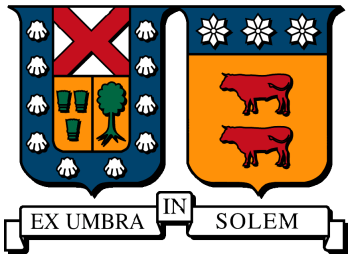
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO-CHILE



CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA DE DESALINIZACIÓN POR HUMIDIFICACIÓN Y DESHUMIDIFICACIÓN DE DOS ETAPAS ACOPLADO CON ENERGÍA SOLAR

MAURICIO SEBASTIÁN RODRÍGUEZ BAHAMONDES

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA : PH.D RODRIGO BARRAZA VICENCIO
PROFESOR CORREFERENTE : ING. MAURICIO REYES VALENZUELA

Abril 2019

Resumen

El primer prototipo de desalinización por método Humidificación-Deshumidificación acoplado con energía solar en Chile fue construido por Reyes [25] en el año 2017. Posteriormente, Aburto [1] mejoró y acondicionó el sistema para lograr una mejor performance, para terminar con un rediseño para un nuevo equipo, con el fin de mejorar la obtención de agua fresca y facilitar el mantenimiento.

Este escrito presenta una continuación del trabajo realizado por ellos. A continuación, se expondrán los antecedentes de la desalinización por Humidificación-Deshumidificación, para luego incorporar una segunda etapa de funcionamiento en el modelo numérico preexistente desarrollado por Leiva [18], ajustado al diseño realizado por Aburto.

Finalmente, se revisará la construcción y la puesta en marcha de la máquina, detallando los procesos llevados a cabo y las modificaciones según situaciones no previstas por el diseño.

Abstract

The first prototype of desalination by Humidification-Dehumidification method (HDH) integrated with solar energy in Chile was designed and constructed by Reyes [25] in 2017. In 2018, Aburto [1] fixed operational problems achieving a higher performance and proposing a complete redesign of the machine so as to improve fresh water production and maintainability. This document continues this research line constructing a new HDH system and implementing Aburto's proposed improvements .

The background of desalination by HDH systems is reviewed, and a second stage of desalination is incluede in the numerical pre-existing model developed by Leiva [18] so as to fit the redesign proposed by Aburto.

Finally, the construction and commissioning of the machine is reviewed, detailing the processes, performed and further modifications undertaken during the construction of the machine.

Índice general

1. Introducción 1
   1.1. Introducción 1
   1.2. Objetivos 2

2. Antecedentes de desalinización por método HDH 3
   2.1. Estudio de patentes e innovación en el método 5
   2.2. Antecedentes teóricos y experimentales 13
   2.3. Conclusiones 15

3. Modificaciones al diseño presentado y adaptación al modelo numérico de dos etapas 17
   3.1. Deshumidificadores y humidificadores conectados en paralelo. 19
   3.2. Deshumidificadores y humidificadores conectados en Serie. 20
   3.3. Deshumidificadores conectados en paralelo y humidificadores conectados en serie. 20
   3.4. Deshumidificadores conectados en serie y humidificadores conectados en paralelo. 21
   3.5. Resultados 22

4. Construcción de desalinizador 24
   4.1. Sistema de colectores 25
      4.1.1. Armado de estructuras 25
      4.1.2. Construcción del piping 26
      4.1.3. Instalación de la bomba 27
   4.2. Circuito de aire 28
      4.2.1. Construcción del humidificador 29
      4.2.2. Selección de materiales y construcción de piping 30

4.2.3. Instalación de ventiladores y reguladores de velocidad 30
4.2.4. Conexión de deshumidificadores e instalación de válvulas mariposa 31
4.3. Circuito de agua salada 33
4.3.1. Interconexión de deshumidificadores 33
4.3.2. Conexión del intercambiador de calor 34
4.3.3. Llegada al humidificador 36
4.3.4. Instalación de bombas y filtros 38
4.3.5. Estanques de almacenaje y medición de destilado 39
4.3.6. Arreglos finales 41

5. Puesta en marcha y recomendaciones 42
5.1. Recomendaciones 43

6. Conclusiones 45

A. Simulaciones realizadas con el programa EES 50

Índice de figuras

1.1. Ciclo del agua. Fuente [21]. 2

2.1. Esquema de un sistema de desalinización por método HDH CAOW. Fuente [20]. 4
2.2. Esquema general de la planta de desalinización inventada por Gerber. Fuente [16]. 5
2.3. Esquema general de la planta de desalinización inventada por Beard. Fuente [4]. 6
2.4. Sistemas propuestos por Dobell. Fuente [7] 6
2.5. Sistema propuesto por ElDifrawi et al. Fuente [9]. 7
2.6. Vista en planta de la interconexión de desalinizadores. Fuente [9]. . . . 7
2.7. Esquema del modelo de desalinización propuesto por Longer. Fuente [19]. 8
2.8. Esquema del modelo de desalinización propuesto por Hartman et al. Fuente [15]. 8
2.9. Esquema del modelo de desalinización propuesto por Beckman. Fuente [5]. 9
2.10. Esquema del modelo de desalinización propuesto por Frolov et al. Fuente [10]. 9
2.11. Esquema del modelo de desalinización propuesto por Nicholas C. Roch. Fuente [26]. 10
2.12. Esquema del modelo de desalinización propuesto por Govindan et al. Fuente [12]. 10
2.13. Esquema del modelo de recuperación de calor propuesto por Govindan et al. Fuente [11]. 11
2.14. Boceto del sistema propuesto por Al-Sulaiman et al. Fuente [8]. 12

2.15. Esquema del humidificador propuesto por Armstrong. Fuente [3]. . . . 12
2.16. Esquema del sistema HDH integrado con un sistema de PVT. Fuente [2]. 13
2.17. Esquema del módulo fotovoltaico modificado para sistema HDH. Fuente [2]. 13
2.18. Esquema de sistema HDH con calentamiento de aire mediante deshidratadores solares [17]. 14
2.19. Sistemas propuestos por T. Rajaseenivasan et al. [23, 24] 14
2.20. Esquema de sistema HDH acoplada con un sistema de vacío [22]. . . . 15

3.1. Esquema del diseño de la planta HDH de dos etapas propuesta. Fuente [1]. 18
3.2. Esquema del diseño de la planta HDH de dos etapas a construir. Fuente, elaboración propia 18
3.3. Esquema del funcionamiento del sistema con humidificador y deshumidificador conectados en paralelo. Fuente, elaboración propia. 19
3.4. Esquema del funcionamiento del sistema con humidificador y deshumidificador conectados en serie. Fuente, elaboración propia. 20
3.5. Esquema del funcionamiento del sistema con deshumidificadores en paralelo y humidificadores en serie. Fuente, elaboración propia. 21
3.6. Esquema del funcionamiento del sistema con humidificadores en paralelo y deshumidificadores en serie. Fuente, elaboración propia. 21
3.7. Diagrama Sankey para sistema HDH de una etapa. 23
3.8. Diagrama Sankey para sistema HDH de dos etapas. 23

4.1. Vista isométrica de la planta de desalinización HDH. 24
4.2. Armado de estructuras soporte para tubos Heat Pipe. 25
4.3. Construcción del piping para colectores. 26
4.4. Elementos instalados en la línea. 27
4.5. Bomba de recirculación Wilo Star RS. 27
4.6. Soportes para deshumidificadores y circuito de aire. 28
4.7. Trabajos en la construcción del humidificador. 29
4.8. Presentación de los humidificadores para dimensionamiento de espacios en el LER. 29
4.9. Conexión con manguito y anillo elastomérico en el humidificador. . . . 30
4.10. Soportes para ventiladores. 31

4.11. Elementos del sistema de circulación de aire. 31
4.12. Conexión final del deshumidificador. 32
4.13. Válvula de mariposa. 32
4.14. Máquina fusionadora de PPR. 33
4.15. Unión americana utilizada en la instalación del circuito de agua salada. 34
4.16. Interconexión final entre deshumidificadores en circuito de agua salada. 34
4.17. Unión americana utilizada en la instalación del intercambiador de placas. 35
4.18. Conexión de un intercambiador de placas. 35
4.19. Relleno evaporativo para el primer y segundo humidificador respectivamente. 36
4.20. Rotámetro regulable antes del ingreso al humidificador. 37
4.21. Brida ciega a modificar para ingreso al humidificador. 37
4.22. Segmento de piping extraíble desde el humidificador. 38
4.23. Boquilla de aspersión Sprying System. 38
4.24. Filtros dispuestos después de la bomba en el circuito de agua salada. . . 39
4.25. Estanques de plástico utilizados en la planta. 41
4.26. Planta de desalinización HDH terminada. 41

A.1. Performance del sistema HDH CAOW con humidificadores y deshumidificadores en paralelo. Fuente, elaboración propia. 50
A.2. Performance del sistema HDH CWOA con humidificadores y deshumidificadores en paralelo. Fuente, elaboración propia. 51
A.3. Performance del sistema HDH OAOW con humidificadores y deshumidificadores en paralelo. Fuente, elaboración propia. 51
A.4. Performance del sistema HDH CAOW con ambos equipos conectados en serie. Fuente, elaboración propia. 52
A.5. Performance del sistema HDH CWOA con ambos equipos conectados en serie. Fuente, elaboración propia. 53
A.6. Performance del sistema HDH OAOW con ambos equipos conectados en serie. Fuente, elaboración propia. 54
A.7. Performance del sistema HDH CAOW con deshumidificadores en paralelo y humidificadores en serie. Fuente, elaboración propia. 55
A.8. Performance del sistema HDH CWOA con deshumidificadores en paralelo y humidificadores en serie. Fuente, elaboración propia. 56

A.9. Performance del sistema HDH OAOW con deshumidificadores en paralelo y humidificadores en serie. Fuente, elaboración propia. 57
A.10. Performance del sistema HDH CAOW con humidificadores en paralelo y deshumidificadores en serie. Fuente, elaboración propia. 58
A.11. Performance del sistema HDH CWOA con humidificadores en paralelo y deshumidificadores en serie. Fuente, elaboración propia. 59
A.12. Performance del sistema HDH OAOW con humidificadores en paralelo y deshumidificadores en serie. Fuente, elaboración propia. 60

Índice de tablas

2.1. Comparación entre los distintos sistemas HDH descritos. 15

3.1. Condiciones de operación de la planta para las simulaciones 19
3.2. Resultados de las simulaciones 22

4.1. Características de colectores Heat Pipe Prisma Solar. 25
4.2. Características de bomba de recirculación Wilo. 28
4.3. Características de ventilador S & P. 31
4.4. Características de intercambiador de placas Alpha Laval. 35
4.5. Características de las boquillas de aspersión Sprying System. 38
4.6. Características de las bombas Pedrollo para el sistema principal de agua salada y el sistema de recirculación. 39
4.7. Características de del estanque principal marca Infraplast. 40
4.8. Características de del estanque para recirculación marca Infraplast. . . . 40
4.9. Características de del estanque para recepción de agua purificada marca Infraplast. 40

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

La disponibilidad de agua potable es, hoy en día, una de las principales problemáticas a nivel mundial y sin duda, dar una solución se encuentra entre los grandes desafíos de la ingeniería. Aplicaciones variadas en manufactura, agricultura, minería, generación de energía, suministro de agua y saneamiento son altamente dependientes del recurso hídrico, lo cual indica que este elemento presenta un rol fundamental en temas económicos [6], además de ser indispensable para lograr altos estándares de calidad de vida.
Es en este punto donde destacan los métodos tradicionales de desalinización, sin embargo, no solucionan de manera completa el problema, debido principalmente a que están pensados para producción a gran escala y centralizadas donde se encuentra la demanda [29]. En respuesta a lo anterior es que se trabaja en un prototipo de desalinización a baja escala y con las condiciones necesarias para trabajar de forma independiente, pensado principalmente en el consumo humano.

El método de desalinización utilizado es llamado Humidificación-Deshumidificación (HDH) y funciona replicando de manera compacta y controlada el ciclo natural del agua en la naturaleza, es decir, se humidifica el aire por medio de un aporte energético para después extraer la humedad al bajar la temperatura del fluido, obteniendo agua destilada. Una de las principales características favorables de este método es la facilidad para ser acoplado con energía solar, brindando una característica de fundamental importancia, la autonomía energética [28].

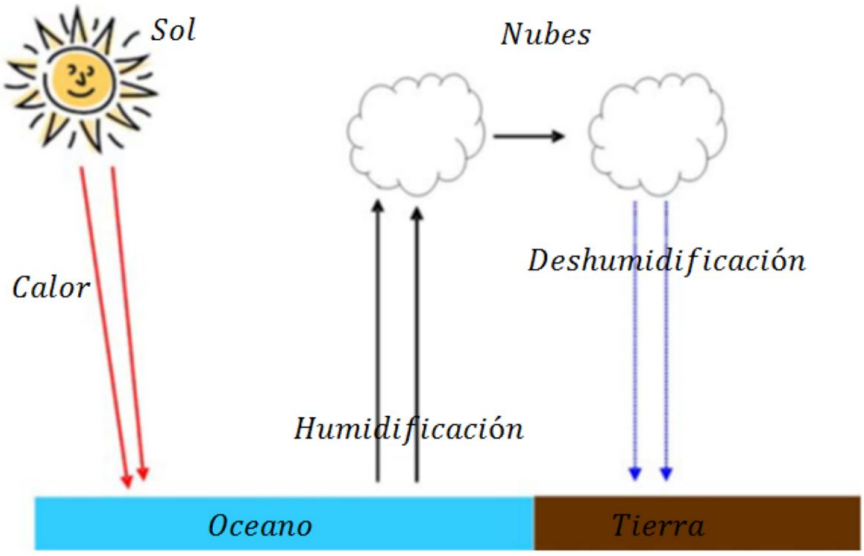


Figura 1.1: Ciclo del agua. Fuente [21].

1.2. Objetivos

- Objetivo general.
  - Construcción y puesta en marcha del sistema de desalinización por humidificación y deshumidificación HDH de dos etapas acoplado con energía solar.
- Objetivos específicos
  - Estudiar los antecedentes previos de la desalinización por método de humidificación- deshumidificación (HDH).
  - Incorporar diseño con una segunda etapa en su funcionamiento y acondicionar cambios en el modelo numérico preexistente para caracterizar los parámetros de diseño del nuevo prototipo desalinizador HDH.
  - Construcción y montaje de un prototipo HDH de dos etapas.
  - Puesta en marcha del equipo HDH de dos etapas, además de la adecuación y dimensionamiento de componentes en base a las características del terreno y no previstas en el diseño.

Capítulo 2

Antecedentes de desalinización por método HDH

La desalinización por método HDH se compone de elementos que permiten humedecer y enfriar el aire húmedo en dos etapas distintas. A continuación, se realiza una breve descripción de los equipos que componen el sistema.

- Colector solar: Equipo dedicado a recibir la energía solar para entregarla en forma de calor al sistema.
- Intercambiador de calor de placas: Se utiliza un método indirecto de calentamiento de agua de mar con la finalidad de evitar la formación de incrustaciones o deterioro de equipos críticos.
- Humidificador: Equipo donde ocurre la transferencia de calor y masa entre un flujo cruzado de aire y agua salada caliente, resultando aire con mayor contenido de humedad.
- Deshumidificador: Equipo cuya principal función es enfriar el aire húmedo y entregar calor al agua salada a la entrada del sistema, favoreciendo la recuperación de energía en el sistema.

El funcionamiento de un sistema desalinizador de estas características cuenta con un sistema de alimentación de agua salada, el cual inicia en el deshumidificador, luego se calienta en el intercambiador de calor de placas para finalmente ser rociado por

una boquilla de aspersión, esto asegurará la correcta distribución del agua en el humidificador. Un segundo circuito es el sistema de recirculación de los colectores e intercambiador de placas, cuyo propósito ya fue mencionado anteriormente. Finalmente, se tiene un último sistema correspondiente al circuito de aire, el cual es impulsado por un ventilador, circula por el humidificador y el deshumidificador transportando la humedad para la producción de agua purificada. En la figura 2.1 se muestra un esquema simplificado del sistema de desalinización por este método.

Los sistemas de desalinización HDH se clasifican en relación a la configuración de los circuitos de agua y aire. En la literatura, destacan tres de estas configuraciones [21].

- Circuito cerrado de agua y abierto de aire (Closed water open air, CWOA).
- Circuito cerrado de aire y abierto de agua (Closed air open water, CAOW).
- Circuito abierto de aire y abierto de agua (Open air open water, OAOW).

Por otra parte, también existe la clasificación según el flujo al que se le transfiere calor, con la posibilidad de calentar el aire, el agua y en algunos casos ambos fluidos.

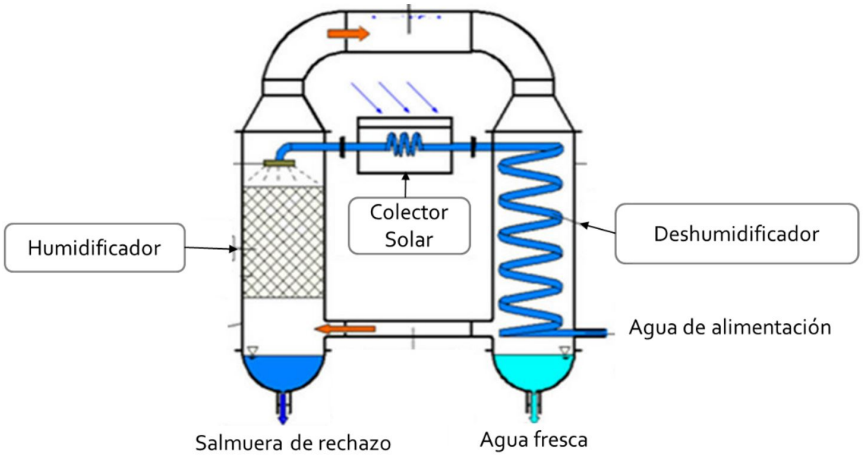


Figura 2.1: Esquema de un sistema de desalinización por método HDH CAOW. Fuente [20].

2.1. Estudio de patentes e innovación en el método

En junio del año 1966, se publicó una patente desarrollada por Gerber [16], donde se aprecia un sistema complejo y adaptado para funcionar en el sector costero, en la patente se detalla el funcionamiento de una máquina destiladora de agua de mar, a través de la transferencia de calor y masa agua-aire (ver figura 2.2). Cuenta con una gran tubería donde se calienta el aire y es humedecido por la aspersión de agua de mar; finalmente, el aire es enfriado en una sección submarina del ducto en cuestión. Está pensada para trabajar a gran escala.

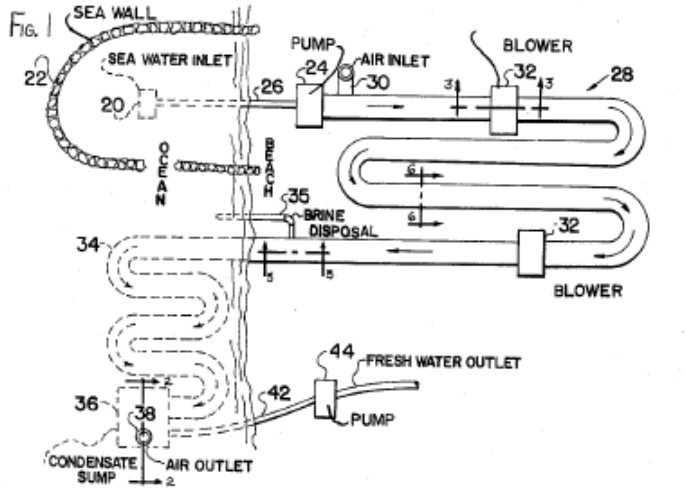


Figura 2.2: Esquema general de la planta de desalinización inventada por Gerber. Fuente [16].

Posteriormente, en el año 1967, Beard [4] propone un nuevo diseño para desalinizar agua de manera indirecta, nombrando claramente dos etapas en el diseño; el evaporador y el condensador. El sistema contempla un circuito cerrado de aire que es calentado con energía solar y humedecido a contraflujo en el evaporador, para finalmente ser deshumidificado en el condensador; equipo que baja la temperatura del aire con agua salada a temperatura ambiente tal como se puede apreciar en la figura 2.3.

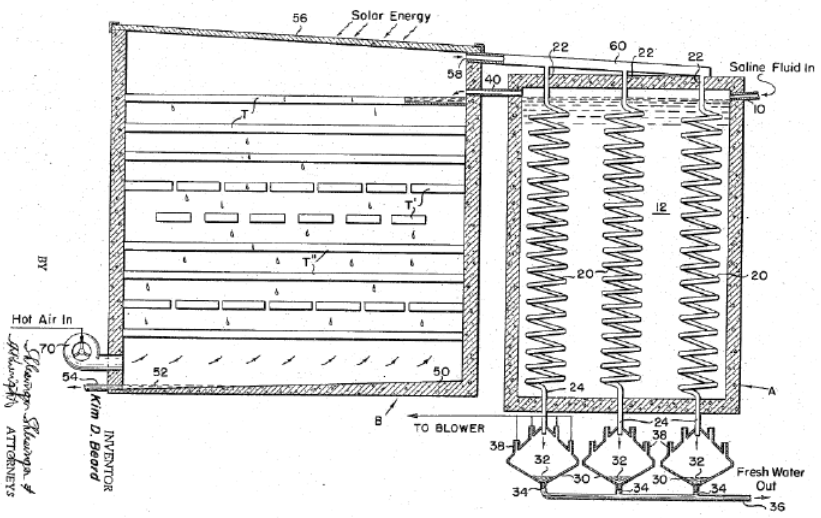
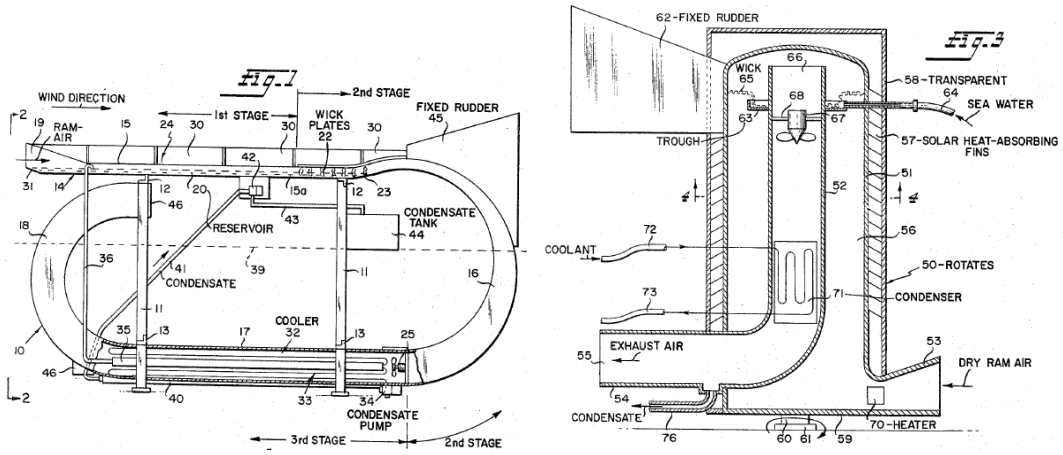


Figura 2.3: Esquema general de la planta de desalinización inventada por Beard. Fuente [4].

En el mismo año, Dobell [7] propone una purificadora de agua dando tres distintos diseños que cumplen con el propósito. La principal novedad de este sistema radica en que utiliza un timón para reducir la utilización de un ventilador en el circuito de aire, de este modo ahorrar energía en el proceso. Por otro lado, la máquina cuenta con calentamiento en el circuito de aire cerrado, el cual es enfriado posteriormente a través de un aceite refrigerante. En la figura 2.4 se muestran dos de los modelos propuestos.



(a) Primer sistema. (b) Segundo sistema.

Figura 2.4: Sistemas propuestos por Dobell. Fuente [7]

Años después, en 1982 ElDifrawi et al. [9] realiza un nuevo aporte con un modelo capaz de ser interconectado para formar una planta desalinizadora. El sistema cuenta con calentamiento de agua de mar a través de energía solar y recuperación de calor en la zona del condensado (Ver figura 2.5). En la figura 2.6 se muestra la conexión de desalinizadores para formar una planta.

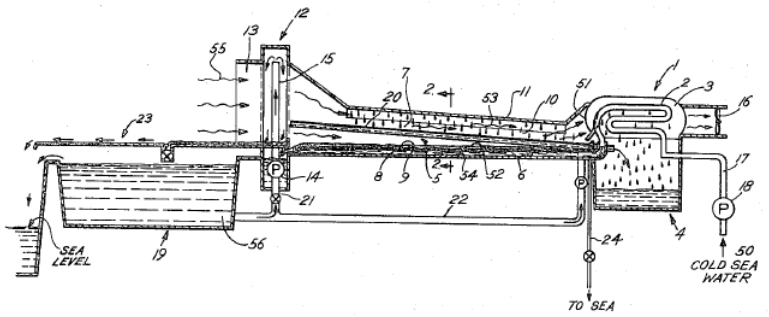


Figura 2.5: Sistema propuesto por ElDifrawi et al. Fuente [9].

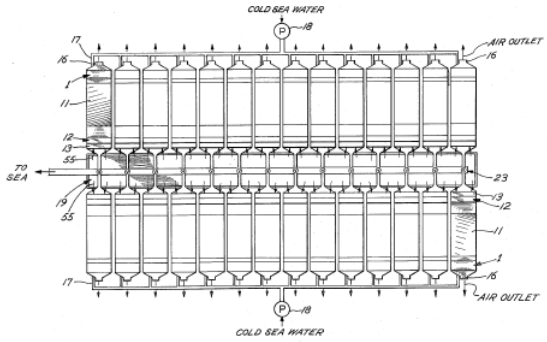


Figura 2.6: Vista en planta de la interconexión de desalinizadores. Fuente [9].

En 2003, Longer [19] introduce el concepto de un sistema de calentamiento indirecto de agua de mar a través de un colector solar plano, de esta forma, se resguarda la integridad del colector, aumentando su tiempo de vida y disminuyendo la frecuencia de mantenimiento por incrustaciones (ver figura 2.7). Además, el sistema considera el almacenamiento de calor como método para prolongar el tiempo de funcionamiento.

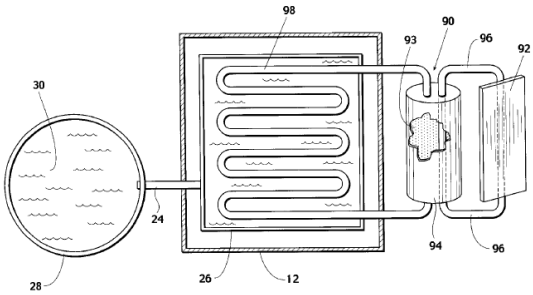


Figura 2.7: Esquema del modelo de desalinización propuesto por Longer. Fuente [19].

Hartman et al. [15] propone un sistema integrado con un rechazo de calor de otro ciclo termodinámico, poniendo como ejemplo la salida de una turbina o el calor residual de alguna planta manufacturera. El sistema cuenta con calentamiento de aire en circuito cerrado como se aprecia en la figura 2.8.

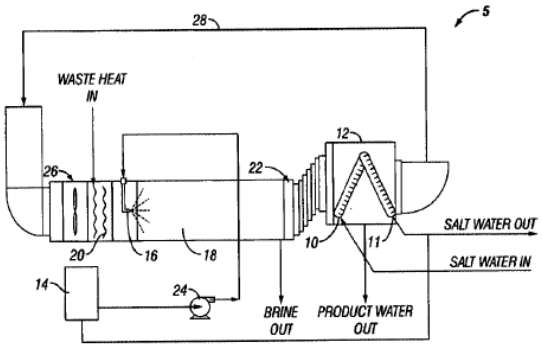


Figura 2.8: Esquema del modelo de desalinización propuesto por Hartman et al. Fuente [15].

Beckman [5] propone un sistema unificado, en donde la transferencia de calor se produce por una pared permeable que separa la zona de evaporación y condensación como se aprecia en la figura 2.9. El sistema cuenta con calentamiento de agua y sistemas abiertos para ambos fluidos.

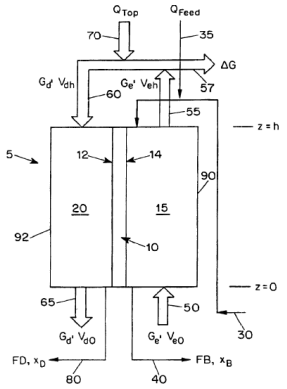


Figura 2.9: Esquema del modelo de desalinización propuesto por Beckman. Fuente [5].

Otro modelo de desalinización fue propuesto por Frolov et al. [10], un sistema autónomo y modular. Se destaca la performance energética, donde asoma un sistema independiente de la red eléctrica y con fuente solar de calor tal como se muestra en la figura 2.10. Por otro lado, el sistema además de ser modular presenta distintas interconexiones entre los módulos de intercambio de calor, evaporador y condensador.

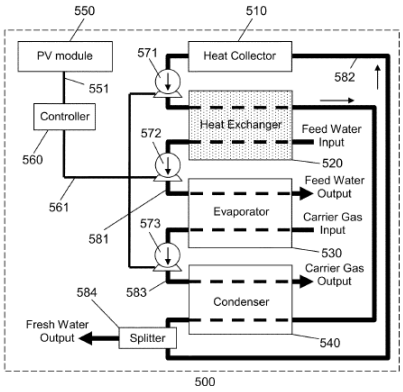


Figura 2.10: Esquema del modelo de desalinización propuesto por Frolov et al. Fuente [10].

En el año 2013, Nicholas C. Roch [26] presenta un módulo integrado de cuatro etapas de humidificación y deshumidificación tal como se ve en la figura 2.11. El sistema tiene la posibilidad de trabajar con circuito abierto o cerrado de aire y se destaca por su modularidad.

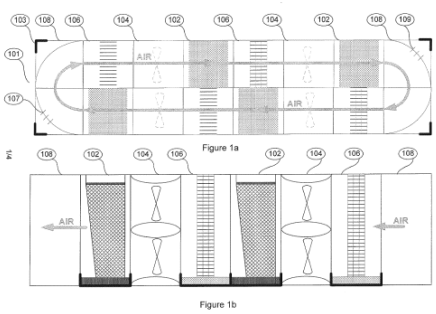


Figura 2.11: Esquema del modelo de desalinización propuesto por Nicholas C. Roch. Fuente [26].

En el año 2011 Govindan et al. [12], presenta un modelo cerrado de aire y abierto de agua con posibilidad de calentar ambos fluidos. En el sistema ocurre recuperación de calor en el deshumidificador y se propone la extracción múltiple de aire húmedo desde el humidificador. Describe el cambio de presión que ocurre a partir de compresores y difusores entre los equipos, explicando los cambios de temperatura que estos conllevan y el beneficio para el proceso.

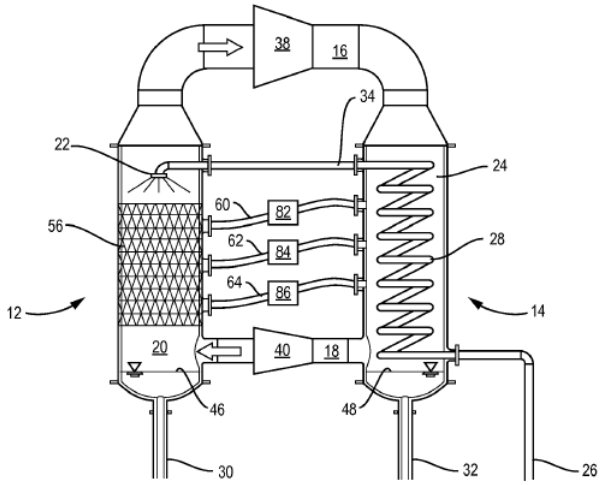


Figura 2.12: Esquema del modelo de desalinización propuesto por Govindan et al. Fuente [12].

Posteriormente en el año 2012 [13], profundiza en el modelo creado y lo complementa, de forma de lograr una mejor eficiencia en el objetivo de obtener agua purificada, integrando flujos de vapor externos, extracción de calor en el compresor e incluso proponiendo un purificador de osmosis inversa en la salida de salmuera. en 2013 [14] se patenta el balance termodinámico para aparatos de transferencia de calor y masa combinados, aplicado en este caso al humidificador.

Finalmente, en el año 2017 [11] plantea un sistema de recuperación de calor en la salmuera residual, que propone un sistema mixto en el circuito de agua salada como se aprecia en la figura 2.13, de forma de funcionar como circuito cerrado y controlar la concentración de sal para evitar perjudicar el equipo.

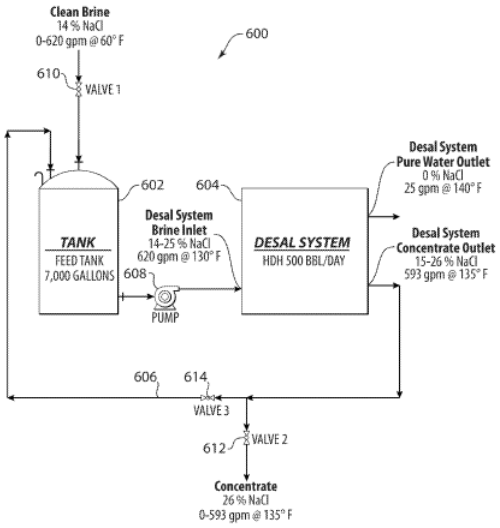


Figura 2.13: Esquema del modelo de recuperación de calor propuesto por Govindan et al. Fuente [11].

En 2017, Al-Sulaiman et al. [8] presenta un modelo distinto de sistema de humidificación e ilustra distintas formas de llevar a cabo el proceso, integrándolo con sistemas fotovoltaicos y probando distintas configuraciones respecto a los flujos de aire y agua. En la figura 2.14 se puede apreciar un boceto del sistema.

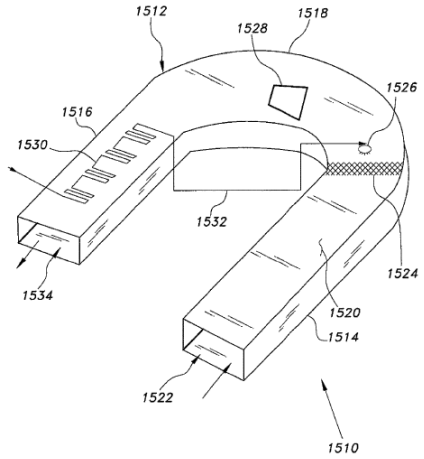


Figura 2.14: Boceto del sistema propuesto por Al-Sulaiman et al. Fuente [8].

Finalmente, en el año 2018, Armstrong [3] desarrolla un nuevo modelo de humidificador acoplado en un sistema de colección solar, de esta forma, el agua y aire se calientan en el humidificador y el aire húmedo es extraido a través de un ventilador tal como se muestra en la figura 2.15.

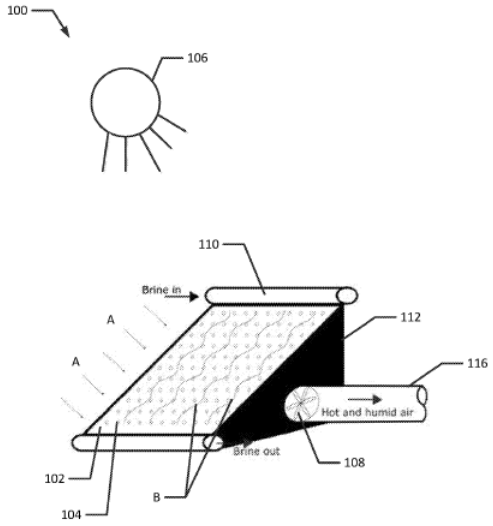


Figura 2.15: Esquema del humidificador propuesto por Armstrong. Fuente [3].

2.2. Antecedentes teóricos y experimentales

Anteriormente, Leiva [18] ha detallado distintos autores involucrados en el estudio de desalinizadores HDH en etapas. A continuación, se presentan distintos autores que han evaluado modificaciones al sistema o que han realizado experimentación con distintas modificaciones al método.

En 2016, A. Giwa et al. [2] estudia la factibilidad técnica de integrar un sistema de enfriamiento de paneles fotovoltaicos (PVT) en una máquina HDH, generando energía eléctrica y agua purificada. En la figura 2.17 se muestra un esquema del sistema HDH presentado.

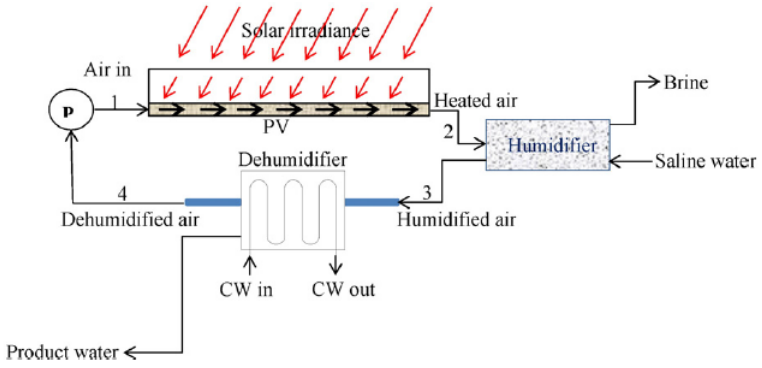


Figura 2.16: Esquema del sistema HDH integrado con un sistema de PVT. Fuente [2].

El sistema permite mejorar la eficiencia del panel y a la vez aumentar la temperatura del aire, mejorando la performance de la máquina.

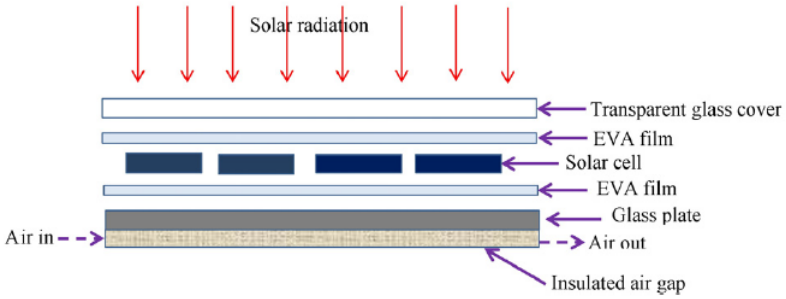


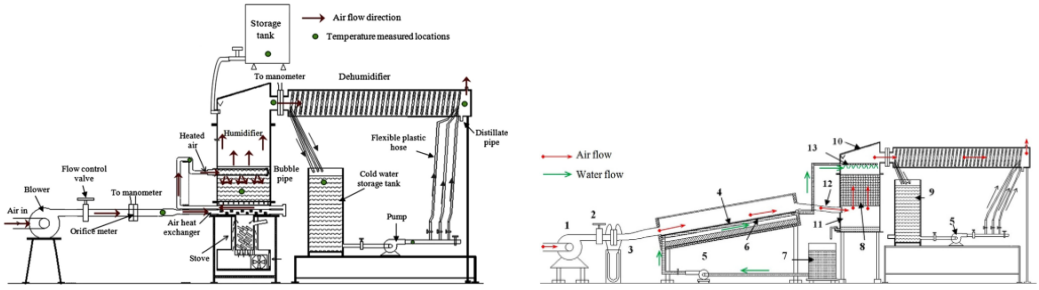
Figura 2.17: Esquema del módulo fotovoltaico modificado para sistema HDH. Fuente [2].

En otra de las aplicaciones, A.E. Kabeel et al. [17] experimenta con un sistema cerrado de agua y abierto de aire con recuperación de calor desde un deshidratador de dos etapas, donde se realiza precalentado de aire. En la figura 2.18 se aprecia la configuración utilizada; el sistema también cuenta con calentamiento de agua.



Figura 2.18: Esquema de sistema HDH con calentamiento de aire mediante deshidratadores solares [17].

T. Rajaseenivasan et al. [23] estudia un sistema abierto de agua y aire, que usa biomasa como fuente de calor. El mismo autor [24], desarrolla un sistema abierto de aire y cerrado de agua, donde se implementa un colector de doble propósito, que busca entregar calor a ambos circuitos. Los esquemas de ambas configuraciones se muestran en la figura 2.19.



(a) Sistema alimentado por biomasa.

(b) Sistema acoplado con colector de doble propósito.

Figura 2.19: Sistemas propuestos por T. Rajaseenivasan et al. [23, 24]

Z. Rahimi-Ahar [22] estudia un sistema HDH de circuito cerrado de aire y abierto de agua con calentamiento de ambos fluidos, el sistema se destaca por estar acoplado con una bomba de vacío, en este equipo, se vuelve a humidificar el aire para posteriormente obtener una cantidad mayor de agua purificada en distintos separadores, tal como se puede apreciar en la figura 2.20.

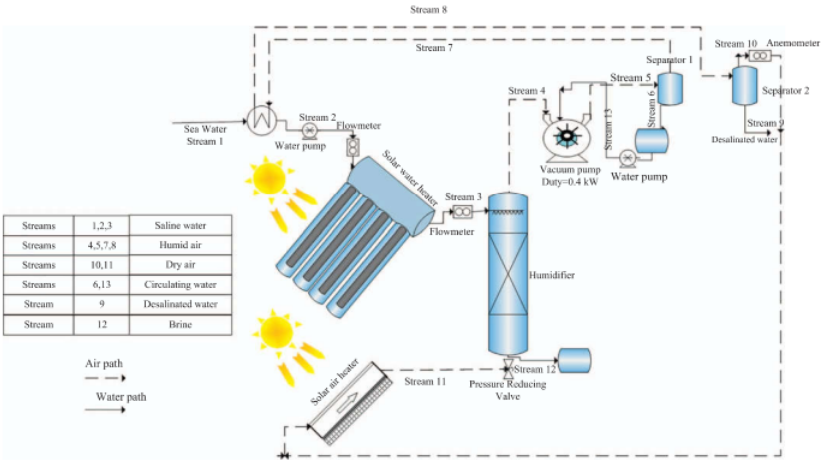


Figura 2.20: Esquema de sistema HDH acoplada con un sistema de vacío [22].

Finalmente, se presenta una tabla comparativa entre los distintos sistemas mencionados.

Configuración HDH	Resultado obtenido	GOR [-]
A.E. Kabeel [17]	33.54 $\left[\frac{l}{d}\right]$	-
T. Rajaseenivasan [23]	6.1 $\left[\frac{l}{d}\right]$	1.4
T. Rajaseenivasan [24]	15.23 $\left[\frac{l}{h \cdot m^2}\right]$	-
Z. Rahimi-Ahar [22]	1.07 $\left[\frac{l}{h \cdot m^2}\right]$	3.43

Tabla 2.1: Comparación entre los distintos sistemas HDH descritos.

2.3. Conclusiones

Se logra dar un contexto al prototipo a desarrollar, identificando las ventajas de la implementación de una segunda etapa de desalinización en el sistema y buscando lograr beneficios de hasta un 50 % de producción de agua destilada [18]. Se identificaron cuatro problemáticas principales de cara a la innovación futura en el método, las cuales son:

- Maximizar la recuperación de calor
- Aumentar la disponibilidad del sistema
- Mejorar autonomía
- Reducir los costos de implementación y construcción

En consideración de lo expuesto, se recomienda apuntar a estos objetivos en futuros diseños.

Capítulo 3

Modificaciones al diseño presentado y adaptación al modelo numérico de dos etapas

El prototipo propuesto por Aburto [1], contempla 6 colectores solares conectados en paralelo con un área total de 16 $[m^2]$ de colección. El sistema de colectores entrega energía de manera indirecta al flujo principal de agua salada a través de un intercambiador de calor, evitando así cualquier incrustación en este. En el flujo principal, se conectan los dos deshumidificadores en serie, posteriormente el agua salada pasa por el intercambiador de calor de placas para finalmente ingresar a los humidificadores mediante la boquilla de aspersión. Cabe destacar que los humidificadores se pueden conectar en serie o en paralelo según la posición de las válvulas V2, V3 y V4 (ver figura 3.1). Finalmente, el tercer flujo implicado corresponde a la circulación de aire entre humidificadores y deshumidificadores, este se realiza mediante un ventilador y presenta la posibilidad de alternar entre un sistema de aire abierto o cerrado según la posición de la válvula V1 para cada sistema, tal como se muestra en la figura 3.1.

Se realizan algunas modificaciones al modelo original con el fin de permitir alternar entre conexión serie y paralelo a los deshumidificadores mediante el accionamiento de las válvulas, ver figura 3.2. Además, se modifica la interconexión de los colectores en un arreglo de 3 sistemas de colectores en paralelo, donde cada sistema cuenta con dos colectores en serie, cambio necesario debido a las limitaciones de espacio en el lugar de instalación.

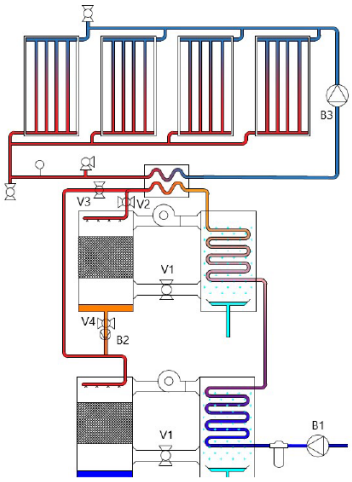


Figura 3.1: Esquema del diseño de la planta HDH de dos etapas propuesta. Fuente [1].

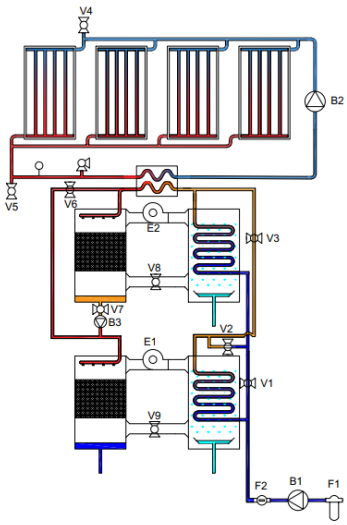


Figura 3.2: Esquema del diseño de la planta HDH de dos etapas a construir. Fuente, elaboración propia

A continuación, se presentan las modificaciones realizadas al modelo desarrollado en el software Engineering Equation Solver (EES) [27] presentado por Leiva [18] para ajustarlo a al prototipo a desarrollar. Para comenzar, se adaptan los equipos a utilizar para la construcción del sistema, se modifican las dimensiones, capacidades y modos de funcionamiento según corresponda. Como se puede ver en la figura 3.2, existen distintas configuraciones en las que puede funcionar el sistema dependiendo de la posición de las válvulas implicadas, además de las configuraciones cerradas/abiertas de agua y aire. Es por esto que se procede a separar el análisis en cuatro de las configuraciones principales. Se realizan simulaciones para sistema funcionando en regímenes CAOW, CWOA y

OAOW; bajo las siguientes condiciones.

Flujo másico de agua, $\dot{m_w}(kg/hr)$	250
Flujo másico de aire seco, $\dot{m_{a,s}}(kg/hr)$	500
Flujo másico de agua en circuito colectores, $\dot{m_c}(kg/hr)$	1200
Radiación solar incidente, $G_t(W/m^2)$	800
Temperatura de ingreso de agua de mar, $T_1(°C)$	21
Presión de la bomba de agua, $P_{s,w}(bar)$	1.5
Temperatura ambiental, $T_{amb}(°C)$	20

Tabla 3.1: Condiciones de operación de la planta para las simulaciones

3.1. Deshumidificadores y humidificadores conectados en paralelo.

El sistema HDH funciona con ambos equipos en paralelo según la posición de las válvulas, dejando V6 abierta y V7 cerrada para el humidificador y las válvulas V1, V3 abierta y V2 cerrada en el deshumidificador (ver figura 3.2), de esta forma el sistema funciona según la configuración que se aprecia en la figura 3.3.

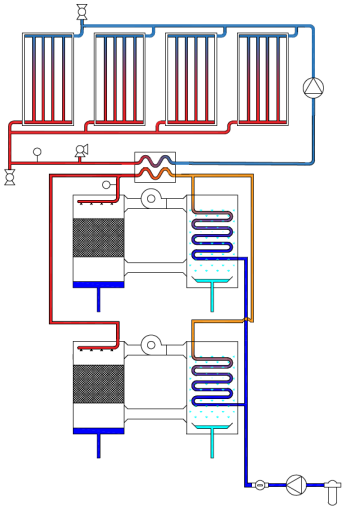


Figura 3.3: Esquema del funcionamiento del sistema con humidificador y deshumidificador conectados en paralelo. Fuente, elaboración propia.

Los resultados obtenidos de las simulaciones se encuentran en el anexo.

3.2. Deshumidificadores y humidificadores conectados en Serie.

El sistema HDH funciona con ambos equipos en paralelo según la posición de las válvulas, dejando V6 cerrada y V7 abierta para el humidificador y las válvulas V1, V3 cerradas y V2 abierta en el deshumidificador (ver figura 3.2), de esta forma el sistema funciona según la configuración que se aprecia en la figura 3.4.

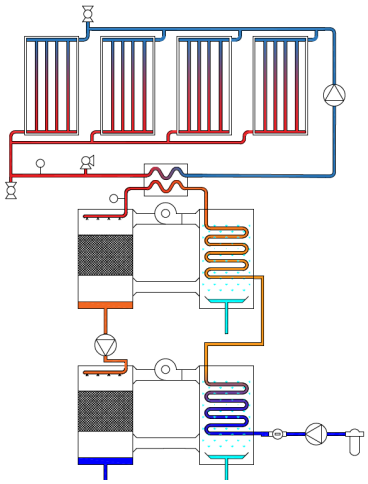


Figura 3.4: Esquema del funcionamiento del sistema con humidificador y deshumidificador conectados en serie. Fuente, elaboración propia.

Los resultados obtenidos de las simulaciones se encuentran en el anexo.

3.3. Deshumidificadores conectados en paralelo y humidificadores conectados en serie.

El sistema HDH funciona con ambos equipos en paralelo según la posición de las válvulas, dejando V6 cerrada y V7 abierta para el humidificador y las válvulas V1, V3 abiertas y V2 cerrada en el deshumidificador (ver figura 3.2), de esta forma el sistema funciona según la configuración que se aprecia en la figura 3.5.

Los resultados obtenidos de las simulaciones se encuentran en el anexo.

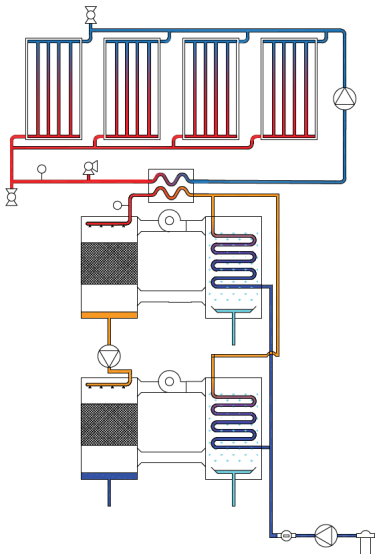


Figura 3.5: Esquema del funcionamiento del sistema con deshumidificadores en paralelo y humidificadores en serie. Fuente, elaboración propia.

3.4. Deshumidificadores conectados en serie y humidificadores conectados en paralelo.

El sistema HDH funciona con ambos equipos en paralelo según la posición de las válvulas, dejando V6 abierta y V7 cerrada para el humidificador y las válvulas V1, V3 cerradas y V2 abierta en el deshumidificador (ver figura 3.2), de esta forma el sistema funciona según la configuración que se aprecia en la figura 3.6.

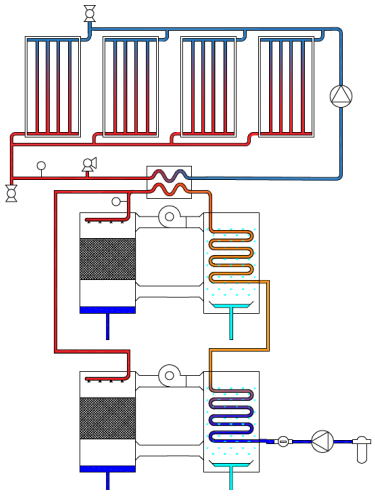


Figura 3.6: Esquema del funcionamiento del sistema con humidificadores en paralelo y deshumidificadores en serie. Fuente, elaboración propia.

Los resultados obtenidos de las simulaciones se encuentran en el anexo.

3.5. Resultados

Se puede apreciar que la configuración con mejor desempeño es la que cuenta con todos sus elementos en serie, esto se explica tomando en cuenta que la recuperación de calor es máxima en este caso; le sigue el sistema de humidificadores en serie y deshumidificadores en paralelo, lo cual se explica porque la principal pérdida de calor al ambiente se encuentra a la salida del humidificador, esto tomando en cuenta que la temperatura con que el agua sale del sistema es superior a la temperatura con la que entra. A continuación, se presentan dos diagramas Sankey donde se muestra la diferencia entre un sistema de una etapa (figura 3.7) y un sistema de dos etapas (figura 3.8). Esto se puede tomar como una comparación entre el sistema funcionando con los equipos en paralelo y el sistema trabajando con los equipos en serie.

Configuración HDH	Producción de destilado $\left[\frac{kg}{h}\right]$	GOR $[-]$
Deshumidificadores y humidificadores conectados en paralelo		
CAOW figura A.1	8.425	0.6277
CWOA figura A.2	1.93	0.1425
OAOW figura A.3	1.789	0.1321
Deshumidificadores y humidificadores conectados en serie		
CAOW figura A.4	11.04	0.8332
CWOA figura A.5	2.201	0.1631
OAOW figura A.6	2.116	0.1569
Deshumidificadores en paralelo y humidificadores en serie		
CAOW figura A.7	9.972	0.7483
CWOA figura A.8	1.658	0.1231
OAOW figura A.9	1.640	0.1218
Deshumidificadores en serie y humidificadores en paralelo		
CAOW figura A.10	8.697	0.6538
CWOA figura A.11	1.953	0.1452
OAOW figura A.12	1.809	0.1346

Tabla 3.2: Resultados de las simulaciones



Figura 3.7: Diagrama Sankey para sistema HDH de una etapa.

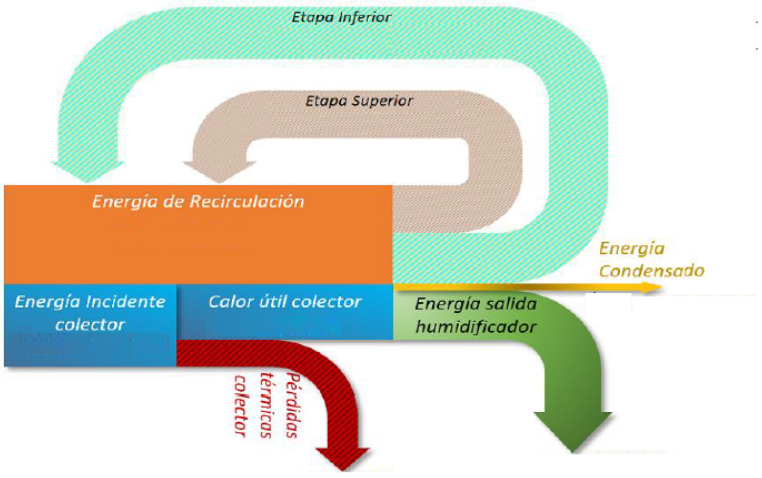


Figura 3.8: Diagrama Sankey para sistema HDH de dos etapas.

Capítulo 4

Construcción de desalinizador

La construcción del desalinizador se llevó a cabo en el Laboratorio de Energías Renovables (LER), emplazado en la sede de José Miguel Carrera de Viña del Mar, lugar donde se encuentra el primer prototipo construido. En la Figura 4.1, se puede apreciar un isométrico de la disposición preliminar de la planta; como ya se mencionó en el capítulo anterior, esta configuración será modificada por razones de espacio.

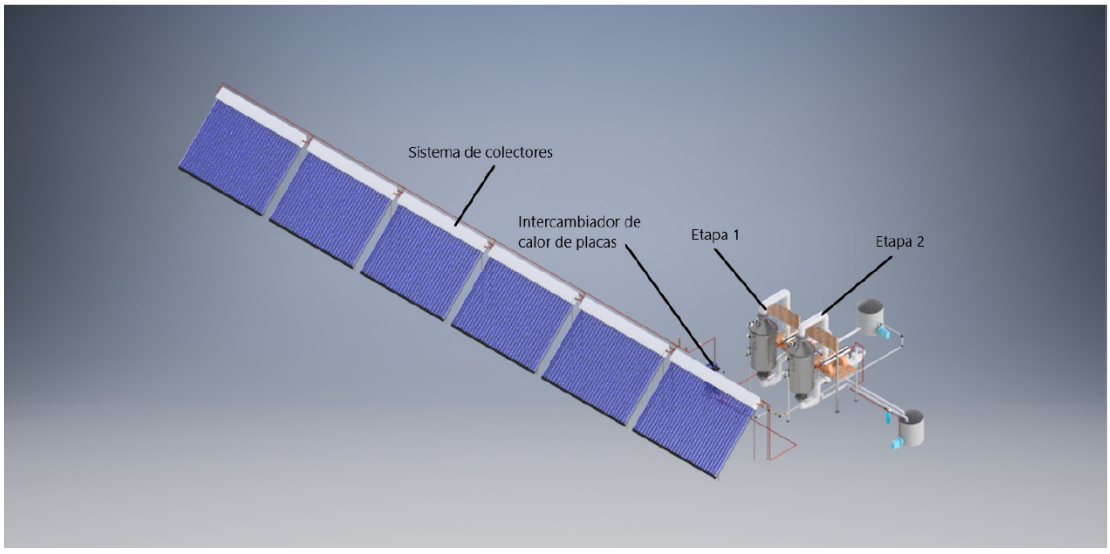


Figura 4.1: Vista isométrica de la planta de desalinización HDH.

4.1. Sistema de colectores

4.1.1. Armado de estructuras

En primera instancia, se tomaron mediciones de la superficie disponible para la instalación del sistema HDH, en este punto se tomó la decisión de ubicar los colectores en dos hileras y conectarlos en un arreglo de 3 arreglos en paralelo de 2 colectores en serie (ver Figura 4.2). De esta forma, se procede al armado de las estructuras para visualizar el espacio total y dimensionar el piping que se utilizará en esta sección.



Figura 4.2: Armado de estructuras soporte para tubos Heat Pipe.

Cada colector presenta las características mostradas en la tabla 4.1.

Cantidad de tubos	30
Dimensiones del tubo	58x1800 $[mm]$
Largo de absorción	1715 $[mm]$
Porcentaje de absorción	Mayor a 92 %
Porcentaje de emisión	Menor a 8 %
Presión de trabajo	0.6 $[MPa]$
Temperatura de estancamiento	200,3 $[°C]$
Máxima temperatura de servicio	95 $[°C]$
Peso neto del colector	114 $[kg]$
Área de apertura	2.84 $[m^2]$
Eficiencia óptica	71.4 $[\%]$
Pérdida lineal	1.08 $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$

Tabla 4.1: Características de colectores Heat Pipe Prisma Solar.

4.1.2. Construcción del piping

Para la construcción del piping de los colectores se trabajó con cañerías de cobre tipo M, principalmente por las temperaturas de trabajo del sistema. Se procede a realizar el armado del piping situando los soportes en su posición final. En la figura 4.3, se muestran algunas imágenes de su construcción.



(a) (b)

(c) (d) (e)

Figura 4.3: Construcción del piping para colectores.

Cabe destacar que se realizó la conexión del intercambiador de calor de placas Alpha Laval modelo T5, dejando la entrada de agua caliente por la parte superior y la salida por la parte inferior tal como se muestra en la figura 4.4. Se instalo también un manómetro y una válvula de seguridad de temperatura y presión que se acciona a $90[°C]$ o a 3 $[bar]$. Finalmente, se instaló un rotámetro para medir el caudal entregado por la bomba, que cuenta con un rango de $10 - 80\ \left[\frac{L}{min}\right]$.



(a) Conexión al intercambiador de placas (b) Manómetro y válvula de seguridad (c) Rotámetro

Figura 4.4: Elementos instalados en la línea.

4.1.3. Instalación de la bomba

Finalmente, se conecta la bomba al sistema hidráulico y eléctrico, de esta forma el sistema de colectores queda listo para comenzar su funcionamiento.



Figura 4.5: Bomba de recirculación Wilo Star RS.

La bomba, mostrada en la figura 4.5, cuenta con las características mostradas en la tabla 4.2.

Tensión de conexión	$1 - 230\,[V] \pm 10\,\%$
Frecuencia de la red	50 $[Hz]$
Temperatura del agua con temperatura ambiente a máx. 40$[°C]$	de 10 a 110 $[°C]$
Temperatura ambiente máx.	40 $[°C]$
Presión de trabajo máx.	10 $[bar]$
Presión mínima de entrada a 50/95/110 $[°C]$	0.05/0.3/1 $[bar]$
Longitud de montaje	130/180 $[mm]$
Conmutación de velocidad	3
Potencia	144 $[W]$

Tabla 4.2: Características de bomba de recirculación Wilo.

4.2. Circuito de aire

Para ubicar los deshumidificadores, los ventiladores y el piping a construir, se elaboran dos estructuras de acero diseñadas para la correcta disposición de cada elemento. Además, debido a su forma cilíndrica, se elaboran soportes de madera especialmente adaptados para los deshumidificadores, de manera que queden asentados en su posición final (ver figura 4.6).



(a) (b) (c)

Figura 4.6: Soportes para deshumidificadores y circuito de aire.

Se procede a montar el circuito de aire, este sistema interconecta el humidificador y la carcasa del deshumidificador, pasando por el ventilador que dará circulación al fluido; cabe destacar que, en la parte inferior del humidificador además de entrar el aire, saldrá el agua salada con dirección a su disposición final. Tomando en cuenta lo anterior se procede a seleccionar los materiales para la construcción.

4.2.1. Construcción del humidificador

Para la construcción del humidificador se trabajó con una empresa especialista en la elaboración de estanques para diversos propósitos, en particular, se les facilitaron los planos elaborados en la etapa de diseño del proyecto elaborados por Aburto [1].



(a) (b)

Figura 4.7: Trabajos en la construcción del humidificador.

Una vez terminados, los equipos fueron trasladados hasta las dependencias del LER, donde fueron ubicados para dimensionar el piping requerido para la conexión de aire en primera instancia y posteriormente la conexión de agua.



Figura 4.8: Presentación de los humidificadores para dimensionamiento de espacios en el LER.

4.2.2. Selección de materiales y construcción de piping

En esta parte, se optó por trabajar con PVC sanitario blanco con conexiones por manguito y anillo elastomérico, esto debido principalmente a la facilidad para extraer e intercambiar piezas en el ensamble. Esta característica es importante tomando en cuenta cualquier modificación o recambio de partes en un futuro. El piping tiene una inclinación suficiente para recolectar el agua que se condensa en el tubo superior.



Figura 4.9: Conexión con manguito y anillo elastomérico en el humidificador.

Se procede a realizar la conexión entre los equipos, comenzando por el humidificador, como se muestra en la figura 4.9.

4.2.3. Instalación de ventiladores y reguladores de velocidad

Se instalan los ventiladores para conducto en línea con las características de funcionamiento mostradas en la tabla 4.3.

Para ubicar los ventiladores en su posición final, es necesario anclar los soportes a la estructura tal como se muestra en la figura 4.10.

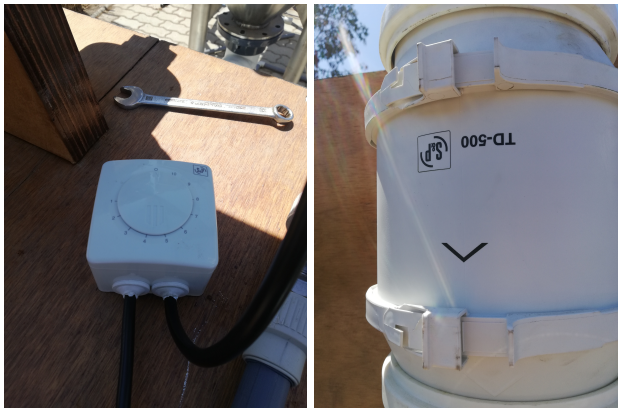
Posteriormente se instalan los ventiladores en los soportes y se realiza la conexión eléctrica. En este punto se agrega un regulador de velocidad modelo RMB-1,5 REB-1 para cada ventilador, esto permite variar los flujos de aire en las posteriores pruebas que se realizarán con el equipo. Ver figura 4.11.

Marca	S & P
Modelo	TD-500/160
Velocidad	2480/2060/1610 $[rpm]$
Temperatura de trabajo	-20/60 $[°C]$
Peso	6 $[kg]$
Diámetro del ducto	160 $[mm]$
Caudal en carga libre	550/450/350 $\left[\frac{m^3}{h}\right]$
Regulación de velocidad	Permite
Potencia	59/50/45 $[W]$

Tabla 4.3: Características de ventilador S & P.



Figura 4.10: Soportes para ventiladores.



(a) Reguladores de velocidad para ventiladores.

(b) Ventilador instalado.

Figura 4.11: Elementos del sistema de circulación de aire.

4.2.4. Conexión de deshumidificadores e instalación de válvulas mariposa

Se instalan los deshumidificadores en sus respectivos soportes. Se utilizan distintas reducciones para llegar al diámetro de salida de la carcasa del deshumidificador, tal

como se muestra en la figura 4.12. Para asegurar que el deshumidificador pueda tener un mantenimiento simple, se ubican dos conexiones americanas en la salida y entrada del equipo, de esta forma se puede retirar de funcionamiento y ser intervenido fuera del lugar de uso. Este equipo cuenta con una pequeña inclinación que permite la evacuación del agua purificada hasta el piping que se encuentra a la salida.



(a) Inteconexión entre equipos

(b) Unión americana utilizada.

Figura 4.12: Conexión final del deshumidificador.

Finalmente, se instalan las válvulas mariposa soportadas por dos sujeciones tipo Pera cada una (ver figura 4.13), estas válvulas permiten cambiar entre un circuito abierto o cerrado de aire. Con la instalación, concluyen las tareas en el sistema de aire.



Figura 4.13: Válvula de mariposa.

4.3. Circuito de agua salada

Se procede a ensamblar el último circuito del desalinizador, el circuito de agua salada; se decide trabajar con piping y fitting de polipropileno (PPR) de diámetro 25 $[mm]$. En el ensamblaje se utiliza una máquina fusionadora (ver figura 4.14), la cual a altas temperaturas funde el PPR que luego es ensamblado. Para poder cambiar la tubería de PPR es necesario cortar y reemplazar, en ningún caso se puede reutilizar algún elemento.



Figura 4.14: Máquina fusionadora de PPR.

4.3.1. Interconexión de deshumidificadores

Se realiza la interconexión entre los deshumidificadores, para esto se debe tener en cuenta las diferentes formas de funcionamiento bajo las que trabajarán. Según lo mostrado en la figura 3.2, se instalan las válvulas V1, V2 y V3 en el sistema de agua salada. Para mantener la facilidad en el mantenimiento de estos equipos, la entrada y salida de agua cuenta con una unión americana, tal como se muestra en la figura 4.15.

La interconexión de los deshumidificadores se puede apreciar en la figura 4.16.



Figura 4.15: Unión americana utilizada en la instalación del circuito de agua salada.



(a) (b)

Figura 4.16: Interconexión final entre deshumidificadores en circuito de agua salada.

4.3.2. Conexión del intercambiador de calor

Luego de los deshumidificadores, se realiza la conexión del intercambiador de calor, el cual había sido previamente conectado al circuito de colectores solares. Se opta por dejar todas las conexiones a este equipo con cañerías de cobre y uniones americanas, con el fin de dar rigidez a los tramos en voladizo y facilitar la extracción del equipo para un óptimo mantenimiento respectivamente, en la figura 4.17 se muestra el equipo conectado.

Es muy importante que la conexión de este equipo sea en contraflujo, es decir, los flujos caliente y frío tengan direcciones contrarias dentro de él, se puede apreciar el principio de funcionamiento en la figura 4.18. En la tabla 4.4 se muestran las características del intercambiador de calor de placas.



Figura 4.17: Unión americana utilizada en la instalación del intercambiador de placas.

Marca	Alpha Laval
Modelo	T5
Placa bastidor	Acero al carbono pintado con epoxi
Placas intercambiadoras de calor	Acero inoxidable AISI 316
Boquillas de conexión	Acero inoxidable rosca 2”
Juntas	Nitrilo, EPDM
Presión de diseño y temperatura	1,6$[MPa]$ a 160 $[°C]$
Superficie de intercambio de calor	4,4 $[m^2]$

Tabla 4.4: Características de intercambiador de placas Alpha Laval.

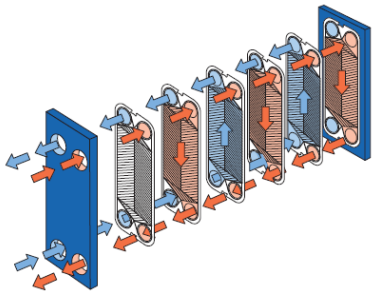


Figura 4.18: Conexión de un intercambiador de placas.

4.3.3. Llegada al humidificador

Antes de realizar las conexiones de agua en el humidificador, se insertan los respectivos rellenos evaporativos en cada uno de los humidificadores. El primer humidificador cuenta con un relleno de paso más amplio que entrega 160 m^2 por metro cúbico de material, lo que da como resultado de 35 m^2 de superficie de intercambio de calor y masa. El segundo humidificador cuenta con el relleno de paso más pequeño, entrega 226 m^2 por metro cúbico de material, lo que da como resultado de 50 m^2 de superficie de intercambio de calor y masa. Se optó por esta configuración debido a que el primer humidificador, al estar más cerca del intercambiador de placas, genera más incrustaciones para el caso crítico de los humidificadores trabajando en serie, en la figura 4.19 se pueden apreciar los elementos instalados.



(a) (b)

Figura 4.19: Relleno evaporativo para el primer y segundo humidificador respectivamente.

Luego de terminada la instalación del relleno, se procede a construir el piping de PPR hasta el humidificador. Es en este punto donde se instalan las válvulas V6 y V7 para cambiar entre conexión serie y paralelo en los humidificadores (Ver figura 3.2).

Luego de estas válvulas, se proceden a instalar los rotámetros correspondientes a cada humidificador. Estos equipos tienen un rango de medición de 1 a 8 $[lpm]$ y permiten regular el flujo que pasa a través de ellos (ver figura 4.20).

Para el ingreso al humidificador se cambia el material del piping a cobre, esto tomando en cuenta que se necesitará rigidez para poder soportar el segmento en voladizo antes de la boquilla de aspersión. Para asegurar la estanqueidad del equipo, se modifica una brida ciega como la que se muestra en la figura 4.21, realizando una perforación para luego mecanizar un hilo interno de 3/4”, de esta forma, queda sellado el equipo.



Figura 4.20: Rotámetro regulable antes del ingreso al humidificador.



(a) (b)

Figura 4.21: Brida ciega a modificar para ingreso al humidificador.

El sistema de entrada al humidificador está diseñado pensando en su fácil extracción del equipo para realizar mantenimiento, es por esto basta con desconectar la unión americana posterior al rotámetro y los pernos de sujeción de la brida para poder remover la pieza completa desde dentro del estanque, tal como se puede apreciar en la figura 4.22.

La boquilla de aspersión es el punto final del circuito de agua (ver figura 4.23). Para su selección se tomó en cuenta la presión de trabajo, paso libre y apertura, de esta forma, se puede obtener la distancia necesaria para desarrollar el cono sólido con un diámetro igual al del humidificador. En la tabla 4.5 se detallan las características de este elemento.



Figura 4.22: Segmento de piping extraíble desde el humidificador.

Marca	Spraying System
Modelo	1/4HHSJ-SS1207
Conexión	1/4”
Ángulo de aspersión a 0.7 bar	120 °
Diámetro nominal de orificio	2.4 $[mm]$
Diámetro nominal de orificio	2.4 $[mm]$
Capacidad a 0.7 bar	2.7 $[\frac{litros}{min}]$
Capacidad a 3 bar	5.5 $[\frac{litros}{min}]$
Material	Acero inoxidable AISI 316

Tabla 4.5: Características de las boquillas de aspersión Sprying System.



Figura 4.23: Boquilla de aspersión Sprying System.

4.3.4. Instalación de bombas y filtros

Se procede a instalar las bombas y filtros para el circuito de agua salada, con la finalidad de reducir las impurezas que entran al sistema transportadas en el agua de alimentación, sobre todo considerando que se trabajará con agua salada. Se instalaron

dos filtros después de la bomba de succión del estanque principal, el primero de ellos es un filtro tipo Y recolector de impurezas y el segundo corresponde a un filtro para agua en línea, ver figura 4.24.



(a) (b)

Figura 4.24: Filtros dispuestos después de la bomba en el circuito de agua salada.

Luego de los filtros se instala la bomba del estanque principal junto con un estanque provisorio, esto para realizar una prueba preliminar con los sistemas en paralelo. La bomba cuenta con las características mostradas en la tabla4.6.

Marca	Pedrollo
Modelo	CP 130
Hmáx/Hmín	23/14 $[m]$
Diámetro nominal de entrada	1”
Diámetro nominal de salida	1”
Tipo de conexión eléctrica	Monofásica/Trifásica
Potencia	0.37 $[kW]$

Tabla 4.6: Características de las bombas Pedrollo para el sistema principal de agua salada y el sistema de recirculación.

4.3.5. Estanques de almacenaje y medición de destilado

Finalmente se instalan los estanques definitivos para el funcionamiento del sistema, estos son tres y se detallan a continuación. El primero de ellos es el estanque principal, este estanque suministra el agua a los deshumidificadores y tiene las características mostradas en la tabla 4.7.

Marca	Infraplast
Modelo	EVS-1200
Capacidad	1200 $[l]$
Alto	134 $[cm]$
Largo	134 $[cm]$
Tipo de conexión	HI 1”

Tabla 4.7: Características de del estanque principal marca Infraplast.

El segundo estanque funciona como receptor del flujo de salida del primer humidificador, esta agua es luego bombeada al segundo humidificador para lograr el circuito en serie propuesto. El estanque cuenta con las características mostradas en la tabla 4.8.

Marca	Infraplast
Modelo	EVS-650
Capacidad	650 $[l]$
Alto	92 $[cm]$
Largo	90 $[cm]$
Tipo de conexión	HI 1”

Tabla 4.8: Características de del estanque para recirculación marca Infraplast.

Finalmente, se tiene el último estanque adquirido, este funciona como receptor del agua purificada por el sistema HDH en la salida de la carcasa del deshumidificador, la principal característica del recipiente es que se encuentra graduado, facilitando la lectura de agua purificada. Las características del estanque se muestran en la tabla 4.9.

Marca	Infraplast
Modelo	QTK-250
Capacidad	250 $[l]$
Alto	98 $[cm]$
Largo	62 $[cm]$
Material	Polietileno (LLDPE)

Tabla 4.9: Características de del estanque para recepción de agua purificada marca Infraplast.

La recolección de agua destilada es realizada por un efecto sifón, es decir, se llena una parte del piping de agua, de tal forma que el goteo constante hace subir el nivel en ambos extremos hasta que se derrama el agua desalinizada por el extremo que da hasta el estanque colector. En la figura 4.25 se aprecia la ubicación final de los elementos.



(a) (b)

Figura 4.25: Estanques de plástico utilizados en la planta.

4.3.6. Arreglos finales

Para terminar la construcción, se instalan los tubos Heat Pipe marca PrismaSolar, es necesario indicar que solo se instalaron la mitad de los tubos en las estructuras frontales, esto para realizar las primeras pruebas, el resto de los tubos Heat Pipe se instalarán paulatinamente en las estructuras vacías. A continuación, en la figura 4.26, se presenta la planta de desalinización HDH terminada.



Figura 4.26: Planta de desalinización HDH terminada.

Capítulo 5

Puesta en marcha y recomendaciones

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, el sistema se hace funcionar con la mitad de los tubos Heat Pipe disponibles a modo de marcha blanca, con el fin de probar los subsistemas presentes y que cada elemento de ellos funcione correctamente. Luego de la verificación, se realiza la primera prueba con agua dulce, comenzando a las 16:00 hrs del jueves 14 de marzo del 2019, onde se obtienen los primeros 4 litros de agua en funcionamiento hasta las 17:30 hrs. Se aprecia que las bombas primaria y de recirculación funcionan a baja capacidad.

El día 15 de marzo se realizan ajustes para reducir los problemas mencionados anteriormente en las bombas. Los resultados obtenidos se relatan a continuación.

- EL circuito de colectores trabaja con un flujo de agua de 20/25/30 $\left[\frac{l}{min}\right]$ dependiendo de la velocidad seleccionada.
- El circuito de aire puede trabajar entre 350-550 $\left[\frac{kg}{hr}\right]$ dependiendo de la regulación de velocidad requerida.
- El circuito de bombas entrega un flujo de hasta 3 $\left[\frac{l}{min}\right]$ máximo en las primeras pruebas.
- El manómetro del circuito de colectores marca 2.5 $[bar]$ de presión.
- El manómetro del circuito de agua salada marca hasta los 2 $[bar]$ de presión.

En el primer día de uso, se trabajó con ambos equipos en serie, logrando extraer hasta 20 litros de destilado durante el día. Cabe destacar que se dejaron listos los puntos

de medición para la instrumentación de la máquina, considerando todos los modos de funcionamiento que esta tiene.

A pesar de que todavía quedan ajustes por realizar a la máquina desalinizadora HDH, se pudo verificar el correcto funcionamiento de todos los subsistemas que la componen, y por consecuencia, el funcionamiento del sistema integrado.

5.1. Recomendaciones

Algunos de los problemas generados fueron la fuga de agua por la acumulación en la juntura del ventilador, cabe destacar que esto es provocado por la falta de aislante térmico en el ducto de salida del humidificador y es una situación fácilmente solucionable.

De la misma forma, es necesario aislar térmicamente el circuito de agua de los colectores y la salida del intercambiador de placas, esto debido a que las altas temperaturas que estos flujos alcanzan, generando mayores pérdidas por transferencia de calor. De la misma forma, se debe evaluar aislar térmicamente el humidificador y el estanque para alimentar la segunda etapa de humidificación, esto debido a que también son equipos que trabajan con altas temperaturas.

Debido al elevado calor especifico del aire húmedo, es recomendable reevaluar el intercambiador de tubo y carcasa como equipo deshumidificador, es posible mejorar su performance aumentando el área de intercambio de calor u obstruyendo parcialmente el paso del aire, todo esto con el fin de reducir más la temperatura del flujo y obtener mayor cantidad de agua purificada a la salida.

Si bien se obtuvo un funcionamiento correcto del equipo, es necesario optimizar el rendimiento de la máquina a través de las mediciones de temperatura y usando los modelos presentados en este documento, de esta forma, ajustar los parámetros de entrada para de obtener un mejor desempeño.

Revisar el rendimiento de las bombas de circulación de agua salada, debido a que presentan un caudal inferior al mostrado por catálogo; esto puede provocarse debido al largo tiempo que estas estuvieron en bodega.

Instalar paneles fotovoltaicos para suplir el consumo eléctrico de los dos ventiladores y las tres bombas, esto para adaptar el prototipo a funcionar de manera completamente independiente.

Los nuevos desafíos para continuar con el desarrollo de este sistema se basan prin-

cipalmente en suplir las carencias detectadas, es decir, se busca lograr mayor independencia del sistema ante las variaciones meteorológicas. Lograr un funcionamiento continuo, de modo de aumentar la disponibilidad de la máquina maximizando las horas de funcionamiento. Por último, lograr reducir los costos de inversión necesarios para contar con esta tecnología, de modo que sea una alternativa más atractiva para la inversión.

Capítulo 6

Conclusiones

La desalinización por método HDH se perfila como una posible solución para la escasez de agua dulce, sobre todo en lugares con poco acceso, alta radiación solar y asentamientos cercanos a fuentes hídricas no potables. En este marco se recopilaron antecedentes de distintos modelos de plantas HDH plasmados como patentes, diseños y experimentos, logrando una perspectiva del panorama actual y apuntando a innovar en el método a futuro.

Los modelos previos de desalinización HDH fueron ajustados satisfactoriamente a los subsistemas y al sistema integrado de la nueva máquina, incorporando las distintas conexiones serie paralelo a las que se hace referencia en el capítulo 3. Se logró encontrar diversos puntos de operación de la planta y comparar las distintas configuraciones. El mejor rendimiento se observó en la configuración de humidificadores y deshumidificadores en serie, debido principalmente a la recuperación de calor entre procesos.

Se logró instalar de manera exitosa la planta de desalinización HDH, destacando la modularidad y el fácil mantenimiento del sistema. La construcción fue llevada a cabo por dos personas, lo que indica que es posible realizar mantenimiento con igual cantidad de mantenedores. A pesar de que no se consideró la instalación de paneles fotovoltaicos en el proyecto, es una opción que puede ser implementada sin inconvenientes.

Con todos los subsistemas funcionando correctamente, la producción de agua purificada el día viernes 15 de marzo del 2019 fue de 20 litros, la cual resulto ser la primera prueba de funcionamiento trabajando con agua potable en el sistema de agua salada. Si bien este número se encuentra bajo lo esperado, se debe tener en cuenta que el sistema solo funcionó con la mitad de los colectores y con algunas dificultades en las bombas

de agua salada, además de no contar con un monitoreo de las temperaturas del sistema, lo que imposibilitó configurar los parámetros para el funcionamiento óptimo.

Bibliografía

[1] José Emiliano Aburto Valenzuela. Rediseño de prototipo de desalinización solar con sistema hdh. B.S. thesis, Santiago/Universidad Técnica Federico Santa María, 2018.

[2] Giwa Adewale, Fath Hassan, and W. Hasan. Shadi. Humidification-dehumidification desalination process driven by photovoltaic thermal energy recovery (pv-hdh) for small-scale sustainable water and power production. Desalination 377, pages 163–171, 2016.

[3] Peter Armstrong. Solar humidifier in a Humidification-Dehumidification type desalination system. Khalifa University of Science and Technology, World Intellectual Property Organization WO 2018/167732 Al, September 20, 2018.

[4] K.D. Beard. Hot air desalinization apparatus. United States Patent Office 3,317,406, May 2, 1967.

[5] James R. Beckman. Method and apparatus for simultaneous heat and mass transfer utilizing a carrier-gas. United States Patent 6,911,121 B1, June 28, 2005.

[6] WWAP (Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas). Agua y empleo. Technical report, UNESCO, 2016.

[7] C. Dobell. Producing fresh water from air raised to haig humidity by exposure to water vapor from contaminated sources of water. United States Patent Office 3,334,026, August 1, 1967.

[8] Al-Sulaiman et al. Humidification-Dehumidification desalination system. King Fahd University of Petroleum and Minerals, United States Patent US 9,643,102 B2, May 9, 2017.

[9] ElDifrawi et al. Thermal gradient Humidification-Dehumidification desalination system. United States Patent 4,363,703, December 14, 1982.

[10] Frolov et al. Hybrid solar desalination system. United States Patent US 2010/0314238 A1, December 16, 2010.

[11] Govindan et al. Transiently-operated desalination systems with heat recovery and associated methods. Gradiant Corporation, United States Patent US 9,617,169 B2, April 11, 2017.

[12] Govindan et al. Water separation under varied pressure. United States Patent US 2011/0079504 A1, April 7 2011.

[13] Govindan et al. High-efficiency thermal-energy-driven water purification system. United States Patent US 2012/0205236 A1, August 16, 2012.

[14] Govindan et al. Thermodynamic balancing of combined heat and mass exchange devices. United States Patent US 8,496,234 B1, July 30, 2013.

[15] Hartman et al. Apparatus and method for thermal desalination based on pressurized formation and evaporation of droplets. United States Patent 6,699,369 B1, March 2, 2004.

[16] H.J. Gerber. Means for desalting sea mater by solar heat and air convection. United States Patent Office 3,257,291, June 21, 1966.

[17] A.E. Kabeel and M. Abdelgaied. Experimental evaluation of a two-stage indirect solar dryer with reheating coupled with hdh desalination system for remote areas. Elsevier Desalination 425, pages 22–29, 2018.

[18] Esteban Ignacio Leiva Flores. Modelamiento numérico y análisis de configuraciones de sistemas de destilación por humidificación y deshumidificación(hdh). B.S. thesis, Santiago/Universidad Técnica Federico Santa María, 2018.

[19] David E. Longer. Process for desalinization utilizing Humidification/Dehumidification. United States Patent 6,607,639 B1, August 19, 2003.

[20] G. Prakash Narayan, Mostafa H. Sharqawy, John H. Lienhard, and Syed M. Zubair. Thermodynamic analysis of humidification dehumidification desalination cycles. Desalination and Water Treatment 16, pages 339–353, 2010.

[21] G. Prakash Narayan, Mostafa H. Sharqawy, Edward k. Summers, John H. Lienhard, Syed M. Zubair, and M.A. Antar. The potential of a solar-driven humidification-dehumidification desalination for small-scale decentralized water production. Elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, pages 1187–1201, 2009.

[22] Zohreh Rahimi-Ahar, Mohamed Sadegh Hatamipour, and Younes Ghalavand. Experimental investigation of a solar vacuum humidifation-dehumidification (vhdh) desalination system. Elsevier Desalination 437, pages 73–80, 2018.

[23] T Rajaseenivasan and K Srithar. An investigation into a laboratory scale bubble column humidification dehumidification desalination system powered by biomass energy. Elsevier Desalination 139, pages 232–244, 2017.

[24] T Rajaseenivasan and K Srithar. Potential of a dual purpose solar collector on humidification dehumidification desalination system. Elsevier Desalination 404, pages 35–40, 2017.

[25] Mauricio Antonio Reyes Valenzuela. Diseño y construcción de sistema de desalinización solar por método de humidificación-deshumidificación (hdh) acoplado con energía solar. B.S. thesis, Santiago/Universidad Técnica Federico Santa María, 2017.

[26] Nicholas C. Roch. Modular Humidification-Dehumidification apparatus for concentrating solutions. Salteorks Technologies INC., World Intellectual Property Organization WO 2013/159220 Al, October 31, 2013.

[27] Klein SA. Engineering Equation Solver (EES) for Microsoft windows operating systems. Commercial and Professional Version, F-Chart Software, 2019.

[28] David Javier Saldivia Salazar. Simulación computacional de sistema térmico de desalinización acoplado con energía solar. B.S. thesis, Valparaíso/Universidad Técnica Federico Santa María, 2015.

[29] Neil M. Wade. Distillation plant development and cost update. Elsevier Desalination 136, pages 3–12, 2000.

Anexo A

Simulaciones realizadas con el programa EES

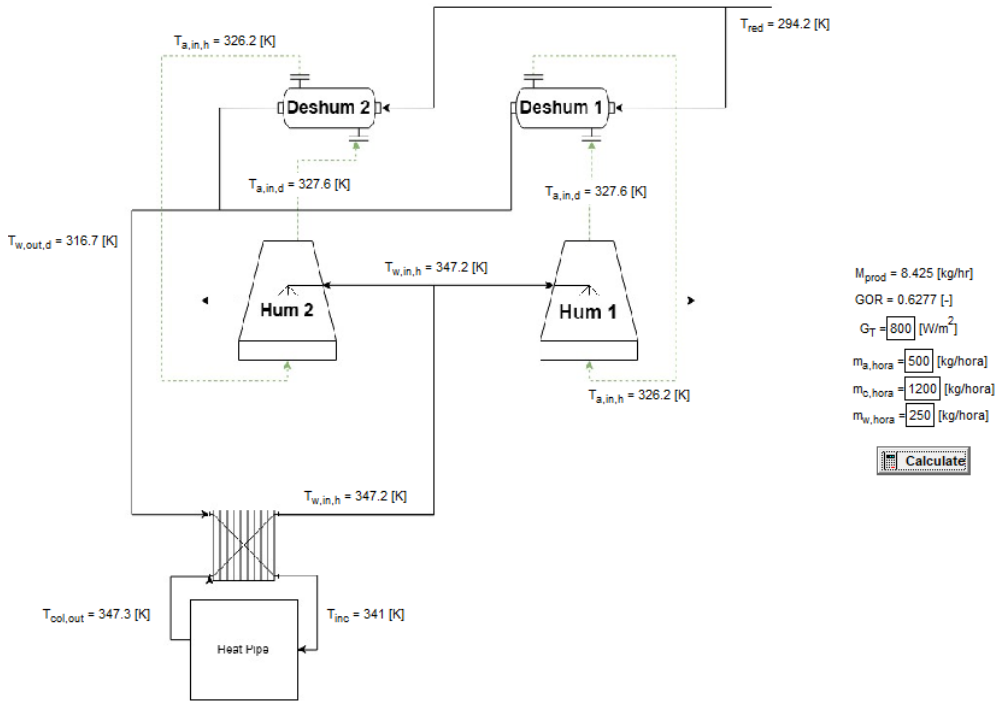


Figura A.1: Performance del sistema HDH CAOW con humidificadores y deshumidificadores en paralelo. Fuente, elaboración propia.

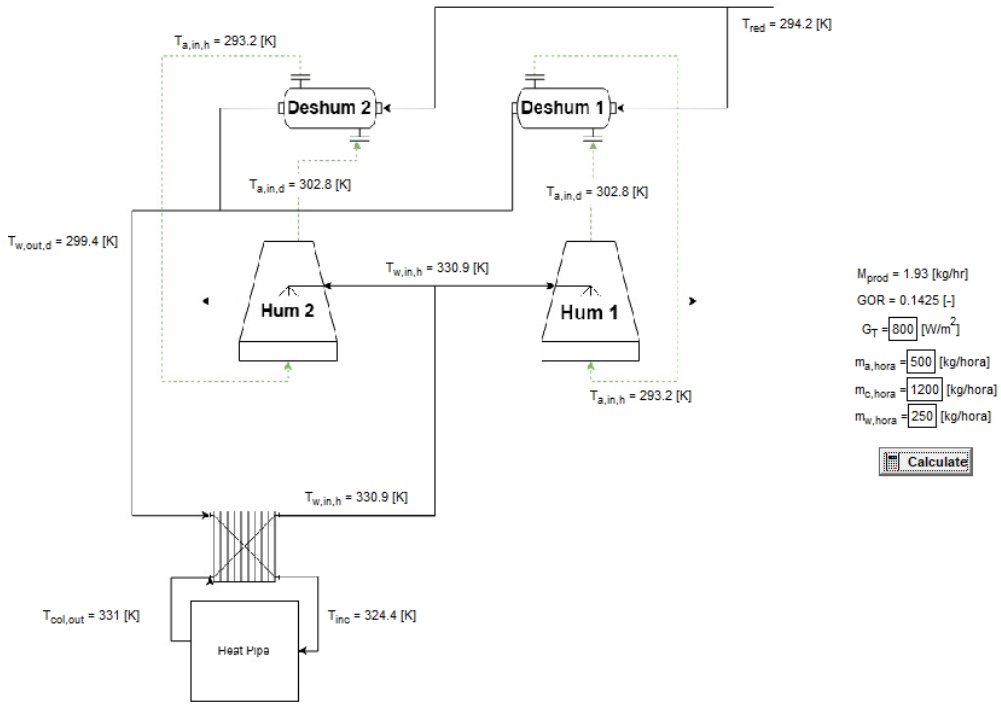


Figura A.2: Performance del sistema HDH CWOA con humidificadores y deshumidificadores en paralelo. Fuente, elaboración propia.

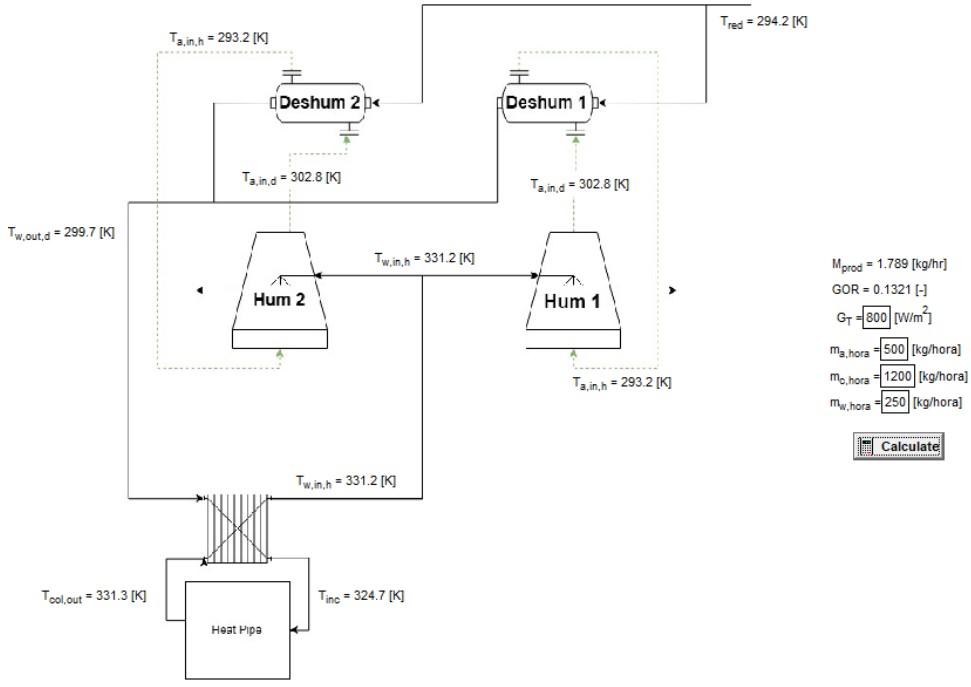


Figura A.3: Performance del sistema HDH OAOW con humidificadores y deshumidificadores en paralelo. Fuente, elaboración propia.

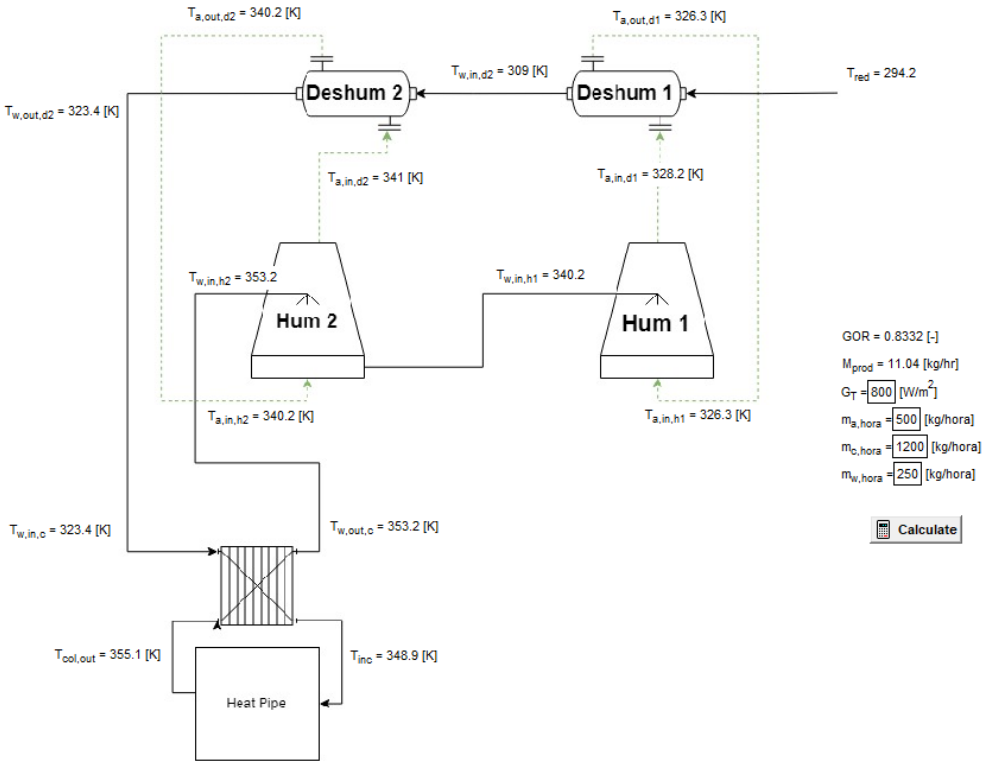


Figura A.4: Performance del sistema HDH CAOW con ambos equipos conectados en serie. Fuente, elaboración propia.

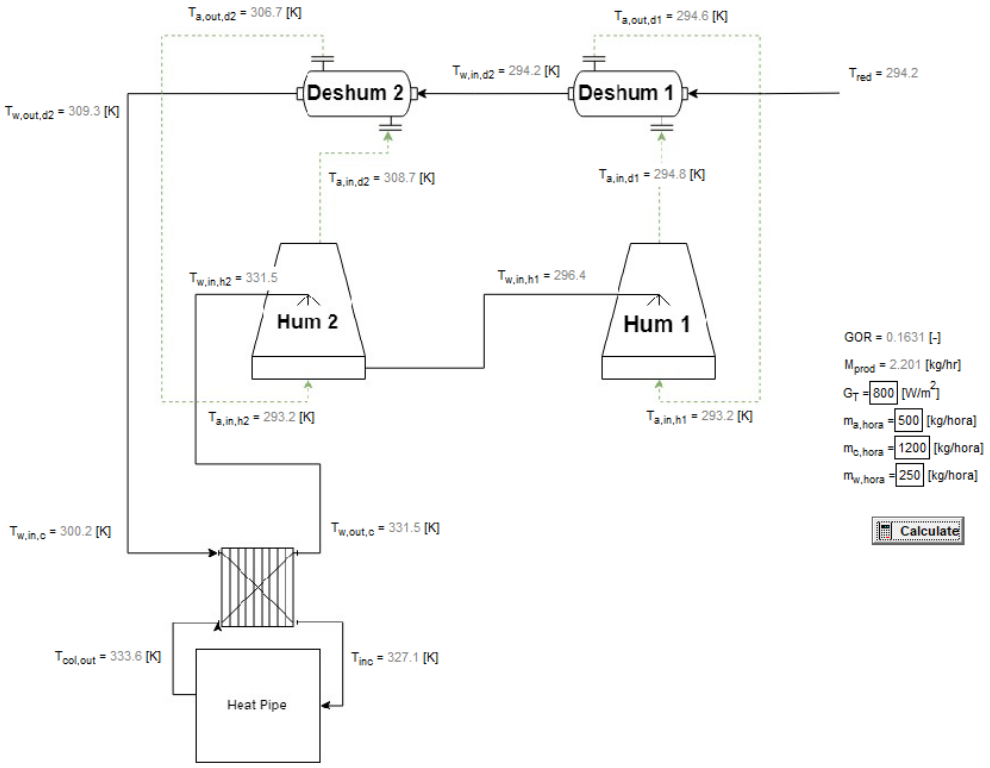


Figura A.5: Performance del sistema HDH CWOA con ambos equipos conectados en serie. Fuente, elaboración propia.

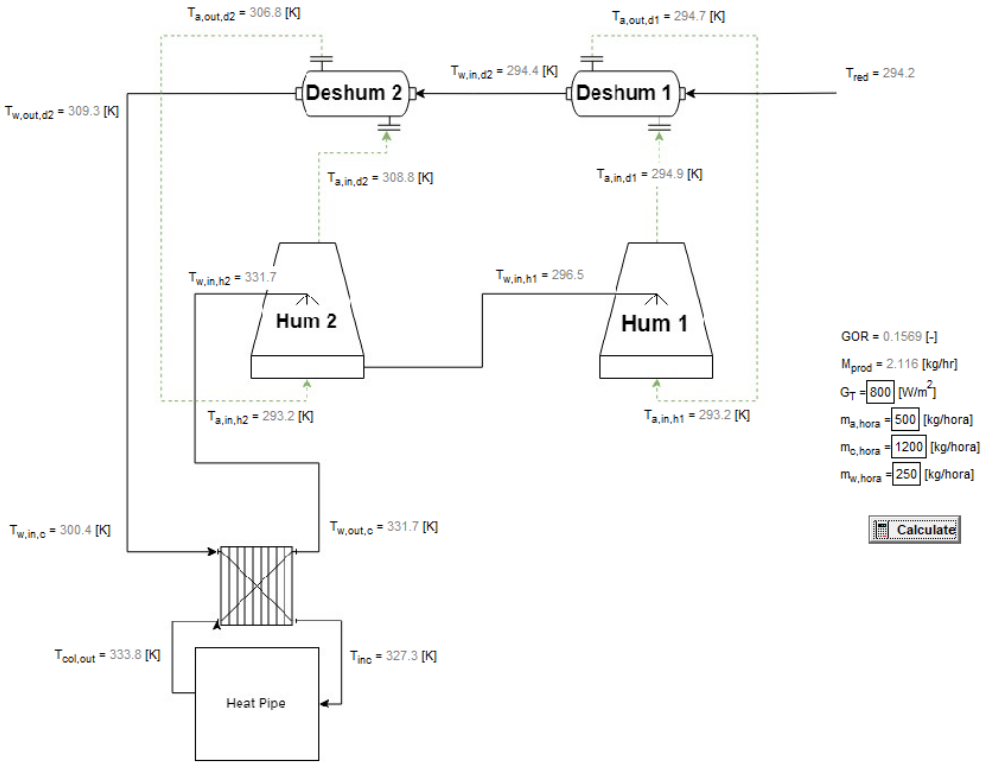


Figura A.6: Performance del sistema HDH OAOW con ambos equipos conectados en serie. Fuente, elaboración propia.

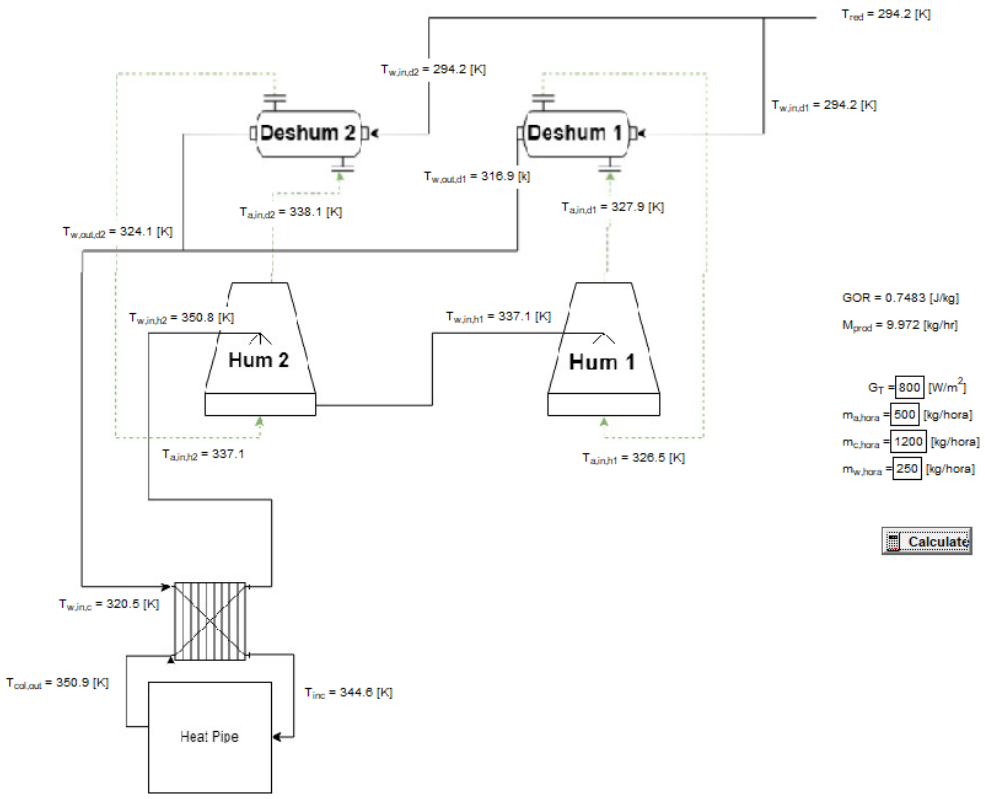


Figura A.7: Performance del sistema HDH CAOW con deshumidificadores en paralelo y humidificadores en serie. Fuente, elaboración propia.

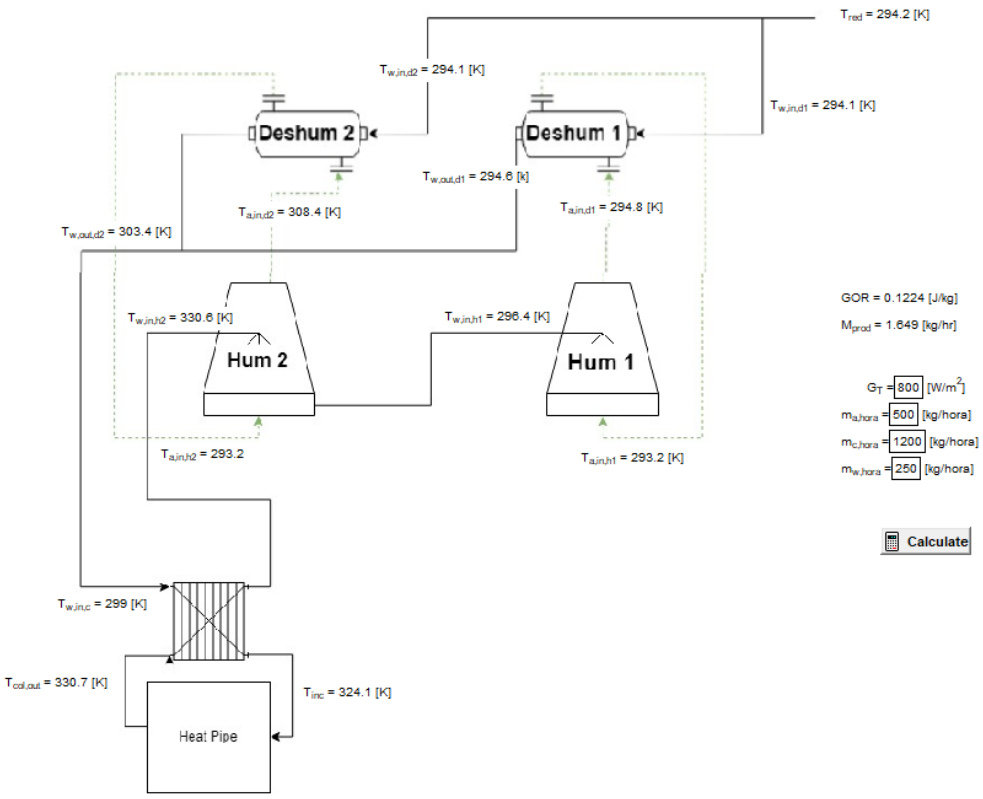


Figura A.8: Performance del sistema HDH CWOA con deshumidificadores en paralelo y humidificadores en serie. Fuente, elaboración propia.

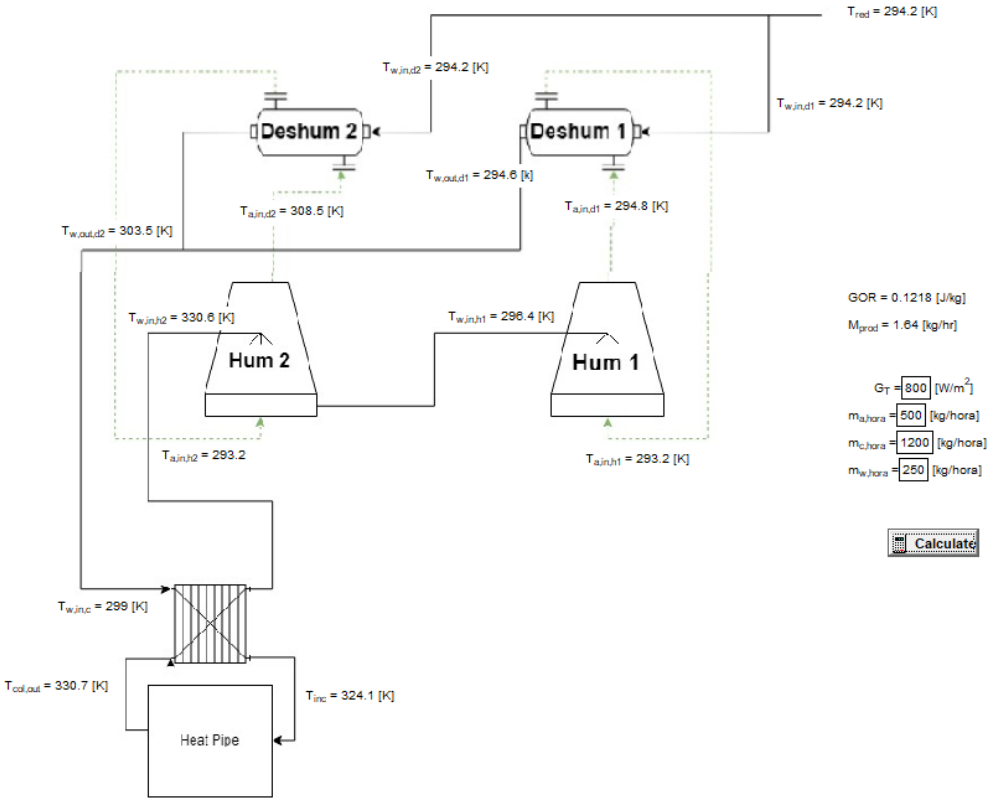


Figura A.9: Performance del sistema HDH OAOW con deshumidificadores en paralelo y humidificadores en serie. Fuente, elaboración propia.

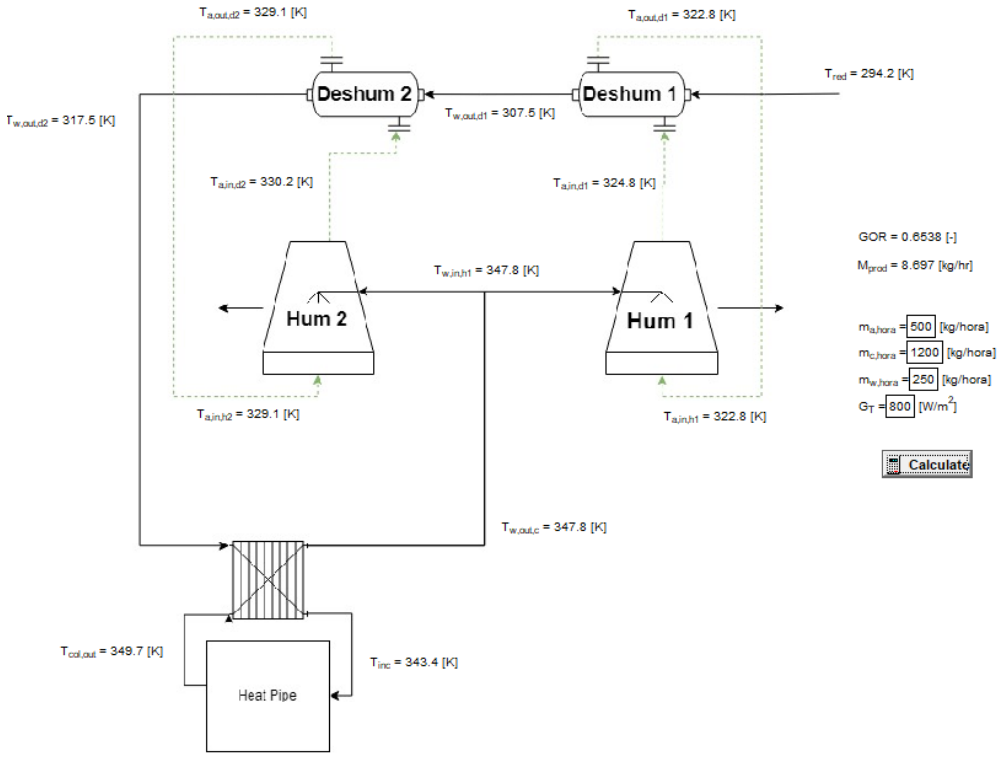


Figura A.10: Performance del sistema HDH CAOW con humidificadores en paralelo y deshumidificadores en serie. Fuente, elaboración propia.

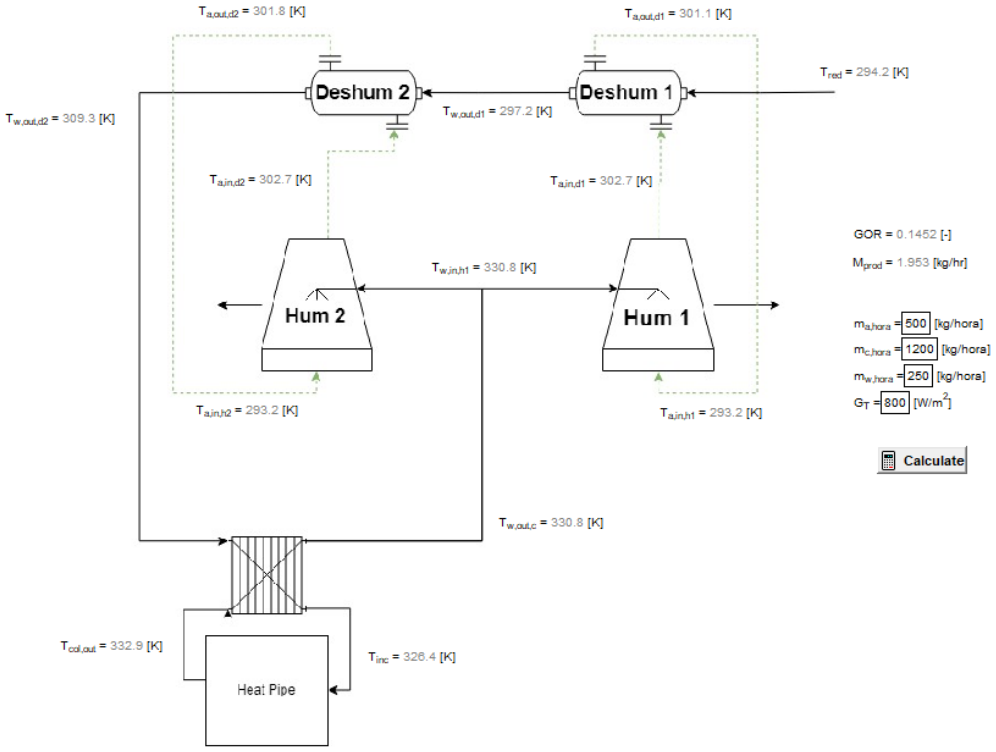


Figura A.11: Performance del sistema HDH CWOA con humidificadores en paralelo y deshumidificadores en serie. Fuente, elaboración propia.

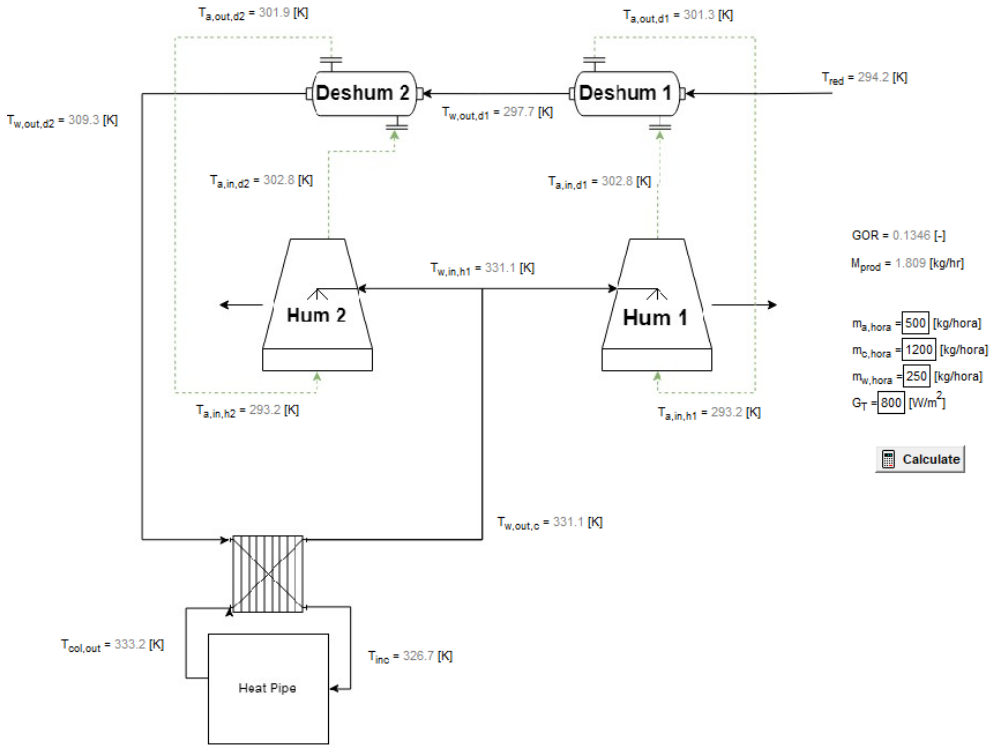


Figura A.12: Performance del sistema HDH OAOW con humidificadores en paralelo y deshumidificadores en serie. Fuente, elaboración propia.