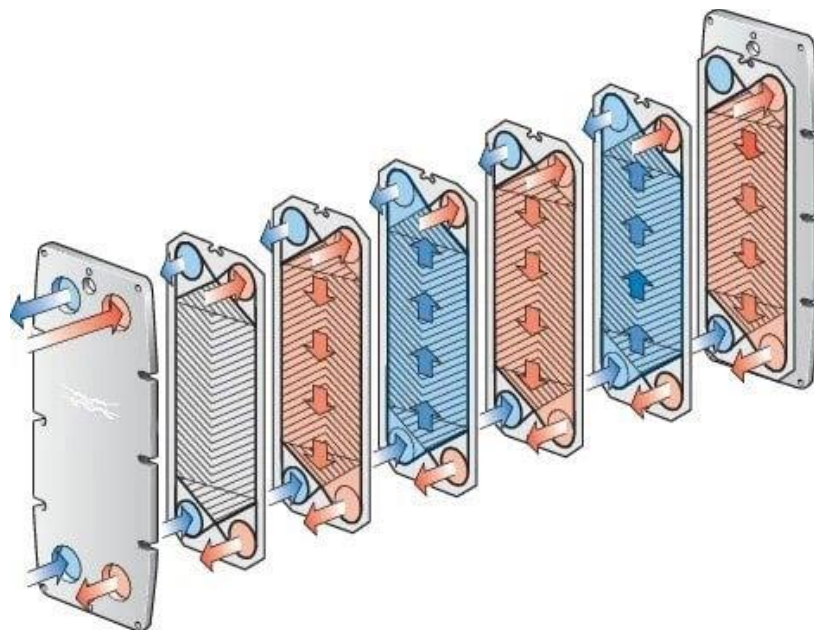


Figura 39. Representación de la dirección de los fluidos en el interior de un intercambiador a contraflujo

Cada palca está formada por dos conductos por los que circulan los fluidos: uno destinado al fluido caliente y otro al fluido frío, alternándose en el apilamiento. De esta forma, el fluido a mayor temperatura transfiere calor al de menor temperatura a través de la superficie metálica, sin producirse contacto directo entre ellos. Tal como se observa en la figura 39, el fluido primario que cede el calor circula entre dos placas, mientras que por las adyacentes lo hace el fluido que debe calentarse. Las juntas situadas entre las placas garantizan que este intercambio ocurra de manera controlada y segura, evitando cualquier mezcla entre ambos fluidos.

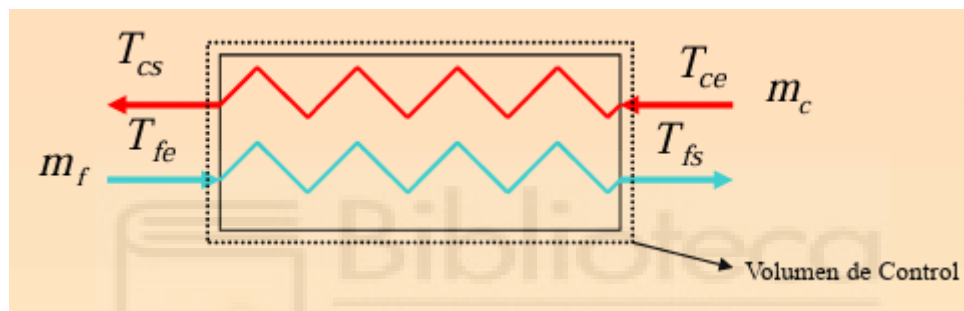


Figura 40. Representación de temperaturas y flujo másico de los fluidos

De forma general el planteamiento de un intercambiador de calor es como en la figura 40. La corriente caliente transfiere calor a la corriente fría, separadas por entre sí por una placa metálica. Aunque la configuración de flujo se a contracorriente, el análisis térmico que sigue es válido para cualquier configuración. En cualquier intercambiador de calor, las ecuaciones para el cálculo del calor transferido son:

$$q = m_c * Cp_c * (T_{ce} - T_{cs}) = m_f * Cp_f * (T_{fs} - T_{fe})$$

Donde:

$$m = \text{Gasto másico} \left(\frac{kg}{s} \right)$$

$$Cp = \text{Calor específico del fluido} \left(\frac{kJ}{kg * K} \right)$$

T_s = Temperatura salida

T_e = Temperatura entrada

$$Q = U_m * A * \Delta T_m$$

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

Donde:

U_m = coeficiente global de transferencia de calor [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]

A = Superficie de intercambio (m^2)

ΔT_m = Diferencia media logarítmica de temperatura (DMLT)

$$T_1 = T_{ce} - T_{cs}$$

$$T_2 = T_{fs} - T_{fe}$$

Respetando el principio de conservación de la energía y considerando un sistema adiabático, la energía térmica que cede la corriente caliente debe ser igual a la que absorbe la corriente fría. La variación de energía de una corriente puede deberse tanto a la transferencia de calor sensible como latente. La entalpía es la propiedad de la corriente que abarca ambos procesos simultáneamente, luego el balance energético se expresa correctamente mediante un balance entálpico. [24]

$$q = m_c * (h_{ce} - h_{cs}) = m_f * (h_{fs} - h_{fe})$$

Donde:

$$m = \text{Gasto másico} \left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)$$

$$h = \text{Entalpía} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)$$

La eficiencia de un intercambiador de calor se calcula con la relación entre el calor cedido por los fluidos y el calor máximo que puede aportar el intercambiador.

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}}$$

$$q_{max} = (m * C_p)_{min} * (T_{ce} - T_{fe})$$

2.3.5. VENTILADORES

Este prototipo de desalación mediante el proceso HDT, cuenta con varios ventiladores, en total 5. En el interior del equipo, hay instalados dos de ellos que se encargan de hacer circular el aire seco, haciendo posible el paso del aire por el panel evaporativo que son en este caso el evaporador y condensado, produciéndose así el calentamiento y enfriamiento de este aire seco.

Por otro lado, en el exterior hay conectados 3 ventiladores en paralelo que están unidos a un radiador con disipador de energía que está conectado al circuito de refrigeración del intercambiador de agua dulce del condensador, lo que intenta con esta batería de ventiladores es enfriar el agua que proviene del depósito ubicado en la parte baja del condensador, al interferir el aire seco calentado anteriormente en el evaporador con el agua dulce que se dosifica en la parte alta del condensador, esta agua se calienta, por lo que para favorecer el proceso de condensación se enfría mediante ventiladores a temperatura ambiente.

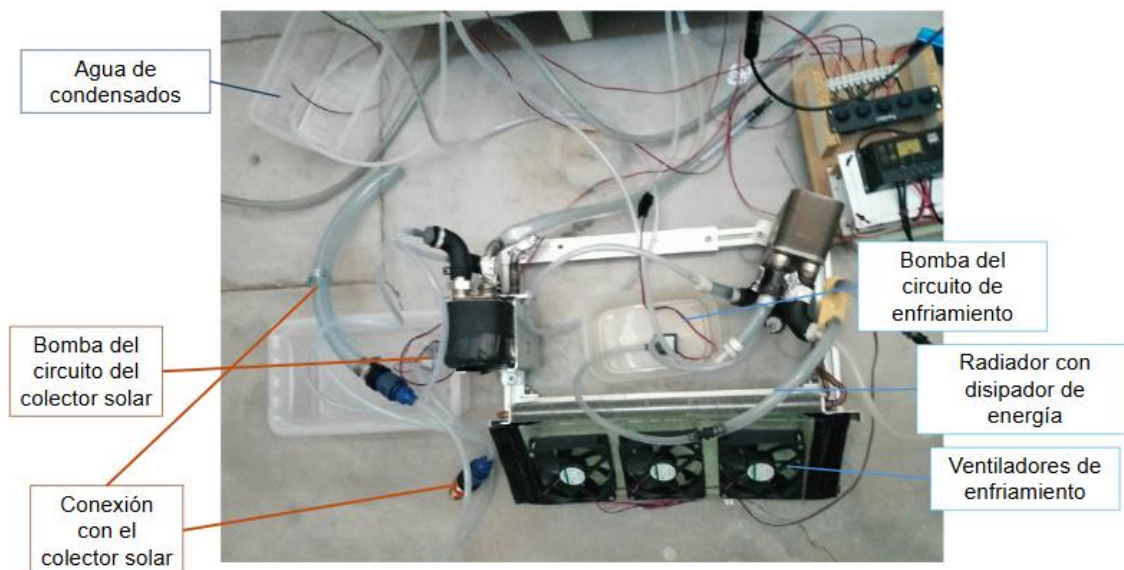


Figura 41. Descripción de los componentes de enfriamiento del circuito del condensador

2.4. FUNDAMENTOS DE PSICROMETRÍA

Se define psicrometría como la ciencia que estudia las propiedades termodinámicas del aire húmedo y el efecto de la humedad atmosférica sobre los materiales y acondicionamiento del aire, así como los métodos para controlar las características térmicas del aire húmedo.

2.4.1. DIAGRAMA PSICROMÉTRICO

El diagrama psicrométrico es una representación gráfica de las propiedades del aire húmedo y permite caracterizar los procesos de humidificación y deshumidificación. Se trata de una herramienta de la psicrometría que se utiliza para conocer en profundidad las relaciones entre las condiciones de humedad y temperatura del aire. A partir del diagrama psicrométrico y con cálculos adecuados, se puede conocer la cantidad de calor o frío necesario para conseguir la temperatura y humedad deseada. [25]

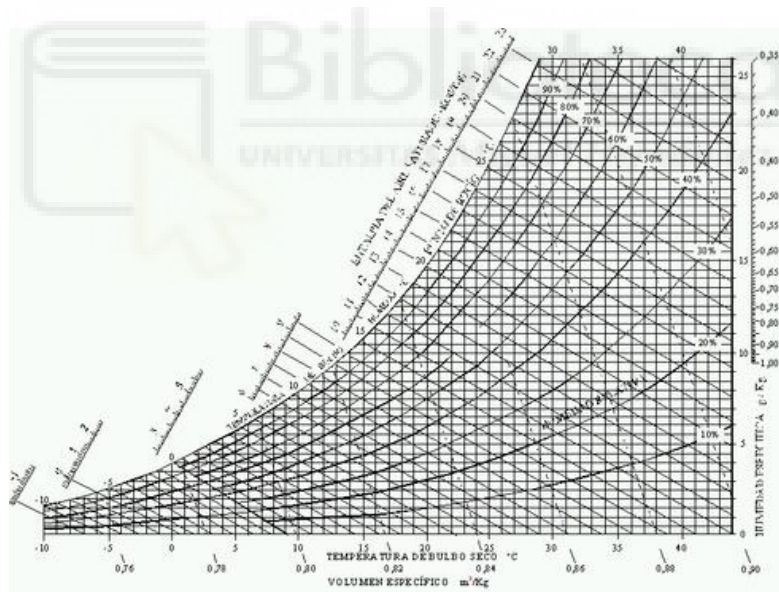


Figura 42. Gráfico psicrométrico

En el diagrama psicrométrico se representa la humedad absoluta en función de la temperatura de bulbo seco. Esta está limitada por la curva de saturación, la cual proporciona la humedad del aire saturado en función de su temperatura. Los puntos situados a la izquierda de la curva de saturación representan las mezclas de aire saturado y agua líquida en condiciones inestables de aire-vapor de agua. en

cambio, los puntos que están situados a la derecha representan una mezcla definida de aire y vapor de agua. [26]

Las curvas situadas entre el eje de abscisas y la curva de saturación son las líneas correspondientes a las distintas humedades relativas y las líneas inclinadas de pendiente negativa corresponden a las líneas de temperatura de saturación adiabática que coinciden con las temperaturas de bulbo húmedo. Además, como se muestra en la siguiente figura, existen líneas que permiten la lectura directa del volumen y la entalpía específica de la mezcla, así como del punto de rocío.³

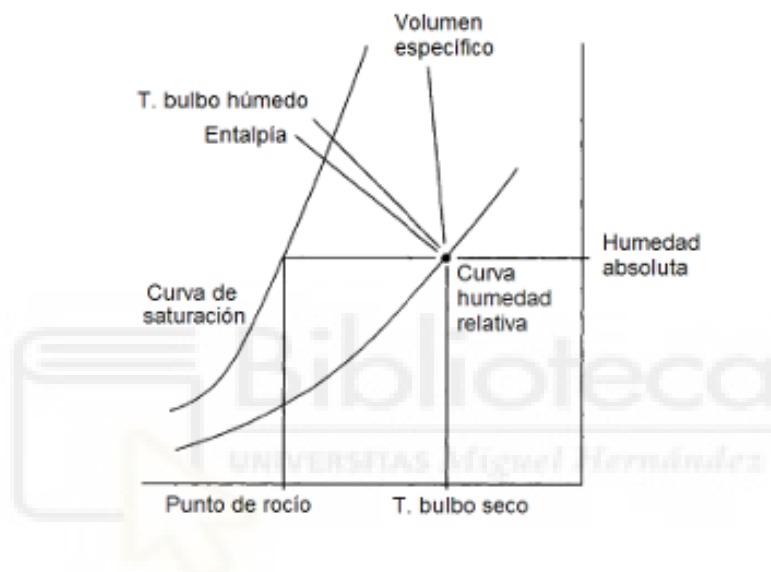


Figura 43. Descripción de las propiedades del diagrama psicrométrico

2.4.2. MEZCLA AIRE – VAPOR DE AGUA

El aire es una mezcla de nitrógeno, oxígeno y otros gases. Cuando no incluye vapor de agua, se le hace llamar aire seco, mientras que, si se toma en cuenta, este aire pasa a ser aire húmedo. A presión atmosférica se puede tratar al aire seco y al vapor de agua como gases ideales, por lo que el aire húmedo es una mezcla de dos gases ideales.

La presión total de la mezcla es la suma de la presión parcial del aire seco y la presión parcial del vapor de agua (presión de vapor). De esta forma si la presión parcial del vapor en la mezcla es menor que la presión de vapor en el equilibrio del

³ (Glicksman,2008,p.6).

líquido a la misma temperatura, se puede decir que la mezcla no está saturada. En cambio, si el aire seco entra en contacto con suficiente líquido, este líquido se evapora en el gas hasta que finalmente la presión parcial del vapor en la mezcla alcanza su valor de saturación.

2.4.3. TEMPERATURA DE BULBO SECO

La temperatura de bulbo seco es la temperatura que se considera real en el aire húmedo. Por ello, de forma genérica se considera la temperatura del aire del ambiente. En este sentido, se trata de la temperatura que suele mostrar un termómetro común.

2.4.4. TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO

Se trata de la temperatura en estado estacionario alcanzada por una pequeña cantidad de agua que se evapora en una gran cantidad de gas húmedo. Se mide con un termómetro cuyo bulbo se ha cubierto con un material fibrosa humedecido y en contacto con una corriente de la mezcla gaseosa a la velocidad moderada.

2.4.5. PUNTO DE ROCÍO

Es la temperatura a la cual la mezcla vapor-gas se satura cuando se enfría a presión constante sin contacto con el líquido. Una vez se alcanza esta temperatura, si se continúa enfriando la mezcla de vapor se condensará.

En un proceso de enfriamiento isobaro de una cierta masa de aire húmedo: si a presión constante se disminuye la temperatura seca de la mezcla, llegará un instante en el que el aire alcance el estado de saturación, apareciendo líquido en equilibrio con el vapor.

2.4.6. HUMEDAD ABSOLUTA

La humedad absoluta de una mezcla de aire-vapor de agua se define como la relación entre la masa de agua y la masa de aire seco.

$$w = \frac{m_v}{m_{as}} \left(\frac{kg \text{ vapor}}{kg \text{ aire seco}} \right)$$

2.4.7. HUMEDAD RELATIVA

Es la relación entre la fracción molar del vapor contenido en una masa de aire seco en unas condiciones dadas de presión y temperatura, y la fracción molar de dicha masa corresponde al estado de saturación en esas mismas condiciones de presión y temperatura.

$$HR (\%) = \left(\frac{n_v}{n_{vs}} \right)_{p,T} = \left(\frac{p_v}{P_{vs}} \right)_{p,T}$$

2.4.8. ENTALPÍA ESPECÍFICA

Se trata de una magnitud clave en los balances de energía. Se define como la energía contenida en el aire húmedo, por unidad de masa de aire seco. Viene dada por la suma de las entalpías correspondientes al aire seco y al vapor de agua:

$$h_T = h_{as} + h_v = c_{p,as} * T + (\lambda + c_{p,v} * T) * w$$

Donde:

h_{as} , h_v : entalpía de aire seco y de vapor $\left(\frac{kJ}{kg} \right)$

$c_{p,as}$, $c_{p,v}$: calores específicos a presión constante del aire seco y vapor de agua.
 $\left(\frac{kJ}{kg \cdot K} \right)$

T : temperatura de aire seco (K)

λ : calor latente de vaporización del agua a la temperatura T

w : humedad de la mezcla $\left(\frac{kg_w}{kg_{as}} \right)$

2.4.9. CALOR LATENTE Y SENSIBLE DE LA MEZCLA AIRE-VAPOR

Si se calienta o enfría el aire húmedo y se produce una condensación de su humedad, o inyectamos agua al aire (lo humidecemos), el calor necesario para el proceso se divide en calor sensible y calor latente.

El calor sensible es el necesario para elevar la temperatura de la mezcla aire-vapor, por otro lado, el calor latente es el necesario para evaporar el agua (hay que aportar calor), o condensar el agua (hay que quitar calor). El calor latente se refiere al calor que se libera o absorbe durante un cambio de estado, en este caso de evaporación de agua.

La entalpía específica es la suma de calor sensible de la mezcla de aire-vapor y el calor latente de vaporización del vapor que contiene a la temperatura a la que se refieran las entalpías.

$$H_T = Q_{Sa} + (Q_{Sv} + Q_{Lv})$$

$$Q_{Sa} = m * C_e * (T_1 - T_2)$$

Donde:

m : masa de aire seco (kg)

C_e : Calor específico del aire (1kJ/kg * °C)

T_1 : Temperatura de referencia

T_2 : Temperatura del aire seco

$$Q_{Sv} = m * C_e * (T_1 - T_2)$$

Donde:

m : masa de vapor de agua (kg)

C_e : Calor específico del vapor de agua (1.805 kJ/kg * °C)

T_1 : Temperatura de referencia

T_2 : Temperatura del vapor de agua

$$Q_{Lv} = m * C_L$$

Donde:

m : masa de vapor de agua (kg)

C_e : Calor latente del vapor de agua (2260 kJ/kg * °C)

En el diagrama psicrométrico se representa en calor latente y sensible como una variación de las entalpías. Como se puede ver en la siguiente figura,

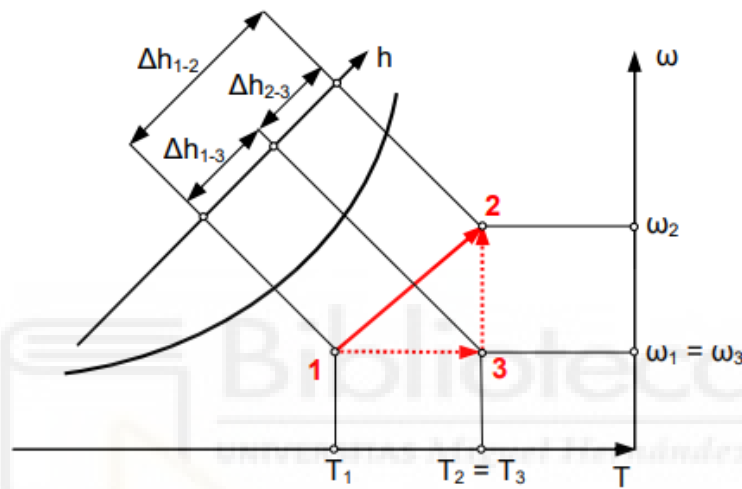


Figura 44. Representación de las propiedades de calor latente y sensible del diagrama psicrométrico

De esta forma el calor total es la suma de calor sensible (h_{1-3}) y el latente (h_{2-3})

$$\Delta h_{1-2} = \Delta h_{1-3} + \Delta h_{2-3}$$

2.4.10. CALENTAMIENTO SENSIBLE DEL AIRE

El calentamiento sensible del aire es el proceso por el cual el aire absorbe o cede calor sin que haya una alteración en su estado físico, como condensación o evaporación.

Esta operación se lleva a cabo en equipos de contacto indirecto, normalmente en intercambiadores de calor de flujo cruzado.

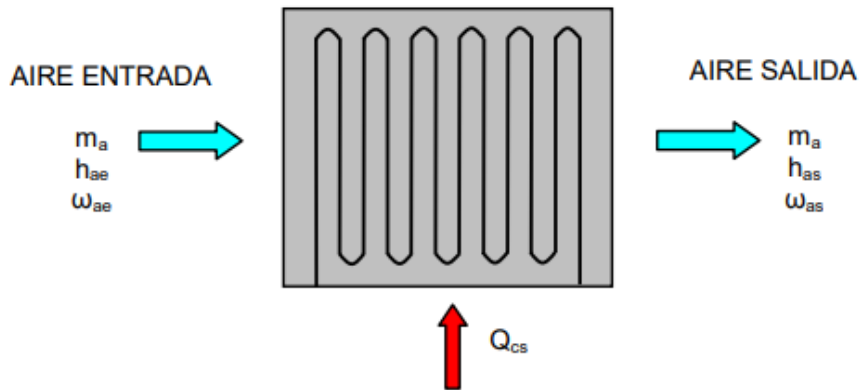


Figura 45. Representación de las propiedades del proceso de calentamiento sensible de aire de un intercambiador de flujo cerrado

El aire entra en contacto con la superficie de los tubos, los cuales se encuentran a una temperatura (T_s) más elevada. El aire de salida puede considerarse como una mezcla de aire ambiente con el aire en contacto con los tubos. Durante el proceso de calentamiento el aire calentado no presenta una variación en su humedad absoluta.

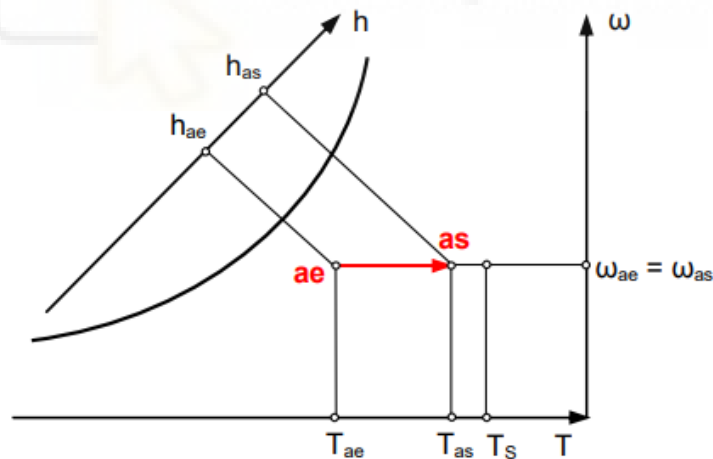


Figura 46. Representación de las propiedades psicrométricas del proceso de calentamiento sensible del aire

El calentamiento del aire se lleva a cabo mediante una fuente de calor seco que solo produzca cambio en el calor sensible, como hornos, serpentines o calentadores eléctricos. En este proceso la humedad específica permanece constante, es decir, que ni se elimina ni se añade vapor. En cambio, en la humedad

relativa sí que se produce una disminución, debido a que la capacidad del aire de retener humedad es mayor cuando aumenta la temperatura.[27]

$$w_{ae} = w_{as}$$

$$Q_{cs} = \dot{m}_a * (h_{as} - h_{ae}) = \dot{m}_a * c_{pa} * (T_{as} - T_{ae})$$

2.4.11. HUMIDIFICACIÓN DEL AIRE HÚMEDO

Este proceso consiste en la inyección directa de vapor o atomización de agua en la corriente de aire, que es lo que sucede en el panel evaporativo que funciona como evaporador del equipo de desalación. El tratamiento se lleva a cabo en equipos de contacto directo y el objetivo de este proceso es aumentar la humedad de una corriente de aire húmedo.

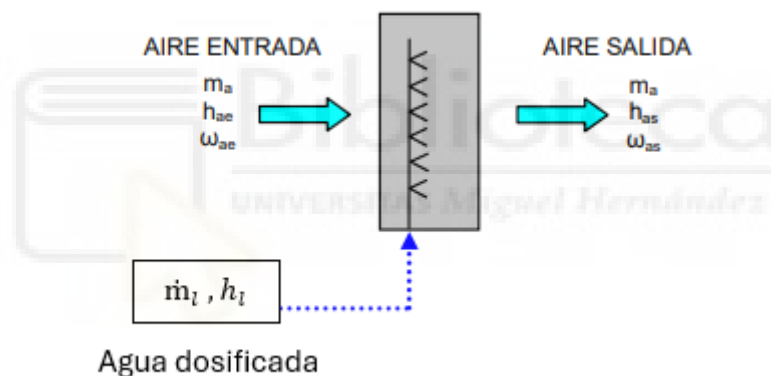


Figura 47. Representación de las propiedades del proceso de humidificación del aire húmedo en un intercambiador de flujo abierto.

En el proceso consiste en hacer que el aire que se encuentra caliente incida con el agua con el agua, como se muestra en la figura 47. La temperatura de salida del aire húmedo depende de la temperatura a la que se introduce el agua al evaporador, en este caso se pueden dar dos situaciones (figura 48):

- Temperatura del agua elevada (a): La temperatura del aire y humedad aumentan
- Temperatura del agua baja (b): La mezcla puede salir con una temperatura inferior y una humedad específica mayor.

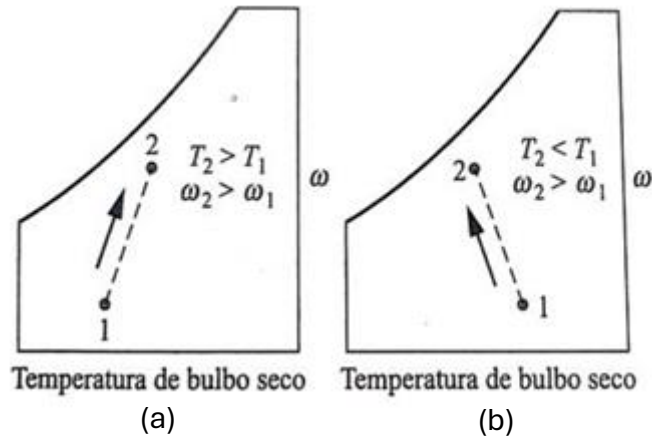


Figura 48. Representación de las propiedades psicrométricas del proceso de humidificación del aire

$$\dot{m}_{w1} + \dot{m}_l = \dot{m}_{w2} \quad (\text{agua})$$

$$\dot{m}_{ae} = \dot{m}_{as} = \dot{m}_a \quad (\text{aire seco})$$

$$Q = \dot{m}_a * (h_{as} + w_{as} * h_{vs}) - \dot{m}_a * (h_{ae} + w_{ae} * h_{ve}) - \dot{m}_l * h_l$$

2.4.12. ENFRIAMIENTO Y DESHUMIDIFICACIÓN

La deshumidificación es el proceso en el cual una corriente de aire húmedo se enfría a una temperatura inferior a la del punto de rocío, por lo que parte del vapor de agua presente en la corriente se condensa, obteniendo una humedad relativa mayor, pero con menos contenido de vapor de agua.

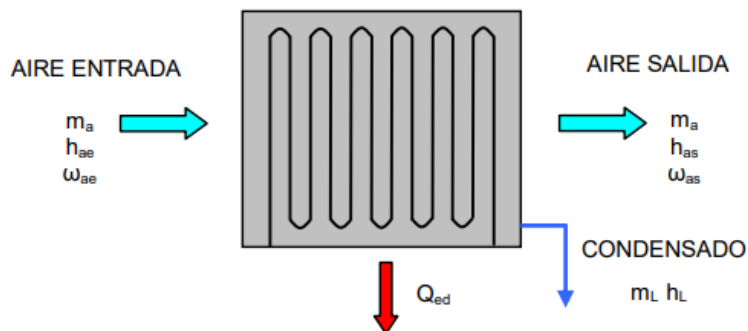


Figura 49. Representación de las propiedades del proceso de enfriamiento y deshumidificación del aire húmedo en un intercambiador de flujo cerrado.

En este caso Q_{ed} es el calor extraído del aire en el intercambiador. Si se aplica en este proceso el balance de masa teniendo en cuenta el principio de conservación de la masa, se relaciona el flujo másico de condensado con el flujo másico de aire seco.

$$\dot{m}_L = \dot{m}_a * (\dot{m}_{ae} - \dot{m}_{as})$$

$$Q_{ed} + \dot{m}_L * h_L = \dot{m}_a * (h_{ae} - h_{as})$$

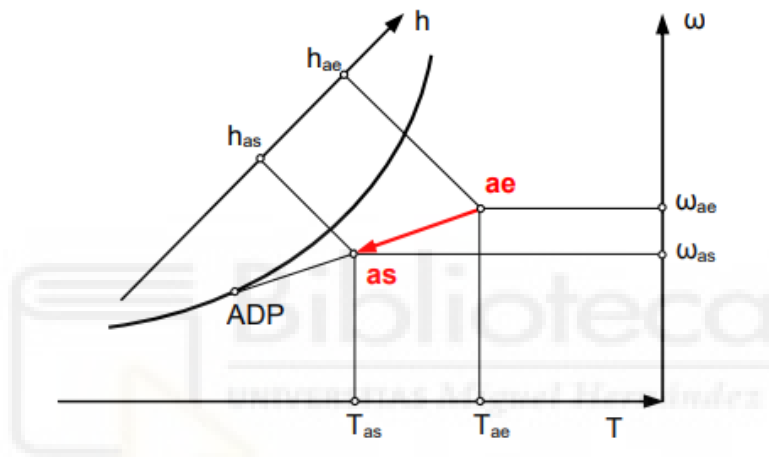


Figura 50. Representación de las propiedades psicrométricas del proceso de enfriamiento y deshumidificación en un intercambiador de flujo abierto.

2.5. BALANCES DE MATERIA Y ENERGÍA

Los balances de materia y energía son una herramienta fundamental en la ingeniería de procesos y en las especialidades de la rama de ingeniería que se basan en la ley de conservación de la masa y la energía. Esta ley establece que tanto la masa como la energía ni se crea ni se destruye, solo se transforma. Este principio permite realizar balances para analizar y calcular las entradas, salidas, acumulaciones, pérdidas y ganancias de energía y materia de un sistema abierto o cerrado.

2.5.1. BALANCE DE MATERIA

Un balance de masa es una secuencia de cálculos que permite contabilizar todas las sustancias que intervienen en un proceso de transformación, satisfaciendo la ley de la conservación de la masa, la cual establece que la materia se transforma, pero no se crea ni se destruye. En un balance de materia las sustancias pueden entrar, salir, transformarse, acumularse o consumirse durante el proceso. Se entiende por proceso a cualquier conjunto de operaciones que producen una transformación física o química en una o varias sustancias.

Toda la materia que ingresan en un proceso recibe el nombre de alimentación o entrada, mientras que las que salen del proceso se les hace llamar producto o salida. Un proceso puede estar formado por varias unidades de proceso, varias entradas o varias salidas.

A la hora de realizar los cálculos de balances de masa, es necesario obtener información de las cantidades (en masa, moles o volumen) de las sustancias que intervienen en el proceso o de los flujos de estas (flujo másico, molar o volumétrica), como también de las composiciones de las mezclas y de las condiciones de operación como las temperaturas en este caso.

A la hora de hacer el balance de materia de un proceso debe de considerarse las entradas y las salidas que interfieren con la frontera del sistema. El balance de masa es la expresión matemática del principio de conservación de la materia, por lo tanto, en cualquier proceso será llevará acabo la siguiente expresión:

$$\sum [(Caudales) + (velocidad de)] = \sum [(Caudales) + (velocidades de)]$$

de entrada producción de salida destrucción

Dicho de otra forma, de un proceso se obtendrá todo lo que entra junto con lo que se produzca en él, descontando lo que se destruya. El balance de materia se puede aplicar a procesos y operaciones continuos o discontinuos. Por lo que se tendrá que formular una ecuación en la que se pueda despejar una variable en función de las restantes. [28]

En un **proceso por cargas** la materia entra a la zona de trabajo de una sola vez y sale después del tiempo de proceso. El balance se referirá a este periodo y su expresión matemática será:

$$E = S + A + D$$

Donde:

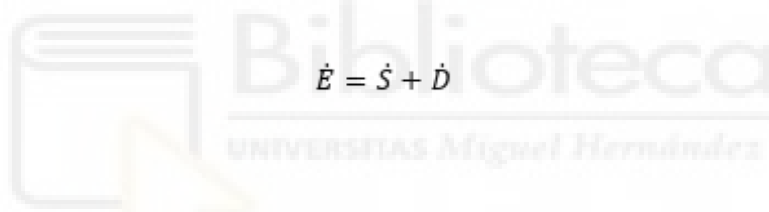
E: Materia de entrada

S: Materia de salida

A: Materia de acumulación

D: Materia que desaparece

En **procesos continuos** las materias entran continuamente en la zona de trabajo, y salen del mismo modo. El balance se aplicará una vez alcanzado el estado estacionario. En este caso no podrá producirse acumulación de materia y en la ecuación intervendrán los caudales másicos.



$$\dot{E} = \dot{S} + \dot{D}$$

Donde:

E: Caudal másico de entrada

S: Caudal másico de salida

A: Caudal másico que desaparece

2.5.2. BALANCE DE ENERGÍA

Los balances de energía son normalmente más complejos a la hora de calcular, debido a que la energía se puede transformar de diferentes formas (mecánica, química, térmica, eléctrica, etc.), lo que obliga a considerar este aspecto en ecuaciones. En general, los balances de energía son imprescindibles en equipos de los que el intercambio de energía sea determinante, como sucede en intercambiadores de calor, evaporadores, columnas de destilación, etc.

En la mayoría de los equipos donde se produzca un intercambio de energía, la ecuación de las entalpías, como se muestra a continuación, es suficiente para su planteamiento.

$$\dot{m}_s * H_s - \dot{m}_e * H_e = Q$$

Donde:

\dot{m}_s : Caudal másico de entrada

\dot{m}_e : Caudal másico de salida

H_s : Entalpía de salida

H_e : Entalpía de entrada

Q : Calor intercambiado en el sistema

El cálculo de la entalpía de cada corriente puede realizarse usando de su capacidad calorífica, y una temperatura de referencia, aunque si hay cambios de fase también habrá que considerar el calor latente. Para el vapor de agua lo ideal es usar las tablas de vapor de agua saturado o recalentado

2.6. CÁLCULO DE BALANCES DEL PROTOTIPO HDT

A continuación, se procederá al cálculo de los balances de energía y masa del sistema de desalación con el fin de calcular de forma ideal el caudal de condensados y compararlo con los resultados obtenidos de forma experimental. De esta forma obtendremos la eficiencia del equipo y su comportamiento en determinadas condiciones de operación.

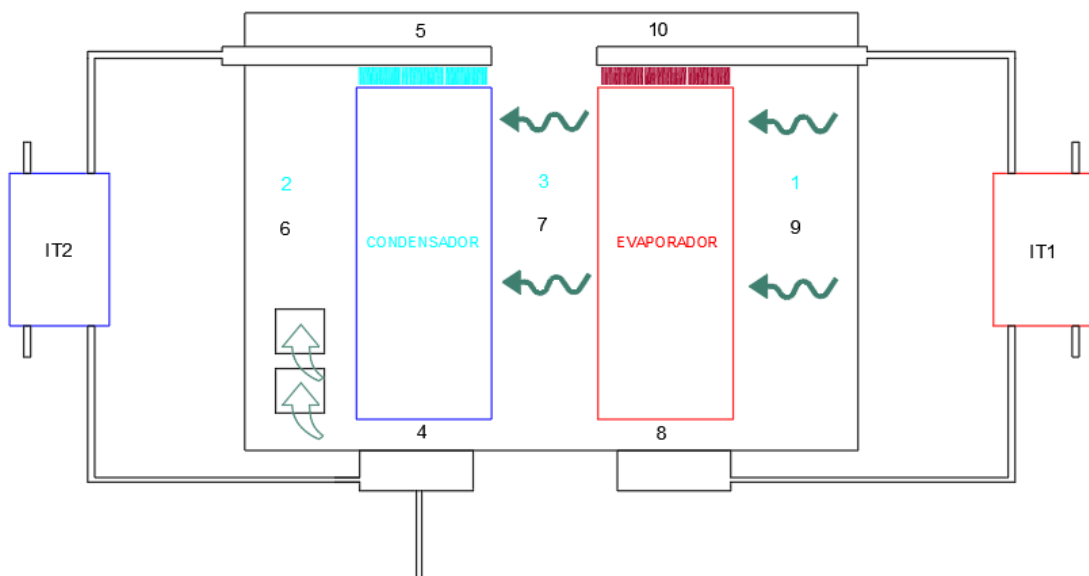


Figura 51. Representación de los intercambiadores y numeración de termopares del interior del sistema

A partir del esquema de la figura 51, se realizarán los cálculos de balances de masa y energía del sistema. Con el fin de conocer el rendimiento del equipo en cuanto a generación de agua dulce a partir de una solución salobre.

2.6.1. BALANCE DEL INTERCAMBIADOR

El sistema de desalación está formado por dos intercambiadores exteriores que se encargan de aumentar o disminuir la temperatura del circuito agua, en este caso se producirá un calentamiento en el intercambiador de la entrada del evaporador y en la entrada del condensador de procederá a enfriar el agua para provocar una condensación del aire húmedo procedente del evaporador. Ambos intercambiadores tienen una distribución a contracorriente.

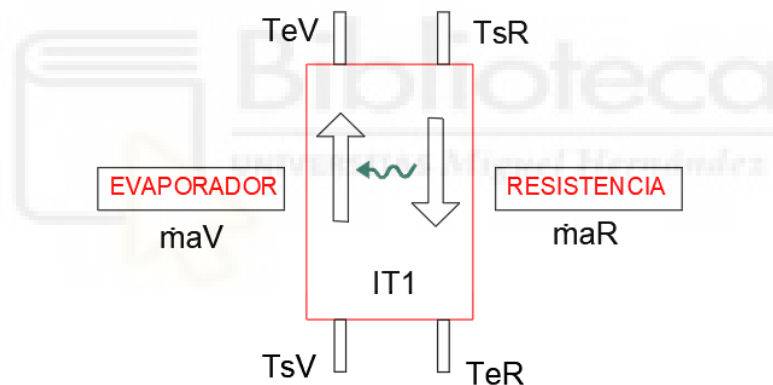


Figura 52. Representación del intercambiador de calor del circuito del evaporador con la resistencia térmica.

El calor transferido en el intercambiador (Q_{IT1}) es el que se transfiere desde el circuito de la resistencia al circuito del evaporador. Para el cálculo se utilizarán las siguientes formulas:

$$Q_{eva} = \dot{m}_{aV} * C_{p\text{agua}} * (T_{eV} - T_{sV})$$

$$Q_R = \dot{m}_{aR} * C_{p\text{agua}} * (T_{sR} - T_{eR})$$

$$Q_{IT1} = Q_{eva} = Q_R$$

Donde:

\dot{m}_{aV} : Caudal másico de agua del evaporador ($\frac{kg}{s}$)

\dot{m}_{aR} : Caudal másico de agua de la resistencia ($\frac{kg}{s}$)

$C_{p\text{agua}}$: Calor específico del agua ($4.18 \frac{kJ}{kg \cdot K}$)

T : Temperaturas de entrada y salida (K)

Q_{IT1} : Calor intercambiado en el intercambiador 1 (kW)

A continuación, se procede a calcular la eficiencia del intercambiador a partir de los datos obtenidos anteriormente.

$$\mathcal{E} = \frac{Q_{IT1}}{Q_{max}}$$

$$Q_{max} = (\dot{m} * C_p)_{min} * (T_{sR} - T_{sV})$$

El segundo intercambiador (IT2) se encarga de enfriar el agua que entra en el condensador. Del mismo modo de cálculo que el IT1, las ecuaciones son las siguientes:

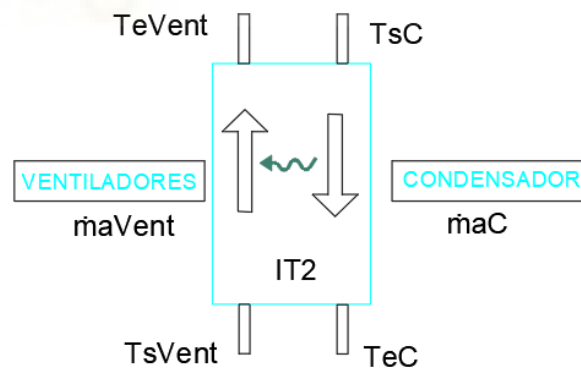


Figura 53. Representación del intercambiador de calor del circuito del condensador con el radiador unido a ventiladores.

$$Q_C = \dot{m}_{aC} * C_{p\text{agua}} * (T_{sC} - T_{eC})$$

$$Q_{Vent} = \dot{m}_{aVent} * C_{p\text{agua}} * (T_{eVent} - T_{sVent})$$

$$Q_{IT2} = Q_C = Q_{Vent}$$

La eficiencia del intercambiador IT2:

$$\varepsilon_{IT2} = \frac{Q_{IT2}}{Q_{max}}$$

$$Q_{max} = (\dot{m} * C_p)_{min} * (T_{sc} - T_{sVent})$$

Donde:

\dot{m}_{ac} : Caudal másico de agua del condensador ($\frac{kg}{s}$)

\dot{m}_{avent} : Caudal másico de agua del sist de ventiladores ($\frac{kg}{s}$)

C_{pagua} : Calor específico del agua ($4.18 \frac{kJ}{kg \cdot K}$)

T : Temperaturas de entrada y salida (K)

Q_{IT2} : Calor intercambiado en el intercambiador 2 (kW)

2.6.2. BALANCE DEL EVAPORADOR

A continuación, se realizará el balance de masa y energía en el evaporador del equipo de desalinización. En esta parte del equipo, se dosifica agua en el panel evaporativo donde se mezcla de forma directa con el aire que circula en el interior del equipo, con ello se consigue es aumentar la temperatura y humedad del aire. El balance en el evaporador queda de la siguiente forma:

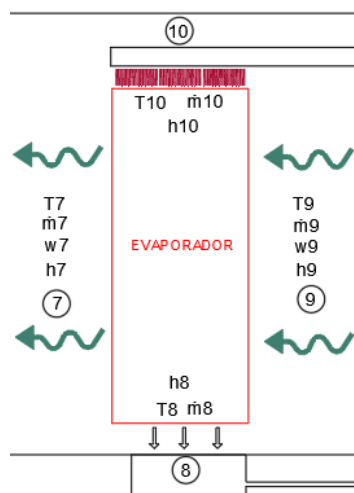


Figura 54. Representación del evaporador del sistema

La ecuación de energía del evaporador es la siguiente:

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_9 = \dot{m}_a$$

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_{10} - (\dot{m}_a * (w_7 - w_9))$$

$$\dot{m}_9 * h_9 + \dot{m}_{10} * h_{10} = \dot{m}_7 * h_7 + \dot{m}_8 * h_8$$

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

La ecuación de masa del evaporador es la siguiente:

$$\dot{m}_v = \dot{m}_{10} - \dot{m}_8 = \dot{m}_a * (w_7 - w_9)$$

Donde:

\dot{m}_v es el vapor que se produce en el evaporador

2.6.3. BALANCE DEL CONDENSADOR

El funcionamiento principal del condensador es enfriar el aire húmedo para obtener agua desalada, en este caso es lo que se quiere calcular. El balance de energía y masa del condensador se determinará el caudal de condensados que se obtiene del sistema. Con ello se podrá calcular el rendimiento del equipo de desalación. Las ecuaciones de balances en este punto del sistema son las siguientes:

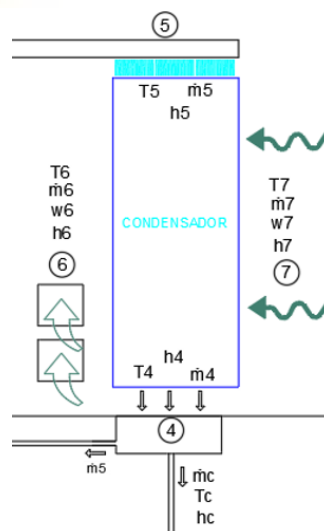


Figura 55. Representación del evaporador del sistema

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_6 = \dot{m}_a$$

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 + \dot{m}_c$$

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

$$\dot{m}_7 * h_7 + \dot{m}_5 * h_5 = \dot{m}_6 * h_6 + \dot{m}_4 * h_4$$

$$\dot{m}_7 * h_7 + \dot{m}_5 * h_5 = \dot{m}_6 * h_6 + (\dot{m}_5 + \dot{m}_c) * h_4$$

$$\dot{m}_a * (h_7 - h_6) = \dot{m}_5 * (h_4 - h_5) + \dot{m}_c * h_4$$

La ecuación de masa del condensador es la siguiente:

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 + \dot{m}_c$$

$$\dot{m}_c = \dot{m}_4 - \dot{m}_5$$

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

2.6.4. PARÁMETROS DE CÁLCULO DE EFICIENCIA

Los balances de masa y energía se realizan con el fin de determinar los parámetros de rendimiento del equipo. Estos parámetros son principalmente:

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

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

El rendimiento del sistema (η) se determina considerando el caudal de condensados obtenidos durante los ensayos de laboratorio y la máxima cantidad de agua que puede ser recuperada en condiciones ideales. El flujo másico de condensados teórico se es determinado mediante los balances obtenidos anteriormente y los datos obtenidos en el laboratorio.

El parámetro GOR (Gained-Output-Ratio) indica la cantidad de calor recuperado en el sistema, ya que es la relación entre el calor latente de evaporación, donde h_{lg} es la entalpía de cambio de fase y el calor de entrada en el sistema. Cuanto más grande sea este indicador, significa que el equipo recupera más calor y por tanto tiene una mejor eficiencia en ese punto.



Biblioteca

CAPÍTULO 3: MONTAJE EXPERIMENTAL

3.1. PROCESO DE PREPARACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS

Para poder conocer cuál es el rendimiento del sistema de desalación se han tenido que realizar una serie de ensayos en el laboratorio de máquinas térmicas del edificio Altet.

El punto de partida para realizar los ensayos ha sido montar el equipo en una zona de fácil acceso, asegurando que la toma de agua y corriente eléctrica estén cerca, colocar todos los elementos de manera eficiente (tuberías, intercambiadores, etc.) y comprobar la instrumentación necesaria para realizar los ensayos. El objetivo de los primeros días en el laboratorio han sido principalmente la puesta en marcha del equipo.



Figura 56. Vista completa del sistema a analizar

En la figura 56, el sistema HDT es colocado en una zona elevada y los elementos exteriores están apoyados sobre un palet de madera, con ello se consigue una mejor organización y ubicación del equipo que mejora su utilización en los ensayos del laboratorio evitando así errores e imprevistos.

Una vez se ha acondicionado el sistema de desalinización se procede a realizar los primeros ensayos, el objetivo es medir las temperaturas en cada punto del equipo y obtener el caudal de condensados procedente del condensador.



Figura 57. Dispositivos medidores de temperatura manuales mediante termopares

Para obtener las temperaturas en los puntos de interés, se hace uso de termopares conectados a una tarjeta de adquisición de datos del Data Logger, en este caso los primeros ensayos se realizan de forma manual obteniéndose de 1 a 2 mediciones (Figura 58).



Figura 58. Dispositivo medidor de temperatura conectado al evaporador

La medición de condensados se realizaba con un tubo calibrado volumétrico, con la ayuda de un cronómetro se calculaba el caudal en litro-hora.



Figura 59. Probeta graduada para la medición del caudal de condensados

Sin embargo, esta forma de medición los ensayos se volvían poco eficientes y se obtenían pocos datos. Además, los resultados obtenidos del caudal de condensados no eran muy coherentes.

Para mejorar los ensayos de laboratorio se realizaron ciertos cambios, se instaló un Data Logger con conexión directa al ordenador mediante un cable conversor de RS232 a USB, además se añadieron más termopares en todos los puntos de interés que afectan a los balances de masa y energía del sistema.



Figura 60. Báscula digital para la medición del caudal de condensados

Como se puede observar en la figura 60, se tomó la decisión de cambiar el medidor de caudal volumétrico por una báscula digital para medir el peso de agua de condensados.



Figura 61. Dispositivo de registro de temperaturas Data Logger

En la figura 61, se muestra un Data Logger, se trata de un grabador independiente que monitorea y registra datos en tiempo real, tales como voltaje, temperatura y corriente. En este caso se instalan 10 termopares tipo K en los canales del dispositivo y mediante un programa se visualizan los datos en gráficos que posteriormente se obtienen en formato Excel donde se realizan los cálculos.



Figura 62. Termopares conectados en el interior del equipo

En la figura 62, se muestra los termopares conectados al Data Logger que están instalados en el interior del equipo. Cada uno de ellos esta numerado según su canal de registro.

Además de medir temperaturas, también se ha registrado la velocidad del aire de salida de los ventiladores en m/s, con ello se calcula el caudal de aire que circula en el interior del sistema a partir de la siguiente ecuación.



Figura 63. Medición del caudal de aire interior

$$Q_{aire} = V_{aire} \left(\frac{m}{s} \right) * Sección\ de\ paso\ (m^2)$$

En este caso para comprobar que el resultado es correcto se han hecho dos mediciones, una a la salida de los ventiladores y la otra a la entrada del evaporador. Se ha medido tanto la velocidad en cada punto y su sección de paso. Comparando los dos resultados se ha visto que el caudal de aire coincide en los dos puntos, confirmando así el resultado válido.

Salida Ventiladores	
Velocidad (m/s)	5
Sección (m ²)	0,01
qv (1 ventilador) (m ³ /s)	0,05
Entrada Evaporador	
Sección (m ²)	0,0533
Velocidad (m/s)	2
qv (2 ventiladores) (m ³ /s)	0,1066
qv (1 ventilador) (m ³ /s)	0,0533

Tabla 1. Datos de partida para el cálculo de caudal de aire

El caudal de aire que se utilizará en el cálculo de balances de masa y energía será de $0.10 \text{ (m}^3/\text{s)}$.

Además de la medición de caudal de aire, se han calculado los caudales de agua que impulsan las bombas de cada circuito, mediante un medidor volumétrico y un cronómetro. Estos caudales serán necesarios para el cálculo de balances.

CAUDALES DE AGUA	l/h
EVAPORADOR (qe)	122
CONDENSADOR (qc)	119
RESISTENCIA (qR)	115

Tabla 2. Caudales de agua de los circuitos del equipo

Por último, se ha calculado la humedad del aire, que es un dato imprescindible para el cálculo de la eficiencia del equipo. Para obtener la humedad del aire se ha optado por calcularla mediante el uso de un diagrama psicrómetro. Para ello se ha instalado en el interior del equipo dos termopares por zona, es decir, el sistema de desalación se divide en tres zonas, la entrada del evaporador, salida del evaporador-entrada al condensador y salida del condensador. En cada zona se ha medido la temperatura de bulbo húmedo y de bulbo seco del aire. Con estos dos datos de temperatura se puede medir en el diagrama de psicrometría la humedad absoluta del aire en cada zona de paso dentro del equipo.

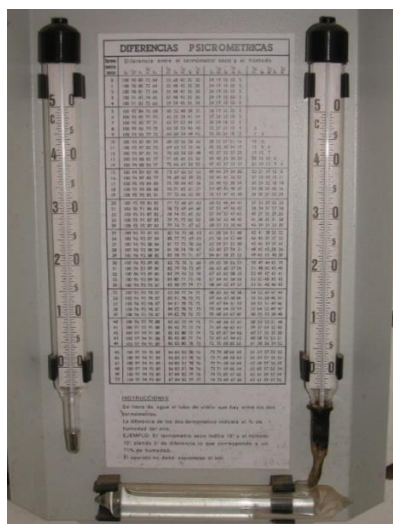


Figura 64. Medidor de humedad Kreiberg

A continuación, se mostrará el procedimiento a seguir para la obtención de la humedad con los datos obtenidos en los ensayos, con la ayuda de un psicrométrico se determinará estos valores.

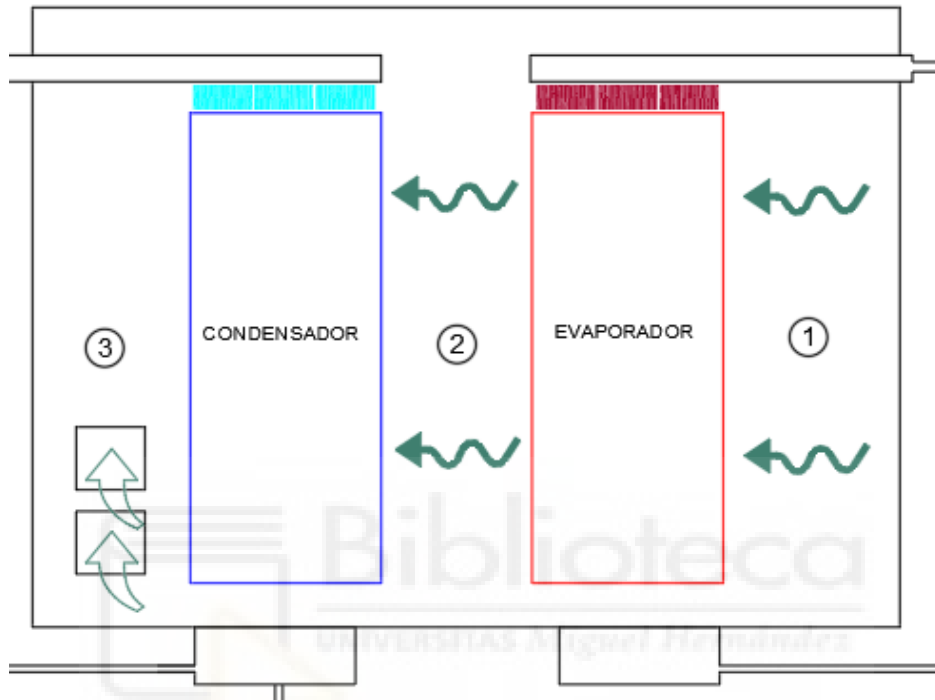


Figura 65. Representación de las zonas del interior del sistema

Como se muestra en la figura 65, en el interior del sistema se calcularán las humedades relativas y absolutas de los puntos 1, 2 y 3. En un ensayo de laboratorio donde la temperatura del baño de agua de la resistencia estaba a 45°C, se obtuvieron los siguientes datos.

PUNTO	ZONAS	T (°C) BULBO HÚMEDO	T (°C) BULBO SECO
1	ENTRADA EVAPORADOR	31,40	32,20
2	EVAPORADOR-CONDENSADOR	31,75	33,77
3	SALIDA CONDENSADOR	31,13	32,34

Tabla 3. Temperaturas de bulbo húmedo y seco en las zonas del sistema

A continuación, se calcularán los tres puntos en el diagrama psicrométrico.

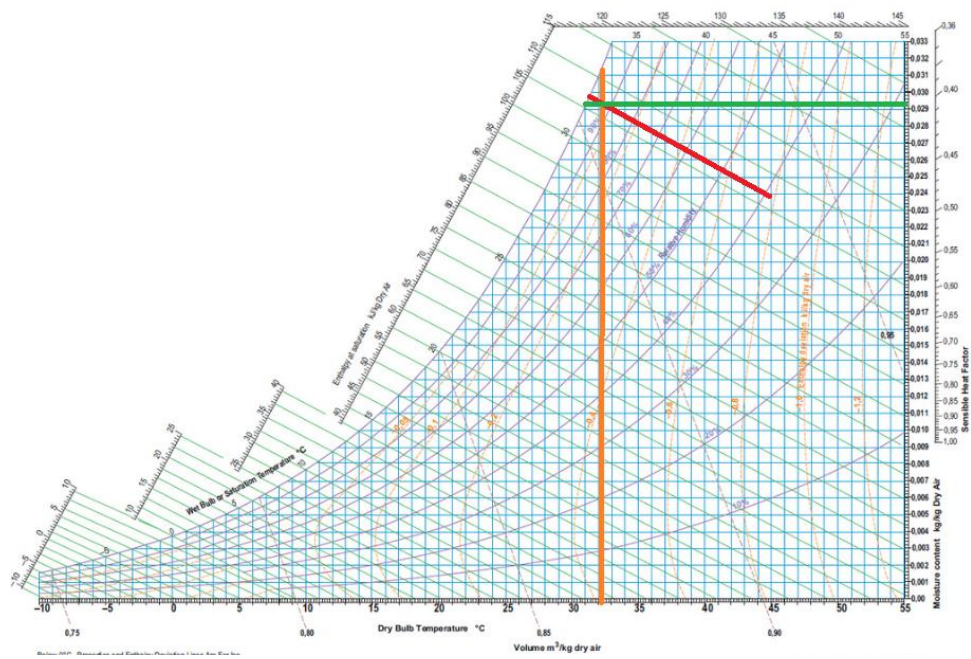


Figura 66. Representación psicrométrica punto 1

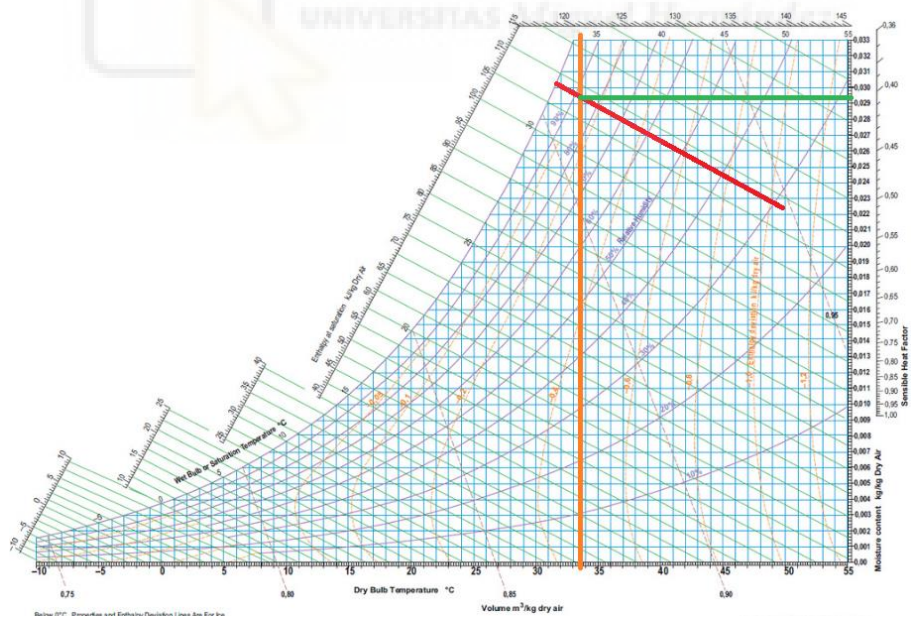


Figura 67. Representación psicrométrica punto 2

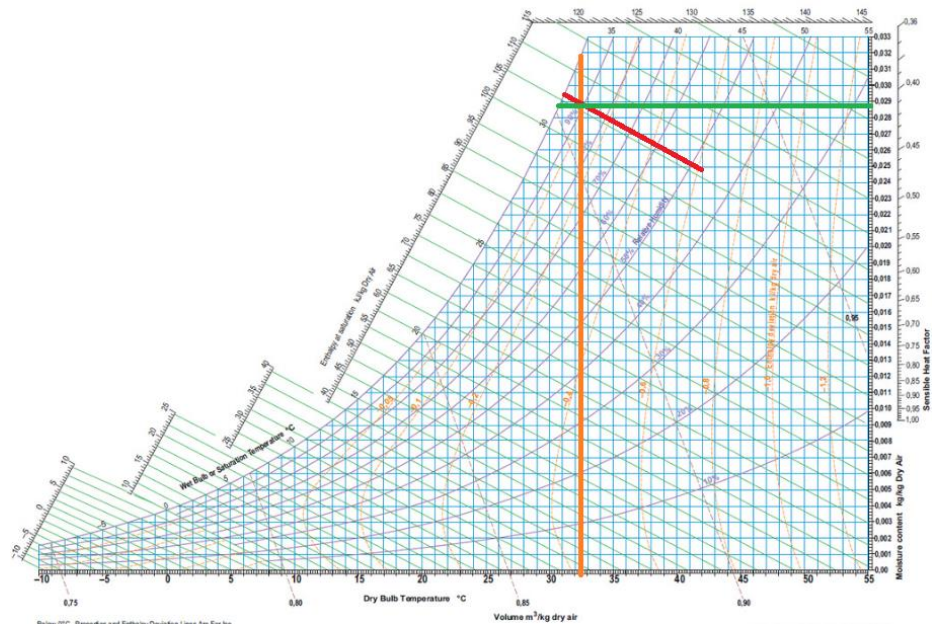


Figura 68. Representación psicrométrica punto 3

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla.

PUNTO	ZONAS	HUMEDAD RELATIVA (%)	HUMEDAD ABSOLUTA (Kg/Kg)
1	ENTRADA EVAPORADOR	95	0,0292
2	EVAPORADOR-CONDENSADOR	88	0,0293
3	SALIDA CONDENSADOR	90	0,0288

Tabla 4. Humedades absolutas obtenidas del ejemplo de cálculo psicrométrico

3.2. CALIBRACIÓN DE TERMOPARES

A la hora de realizar los balances y calcular la humedad absoluta para obtener el caudal de condensados es importante comprobar el error que existe entre los pares de termopares para obtener unos resultados correctos.

Al tener la humedad del aire muy alta, las temperaturas de bulbo húmedo y seco son muy parecidas por lo que un pequeño error de mediciones provoca resultados incoherentes. Por ello, se ha realizado una calibración de los termopares para obtener unos resultados más reales.

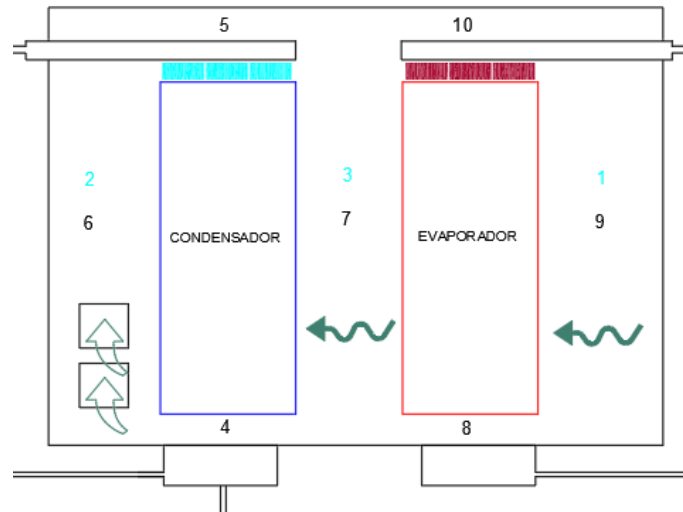


Figura 69. Representación de los 10 termopares interiores

En este caso, hay 4 termopares que se encargan de medir la temperatura de agua y 6 que miden la temperatura de aire. Para realizar la calibración se ha utilizado el método de comparación.

TERMOPAR	MEDIO	TEMPERATURA
1	aire	bulbo húmedo
2	aire	bulbo húmedo
3	aire	bulbo húmedo
4	líquido	agua
5	líquido	agua
6	aire	bulbo seco
7	aire	bulbo seco
8	líquido	agua
9	aire	bulbo seco
10	líquido	agua

Tabla 5. Clasificación de los termopares de aire y agua

El método de calibración por comparación es una técnica que se utiliza para calibrar termopares de manera relativa, en este proceso se someten los termopares al mismo medio, en este caso en un baño con regulación de temperatura, con ello se analiza la diferencia entre sus lecturas para determinar cuál de ellos presenta desviaciones.

El procedimiento para realizar la calibración es colocar los 10 termopares dentro del baño a diferentes temperaturas, en este caso a 40 °C, 45 °C, 50 °C, 55 °C y a 60 °C.



Figura 70. Vista de los 10 termopares introducidos dentro de un baño termo regulable

Una vez estabilizado el sistema, se registran simultáneamente las temperaturas en el Data Logger que posteriormente es exportado a Excel donde se realizan los cálculos de diferencias de temperatura y obtener un promedio. Esto permite verificar si el error entre ambos termopares es constante o varía con la temperatura. Este método de calibración permite identificar y corregir la diferencia relativa entre los pares de termopares. Sin embargo, este proceso no sería viable si no se consigue una homogeneidad térmica del medio y se realizan varias mediciones.

Los resultados obtenidos para una temperatura de 60 °C se reflejan en las siguientes tablas, de la misma forma se han obtenido todas las temperaturas mencionadas anteriormente.

REGISTROS	TERMOPARES									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	62,5	62,34	61,97	62,5	61,69	61,74	60,85	61,91	61,71	61,61
2	62,47	62,39	62	62,71	61,68	61,66	60,56	62,06	61,84	61,65
3	62,48	62,32	62,13	62,61	61,74	61,7	60,8	62,02	61,9	61,76
4	62,57	62,55	62,03	62,89	61,83	61,78	60,67	62,19	61,95	61,67
5	62,57	62,55	62,09	62,58	61,83	61,58	60,68	62,05	61,87	61,75
6	62,73	62,45	62,21	62,5	61,79	61,81	60,86	62,11	61,98	61,66
7	62,67	62,48	62,01	62,67	61,91	61,77	60,87	62,03	62	61,72
8	62,6	62,51	62,31	62,67	61,95	61,83	60,86	62,2	61,92	62,08
9	62,72	62,45	62,17	62,8	62,02	61,84	61	62,01	61,99	61,71
10	62,73	62,48	62,32	62,51	61,92	61,75	60,77	62,11	61,97	61,81
11	62,69	62,41	62,09	62,8	61,91	61,85	60,99	62,09	62	61,82
12	62,72	62,45	62,4	62,82	61,93	61,86	60,82	62,05	62,02	61,84
13	62,72	62,5	62,31	63	61,96	61,86	61	62,13	62	61,77
14	62,71	62,49	62,27	62,67	61,98	61,9	61,06	62,19	62,04	61,94

Tabla 6. Registro de temperaturas de calibración

En la tabla 6 se puede observar el registro de temperaturas en 14 lecturas de tiempo de cada termopar.

(10)-(8)	(4)-(5)	(9)-(1)	(7)-(3)	(2)-(6)	(6)-(9)	(7)-(9)	(2)-(1)	(3)-(1)	(2)-(3)	(6)-(7)
-0,298	0,81	-0,789	-1,117	0,594	0,03	-0,859	-0,165	-0,531	0,366	0,889
-0,411	1,027	-0,63	-1,437	0,728	-0,172	-1,276	-0,074	-0,469	0,395	1,104
-0,261	0,862	-0,58	-1,327	0,621	-0,199	-1,101	-0,158	-0,354	0,196	0,902
-0,516	1,054	-0,619	-1,364	0,768	-0,17	-1,279	-0,021	-0,534	0,513	1,109
-0,301	0,75	-0,7	-1,406	0,969	-0,282	-1,182	-0,013	-0,476	0,463	0,9
-0,45	0,71	-0,75	-1,346	0,632	-0,162	-1,114	-0,28	-0,518	0,238	0,952
-0,314	0,766	-0,661	-1,139	0,702	-0,23	-1,13	-0,189	-0,652	0,463	0,9
-0,114	0,716	-0,68	-1,45	0,681	-0,085	-1,058	-0,084	-0,288	0,204	0,973
-0,298	0,778	-0,735	-1,175	0,61	-0,151	-0,99	-0,276	-0,55	0,274	0,839
-0,305	0,59	-0,768	-1,55	0,733	-0,214	-1,198	-0,249	-0,416	0,167	0,984
-0,274	0,886	-0,687	-1,102	0,558	-0,146	-1,012	-0,275	-0,597	0,322	0,866
-0,209	0,891	-0,698	-1,574	0,589	-0,156	-1,195	-0,265	-0,319	0,054	1,039
-0,358	1,036	-0,716	-1,314	0,632	-0,141	-1,006	-0,225	-0,408	0,183	0,865
-0,256	0,689	-0,671	-1,21	0,594	-0,146	-0,986	-0,223	-0,447	0,224	0,84

Tabla 7. Registro de temperaturas de calibración

En la tabla 7, se puede ver la diferencia entre los pares de agua y aire dentro del sistema y comprobar cuanto es el error. Por último, una vez realizado todas las mediciones, se realiza un promedio de todas las diferencias entre pares para

comparar y comprobar si se mantienen constantes en todas las temperaturas. El resultado final de los promedios es el siguiente:

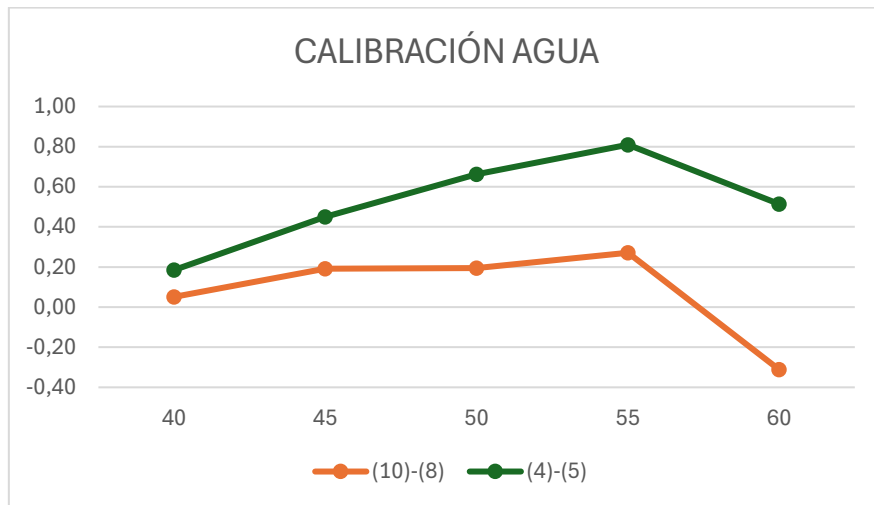


Figura 71. Gráfico de calibración del agua

Como se puede apreciar en la calibración de agua, la diferencia del termopar (10)-(8) mantiene una pendiente estable hasta que llega a los 60 °C, por otro lado, los termopares (4)-(5) tienen una pendiente ascendente y al igual que el anterior par cuando llega a los 60 °C se produce un pico de diferencia.

A continuación, se muestra los resultados obtenidos de la diferencia de error en la calibración de los termopares de medición de la temperatura del aire.

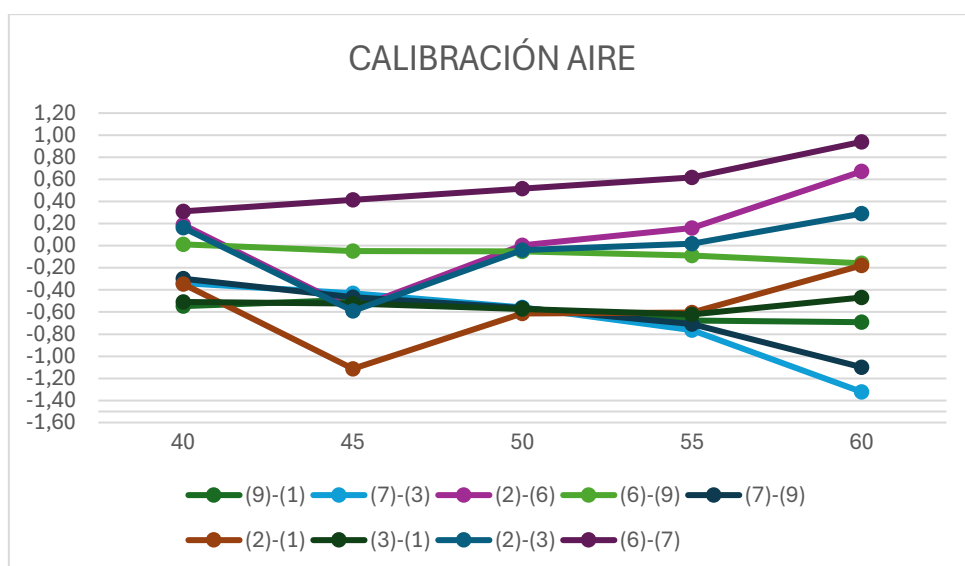
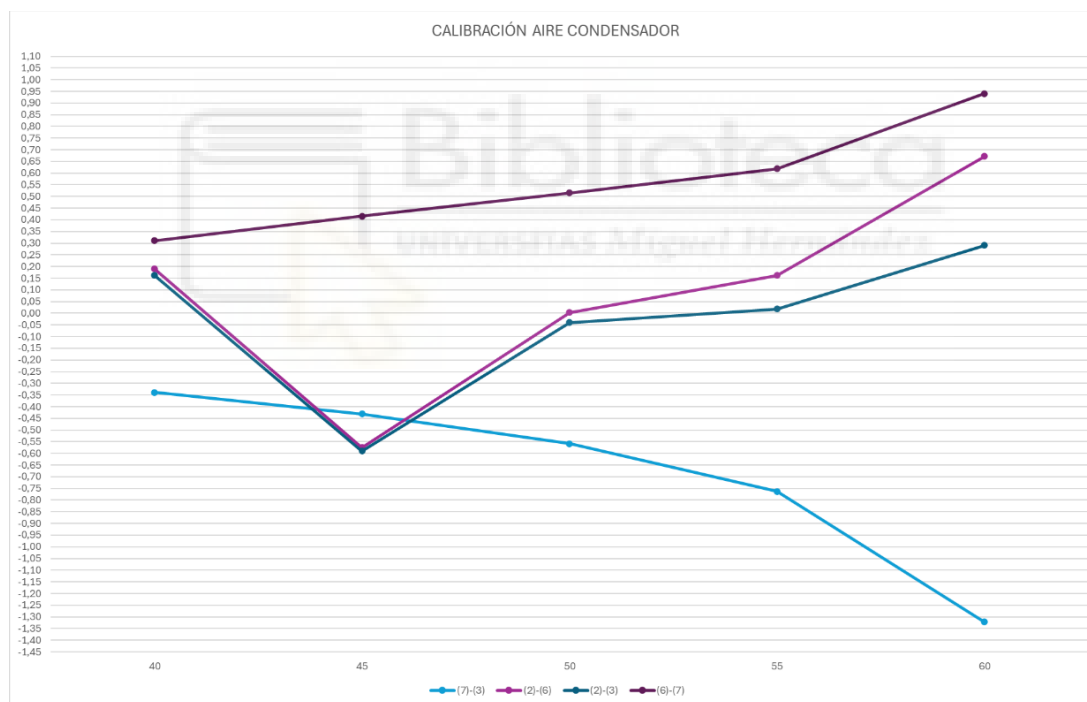
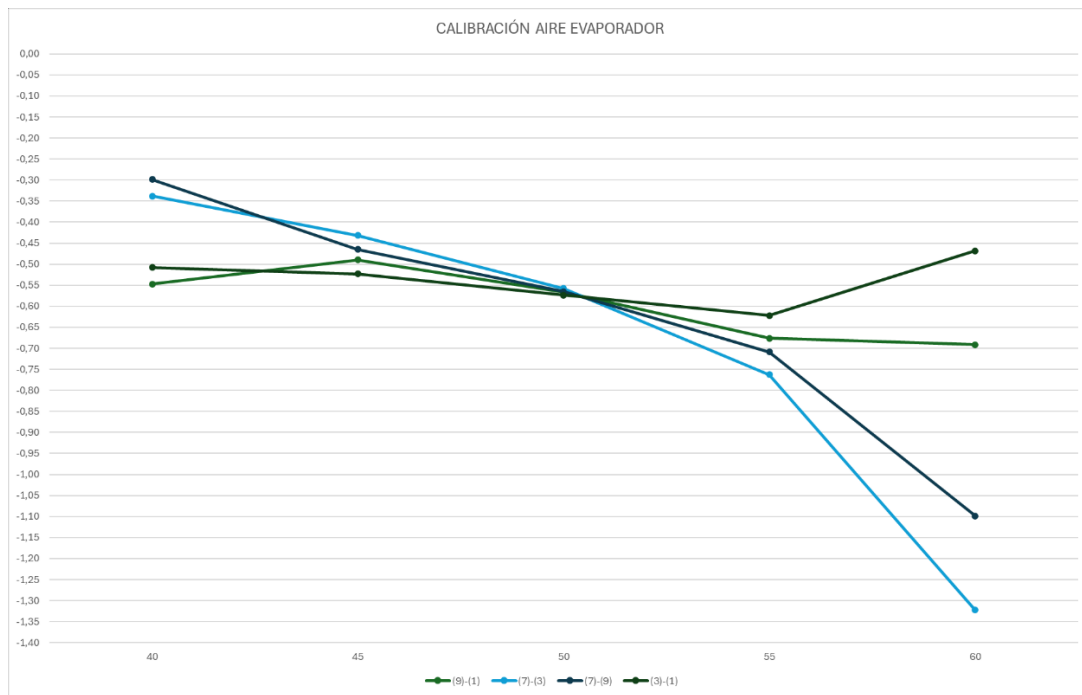


Figura 72. Gráfico de calibración del aire



Figuras 73 y 74. Gráficos de calibración del aire del evaporador y condensador

Como se representa en las figuras 73 y 74, la diferencia entre los termopares que intervienen en el evaporador mantiene una recta descendente casi lineal hasta que llegan hasta los 60 °C, donde se puede observar un pico en comparación con el resto de los datos. En cambio, en los termopares que intervienen en el condensador dos de ellos el (2)-(3) y el (2)-(6) presentan un pico a 45 °C, después mantienen una

pendiente ascendente. El par que mejor se comporta es el (6)-(7), donde se puede apreciar una recta lineal con pocos picos, excepto cuando llega a los 60°C. Con esto se puede afirmar que cuando llega a temperaturas más altas aumenta el error en los termopares.

Con estos resultados se puede comprobar la diferencia que existe en los pares de termopares, con ello se puede corregir el error que afecta al cálculo de los balances del sistema.

TEMPERATURA (°C)	(10)-(8)	(4)-(5)	(9)-(1)	(7)-(3)	(2)-(6)	(6)-(9)	(7)-(9)	(2)-(1)	(3)-(1)	(2)-(3)	(6)-(7)
40	0,05	0,13	-0,55	-0,34	0,19	0,01	-0,30	-0,35	-0,51	0,16	0,31
45	0,19	0,26	-0,49	-0,43	-0,57	-0,05	-0,47	-1,11	-0,52	-0,59	0,42
50	0,20	0,47	-0,57	-0,56	0,00	-0,05	-0,57	-0,61	-0,57	-0,04	0,52
55	0,27	0,54	-0,68	-0,76	0,16	-0,09	-0,71	-0,60	-0,62	0,02	0,62
60	-0,31	0,83	-0,69	-1,32	0,67	-0,16	-1,10	-0,18	-0,47	0,29	0,94

Tabla 8. Calibración final de los termopares





Biblioteca

CAPÍTULO 4: RESULTADOS DE
LABORATORIO

4.1. RESULTADOS OBTENIDOS DE ENSAYOS CON CORRECCIONES

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, el procedimiento que se ha seguido a la hora de realizar todos los ensayos ha sido el mismo.

En primer lugar, se rellena de agua los depósitos ubicados en la base de los paneles evaporativos, se humedecen los termopares de bulbo húmedo y se comprueba que estén todos los termopares en buen estado, comprobándolos en el Data Logger. El segundo paso es encender las bombas del sistema y la resistencia del baño de agua, cuando la entrada al evaporador tenga una temperatura estable se inicia el ensayo, registrando todas las temperaturas de los termopares en el ordenador mediante un software que representa todas las temperaturas del Data Logger. Además, durante la duración de los ensayos se registran los volúmenes de condensados con sus respectivos tiempos.

El objetivo de los ensayos es variar la temperatura del agua de la entrada al evaporador con saltos de temperatura de entre 5 a 10 °C, registrando de este modo la variación de las temperaturas dentro del equipo y midiendo en cada instante el caudal de condensados que se obtiene, con todo ello finalmente se conoce el rendimiento del equipo y el comportamiento en diferentes condiciones de trabajo.

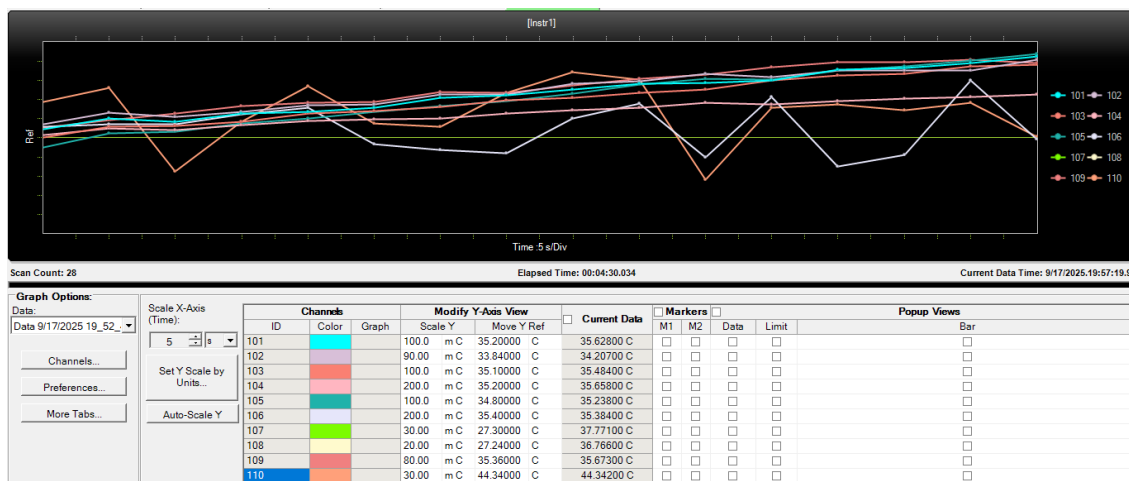


Figura 75. representación del registro de temperaturas del Data Logger

	TERMOPARES									
ENSAYO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	31,80	31,59	32,25	31,22	28,59	31,46	34,40	34,54	31,63	40,06
2	33,04	32,76	33,50	32,42	29,41	32,69	35,79	35,85	32,78	42,02
3	34,63	34,42	35,15	33,97	30,44	34,12	37,69	37,46	34,34	44,75
4	35,97	35,70	36,54	35,30	31,33	35,02	39,47	38,42	35,77	47,59
5	37,52	37,10	38,08	36,68	32,17	36,52	41,32	40,13	37,27	50,47
6	38,34	37,22	38,67	36,79	32,04	36,83	43,22	41,27	38,32	54,45

Tabla 9. Ejemplo de registro de temperatura del Data Logger

En la tabla 9 se muestra un ejemplo de registro de temperaturas en Excel para realizar los cálculos, los termopares están numerados según su posición en el equipo que se muestra en la figura 49.

Durante los ensayos se ha trabajado con diferentes situaciones, variando el caudal de aire, habiendo uso de uno o dos ventiladores, también se ha realizado ensayos variando el tiempo de recogida de caudales entre 10 y 20 min, además, se ha estudiado el sistema en caso de fallo de los ventiladores de refrigeración del condensador. Por último, se han realizado ensayos con agua salada comprobando como varía el comportamiento y estudiando la conductividad en cada tramo.

Todos los cálculos de los ensayos se han realizado en Excel, donde se han calculado todas las fórmulas que aparecen en el apartado 2.6. cálculo de balances del prototipo HDT. Además, se ha calculado las entalpías y humedades absolutas con las temperaturas registradas en el Data Logger con ayuda de un software vinculado a las propiedades psicrométricas del aire húmedo.

Psicrometría		
Datos		
Unidades:	<input checked="" type="radio"/> SI	<input type="radio"/> Ing.
Parámetros	Valor	Unidad
Temperatura:	42	C
Temp. b. húmedo:	41.3	C
Humedad relativa:	95.83797851141	%
Punto de rocío	41.16937673347	C
Altitud SNM	0.0	m
<input type="button" value="Calcular"/>		
Resultados		
Presión Atmosférica	1.013238759799	bar
Pv sat	82.07945770637	mbar
Pv	78.66329303892	mbar
Humedad absoluta	0.052353790582	kg/kg
Entalpía	177.1408383464	kJ/kg
Volumen específico	0.966898727384	m3/kg

Figura 76. Software para cálculo de humedad absoluta y entalpía

Las propiedades utilizadas en los cálculos de los ensayos han sido caudales de agua de las bombas y de aire, las propiedades del aire y agua.

CAUDALES DE AGUA	l/h	kg/s
EVAPORADOR (qe)	122	0,03389
CONDENSADOR (qc)	119	0,03306
RESISTENCIA (qR)	115	0,03194
VENTILADORES (RADIADOR)	120	0,03333

CAUDAL DE AIRE	m ³ /s	kg/s
EVA-CON (qe)	0,05	0,0600
VENTILACIÓN ENFRIAMIENTO	0,15	0,1800

PROPIEDADES DEL AGUA	VALOR	UNIDADES
CALOR ESPECÍFICO	4,18	kJ/kg*K
DENSIDAD DEL AGUA	1000	kg/m ³

PROPIEDADES DEL AIRE	VALOR	UNIDADES
CALOR ESPECÍFICO	1	kJ/kg*K
DENSIDAD DEL AGUA	1,2	kg/m ³

Tabla 10. Propiedades y caudales de cálculo

A continuación, se mostrarán los resultados obtenidos en cada situación aplicando las respectivas correcciones de los termopares.

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

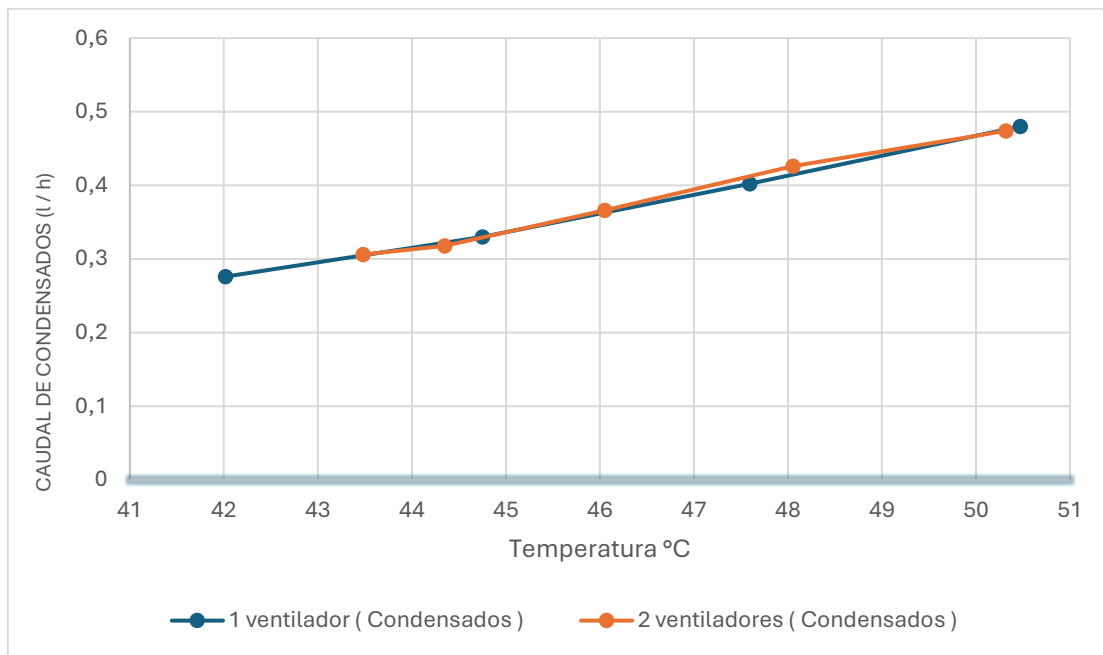


Figura 78. Representación del caudal de condensados cada 10 min

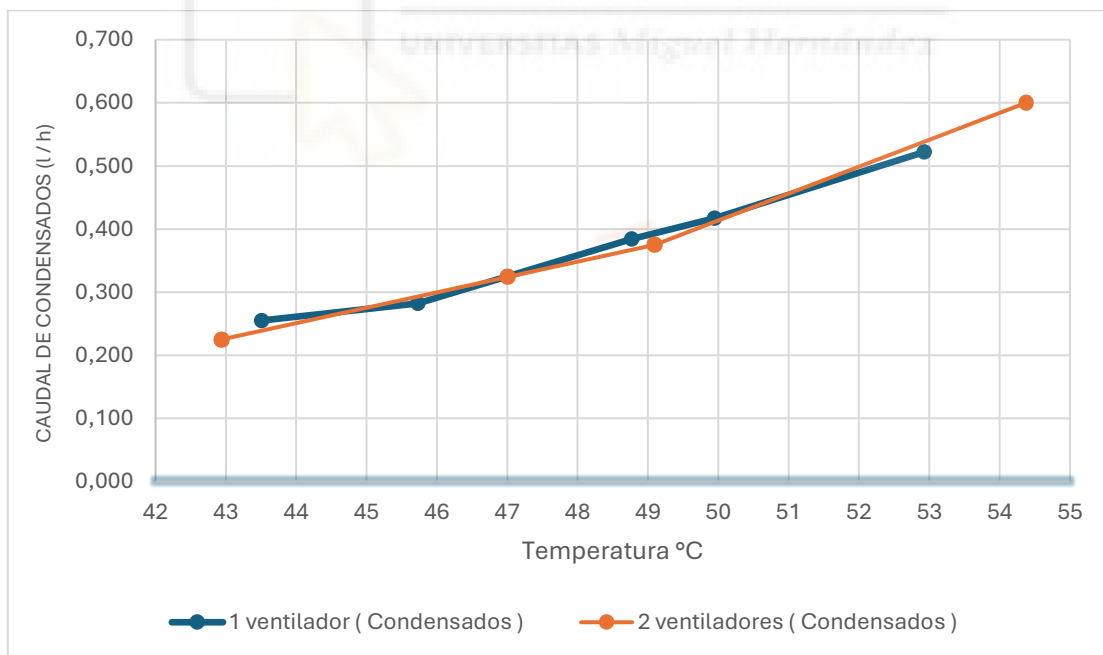


Figura 79. Representación del caudal de condensados cada 20 min

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:

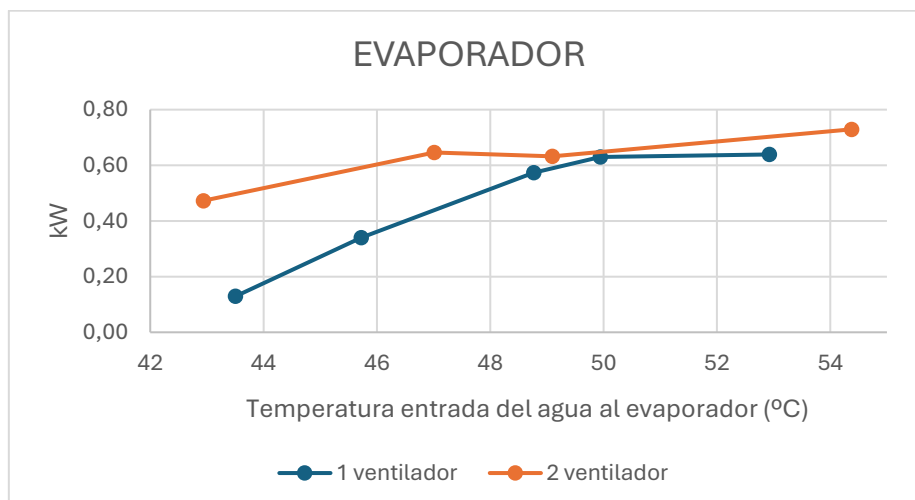


Figura 80. Representación de pérdidas de energía en el evaporador

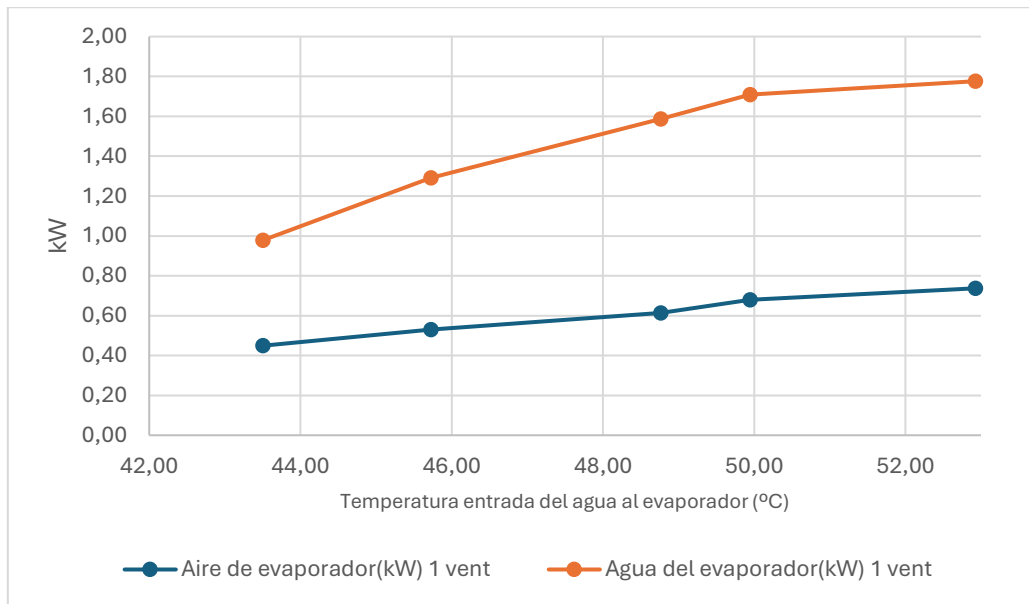


Figura 81. Representación de la energía del agua y aire en el evaporador (1 vent)

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:

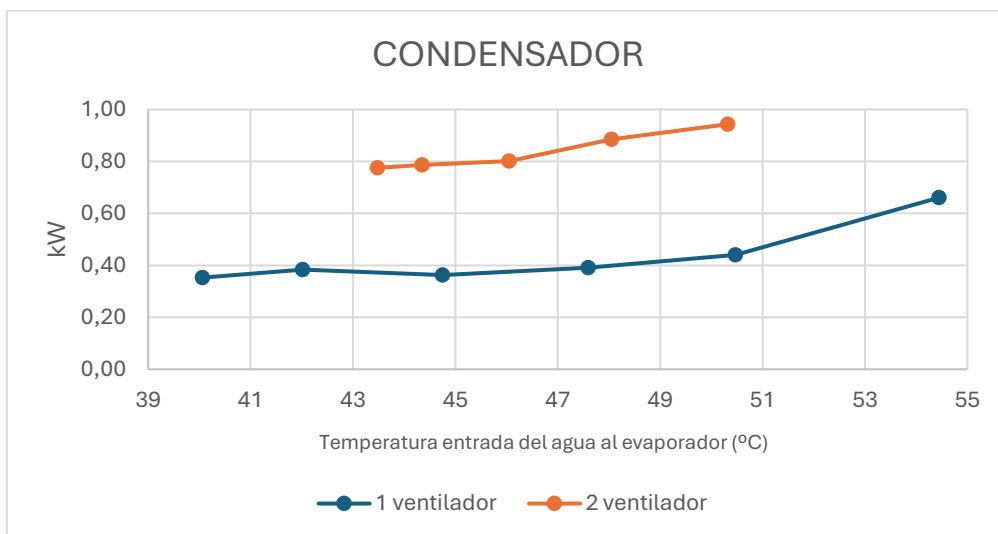


Figura 82. Representación de pérdidas de energía en el condensador

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.

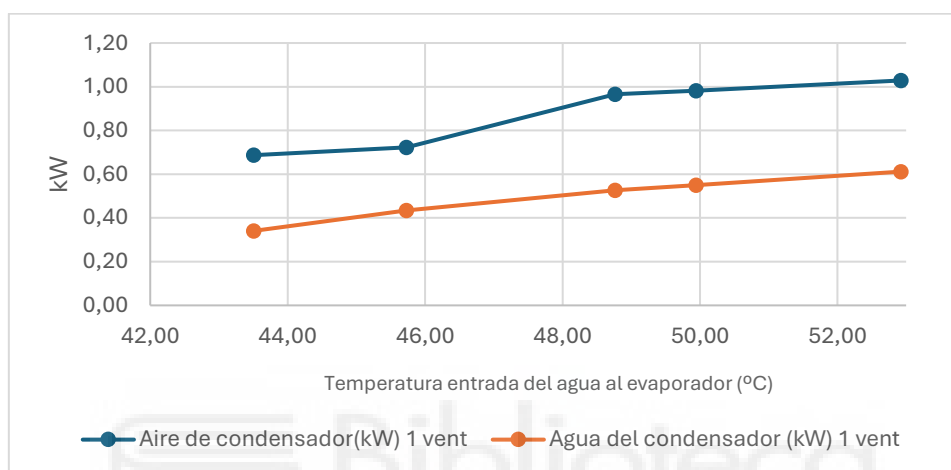


Figura 83. Representación de la energía del agua y aire en el condensador (1 vent)

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.

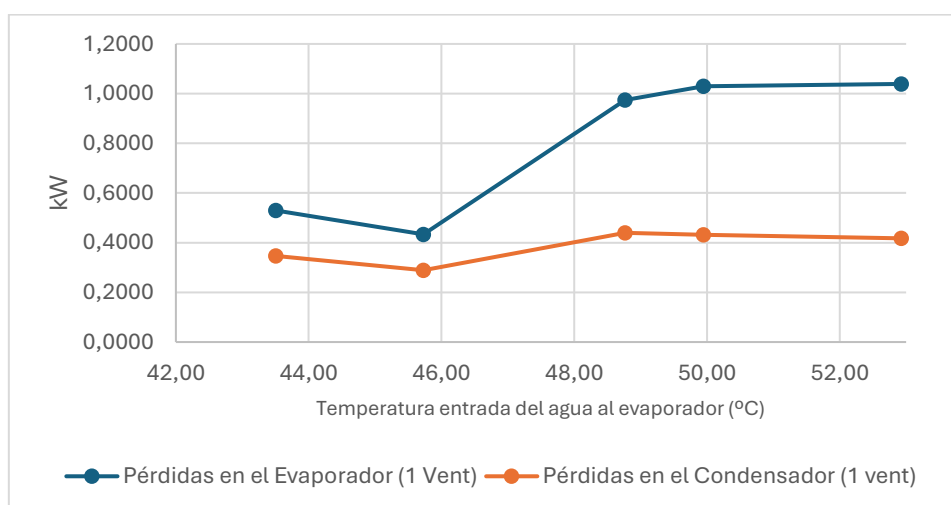


Figura 84. Representación de la energía pérdida en el evaporador y condensador (1 vent)

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:

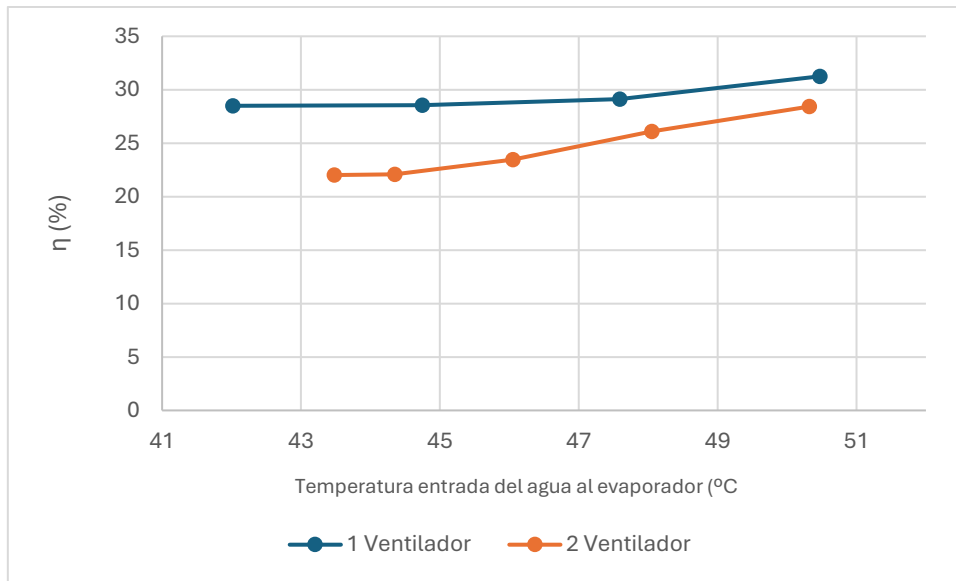


Figura 85. Representación del rendimiento cada 10 min

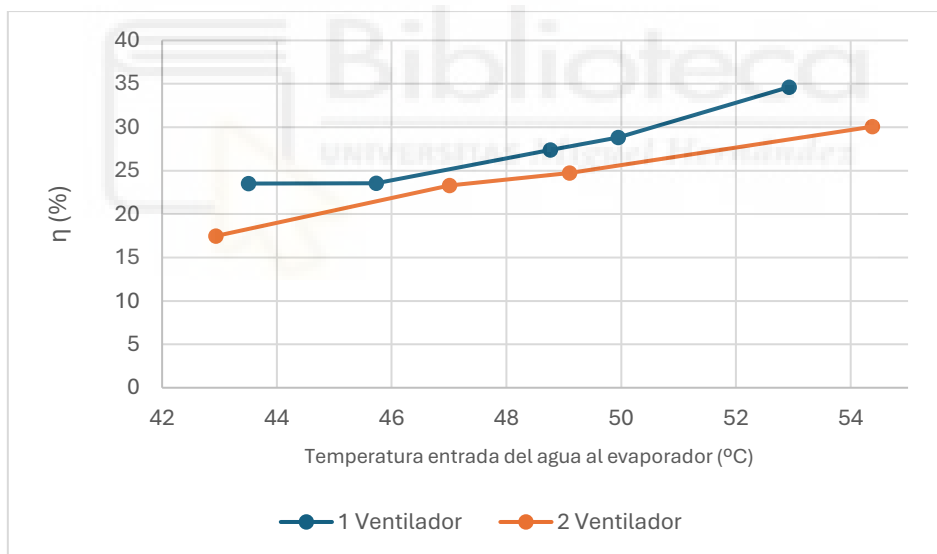


Figura 86. Representación del rendimiento cada 20 min

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.

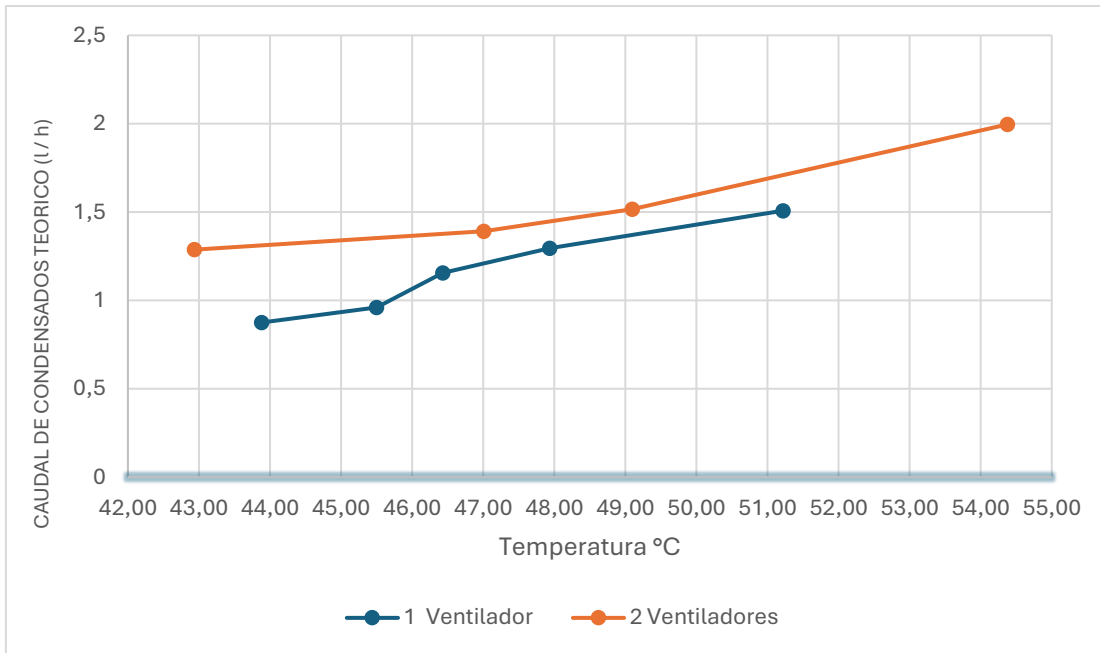


Figura 87. Representación el caudal teórico de condensados

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.

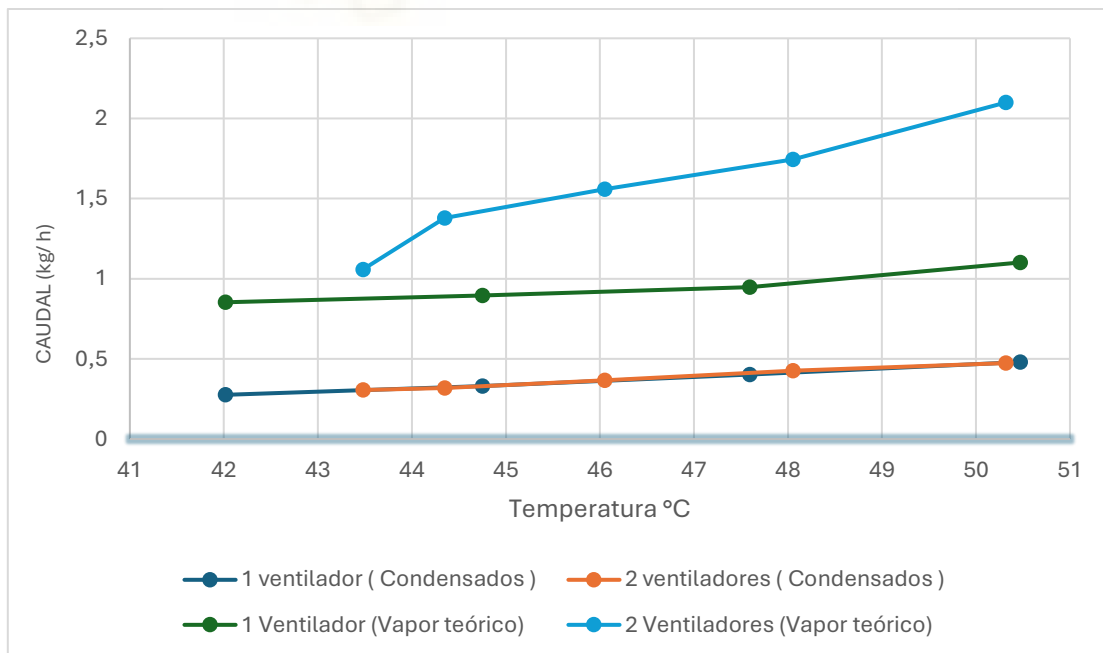


Figura 88. Representación del caudal de vapor teórico y caudal de condensados real

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)	Qin (kW)	mc (kg/s)	hlg(kJ/kg)	mc * hlg (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:

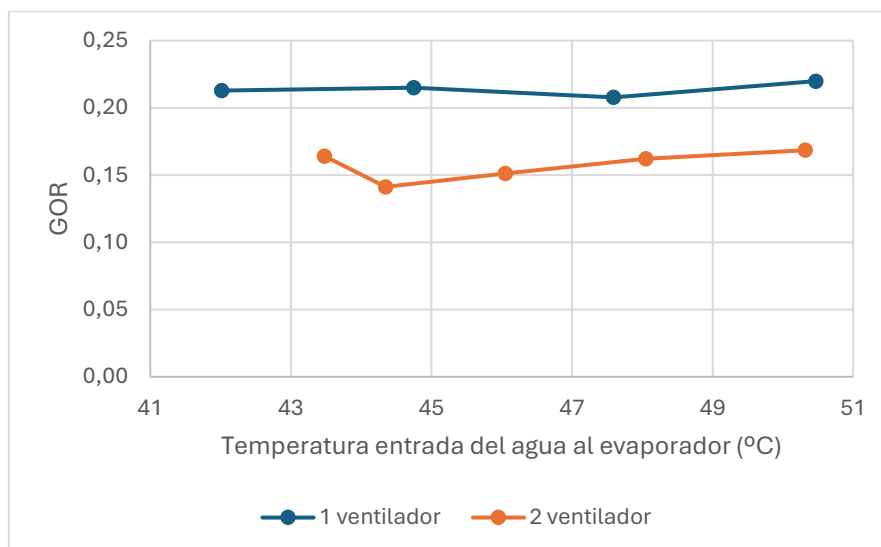


Figura 89. Representación de la eficiencia cada 10 min

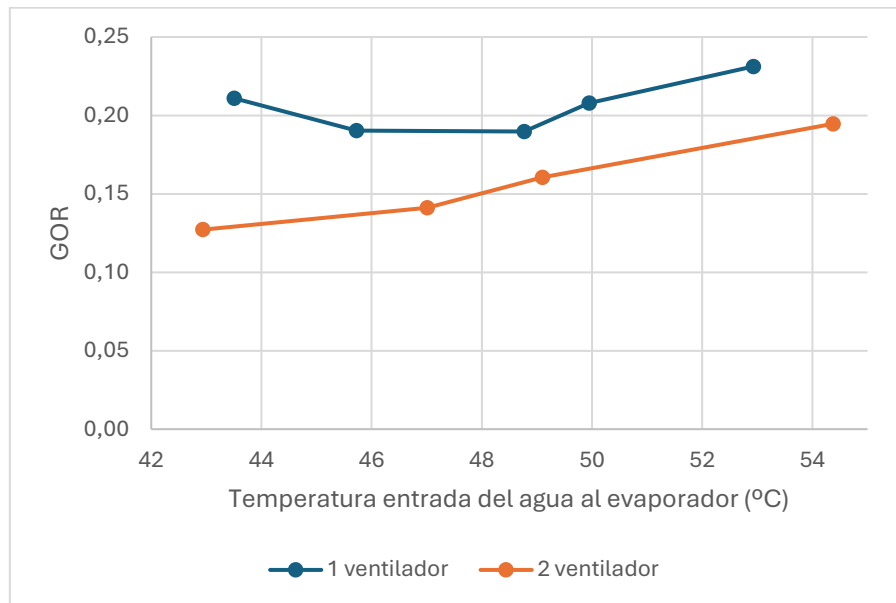


Figura 90. Representación de la eficiencia cada 20 min

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.

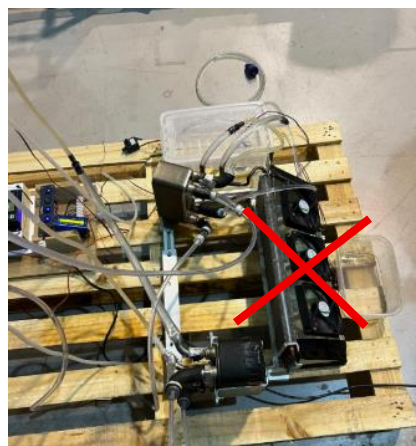


Figura 91. Vista del sistema de refrigeración del condensador

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.

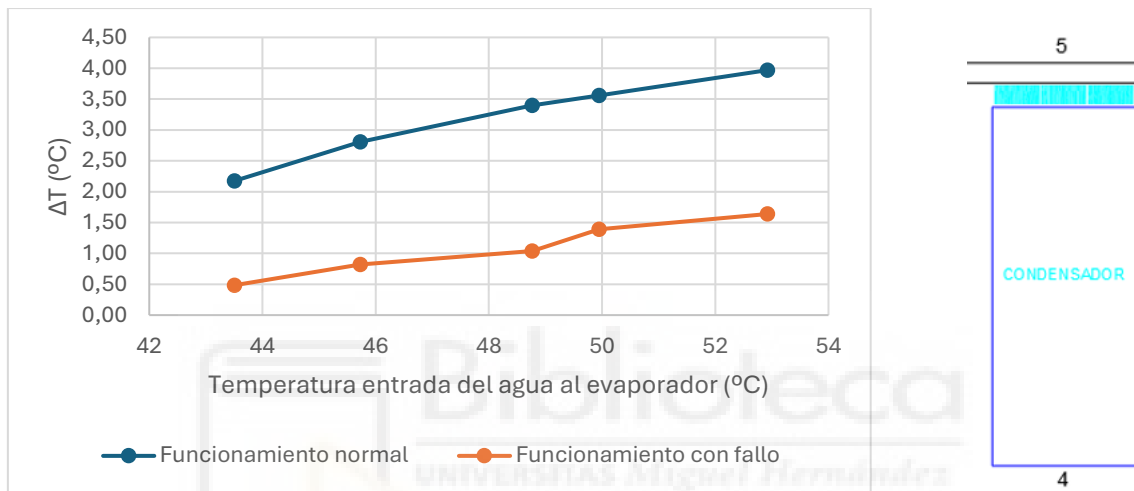


Figura 92. Variación de temperatura de agua entre el punto 5 y 4 del condensador

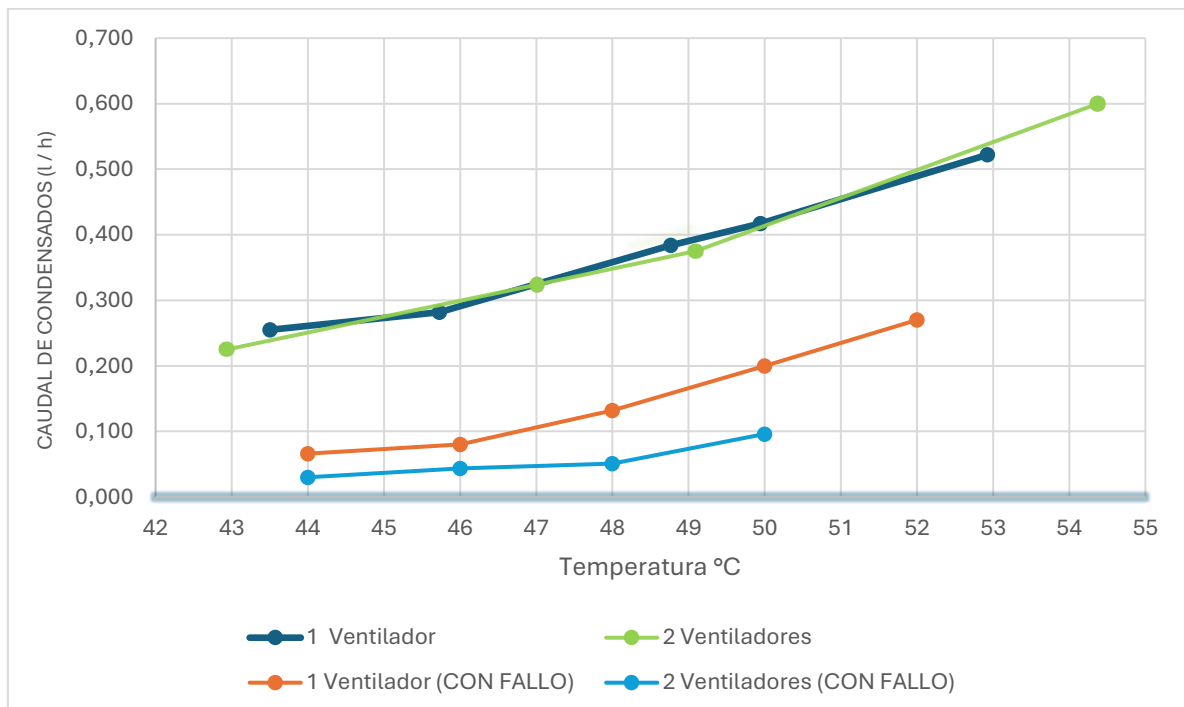


Figura 93. Representación de la comparación de obtención de condensados

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.

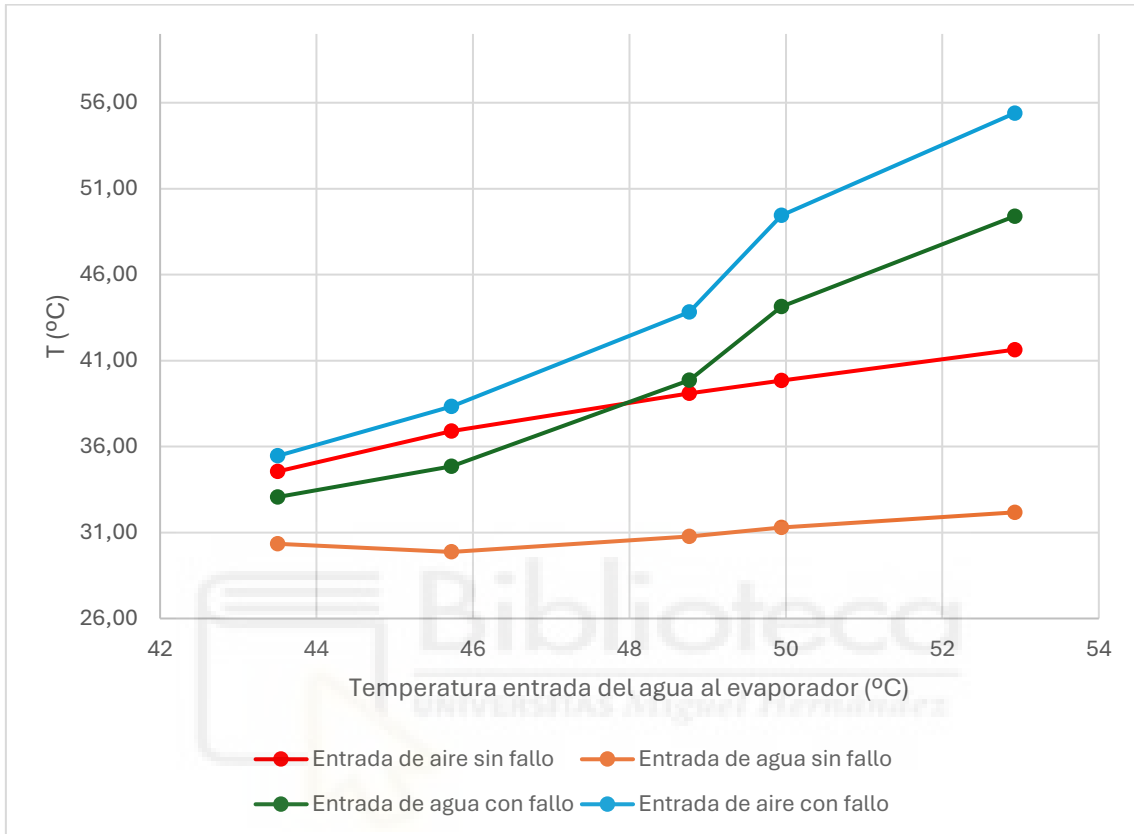


Figura 94. Representación de las temperaturas de entrada de agua y aire en el condensador

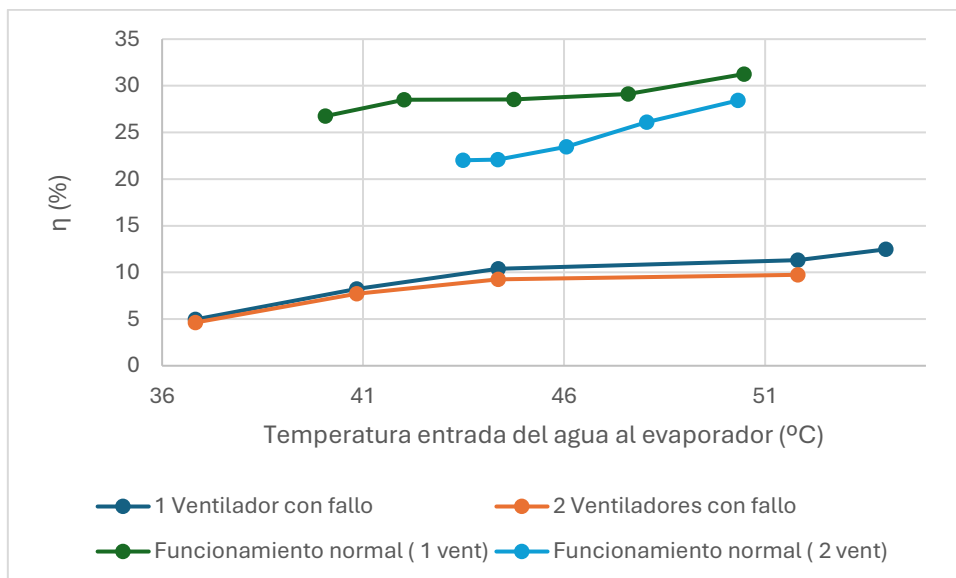


Figura 95. Representación del rendimiento con funcionamiento normal y sin refrigeración

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

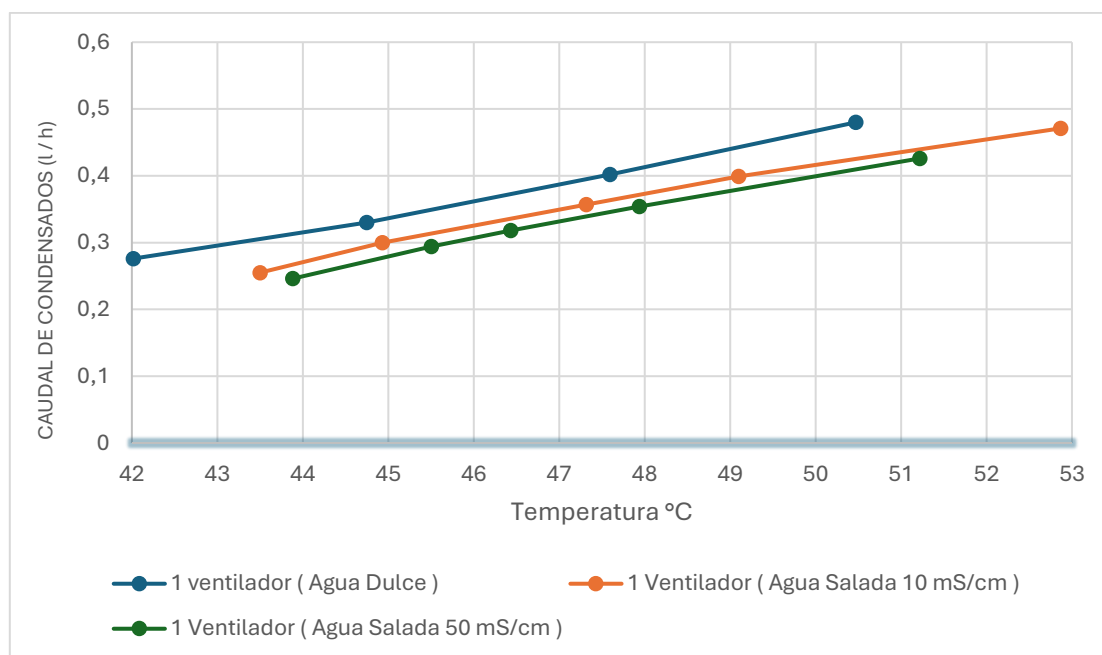


Figura 97. Representación de caudales de condensados con agua salada y dulce

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.

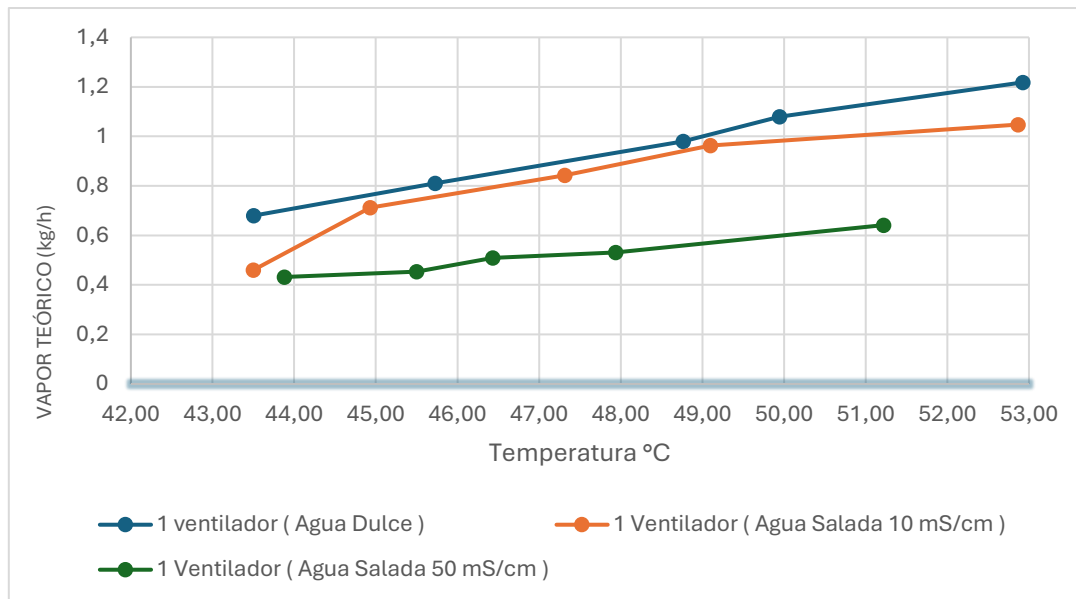


Figura 98. Representación de caudales de vapor teóricos con agua salada y dulce

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.

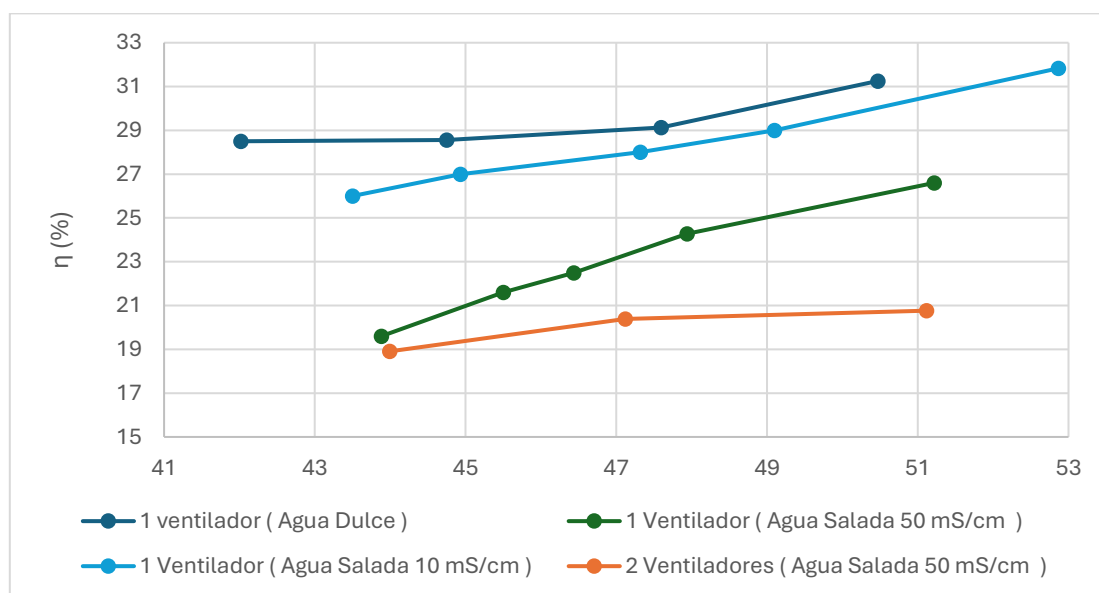


Figura 99. Representación del rendimiento con agua salada y dulce

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.

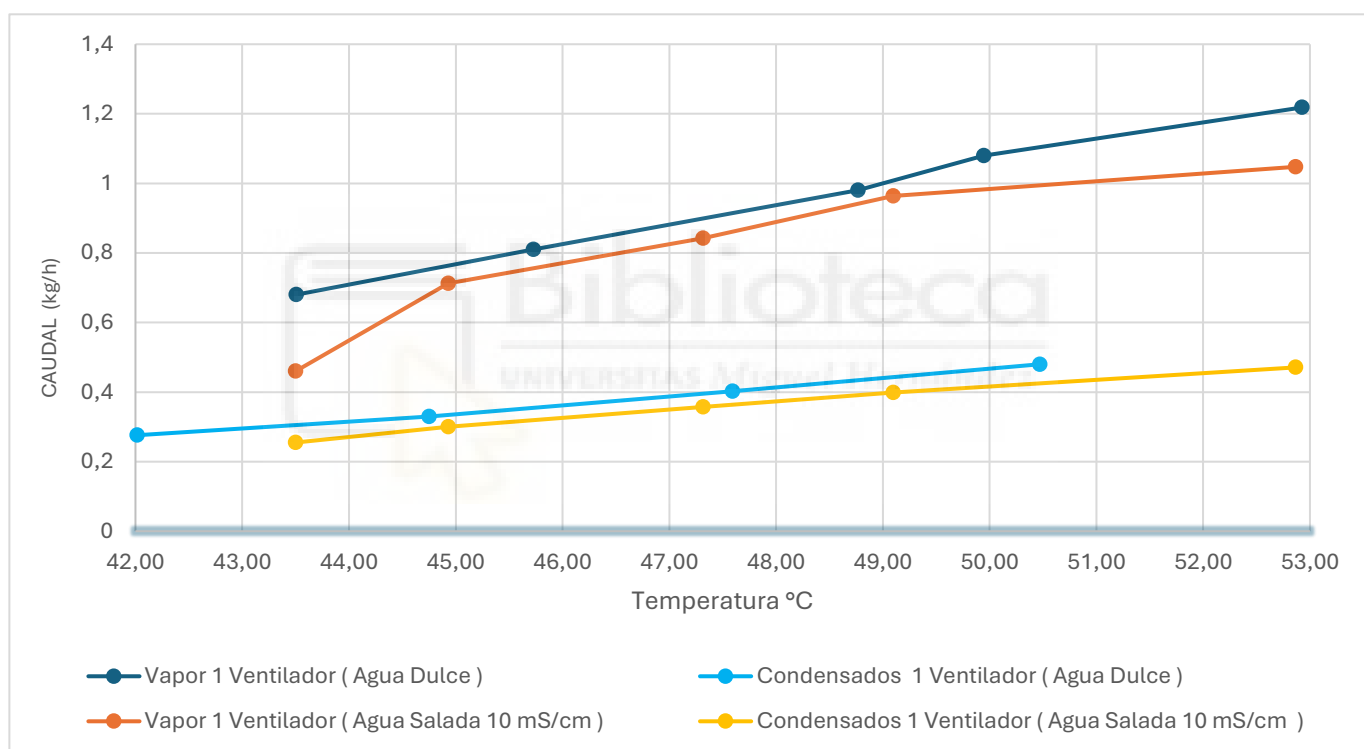


Figura 100. Representación de caudales de vapor y condensados con agua salada y dulce (1 ventilador)

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.

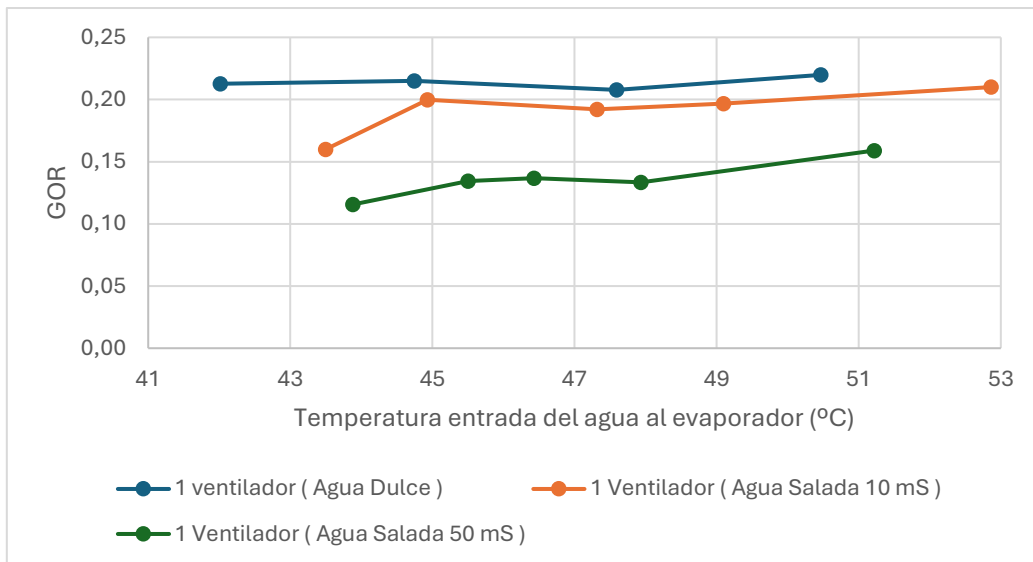


Figura 101. Representación del GOR con agua salada y dulce (1 ventilador)

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

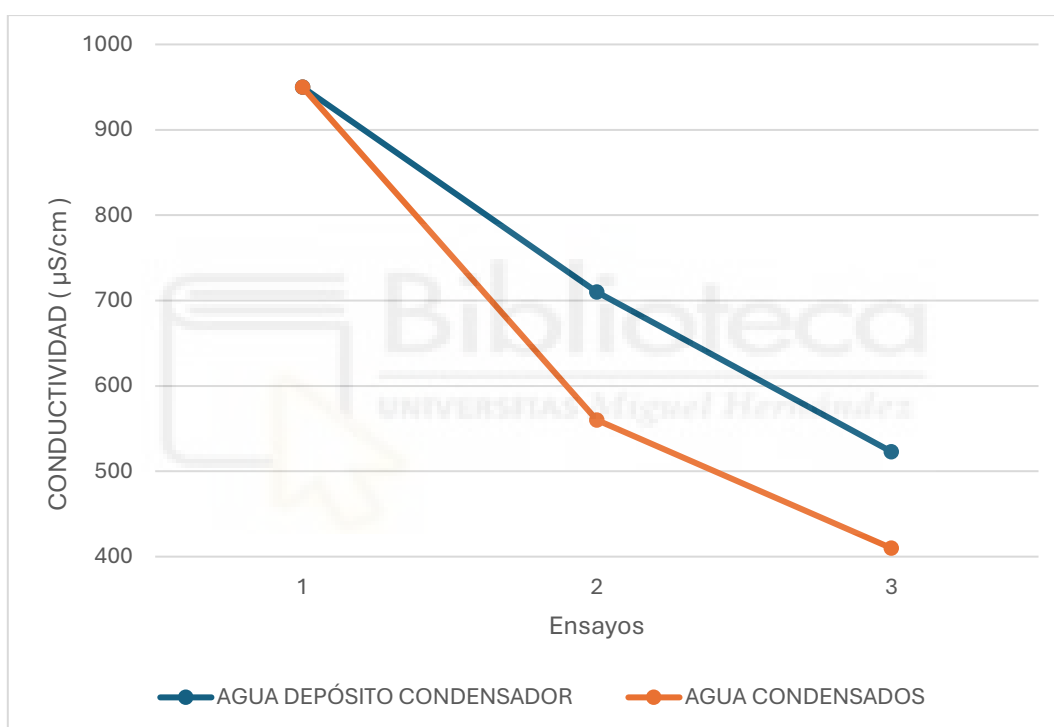


Figura 103. Representación de la conductividad en el condensador y recogida de condensados

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.

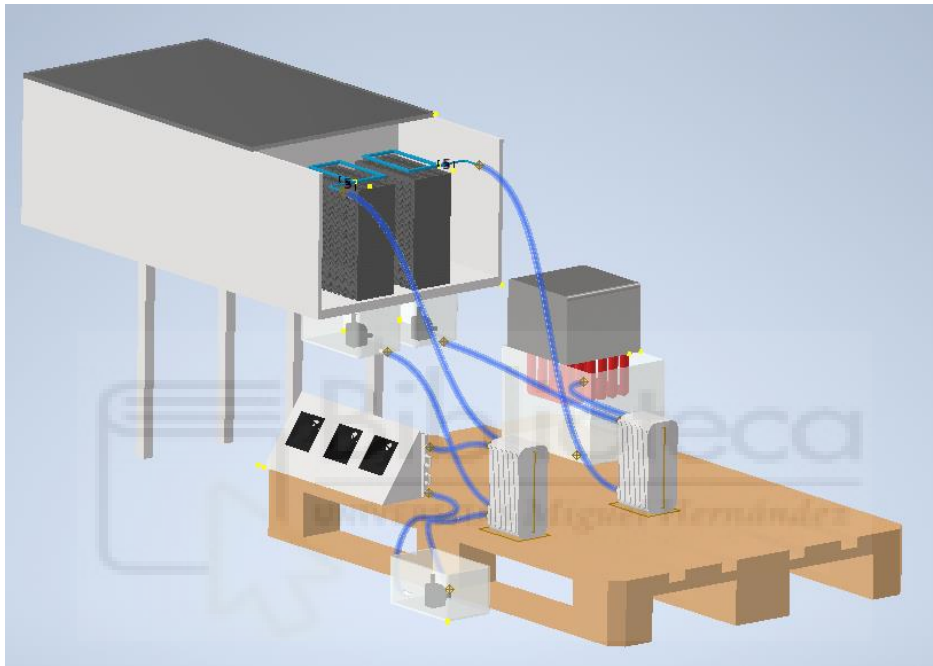


Figura 106. Representación 3D del sistema actual

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.

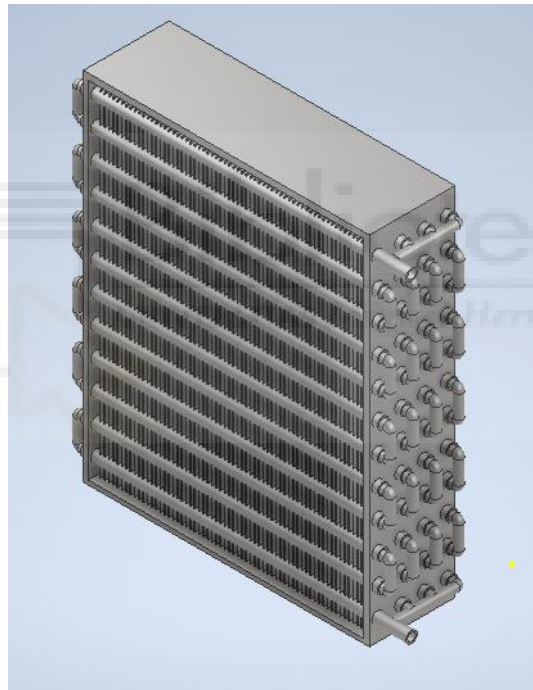


Figura 108. Diseño 3D Intercambiador aire-agua como propuesta de mejora

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.

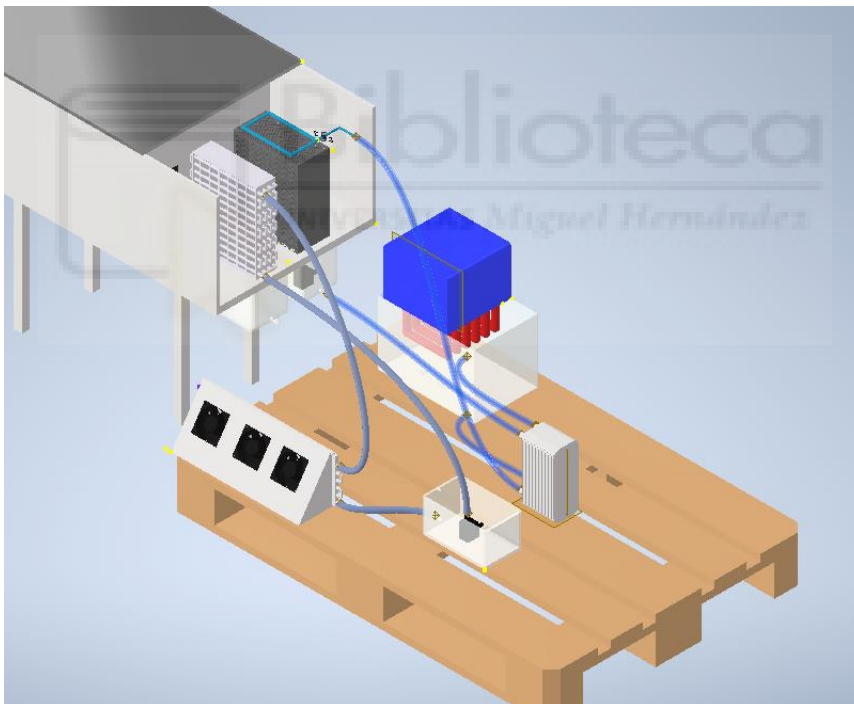


Figura 109. Modelo 3D de la propuesta de mejora con un intercambiador de acero inoxidable

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.

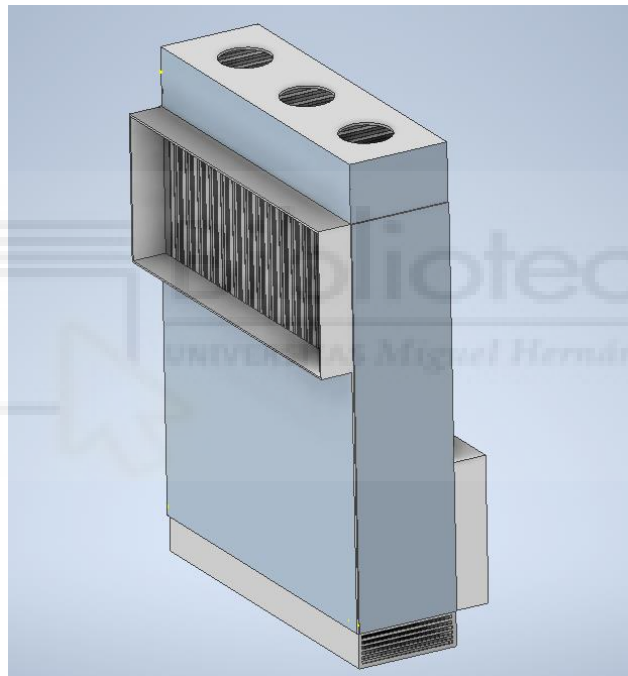


Figura 110. Modelo 3D del intercambiador aire-aire

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.

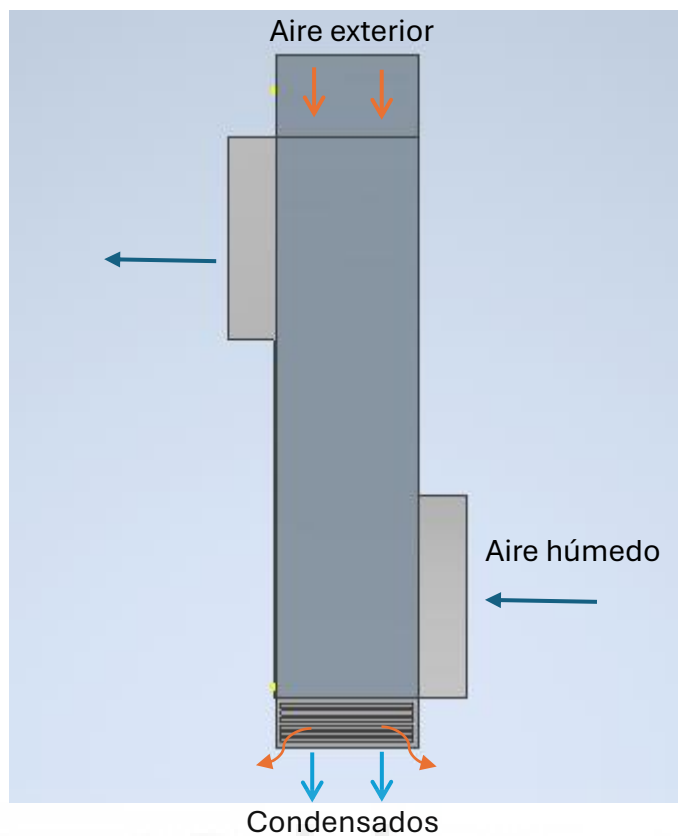


Figura 111. Modelo 3D del intercambiador aire-aire con flujos de aire

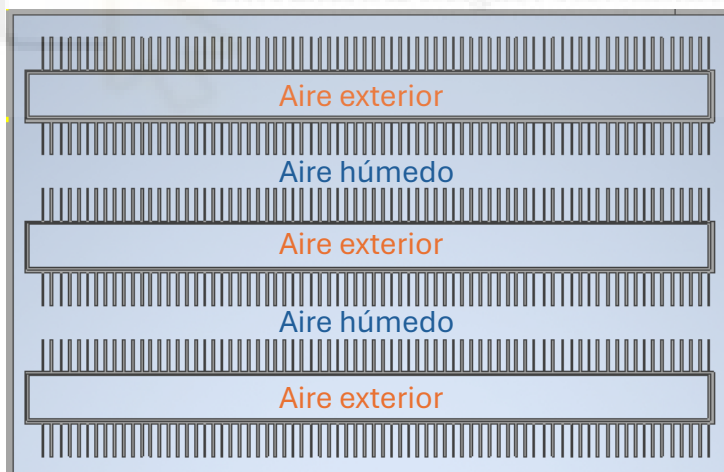


Figura 112. Interior del intercambiador aire-aire con separación de flujos de aire

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.

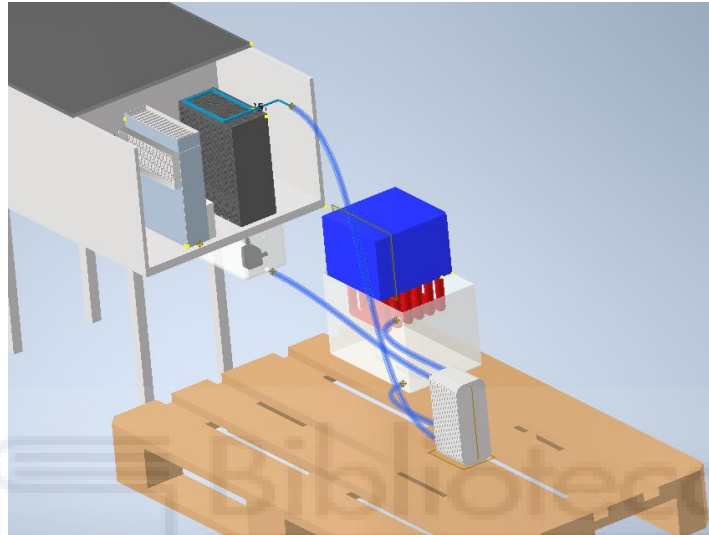


Figura 113. Modelo 3D con el intercambiador aire-aire

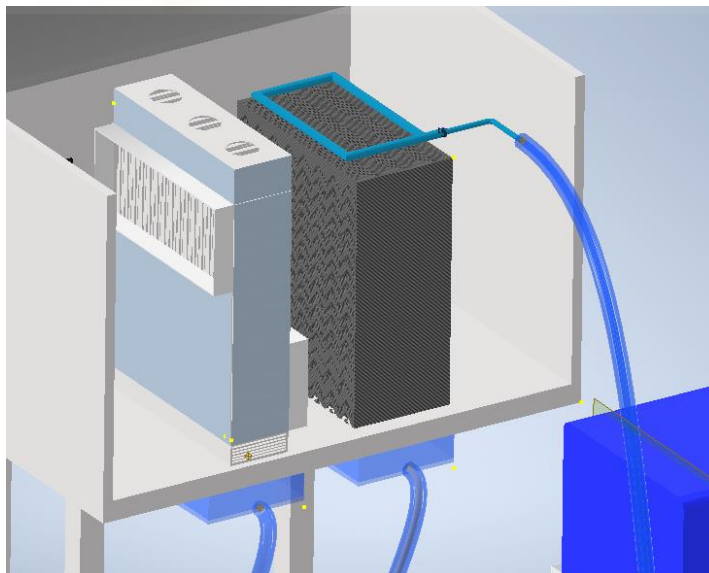


Figura 114. Modelo 3D con el intercambiador aire-aire ampliada

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.

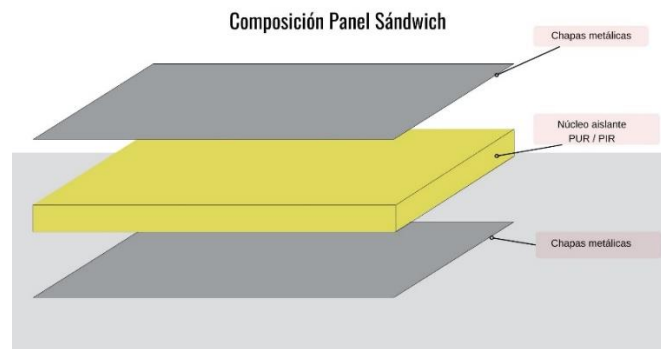


Figura 120. Representación de la propuesta de panel sándwich

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.

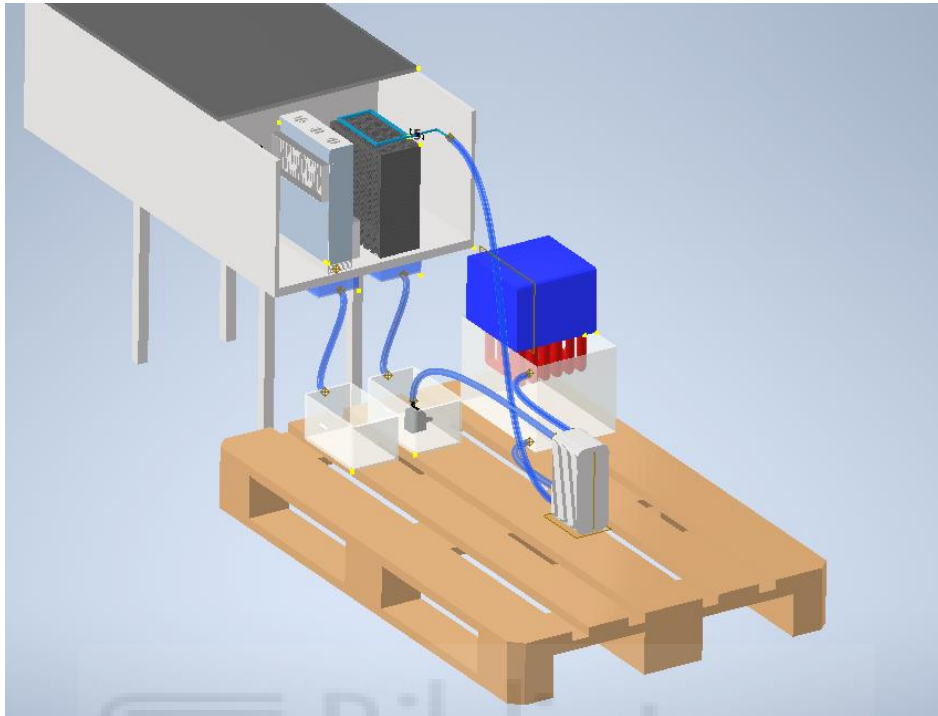


Figura 122. Modelo 3D con depósitos sobre pallet con suministro continuo de agua salada

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.

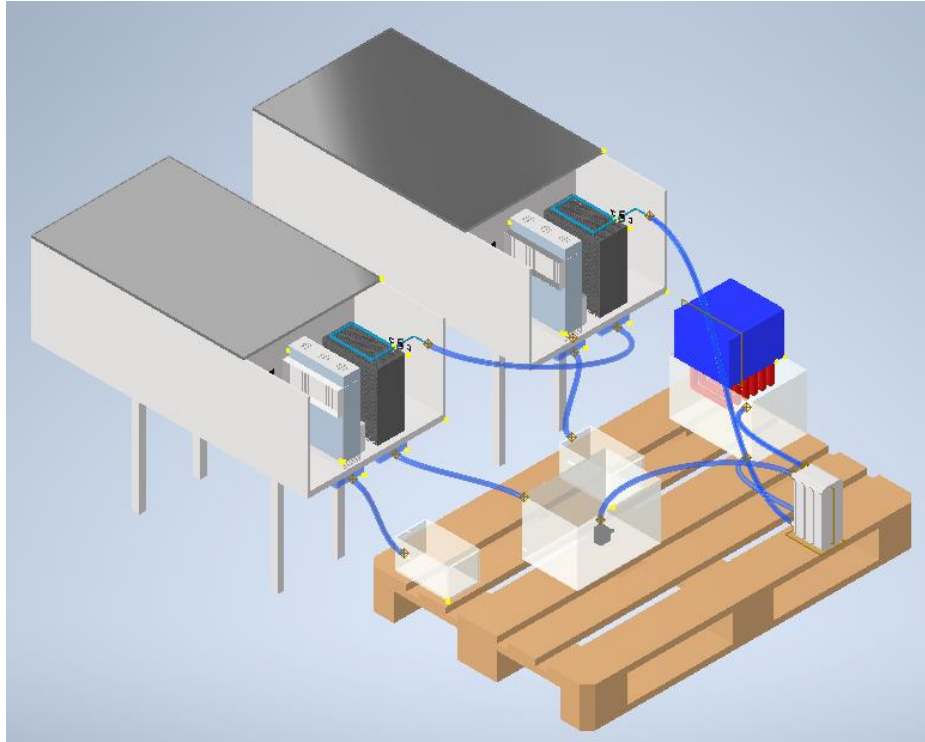


Figura 123. Modelo 3D propuesta de equipo multietapa

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.

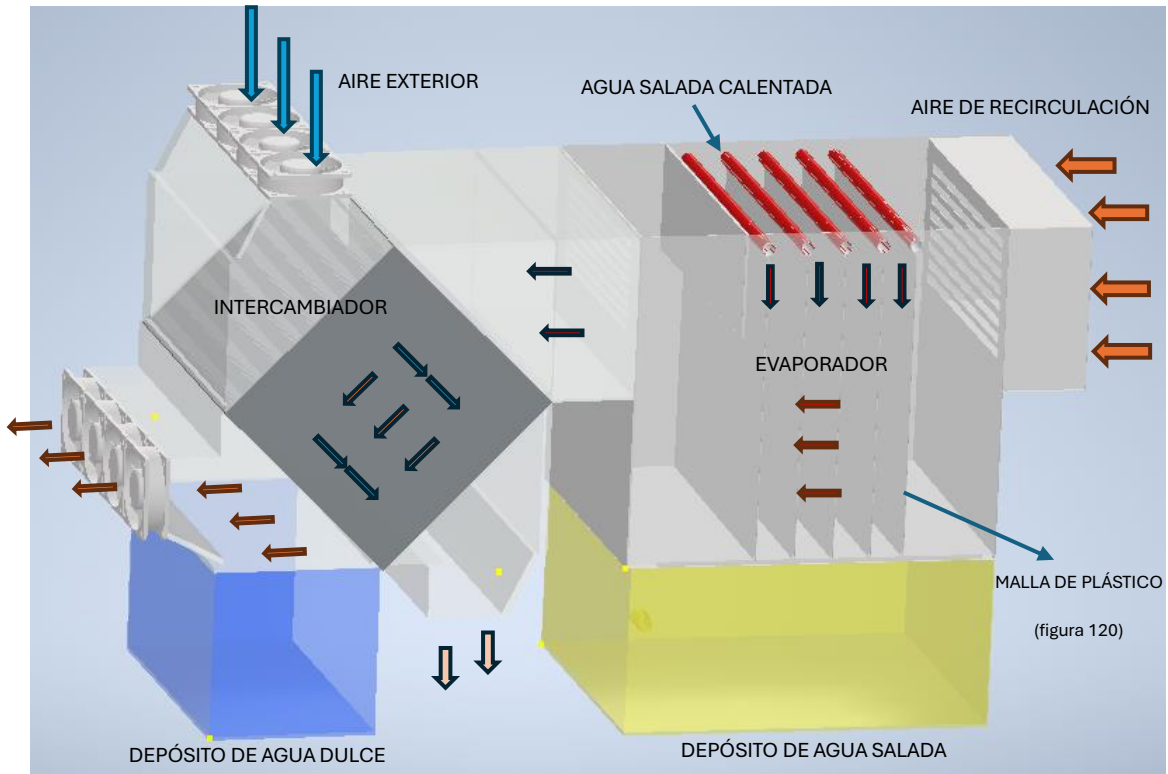


Figura 124. Modelo 3D propuesta de equipo mejorado



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.

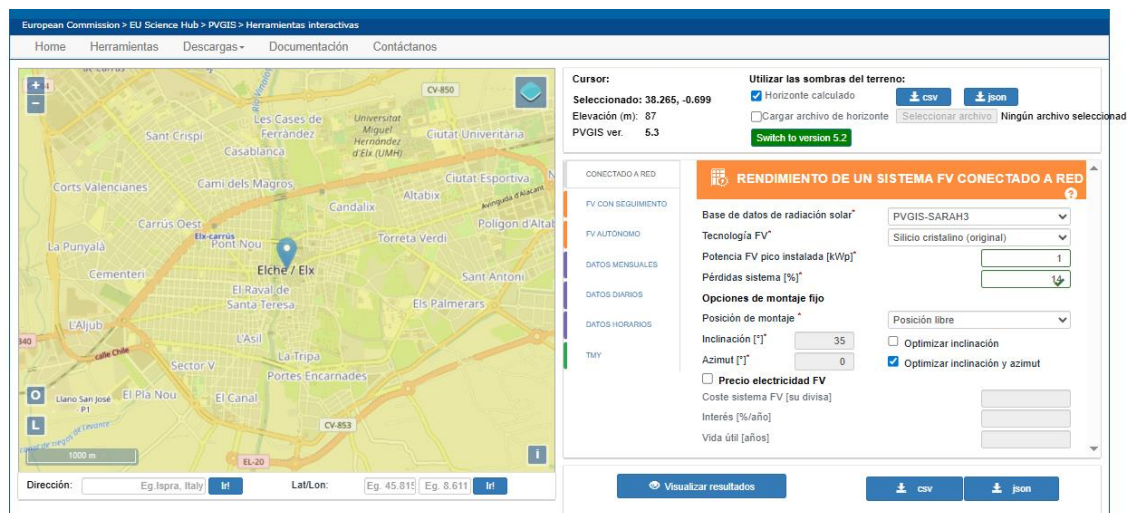


Figura 126. Software PVGIS

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.

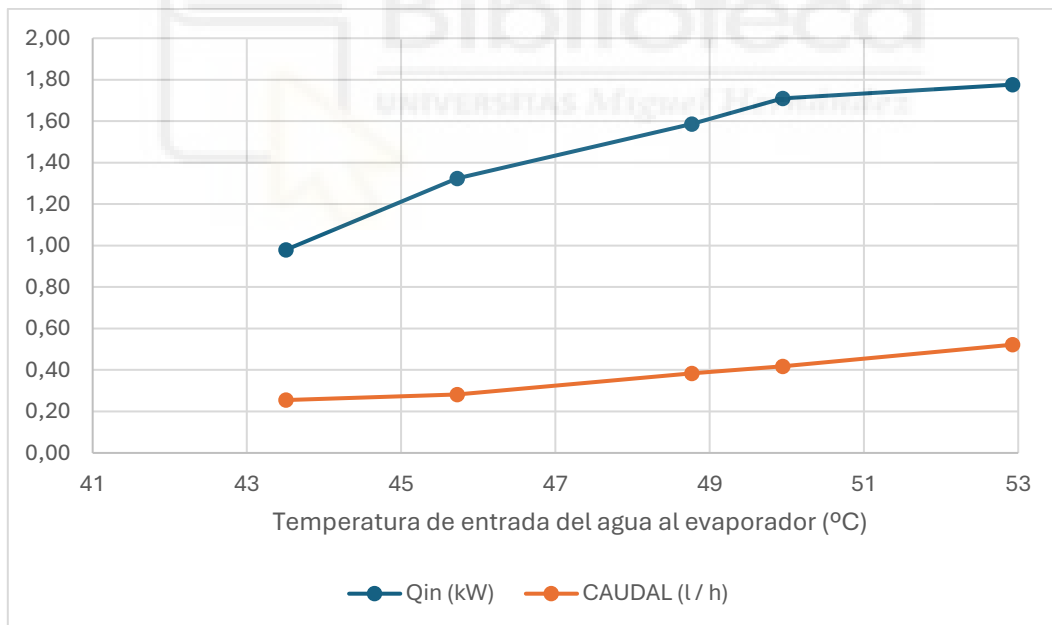


Figura 128. Resultados de energía necesaria para producir condensados

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.

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

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

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

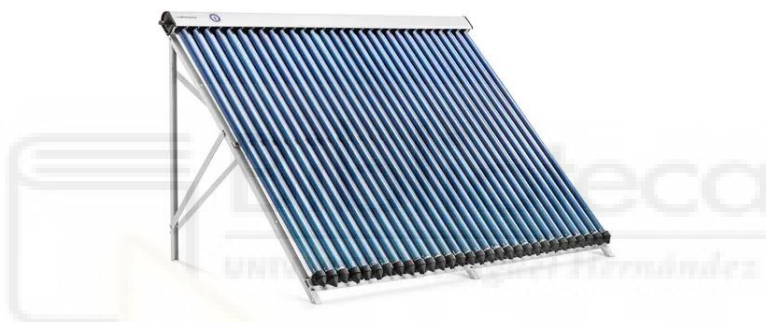


Figura 129. Colector solar de 3,26 m²

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.

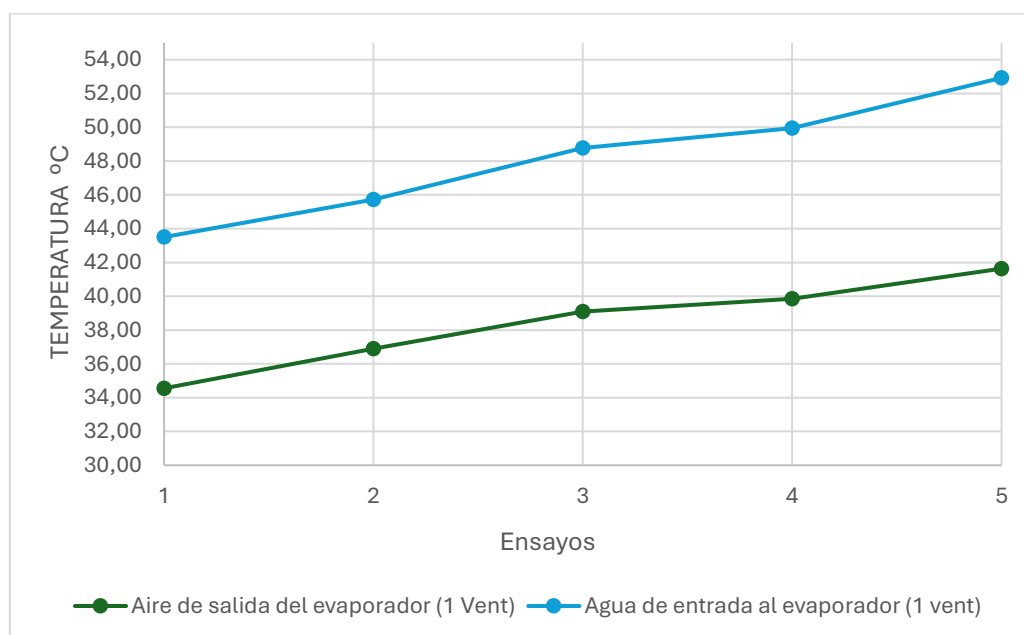


Figura 104. Representación de la temperatura de entrada del agua y salida del aire del evaporador

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.

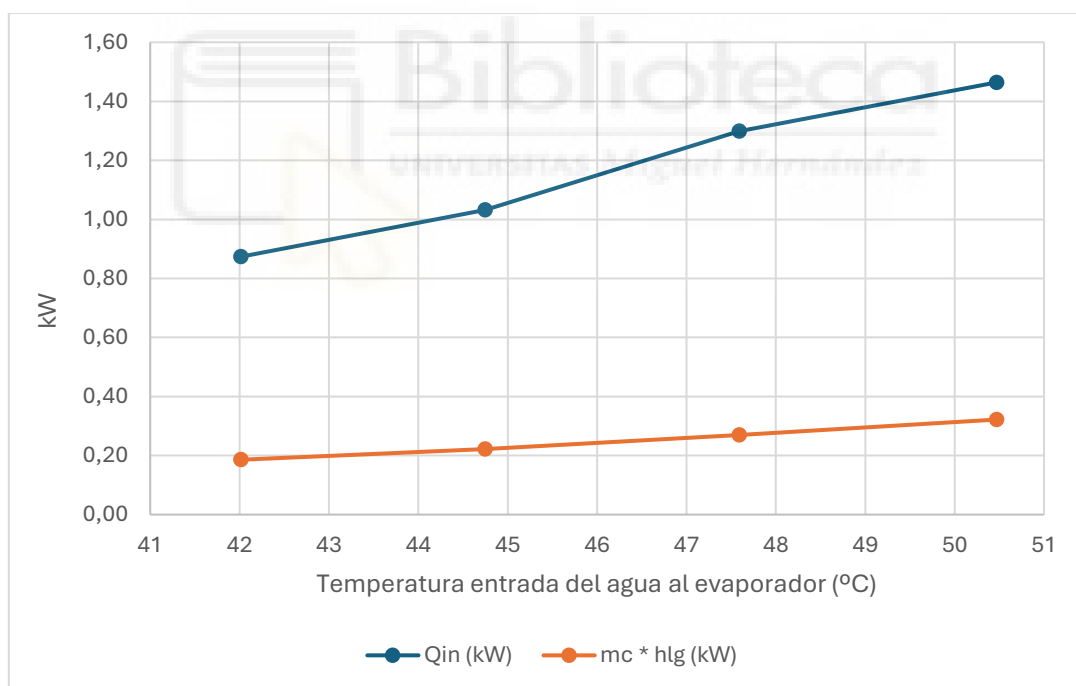


Figura 105. Representación de la energía de entrada y salida del sistema

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>

