

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

VALPARAÍSO – CHILE



Análisis operacional de sistemas de desalinización
solar por Humidificación y Deshumidificación de una
y dos etapas

CÉSAR ANTONIO MAYA MAYA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: PH. D RODRIGO BARRAZA VICENCIO

PROFESOR CORREFERENTE: ING. MAURICIO REYES VALENZUELA

MAYO 2021

Resumen

En el laboratorio de energías renovables de la Universidad Técnica Federico Santa María en Viña del Mar, se encuentran instalados dos prototipos de plantas desaladoras por método Humidificación-Deshumidificación (HDH) de una y dos etapas acopladas con energía solar, las cuales fueron desarrolladas por Reyes [1] y Rodríguez [2] respectivamente.

Este trabajo corresponde a la puesta en marcha, para un funcionamiento óptimo, del sistema de desalinización HDH de dos etapas. En primer lugar, se realiza una revisión y análisis del estado y funcionamiento de la planta existente, con el fin de corregir todas las filtraciones y/o piezas defectuosas que impiden un correcto funcionamiento. Para esto, se realiza un proceso de reparación de los equipos, y la conexión de todos los elementos que faltaban ensamblar para completar el diseño propuesto por Aburto [3].

Tras los arreglos del sistema HDH de dos etapas, se realizan pruebas, tanto a la planta de una como la de dos etapas, para encontrar las condiciones y la configuración para producir el máximo de agua destilada en cada sistema de desalinización. Para el prototipo de una etapa se encuentran los caudales de aire y agua de alimentación que producen el máximo rendimiento, mientras que para la planta de dos etapas se evalúan las distintas configuraciones de operación, para encontrar el arreglo que aprovechaba mejor la energía del sistema y produce la mayor cantidad de destilado. Para lograr lo anterior, se propone un nuevo indicador de rendimiento para las plantas HDH de una y dos etapas, llamado SIDR, que reemplaza al parámetro GOR, para obtener mejores conclusiones de cada planta desalinizadora con respecto a su desempeño.

Finalmente, se proponen las condiciones iniciales y configuración de operación para cada prototipo, detallando los procesos llevados a cabo y las recomendaciones para obtener un sistema más eficiente y autónomo que integre a ambos prototipos.

Abstract

At the renewable energy laboratory of the Technical University Federico Santa María in Viña del Mar, two prototypes of desalination plants are installed using the humidification – dehumidification (HDH) method of one and two stages coupled with solar energy, which were developed by Reyes [1] and - Rodriguez [2] respectively.

This work corresponds to the start-up, for optimal operation, of the two-stage HDH desalination system. In first place, a review and analysis of the condition and operation of the existing plant is carried out, in order to correct all the leaks and / or defective parts that prevent proper operation. For this, a process of repair of the equipment is carried out, and the connection of all the missing elements to complete the design proposed by Aburto [3].

After the arrangements of the two-stage HDH system, tests are carried out, both at the one-stage and the two-stage plant, to find the optimal conditions and configuration to produce the maximum distilled water in each desalination system. For the one-stage prototype there are the air and feedwater flow rates that produce maximum performance, while for the two-stage plant the different operating configurations are evaluated, to find the arrangement that best used the energy of the system and It produces the largest amount of distillate. To achieve the previously mentioned, a new performance indicator is proposed for the one and two stage HDH plants, called SIDR, which replaces the GOR parameter, in order to obtain better conclusions of each desalination plant with respect to its performance.

Finally, the initial conditions and operation configuration for each prototype are proposed, detailing the processes carried out and the recommendations to obtain a more efficient and autonomous system that integrates both prototypes.

Índice

1	Introducción	- 1 -
1.1	Introducción	- 1 -
1.2	Objetivos	- 2 -
1.2.1	Objetivo general	- 2 -
1.2.2	Objetivos específicos	- 2 -
2	Antecedentes de sistemas de desalinización solar por método Humidificación-Deshumidificación	- 3 -
2.1	Sistemas de desalinización por método HDH	- 3 -
2.2	Estudio de patentes e innovaciones en métodos HDH	- 5 -
2.3	Tipos de circuitos de sistemas HDH	- 9 -
2.3.1	Deshumidificadores y humidificadores conectados en paralelo.	- 10 -
2.3.2	Deshumidificadores y humidificadores conectados en serie.	- 11 -

2.3.3	Deshumidificadores y humidificadores conectados en paralelo y serie respectivamente.	_____	- 12 -
2.3.4	Deshumidificadores y humidificadores conectados en serie y paralelo respectivamente.	_____	- 13 -
2.4	Conclusiones	_____	- 14 -
3	Evaluación, modificaciones operativas y de instrumentación del sistema HDH de dos etapas existente.	_____	- 15 -
3.1	Situación actual de la planta HDH de dos etapas existente	_____	- 15 -
3.2	Sistema colector solar	_____	- 15 -
3.3	Humidificadores	_____	- 18 -
3.4	Circuito de aire	_____	- 22 -
3.5	Instrumentación	_____	- 24 -
3.5.1	Temperatura	_____	- 24 -
3.5.2	Calibración	_____	- 25 -
3.5.3	Radiación	_____	- 26 -

3.5.4	Presión	_____	- 26 -
3.5.5	Flujos de agua y aire	_____	- 26 -
3.6	Consumo eléctrico	_____	- 28 -
3.7	Conclusiones	_____	- 30 -
4	Análisis y resultados experimentales	_____	- 31 -
4.1	Parámetros de rendimiento	_____	- 31 -
4.1.1	GOR	_____	- 31 -
4.1.2	SIDR	_____	- 32 -
4.2	Planta desaladora HDH de una etapa	_____	- 32 -
4.2.1	Parámetros constructivos y de operación	_____	- 32 -
4.2.2	Resultados experimentales	_____	- 36 -
4.2.3	Análisis de resultados planta HDH de una etapa	_____	- 40 -
4.3	Planta desaladora HDH de dos etapas	_____	- 41 -
4.3.1	Parámetros constructivos y de operación	_____	- 41 -

4.3.2	Resultados experimentales	- 45 -
4.3.3	Análisis de resultados planta HDH de dos etapas	- 49 -
4.4	Conclusiones	- 53 -
5	Conclusiones y recomendaciones	- 55 -
5.1	Conclusiones	- 55 -
5.2	Recomendaciones	- 58 -
6	Referencias	- 59 -
7	Anexos	- 61 -
7.1	Anexo A	- 61 -
7.2	Anexo B	- 63 -
7.3	Anexo C	- 65 -

Índice de figuras

Figura 1-1 Ciclo del agua, apartado de Narayan [4].	- 1 -
Figura 2-1 Sistema de desalinización solar HDH - Narayan [4].	- 4 -
Figura 2-2 Modelo de Huang [7].	- 6 -
Figura 2-3 Estructura del sistema de Weifeng [8].	- 7 -
Figura 2-4 Propuesta de Sulaiman [9].	- 8 -
Figura 2-5 Deshumidificadores y humidificadores conectados en paralelo - Rodríguez [2]	- 10 -
Figura 2-6 Deshumidificadores y humidificadores conectados en serie - Rodríguez [2]	- 11 -
Figura 2-7 Deshumidificadores y humidificadores conectados en paralelo y serie respectivamente - Rodríguez [2].	- 12 -
Figura 2-8 Deshumidificadores y humidificadores conectados en serie y paralelo respectivamente - Rodríguez [2].	- 13 -
Figura 3-1 Tubos Heat Pipe conectados.	- 16 -
Figura 3-2 Válvula de cierre sistema colector	- 17 -

Figura 3-31 Piranómetro, Manómetro y Rotámetro	- 27 -
Figura 4-1 Planta HDH de una etapa	- 33 -
Figura 4-2 Sistema colectores, planta HDH de una etapa	- 34 -
Figura 4-3 Agua destilada vs Agua de mar, planta HDH una etapa.....	- 36 -
Figura 4-4 Figura 4 3 Radiación vs Agua de mar, planta HDH una etapa	- 37 -
Figura 4-5 GOR vs Agua de mar, planta HDH una etapa	- 38 -
Figura 4-6 SIDR vs Agua de mar, planta HDH una etapa.....	- 39 -
Figura 4-7 Planta HDH de dos etapas.....	- 41 -
Figura 4-8 Sistema colector, planta HDH de dos etapas.	- 43 -
Figura 4-9 Agua destilada vs Agua de mar, planta HDH dos etapas.....	- 46 -
Figura 4-10 Radiación vs Agua de mar, planta HDH dos etapas.	- 47 -
Figura 4-11 GOR vs Agua de mar, planta HDH dos etapas.	- 48 -
Figura 4-12 SIDR vs Agua de mar, planta HDH dos etapas.	- 49 -

Figura 4-13 Agua destilada y radiación incidente, planta HDH una etapa vs dos etapas. ..	51 -
Figura 4-14 GOR y SIDR, planta HDH una etapa vs dos etapas.	52 -
Figura 7-1 Radiación anual LER, UTFSM Viña del Mar.....	61 -
Figura 7-2 Radiación global Horizontal LER, UTFSM Viña del Mar	62 -
Figura 7-3 Variación anual de la radiación LER, UTFSM Viña del Mar.....	62 -
Figura 7-4 Resultados temperaturas promedios a 0°[C] y 100°[C] de sondas PT100..	63 -
Figura 7-5 Coeficientes de corrección de temperatura.	64 -

Índice de tablas

Tabla 1 Características de los colectores Heat Pipe	16 -
Tabla 2 Características de los instrumentos de medición	28 -
Tabla 3 Medición de voltaje y corriente del ventilador	29 -
Tabla 4 Medición de voltaje y corriente de las bombas.....	30 -

Tabla 5 Dimensiones del humidificador de una etapa.....- 33 -

Tabla 6 Dimensiones deshumidificador de una etapa.....- 34 -

Tabla 7 Características bomba de recirculación Wilo, sistema colector- 35 -

Tabla 8 Características intercambiador de placas.....- 35 -

Tabla 9 Condiciones de operación planta HDH de una etapa- 35 -

Tabla 10 Dimensiones humidificador, planta HDH de dos etapas- 42 -

Tabla 11 Dimensiones deshumidificador, planta HDH de dos etapas.....- 42 -

Tabla 12 Características de colectores Heat Pipe Prisma Solar.....- 43 -

Tabla 13 Características bomba de recirculación Wilo, sistema colector, planta HDH de dos etapas.....- 44 -

Tabla 14 Características intercambiador de placas, planta HDH de dos etapas.....- 44 -

Tabla 15 Condiciones de operación, planta HDH de dos etapas- 45 -

1 Introducción

1.1 Introducción

El principio de funcionamiento de una planta desalinizadora por método HDH se explica en el estudio de Narayan [4], donde se detalla la tecnología en los procesos de desalinización de agua salada, el cual simula el ciclo natural del agua, donde la naturaleza utiliza la energía solar para desalinizar el agua del océano mediante el ciclo de la lluvia. La radiación solar le entrega calor al agua de mar y según la carta psicrométrica, el aumento de temperatura del bulbo seco del aire, manteniendo el mismo valor de humedad relativa trae consigo un aumento de humedad absoluta, considerando que se mantiene constante el valor de humedad relativa, en caso contrario al disminuir la temperatura del aire, éste se deshumidifica, disminuyendo su humedad absoluta. Es por ello por lo que, al aumentar la temperatura del aire, éste se humidifica y actúa como gas portador. El aire humidificado se levanta formando nubes, las que se enfrían a medida que aumenta su altura, mientras las partículas de agua contenidas en las nubes son condensadas, generando la deshumidificación del aire en forma de lluvia (ver Figura 1-1).

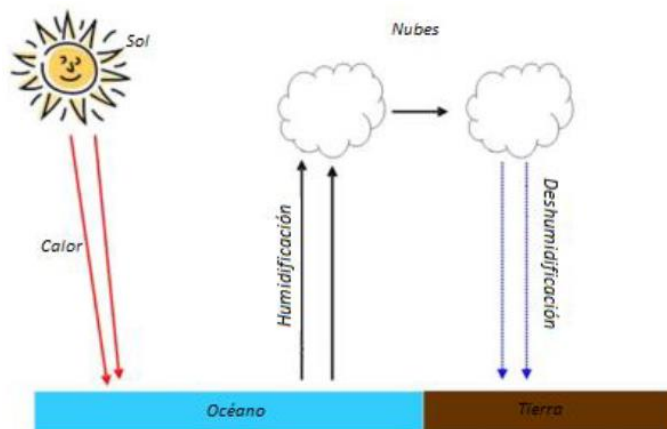


Figura 1-1 Ciclo del agua, apartado de Narayan [4].

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Analizar operacionalmente sistemas de desalinización solar por método de humidificación-deshumidificación de una y dos etapas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Actualizar y analizar las innovaciones e invenciones de sistemas de desalinización por método de humidificación – deshumidificación (HDH).
- Realizar la puesta en marcha y adaptar el nuevo prototipo de desalinización HDH para un adecuado funcionamiento operacional continuo.
- Instrumentar el nuevo prototipo de desalinización HDH.
- Registrar y analizar el comportamiento operacional de sistemas HDH bajo diferentes condiciones de trabajo.

2 Antecedentes de sistemas de desalinización solar por método Humidificación-Deshumidificación

2.1 Sistemas de desalinización por método HDH

Los sistemas de desalinización por método HDH basan su funcionamiento en el ciclo natural del agua. El agua de mar es calentada mediante la radiación solar, evaporándose y humidificando el aire, el cual forma nubes que se comportan como gas portador, trasladando el agua evaporada para posteriormente, producto del aumento de altura y disminución de su temperatura, deshumidificarse, liberando el agua contenida en forma de precipitaciones hacia la superficie terrestre.

Los principales equipos que componen un sistema de desalinización solar por método HDH son:

- Humidificador: equipo donde se produce la transferencia de calor y masa desde el agua de alimentación hacia el aire que circula por éste, humidificándolo para obtener un aire con un mayor contenido de humedad.
- Deshumidificador: equipo que funciona como intercambiador de calor al disminuir la temperatura del aire húmedo y subir la temperatura del agua de alimentación. El aire al ceder calor es enfriado a medida que circula por el equipo, lo que produce la condensación del agua contenida en el aire en forma de humedad.
- Colector Solar: equipo que capta la radiación solar para entregarla como energía al sistema, mediante un intercambiador de calor.

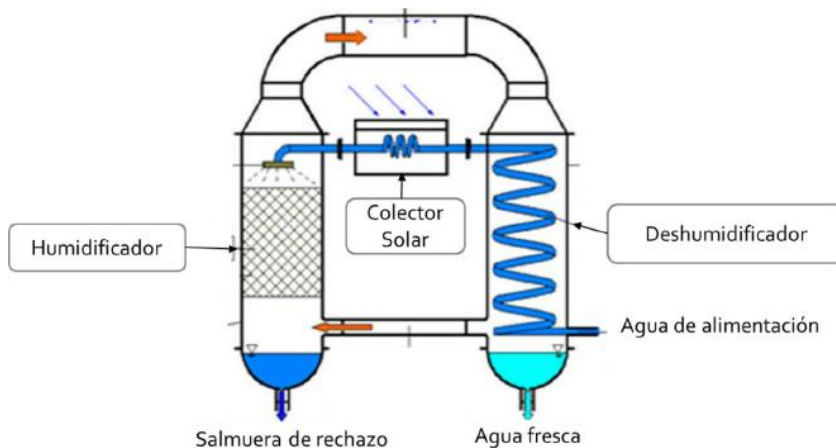


Figura 2-1 Sistema de desalinización solar HDH - Narayan [4].

La figura 2-1 muestra el principio de funcionamiento de un sistema desalinizador solar por método HDH. El agua de mar ingresa por el deshumidificador donde es precalentada, producto de la condensación que se genera a medida que circula por el equipo, saliendo de éste a una mayor temperatura hacia un intercambiador de calor, acoplado con un sistema de colectores solares, los cuales aprovechan la radiación solar incidente para entregarla en forma de calor al sistema HDH. A través del intercambiador de placas, el agua de mar de alimentación incrementa su temperatura para su posterior ingreso al humidificador. Al ingresar el agua al humidificador, entra en contacto con el aire que ingresa por la parte inferior de éste, cediéndole energía y masa, lo que causa un aumento en la temperatura y humedad del aire. El aire circula gracias a un ventilador que permite transportar la humedad contenida en el aire desde el humidificador hacia el deshumidificador, donde es enfriado mediante el contacto indirecto con el agua de mar de alimentación, cediendo calor al agua y disminuyendo la temperatura del aire, condensando así el agua contenida en forma de humedad para la producción de agua purificada.

Los sistemas de desalinización HDH pueden clasificarse según el circuito de los fluidos dentro del sistema en:

- 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)
- Circuito cerrado de agua y cerrado de aire (Closed water closed air (CWCA)

También se pueden clasificar según el fluido que es calentado. En los sistemas de desalinización por método HDH es posible calentar el aire, el agua o ambos fluidos. En el estudio presentado por Leiva [5] se concluye que la configuración que mejor desempeño muestra es una en ciclo CAOW con calentamiento de agua.

2.2 Estudio de patentes e innovaciones en métodos HDH

Anteriormente Rodriguez [2] ha detallado distintos autores involucrados en el estudio y la innovación de sistemas de desalinización por método HDH, que van desde la recuperación de calor en el humidificador a través de una extracción múltiple del aire, como lo detalla Giovindan [6] por ejemplo, al recuperar el calor en la salmuera residual.

Durante el año 2019 Huang [7] desarrolla un modelo del consumo eléctrico y la caída de presión que existe en un sistema de humidificación-deshumidificación como el que se presenta en la figura 2-2. Bajo un estudio experimental para ver el efecto de los parámetros operativos en la caída de presión, Huang [7] concluye que a medida que se incrementa el caudal masico de aire que circula por los equipos, la caída de presión también aumenta. Bajo esta base propone un modelo de optimización para el consumo de energía total

mínimo específico (STEC), donde el consumo de calor domina el consumo total de energía.

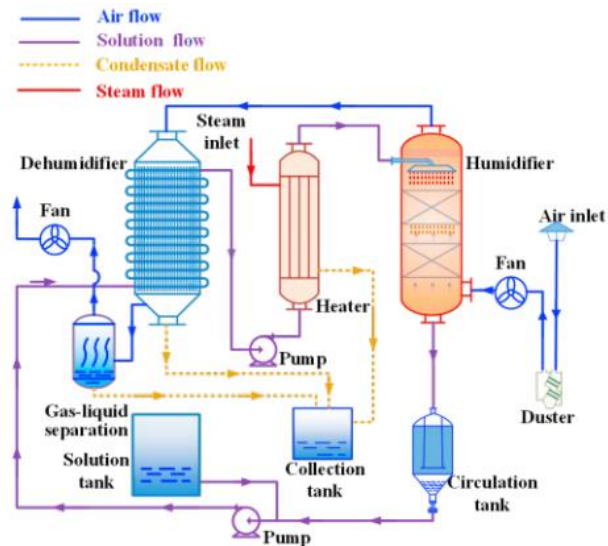


Figura 2-2 Modelo de Huang [7].

Weifeng [8] propone un sistema de circulación termodinámica de aire húmedo cerrado, utilizando un compresor para inyectar energía al circuito de la bomba de calor. La estructura del sistema es compacta, de bajo consumo energético, ideal para zonas con baja demanda de agua dulce. El equipo propuesto mejora la eficiencia del sistema al utilizar integralmente la energía térmica, además de reducir la contaminación por calor latente de condensación del aire húmedo. El esquema propuesto por Weifeng [8] se aprecia en la figura 2-3.

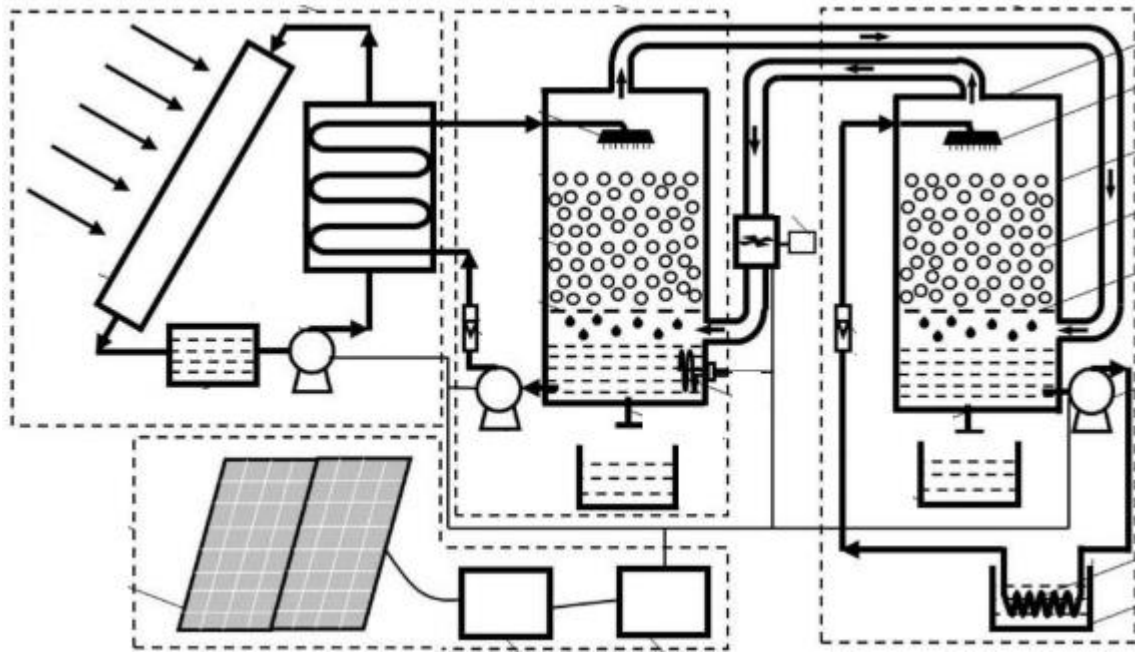


Figura 2-3 Estructura del sistema de Weifeng [8].

Sulaiman [9] propone un sistema de desalinización por humidificación-deshumidificación alimentado con energía solar con la incorporación de un almacenamiento térmico. El almacenamiento térmico consiste en dos tanques, uno para almacenar agua fría y otro para agua caliente. Para trabajar de una manera óptima, un sistema de control mide la temperatura de los tanques de almacenamiento de agua fría y caliente, para mezclar las proporciones necesarias de cada flujo en un intercambiador de calor y así, entregar la temperatura requerida para el agua de alimentación entre el humidificador y el deshumidificador, tal como se muestra en la figura 2-4. El sistema de almacenamiento térmico está diseñado para proporcionar un sistema con una capacidad funcional de 24 horas y una producción de agua dulce a un ritmo constante.

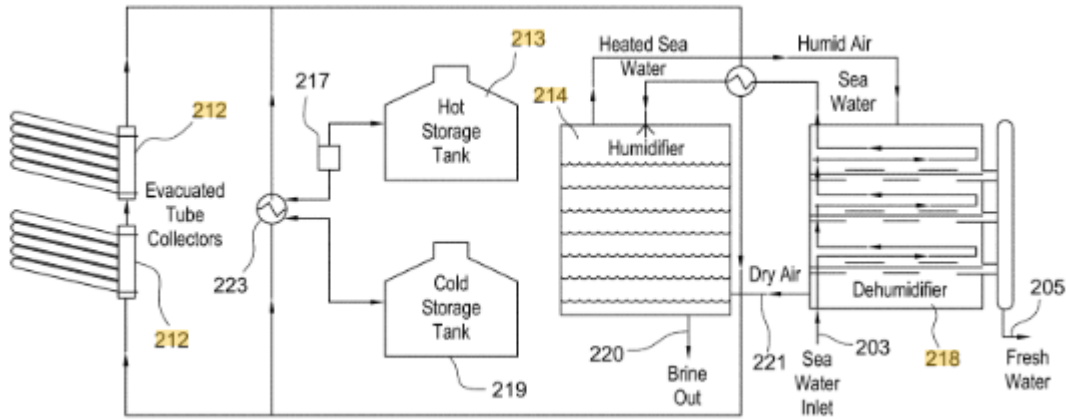


Figura 2-4 Propuesta de Sulaiman [9].

El sistema que propone Sulaiman [9] permite funcionar en un régimen continuo., aumentando la probabilidad de que las sales del agua de alimentación se acumulen dentro del sistema, en comparación a un sistema que opere de manera transitoria. Simpson [10] detalla que una corriente de líquido que fluye a través de un sistema de desalinización operado transitoriamente puede tener una velocidad de flujo relativamente alta en relación con uno que opere continuamente, disminuyendo la formación de cristales de sal. En consecuencia, la probabilidad de formar cristales de sal dentro de un sistema de desalinización puede reducirse al operar un sistema HDH de forma transitoria en comparación a uno que opera continuamente.

2.3 Tipos de circuitos de sistemas HDH

Anteriormente Leiva [5] ha detallado el avance de los sistemas de desalinización por métodos de humidificación-deshumidificación incorporando el concepto de multi-etapas, es decir, se agregan dos o más equipos de humidificador y/o condensador con calentamiento de agua o aire. Al agregar más etapas al sistema aumenta la producción de la planta y mejora su desempeño, pero existe un punto en donde agregar más etapas conlleva a una inversión que no se justifica con el aumento en la producción de agua dulce.

El sistema de desalinización HDH que mejor desempeño puede lograr es uno que opere con ciclo de aire cerrado y el flujo de agua de alimentación en ciclo abierto, con calentamiento de esta última. El aumento desde una a dos etapas en sistemas HDH es el cambio más significativo en la producción de agua dulce entre una etapa y otra. Al agregar más etapas sigue aumentando el destilado producido, pero cada vez el aumento es menor. En el estudio hecho por Leiva [5] se detallan casos de hasta un máximo de cuatro etapas, ya que no es viable invertir en una gran cantidad de equipos para una planta que puede producir un insignificante aumento en la producción de agua dulce ante un considerable aumento en la inversión.

Para un sistema de desalinización HDH de dos etapas existen diferentes configuraciones de operación en la que pueden ser conectados los equipos. El prototipo diseñado por Aburto [3] permite ser operado en las distintas configuraciones, pudiendo interconectar los equipos en configuraciones serie y/o paralelo.

2.3.1 Deshumidificadores y humidificadores conectados en paralelo.

El agua salada de alimentación ingresa al sistema HDH por ambos deshumidificadores al mismo tiempo, donde luego los flujos de agua salada de ambos equipos se juntan para pasar al intercambiador de calor donde nuevamente el flujo de alimentación se divide para cada etapa en cada humidificador. El funcionamiento de este tipo de configuración se aprecia en la figura 2-5.

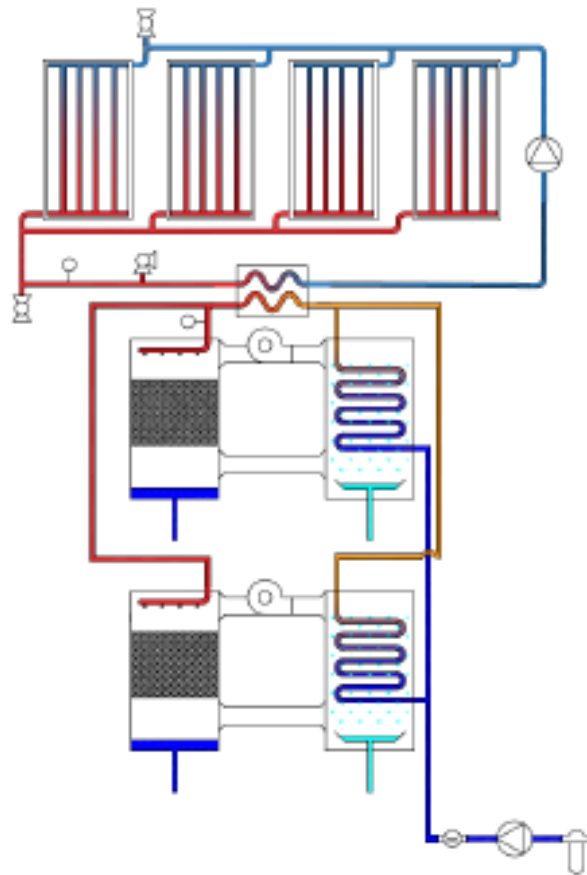


Figura 2-5 Deshumidificadores y humidificadores conectados en paralelo - Rodríguez [2]

2.3.2 Deshumidificadores y humidificadores conectados en serie.

El agua salada de alimentación ingresa al sistema HDH por el deshumidificador de la etapa inferior para luego pasar al deshumidificador superior. Luego de pasar por ambos deshumidificadores el agua salada de alimentación pasa a través del intercambiador de calor para redirigirse hacia el humidificador superior y posteriormente ingresar al humidificador de la etapa inferior. El funcionamiento de este tipo de configuración se aprecia en la figura 2-6.

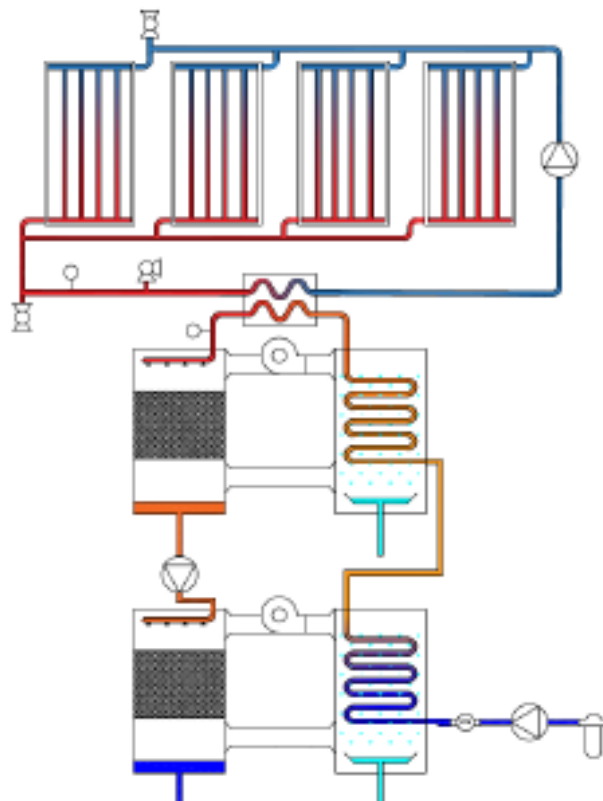


Figura 2-6 Deshumidificadores y humidificadores conectados en serie - Rodríguez [2]

2.3.3 Deshumidificadores y humidificadores conectados en paralelo y serie respectivamente.

El agua salada de alimentación ingresa al sistema HDH por ambos deshumidificadores al mismo tiempo, donde luego los flujos de agua salada de ambos equipos se juntan para pasar al intercambiador de calor donde el agua de alimentación ingresa directamente hacia el humidificador superior para posteriormente ingresar al humidificador de la etapa inferior. El funcionamiento de este tipo de configuración se aprecia en la figura 2-7.

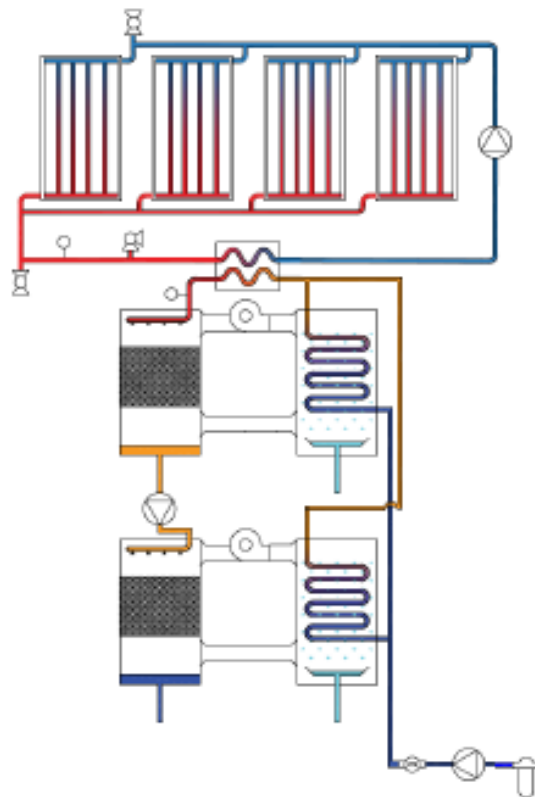


Figura 2-7 Deshumidificadores y humidificadores conectados en paralelo y serie respectivamente - Rodríguez [2]

2.3.4 Deshumidificadores y humidificadores conectados en serie y paralelo respectivamente.

El agua salada de alimentación ingresa al sistema HDH por el deshumidificador de la etapa inferior para luego pasar al deshumidificador superior. Luego de pasar por ambos deshumidificadores el agua salada de alimentación pasa a través del intercambiador de calor para redirigirse y dividir el flujo de entrada hacia cada etapa en cada humidificador. El funcionamiento de este tipo de configuración se aprecia en la figura 2-8.

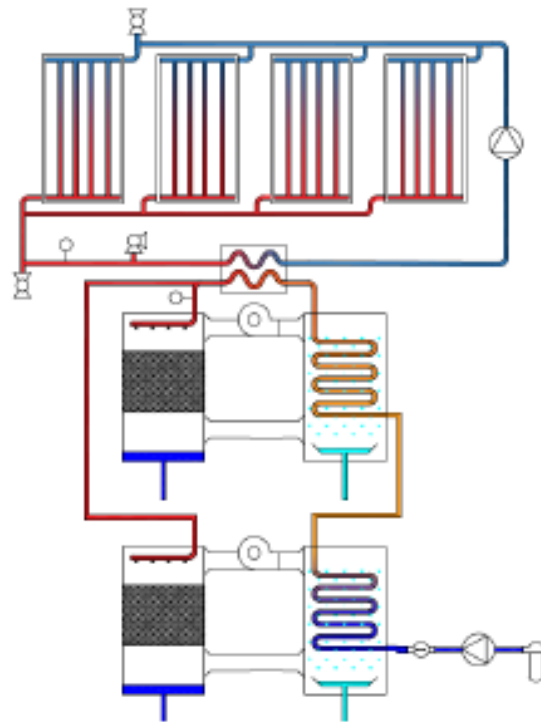


Figura 2-8 Deshumidificadores y humidificadores conectados en serie y paralelo respectivamente - Rodríguez [2]

2.4 Conclusiones

El sistema de desalinización HDH que mejor desempeño puede obtener, es una que opere con ciclo CAOW con calentamiento de agua, dado que la capacidad calorífica del agua es mayor que la del aire, y para el caso de la planta HDH de dos etapas, se aprecia que la configuración con mejor desempeño es la que cuenta con todos sus elementos conectados en serie, debido a que la recuperación de calor en este caso es máxima. Las configuraciones que cuentan con los humidificadores conectados en paralelo son las con menor desempeño reflejan, ya que las pérdidas de calor al ambiente aumentan, tomando en cuenta que, a la salida de cada humidificador, el agua de mar circulante sale con una temperatura mayor con la que ingresa al sistema.

El cambio más demostrativo entre sistemas multi-etapas HDH es el paso de una a dos etapas, donde la diferencia de producción de agua dulce entre éstas es más significativa. Al agregar más etapas sigue aumentando el destilado producido, pero cada vez el aumento es menor, y la inversión entre una y otra alternativa se hace prioritaria a la hora de decidir.

3 Evaluación, modificaciones operativas y de instrumentación del sistema HDH de dos etapas existente.

3.1 Situación actual de la planta HDH de dos etapas existente

El sistema existente en el LER construido por Rodríguez [2] presenta a priori tareas pendientes que finalizar para poder comenzar a operar de manera eficiente, además de exhibir fallas por uniones mal realizadas, piezas defectuosas y fugas a través de los componentes de cada equipo. El sistema colector solar se encuentra con tareas pendiente debido a la cantidad de tubos Heat Pipe faltantes para instalar. La red de agua que alimenta los tubos falta ser aislada térmicamente y ser reparada por problemas presentes en la válvula de seguridad, por un incorrecto funcionamiento y lectura registrada.

Durante las primeras operaciones de la planta se observan filtraciones de agua por varias partes del sistema. En la parte inferior de los humidificadores se presentaban notorias pérdidas de agua, asimismo con los ventiladores que presentaban fugas en las juntas. Al igual que en el sistema colector solar, falta aislar térmicamente los circuitos de agua y aire entre los distintos equipos del sistema. A continuación, se describirán los arreglos para cada equipo con problemas de diseño y/o funcionamiento, presentando las soluciones implementadas para el correcto funcionamiento operacional del sistema.

3.2 Sistema colector solar

Primero que todo se instalan la mitad de los tubos Heat Pipe faltantes para completar el sistema de colección solar. Luego se procede a aislar térmicamente el circuito de agua que circula por los colectores, con el fin de disminuir las pérdidas por transferencia de calor. Para esto se utilizó un aislante térmico flexible de 13 [mm] de espesor. Las características

de cada colector y el arreglo final, con el aislante instalado se aprecian en la tabla 1 y figura 3-1 respectivamente.

Tabla 1 Características de los colectores Heat Pipe

Cantidad de tubos	30
Dimensiones del tubo	58x1800 [mm]
Largo de absorción	1715 [mm]
Porcentaje de emisión	> 92%
Presión de trabajo	< 8%
Temperatura de estancamiento	0,6 [MPa]
Máxima temperatura de servicio	200,3 [°C]
Peso neto del colector	114 [kg]
Área de apertura	2,84 [m ²]
Eficiencia óptica	71,40%
Pérdida lineal	1,08 [W/m ² K]



Figura 3-1 Tubos Heat Pipe conectados.

Se reemplaza la válvula de seguridad instalada por Rodríguez [2], tal como se aprecia en la figura 3-2, por presentar problemas en su correcto funcionamiento, y con el fin de poder

reutilizar el agua y aire caliente presentes en el circuito de cañerías al momento de poner en marcha el sistema. La figura 3-3 muestra la válvula de cierre instalada que permite, a través de una manguera acoplada (punto A), depositar el agua y el aire calientes contenidos inicialmente en las cañerías del sistema hacía el interior del segundo estanque de agua salada (punto B), aprovechando la energía que se libera al momento de poner en marcha el sistema de colección solar y así, precalentar el agua que ingresa al humidificador inferior (punto C) cuando se trabaje con la configuración del sistema en serie, tal como se representa en la figura 3-3.



Figura 3-2 Válvula de cierre sistema colector

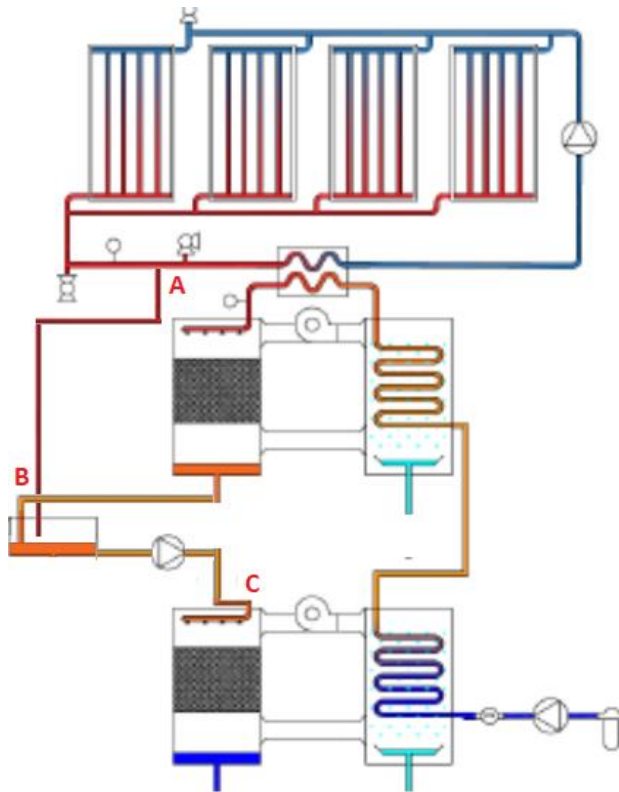


Figura 3-3 Esquema de la nueva válvula instalada – Elaboración propia

3.3 Humidificadores

Los humidificadores de ambas etapas presentaban fugas por la parte inferior donde se acoplan con la red piping, debido a las diferencias de diámetro que poseen las piezas, lo que hace que la unión de éstas no quede correctamente sellada. Para solucionar este problema, se desmontó la red piping inferior de ambas etapas para incorporar, en los codos donde se ensamblaban los humidificadores, una goma (caucho) que detuviera la filtración de agua, agregando un sello de silicona por todo el contorno del ensamblaje. El arreglo final con la goma instalada se aprecia en la figura 3-4:



Figura 3-4 Arreglo fuga por la parte inferior del humidificador.

Las uniones americanas plásticas posteriores de los rotámetros de ambos humidificadores se reemplazaron por unas de un material más resistente como el bronce. Ambas presentaban un desgaste en los hilos donde se acoplaban, y al ser de plástico no soportaban la presión y temperatura de trabajo, presentando un claro deterioro que provocaba filtraciones del agua salada circulante. La figura 3-5 muestra el desmontaje y la nueva unión instalada.



Figura 3-5 Nueva unión americana instalada

Otro de los problemas que se observan es durante la operación del sistema, donde se evidencia una pérdida de carga significativa en el caudal de aire que circula por la etapa inferior, en comparación al de la etapa superior. Esto se debe principalmente a la cantidad de empaquetadura que contienen al interior los equipos, por lo que se probó quitando distintas cantidades de relleno evaporativo a ambos humidificadores, encontrando que para el humidificador superior no se justificaba retirar material, ya que el caudal de aire no se veía alterado. Para el humidificador inferior se encontró que, al retirar una capa de empaquetadura, éste mejoro la circulación del aire entre los equipos, provocando una mejora en la eficiencia del sistema. Seguir retirando capas de relleno no mostró gran

mejora, por lo que se optó por retirar solo una línea de relleno. Cabe destacar que el humidificador superior en comparación al humidificador inferior, al estar más cerca del intercambiador de placas genera mayores incrustaciones durante la operación, sobre todo cuando se trabaja con todos los equipos conectados en serie, por lo que Rodríguez [2] opta por que el humidificador superior cuente con un relleno de paso más pequeño que los del humidificador inferior, con el fin de disminuir la generación de incrustaciones en el humidificador superior, tal como se aprecia en la figura 3-6.



Figura 3-6 Relleno evaporativo humidificador inferior

3.4 Circuito de aire

Los ventiladores de ambas etapas presentan significativas fugas de agua salada en la junta de cada uno de éstos, principalmente debido a que no se encuentran bien alineados con la red de piping. Para poder solucionar este problema se desmontan las redes piping superiores que interconectan a los humidificadores con los deshumidificadores, de tal manera de modificar los soportes donde descansan los ventiladores. Por la parte inferior donde va soportado el ventilador, se introduce una placa de metal de 5 [mm] para poder darle inclinación a cada ventilador y quedar alineados con los ductos de la red piping. Luego de volver a instalar los ventiladores se sella la junta con silicona de tal manera de disminuir la probabilidad de fuga. El arreglo final se presenta en la figura 3-7.



Figura 3-7 Piping donde van sujetos los ventiladores de ambas etapas

Para poder realizar las mediciones de caudal de aire en cada etapa, se realizan perforaciones de una pulgada de diámetro en los ductos posteriores a cada ventilador y válvula mariposa, de tal manera de poder introducir el anemómetro y así obtener el flujo masico de aire a la salida y entrada de los equipos en cada etapa.

Finalmente se aísla térmicamente todo el circuito de aire con aislante flexible de 50 [mm] de espesor, para así disminuir las perdidas por transferencia de calor y las posibles fugas de agua salada que se provocan por la acumulación en las juntas de los equipos, tal como se aprecia en la figura 3-8.



Figura 3-8 Aislante térmico circuito de aire

3.5 Instrumentación

Para obtener el registro de los funcionamientos operacionales de los sistemas de desalinización solar de una y dos etapas es fundamental conocer el comportamiento de las variables significativas de flujos en la entrada y salida de cada equipo. Dentro de estas variables se consideran: temperatura, presión, radiación y caudal masico de agua y aire.

3.5.1 Temperatura

La temperatura del agua salada y del sistema colector de cada sistema son monitoreadas durante su operación mediante un instrumento con adquisición de datos (Datalogger) y sondas PT100, las que analizan la variación de la resistencia de un conductor (alambre de platino) con la temperatura, tal como se aprecia en la figura 3-9.



Figura 3-9 Sondas PT100 para temperatura

3.5.2 Calibración

Para asegurar una medición fidedigna es necesario calibrar correctamente cada sonda PT100, con el fin de tener una medición en la operación válida. Para lograrlo se utiliza el método de baño termostático, el cual al ser un sistema cuya capacidad calorífica es tan grande que, cuando se halla en contacto con un sistema de calibración a prueba, la temperatura de éste permanece constante, facilitando la comparación con un patrón. Los equipos necesarios para llevar a cabo la calibración fueron facilitados por el laboratorio de termodinámica presente en casa central UTFSM. Se utilizaron 2 puntos independientes en baños termostáticos separados, como muestra la figura 3-10, uno a 0 [°C] y otro a 100 [°C]. Se introdujeron de a dos sondas por baño termostático, tomando mediciones cada 1 segundo durante 5 minutos para cada equipo.



Figura 3-10 Baños termostáticos, UTFSM

Los resultados obtenidos arrojaron que dos de las quince sondas analizadas presentaban grandes oscilaciones y registros de temperaturas fuera de rango, por lo que se deciden excluir como instrumento de medición en los sistemas de desalinización. El detalle de cada calibración se encuentra en el anexo A.

3.5.3 Radiación

La medición de la radiación incidente durante la operación de los equipos se realiza mediante un sistema de adquisición de datos, al igual que para la medición de la temperatura, llamado TinytagPlus. Las lecturas se registran en forma de miliVolts y para obtener la medición en unidades $[W/m^2]$, se divide el dato registrado por la sensibilidad del equipo.

3.5.4 Presión

Las presiones en el circuito de agua salada y en el circuito del colector solar son registradas mediante manómetros ubicados a la entrada de cada humidificador y anterior a la válvula de seguridad de cada sistema de colección solar, con el fin de identificar posibles pérdidas de carga anormales que sean producto de un problema operacional.

3.5.5 Flujos de agua y aire

Para medir y regular los flujos de agua salada se utilizan rotámetros con válvula de estrangulación incluida, con rango de medición de 1 a 8 [lpm]. La instalación de estos componentes en ambos sistemas de desalinización es anterior a la entrada de cada humidificador. Cabe señalar que los rotámetros utilizados poseen una mala sensibilidad, lo que provoca una aproximación a valores enteros de los flujos de agua que circulan por cada sistema HDH.

Los flujos de aire húmedo que circulan en los sistemas de desalinización son monitoreados por un anemómetro telescópico de hilo caliente, que mide la velocidad del aire que circula por los ductos, permitiendo calcular el flujo masico del aire con la

ecuación 1, donde ρ_a es la densidad del aire, \bar{V}_a es la velocidad promedio que circula por el ducto y A_{ducto} corresponde al área del ducto. La velocidad promedio en ductos se calcula en base a lo establecido en la norma ASTM D3464.

$$\dot{m}_a = \rho_a \cdot \bar{V}_a \cdot A_{ducto} \quad (\text{Ecuación 1: Flujo masico de aire})$$

Los instrumentos anteriormente mencionados y sus especificaciones técnicas se muestran en la figura 3-11 y la tabla 2 siguientes:



Figura 3-31 Piranómetro, Manómetro y Rotámetro

Tabla 2 Características de los instrumentos de medición

Instrumento	Marca/Modelo	Rango de medición	Resolución
Rotámetro	VETO/LZT 1005M-V	2 – 8 LPM	0,72 LPM
Anemómetro	PCE/PCE-009	0,2 – 20 [m/s] 0 – 50 [°C]	Si $v \leq 4 \left[\frac{m}{s} \right]$: $\pm 0,3 \left[\frac{m}{s} \right]$ Si $v > 4 \left[\frac{m}{s} \right]$: $\pm 0,05 \cdot v + 0,1 \left[\frac{m}{s} \right]$
PT-100 claseA	Tinytag/PB- 6005-1M5/3M	-50 – 300 [[°C]	-
Piranómetro	Kipp&Zonen/SP Lite2	0 – 2000 [W/m ²] Sensibilidad: 70,4 [μ V/Wm ⁻²]	$\pm 0,5 \left[\mu \frac{V}{Wm^{-2}} \right]$
Tinytag Plus data logger	Tinytag	-40 hasta 125 [°C]	0,02 [°C]
Manómetro	Khone	0 – 10 [bar]	0,2 [bar]

3.6 Consumo eléctrico

Para evaluar de mejor manera el consumo energético con el que operan las plantas HDH, es necesario medir la potencia consumida por los ventiladores y bombas que forman parte de ambos prototipos. Con la ayuda de un multitester Microlab modelo MCL4547 y un circuito simple con cables conductores, como se muestra en la figura 3-12, se mide la corriente y voltaje monofásicos consumido por los ventiladores y las bombas de alimentación y circulación.



Figura 3-12 Medición de corriente y voltaje de las bombas y ventiladores

Al variar la velocidad del ventilador el consumo eléctrico prácticamente no varía, al igual que cuando se varía el flujo de alimentación de agua para las bombas. Los equipos de ambos prototipos mostraron el mismo consumo, los cuales se resumen en las tablas 3 y 4.

Tabla 3 Medición de voltaje y corriente del ventilador

Capacidad Ventilador	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
50%	233	0,15	28,0
60%	233	0,15	28,0
70%	233	0,16	29,8
80%	233	0,16	29,8
90%	233	0,16	29,8
100%	233	0,17	31,7
Potencia promedio (W)			29,5

Tabla 4 Medición de voltaje y corriente de las bombas

	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)
Bomba alimentación	229	0,45	82,4
Bomba Sist. Colector solar	236	0,43	81,2
Total Potencia bombas [W]			163,6

3.7 Conclusiones

Como se puede apreciar en el análisis y revisión de la planta HDH de dos etapas, se presentaron varios inconvenientes constructivos que impedían el funcionamiento óptimo de la planta HDH. Una vez resuelto los problemas operativos de la planta, se encuentran mejoras que ayudan a obtener un desempeño en el sistema más eficiente, como el aprovechamiento del agua retenida en el circuito colector al momento de poner en marcha la planta HDH.

La planta HDH queda, casi en su totalidad, instrumentada con equipos de medición que permiten analizar el funcionamiento del sistema en todas sus posibles configuraciones, con el fin de encontrar la configuración óptima de operación. Sin embargo, aún puede instrumentarse el sistema de modo que la operación de la planta sea totalmente autónoma, como la implementación de una balanza digital que registre y almacene el destilado producido a cada momento, y así, poder realizar un análisis más exhaustivo del efecto de la radiación sobre la producción de destilado en cada instante.

4 Análisis y resultados experimentales

4.1 Parámetros de rendimiento

Para evaluar el desempeño de una planta HDH es necesario conocer las variables de mayor interés, como lo son la producción de destilado, la temperatura de operación en cada equipo del sistema y la radiación solar incidente. El principal parámetro de rendimiento utilizado en sistemas térmicos de desalinización es el GOR, tal como se refleja en la literatura expuesta por Leiva [5].

4.1.1 GOR

Gained output ratio GOR, corresponde a la razón entre la energía requerida para evaporar la cantidad de agua producida y la energía inyectada al sistema. La ecuación 2 refleja la relación entre el flujo masico de destilado (\dot{m}_d) producido por su calor latente de vaporización (λ) y la energía entregada por el sistema del colector solar (\dot{Q}).

$$GOR = \frac{\dot{m}_d \lambda}{\dot{Q}} \quad (\text{Ecuación 2: GOR [-]})$$

GOR es un parámetro que solo considera el proceso de la desalinización, dejando de lado el rol que cumple la irradiación solar incidente. Para relacionar de mejor manera el desempeño de las plantas HDH, tomando en cuenta el rol que cumple la radiación, se sugiere un nuevo parámetro de rendimiento el SIDR, que relaciona la cantidad de energía radiativa que se utiliza para producir un kilogramo de destilado.

4.1.2 SIDR

La relación de irradiación solar-destilado SIDR es un parámetro de rendimiento que toma en cuenta el proceso de los colectores solares, el proceso de desalinización y las potencias consumidas por los equipos eléctricos. En la ecuación 3, G_T es la radiación global en plano inclinado, A_C el área de los colectores solares, P_V potencia del ventilador, P_B potencia de las bombas de alimentación y recirculación, y \dot{m}_d es el flujo de agua destilada producido.

$$SIDR = \frac{G_T \cdot A_C + P_V + P_B}{\dot{m}_d} \left[\frac{kWh}{kg} \right] \quad (\text{Ecuación 3: SIDR [kWh/kg]})$$

4.2 Planta desaladora HDH de una etapa

Para realizar las pruebas experimentales al prototipo de una etapa presente en el LER, se consideran los parámetros constructivos y distintas condiciones de operación de la planta HDH, para corroborar las simulaciones hechas por Leiva [5].

4.2.1 Parámetros constructivos y de operación

La figura 4-1 muestra los equipos con los cuales opera la planta. El estanque cilíndrico de la izquierda es el humidificador, quien se encarga de humidificar el aire de una manera similar a la de una torre evaporativa. Su gran tamaño permite tener el suficiente espacio para que los atomizadores desarrollen un buen cono de pulverización. El estanque pequeño de la derecha es el deshumidificador. Consta de un intercambiador de calor con aletas de flujo cruzado sin mezcla.



Figura 4-1 Planta HDH de una etapa.

Las dimensiones del humidificador y deshumidificador del prototipo HDH de una etapa se muestran en la tabla 5 y tabla 6 respectivamente.

Tabla 5 Dimensiones del humidificador de una etapa

Altura humidificador	2100 [mm]
Altura packing	600 [mm]
Diámetro packing	1640 [mm]
Coef. de área específica de transferencia	226 [m ² /m ³]

Tabla 6 Dimensiones deshumidificador de una etapa

Número de filas	12
Número de columnas	4
Largo del IDC	330 [mm]
Ancho del IDC	1100 [mm]
Alto del IDC	470 [mm]
Diámetro exterior del tubo	12 [mm]
Espesor del tubo	1,2446 [mm]
Paso aleta	3 [mm]
Espesor aleta	0,33 [mm]

El sistema de colectores se compone de 4 paneles solares de placa plana de Yazaki, tipo SC-V1020 con doble cubierta de vidrio y un área efectiva de colección de 1,91 m² cada uno. Para su operación existe una bomba de recirculación y un intercambiador de calor de 12 placas encargado de entregarle calor al sistema HDH. Las dimensiones y características de cada componente se muestran en la figura 4-2 y la tabla 7.



Figura 4-2 Sistema colectores, planta HDH de una etapa

Tabla 7 Características bomba de recirculación Wilo, sistema colector

Tensión de conexión	230 [V] ±10%
Frecuencia de la red	50 [Hz]
Temperatura ambiente máxima	40 [°C]
Presión de trabajo máxima	10 [bar]
Presión mínima de entrada a 50/95/110 [°C]	0,05/0,3/1 [bar]
Potencia	144 [W]

Tabla 8 Características intercambiador de placas.

Marca/Modelo	Alpha Laval/ T5
Placas intercambiador de calor	Acero inoxidable AISI 316
Presión de diseño	1,6 [MPa]
Temperatura de diseño	160 [°C]
Superficie de intercambio de calor	4,4 [m ²]

Las condiciones de operación en las distintas pruebas experimentales durante la puesta en marcha de la planta HDH se indican en la tabla 9:

Tabla 9 Condiciones de operación planta HDH de una etapa

Flujo de agua circuito colector	600 [kg/h]
Presión bomba circuito colector	2 [bar]
Presión bomba alimentación	1,5 [bar]
Temperatura ambiental	20 [°C]
Consumo eléctrico	193,1 [W]

4.2.2 Resultados experimentales

Para un flujo de alimentación de agua salada fijo, se varían los flujos del aire a través del ventilador que conecta al humidificador con el deshumidificador. El flujo de agua de alimentación para poder operar con la mayor producción de destilado varía entre 120 y 300 [kg/h].

La figura 4-3 muestra el destilado producido para diferentes flujos de agua de mar y aire, donde la mayor producción de agua destilada se alcanza al 50% de la capacidad del ventilador con un caudal de 507 [kg/h], alcanzando 1,48 [kg/h] de destilado para un flujo de alimentación de agua de mar de 180 [kg/h]. A medida que el flujo de alimentación aumenta el agua destilada tiende a descender, por lo que aumentar más el flujo de alimentación no garantiza mejores resultados.

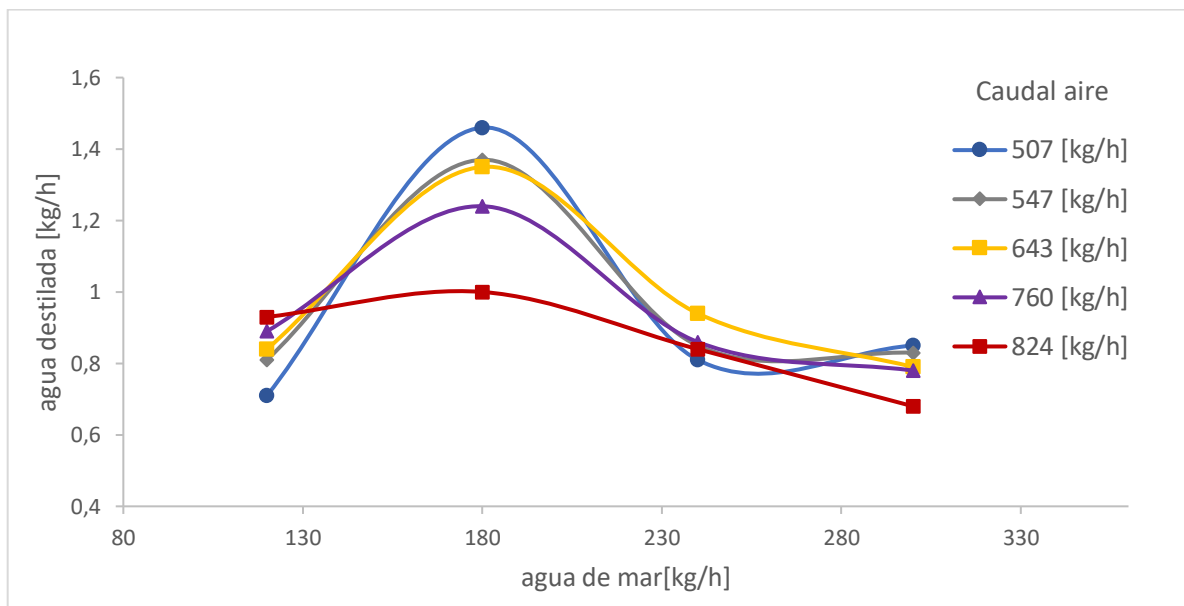


Figura 4-3 Agua destilada vs Agua de mar, planta HDH una etapa.

La figura 4-4 muestra la radiación promedio obtenida para las distintas configuraciones de flujos de aire y agua de mar. La grafica de radiación sigue un comportamiento similar al de la producción de agua destilada. Coincide que para un flujo de aire de 507 [kg/h] y un flujo de agua de alimentación de 180 [kg/h] se obtienen los máximos valores, mostrando una relación directa entre la producción de destilado y la radiación incidente durante la operación.

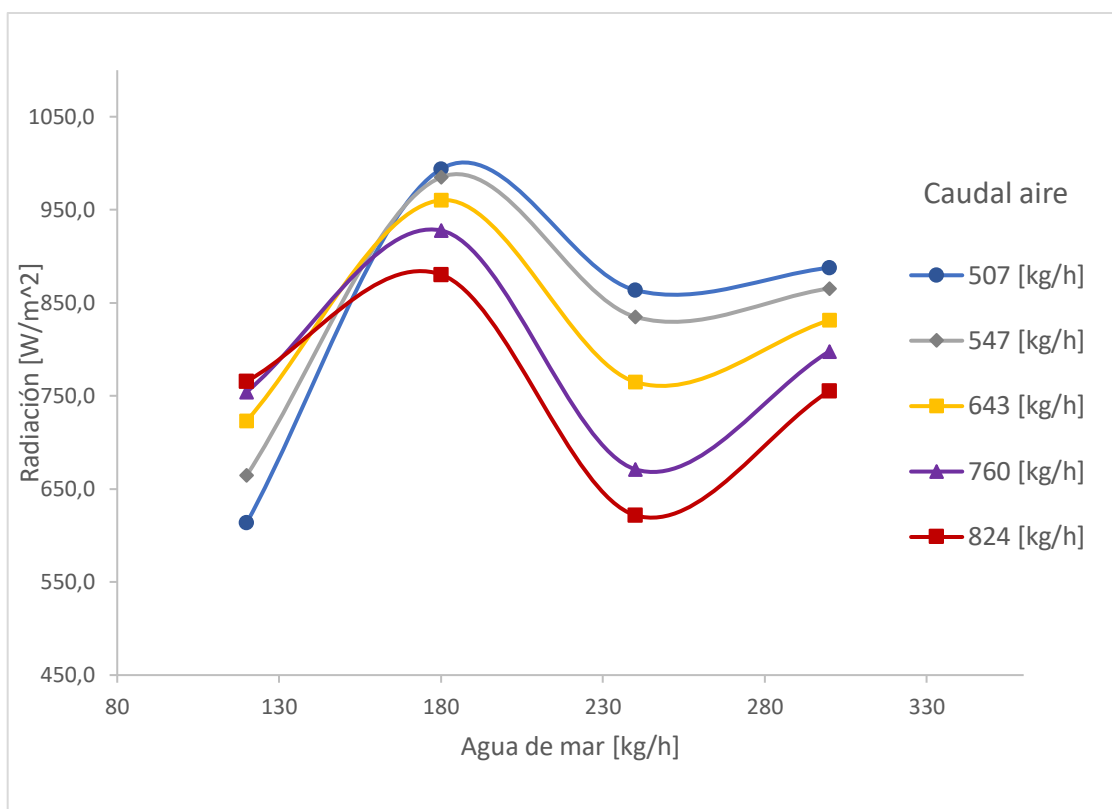


Figura 4-4 Figura 4 3 Radiación vs Agua de mar, planta HDH una etapa

La figura 4-5 muestra el GOR obtenido para distintos flujos de agua de mar y aire, donde los mejores parámetros se obtienen cuando el caudal de agua de mar es 240 [kg/h]. El GOR máximo alcanzado es de 0,61, cuando el ventilador del sistema funciona al 80% entregando un caudal de aire de 760 [kg/h]. Es claro notar que a medida que el agua de alimentación aumenta el GOR tiende a disminuir independiente del fujo de aire. Además, se observa un cambio de tendencia en el comportamiento del GOR obtenido para un caudal de aire de 507 [kg/h] cuando el caudal de agua de alimentación es de 180 [kg/h], debido a que las temperaturas de operación en esta configuración fueron más elevadas, lo que permitió un intercambio de calor mayor, lo que también se refleja en la radiación incidente mostrada en la figura 4-4.

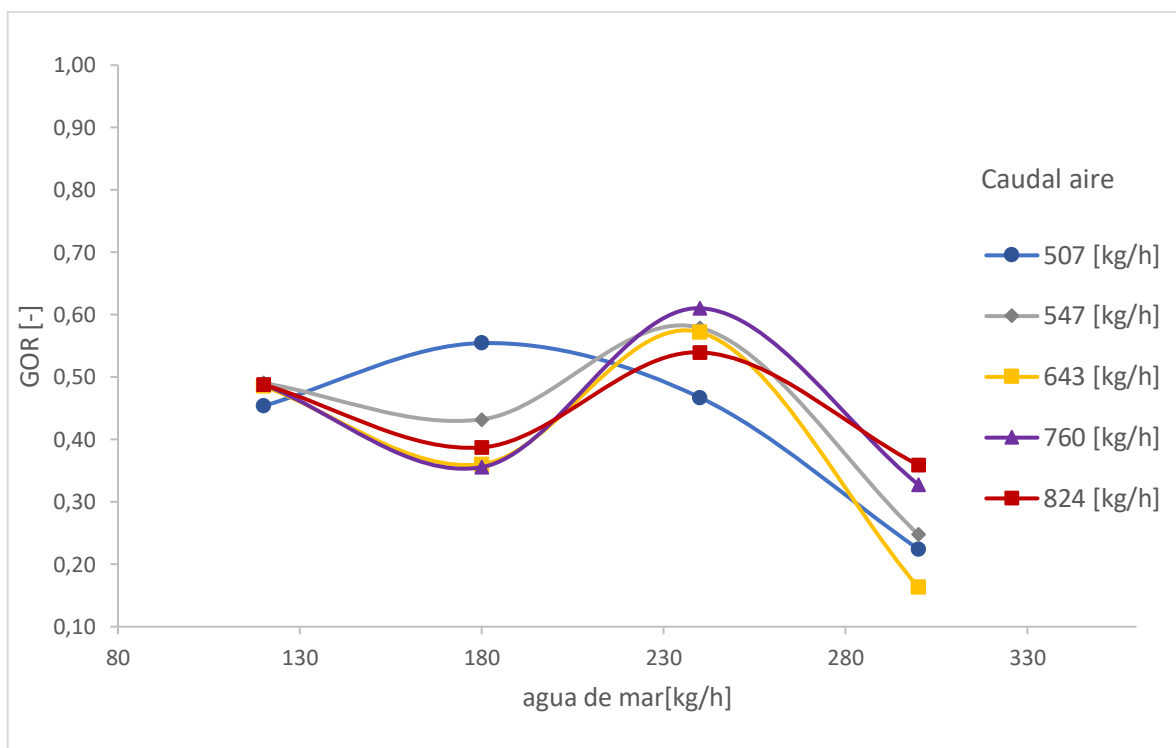


Figura 4-5 GOR vs Agua de mar, planta HDH una etapa

La figura 4-6 muestra el SIDR obtenido para distintos flujos de agua de mar y aire. Se observa que al aumentar el flujo de agua de mar el SIDR marca una tendencia en aumento, independiente del caudal de aire que esté operando. La grafica refleja el costo asociado para producir un kilogramo de agua destilada, donde el mínimo alcanzado es para el punto donde el destilado es mayor, para un flujo de agua de alimentación de 180 [kg/h]. Existe un punto de inflexión cerca de los 200 [kg/h] de agua de mar donde a mayor caudal de aire menor es el SIDR obtenido.

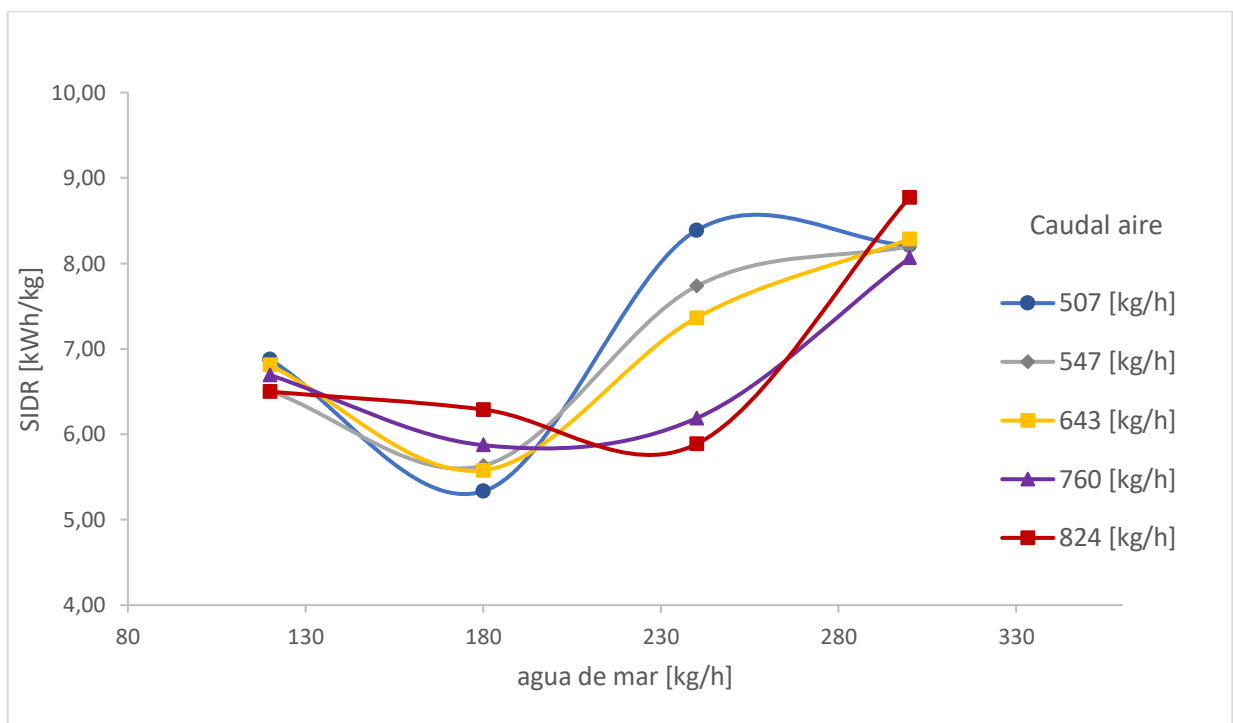


Figura 4-6 SIDR vs Agua de mar, planta HDH una etapa

4.2.3 Análisis de resultados planta HDH de una etapa

Las condiciones donde se obtiene un mayor destilado son para un flujo de alimentación de agua de mar de 180 [kg/h] con una producción máxima de 1,46 [kg/h] de agua dulce. El comportamiento de la producción de destilado de la figura 4-3 muestra claramente que al aumentar el flujo de agua de mar disminuye la producción de destilado. Se ve también que el flujo de destilado mejora cuando el caudal de aire disminuye. Los resultados pueden asociarse que al hecho de que, al tener menor masa tanto de agua de mar como de aire, el proceso de transferencia de calor mejora, obteniendo temperaturas de operación más altas que conllevan a una mayor diferencia de humedad y, por lo tanto, una mayor producción de destilado.

Para poder mejorar el GOR se debe disminuir el flujo de alimentación, lo que conlleva a obtener una menor producción, por lo que no resulta una buena medida bajar considerablemente el agua de mar de alimentación para obtener un mejor GOR, si la producción de destilado disminuirá a números fuera del rango operativo esperado.

La figura 4-6 nos muestra que el SIDR tiene un mínimo en los 180 [kg/h] de agua de mar, y al aumentar el flujo de alimentación el SIDR tiende a incrementarse. El comportamiento de SIDR muestra una relación directa con la producción de destilado, verificando que es un mejor parámetro, en comparación al GOR, para poder analizar el funcionamiento operativo de la planta HDH. El requerimiento mínimo de energía para obtener 1,46 [kg/h] de agua dulce es de 5,33 [kWh/kg] por kilogramo de agua destilada.

4.3 Planta desaladora HDH de dos etapas

Una vez realizadas las modificaciones operativas y de instrumentación al prototipo HDH de dos etapas construido por Rodríguez [2], se realizan análisis experimentales para las distintas configuraciones que fue diseñada la planta, con el fin de encontrar el funcionamiento óptimo de ésta.

4.3.1 Parámetros constructivos y de operación

La figura 4-7 muestra los equipos con los cuales opera la planta. Los equipos de la izquierda conforman la etapa inferior y los de la derecha la etapa superior. Los estanques cilíndricos que se encuentran en la parte posterior son los humidificadores. El humidificador superior posee más relleno evaporativo y con un mayor paso, como ya se explicó en el punto 3.5.2. Los estanques cilíndricos horizontales son los deshumidificadores. Las dimensiones de cada humidificador y deshumidificador del prototipo HDH de dos etapas se muestran en la tabla 10 y tabla 11 respectivamente.



Figura 4-7 Planta HDH de dos etapas.

Tabla 10 Dimensiones humidificador, planta HDH de dos etapas

Altura humidificador	2132 [mm]
Diámetro	600 [mm]
Material	Acero Inoxidable 340-L
Masa total	52,4 [kg]

Tabla 11 Dimensiones deshumidificador, planta HDH de dos etapas

Modelo	SP-1200K
Potencia	352 [kW]
Área de TDC	2,01 [m ²]
Número de tubos	84
Longitud tubos	760 [mm]
Diámetro exterior de los tubos	9,525 [mm]
Diámetro interior de los tubos	7,825 [mm]

El sistema de colectores se compone de un arreglo con tres colectores en paralelo y dos colectores en serie (ver Figura 4-8). Los colectores solares son de tubo de vacío, dado que en los tubos al vacío se reducen las pérdidas por convección y conducción, consiguiendo temperaturas más elevadas. Para su operación existe una bomba de recirculación y un intercambiador de calor de 12 placas encargado de entregarle calor al sistema HDH. Las dimensiones y características de cada componente se muestran a continuación:



Figura 4-8 Sistema colector, planta HDH de dos etapas.

Tabla 12 Características de colectores Heat Pipe Prisma Solar.

Cantidad de tubos	30
Dimensiones del tubo	59x1800 [mm]
Largo de absorción	1715 [mm]
Porcentaje de absorción	> 92%
Porcentaje de emisión	< 8%
Máx. Temperatura servicio	95 [°C]
Peso neto del colector	114 [kg]
Eficiencia óptica	71.4%
Área de apertura	2.84 [m ²]
Pérdida lineal	1.08 [W/m ² K]

Tabla 13 Características bomba de recirculación Wilo, sistema colector, planta HDH de dos etapas.

Tensión de conexión	230 [V] \pm 10%
Frecuencia de la red	50 [Hz]
Temperatura ambiente máxima	40 [°C]
Presión de trabajo máxima	10 [bar]
Presión mínima de entrada a 50/95/110 [°C]	0,05/0,3/1 [bar]
Potencia	144 [W]

Tabla 14 Características intercambiador de placas, planta HDH de dos etapas.

Marca/Modelo	Alpha Laval/ T5
Placas intercambiador de calor	Acero inoxidable AISI 316
Presión de diseño	1,6 [MPa]
Temperatura de diseño	160 [°C]
Superficie de intercambio de calor	4,4 [m ²]

La planta HDH trabaja en cuatro configuraciones, con los humidificadores y deshumidificadores conectados en serie y paralelo entre ellos. Para distintas mediciones, se escogen las que obtuvieron mayores producciones de destilado y tengan radiaciones promedio similares entre ellas. Las condiciones de operación en las distintas pruebas experimentales durante la puesta en marcha de la planta HDH se indican en la tabla 15.

Tabla 15 Condiciones de operación, planta HDH de dos etapas

Flujo de agua circuito colector	600 [kg/h]
Presión bomba circuito colector	3 [bar]
Presión bomba alimentación	1,5 [bar]
Temperatura ambiental	20 [°C]
Consumo eléctrico	193,1 [W]

4.3.2 Resultados experimentales

Para un flujo de alimentación de agua salada fijo, se varían los flujos del aire a través de los ventiladores que conectan al humidificador con el deshumidificador en cada etapa. El flujo de agua de alimentación, para obtener la mayor cantidad de destilado, varía entre 180 y 360 [kg/h]. Para las cuatro posibles configuraciones se obtuvo que, para un caudal de aire de 150 [kg/h] se obtienen los mejores resultados de destilado, tal como se presenta en el Anexo C, por lo que todos los resultados mostrados de aquí en adelante corresponden a un caudal masico de aire fijo de 150 [kg/h].

La figura 4-9 muestra el destilado producido para diferentes flujos de agua de mar y aire para las 4 configuraciones en estudio, donde la mayor producción de agua destilada se produce para la configuración con todos sus componentes en serie. Para un caudal de agua de mar de alimentación de 180 [kg/h] se obtienen los mejores resultados en las cuatro distintas configuraciones. A medida que el flujo de alimentación aumenta el agua destilada descende hasta estabilizarse en valores constantes, teniendo un mínimo en los 240 [kg/h] de agua de mar. El máximo destilado se alcanza cuando el agua de alimentación es de 180 [kg/h] con un caudal masico de aire de 150 [kg/h] en la configuración serie – serie y una producción de 4,81 [kg/h] de agua destilada.

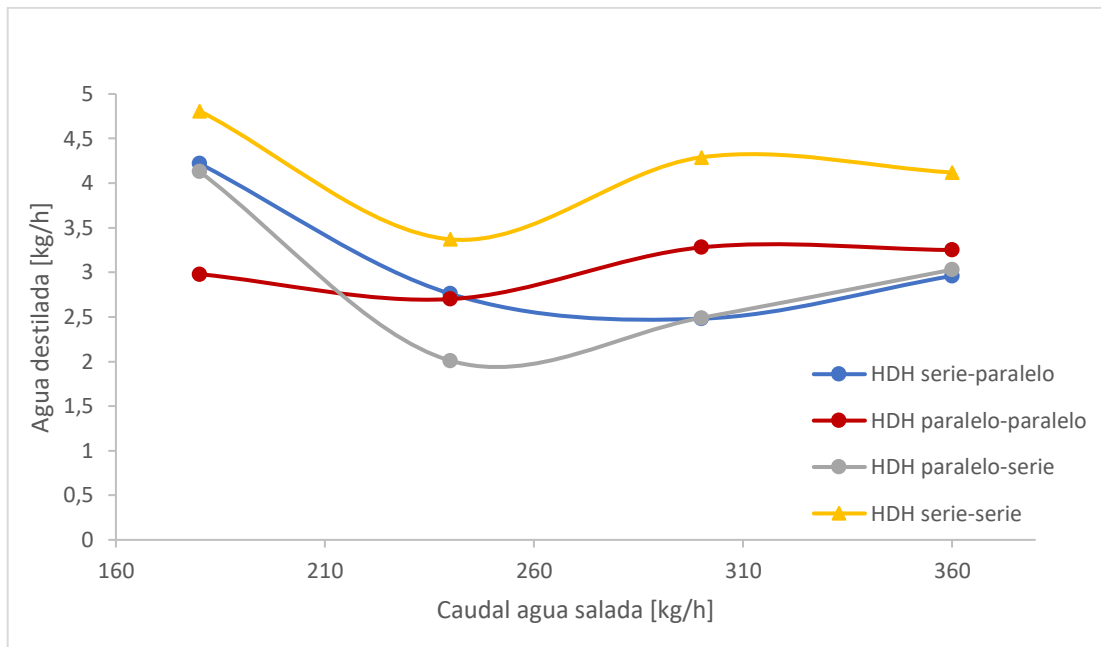


Figura 4-9 Agua destilada vs Agua de mar, planta HDH dos etapas.

La figura 4-10 muestra la radiación promedio obtenida para las distintas configuraciones variando el flujo de alimentación de agua de mar. La grafica de radiación sigue un comportamiento similar al de la producción de agua destilada. La configuración serie-serie fue la que opero a una radiación promedio más elevada que las otras configuraciones, mostrando una relación directa entre la producción de destilado y la radiación incidente durante la operación, al igual que en la planta HDH de una etapa.

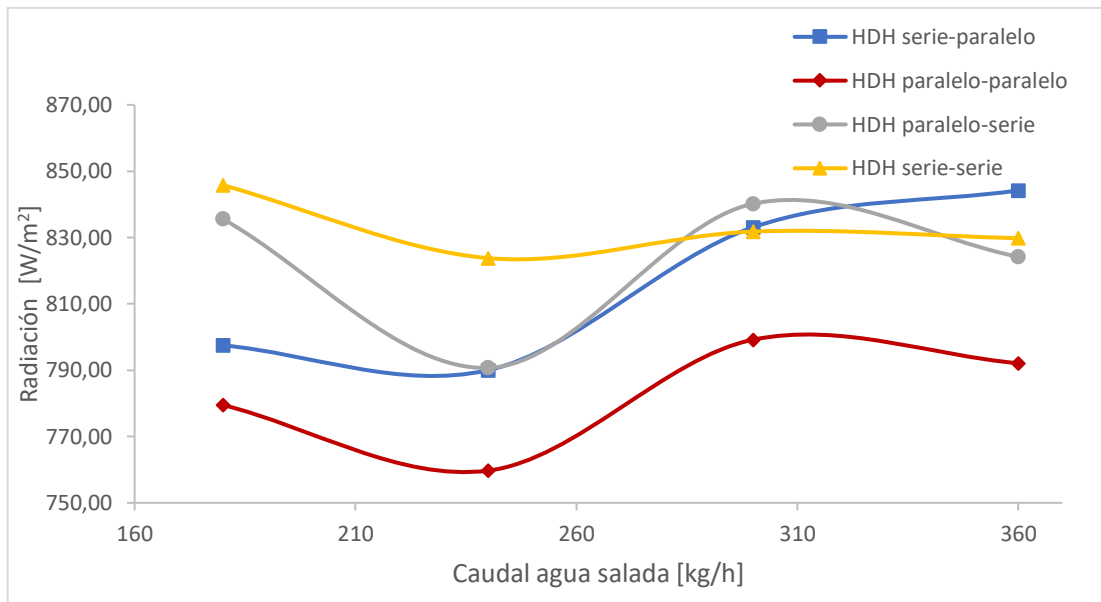


Figura 4-10 Radiación vs Agua de mar, planta HDH dos etapas.

La figura 4-11 muestra el GOR obtenido para las cuatro configuraciones a distintos flujos de agua de mar, donde los mejores parámetros se obtienen en las configuraciones serie-serie y paralelo serie. El GOR máximo alcanzado es de 0,57, cuando el caudal másico de aire es de 150 [kg/h] y los humidificadores y deshumidificadores están conectados en paralelo-serie respectivamente. Es claro notar que, al igual que en la planta HDH de una etapa, a medida que el agua de alimentación aumenta, el GOR tiende a disminuir independiente de la configuración con la que se trabaje.

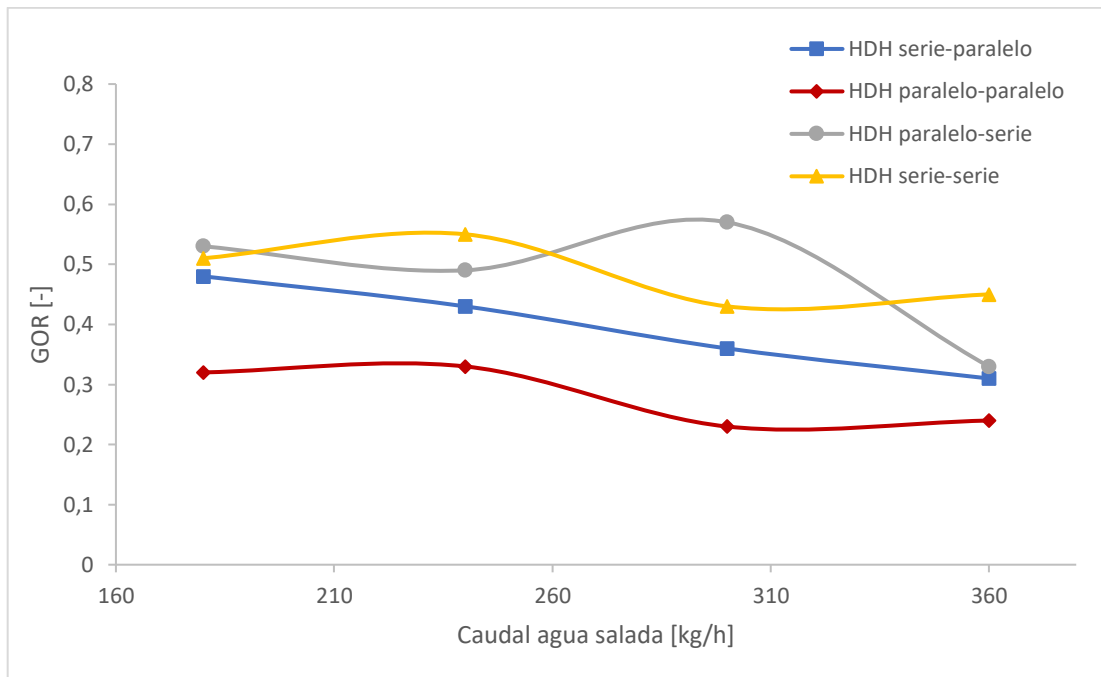


Figura 4-11 GOR vs Agua de mar, planta HDH dos etapas.

La figura 4-12 muestra el SIDR obtenido para las cuatro configuraciones a distintos flujos de agua de mar, donde los menores requerimientos energéticos se obtienen en la configuración serie-serie. El SIDR tiende a ir en aumento hasta que el flujo de agua de mar alcanza los 240 [kg/h], donde las curvas tienden a disminuir hasta alcanzar un comportamiento constante e independiente del caudal de agua de alimentación. La grafica refleja el costo asociado para producir un kilogramo de agua destilada, donde el mínimo SIDR alcanzado coincide con el mayor destilado producido para una operación en la planta de 180 [kg/h] de agua de alimentación para cada configuración en análisis. El menor SIDR obtenido es de 2,86 [kWh//kg] para la configuración con todos sus elementos en serie, con un flujo de agua de mar de 180 [kg/h].

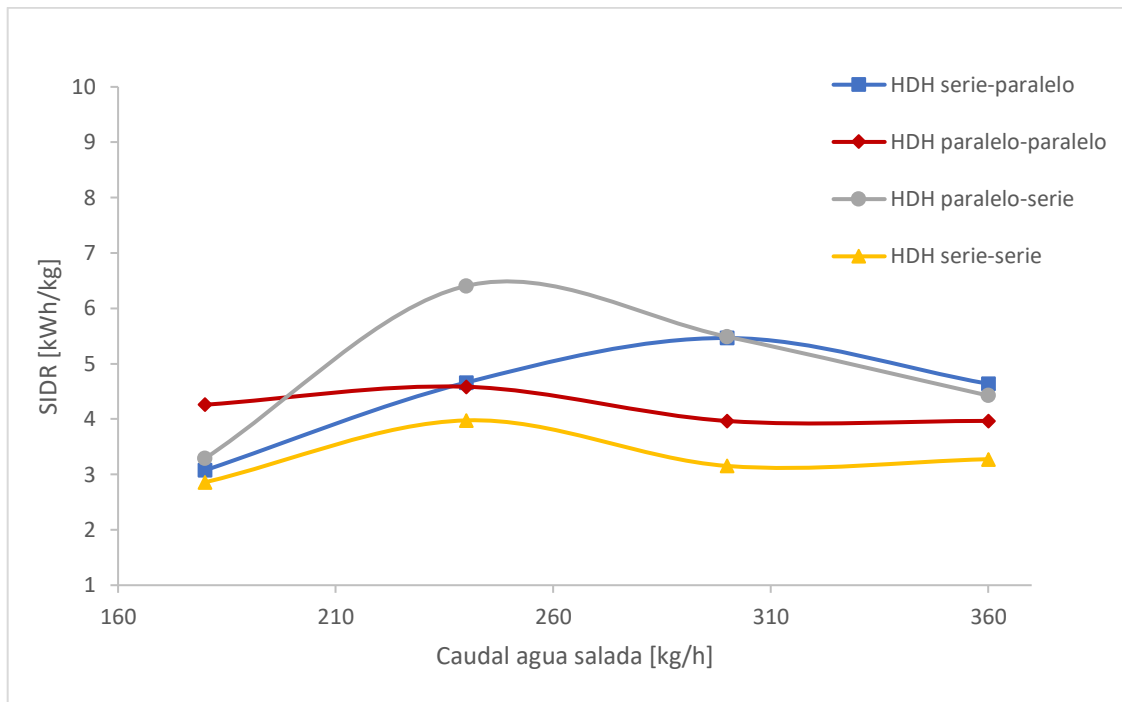


Figura 4-12 SIDR vs Agua de mar, planta HDH dos etapas.

4.3.3 Análisis de resultados planta HDH de dos etapas

La mayor producción de agua destilada se produce para un flujo de alimentación de 180 [kg/h] independiente de la configuración con la que se opere. La mayor producción de agua destilada alcanzada es de 4.81 [kg/h] cuando la planta HDH trabaja con todos sus equipos en serie. El comportamiento de la producción de destilado de la figura 4-9 muestra que al trabajar con 180 [kg/h], la mínima alimentación de agua de mar posible para la planta HDH de dos etapas, se alcanzan los mejores resultados, y al aumentar el flujo de alimentación se obtienen valores constantes independientes del caudal de alimentación. Los resultados pueden asociarse, al igual que en la planta HDH de una etapa, al hecho de

que, al tener menor masa, tanto de agua de mar como de aire, el proceso de transferencia de calor mejora y el destilado obtenido es óptimo. La configuración que mayores producciones entrega es la que cuenta con todos sus equipos conectados en serie, como se aprecia en la figura 2-6.

Para poder mejorar el GOR se debe disminuir el flujo de agua de mar de alimentación, lo que no es viable, como ya se explicó para el análisis de la planta HDH de una etapa. La configuración que cuenta con todos sus equipos en paralelo es la que presenta los más bajos valores de GOR, mientras que el resto de las configuraciones presentan un comportamiento similar marcando una tendencia en descenso al aumentar el flujo de alimentación.

La figura 4-12 nos muestra que el SIDR tiene un mínimo cuando el flujo de alimentación de agua de mar es de 180 [kg/h], y al aumentar el flujo de alimentación el SIDR tiende a mantener valores constantes. El comportamiento de SIDR muestra una relación directa con la producción de destilado, y al igual que en los resultados obtenidos en la planta HDH de una etapa, refleja que es un mejor parámetro, en comparación al GOR, para poder analizar el funcionamiento operativo de la planta HDH.

Al comparar ambas plantas HDH de una y dos etapas, es claro notar las diferencias en la producción de destilado y en el rendimiento de éstas. De acuerdo con los datos presentados anteriormente, se seleccionan las configuraciones de ambos prototipos con mejor desempeño, cuando trabajan con las condiciones de operación de mayor producción de destilado, esto es, cuando la planta HDH de una etapa opera con un caudal másico de aire y agua de mar de 507 [kg/h] y 180 [kg/h] respectivamente. La planta HDH de dos etapas obtiene su mayor producción de destilado cuando opera con todos sus elementos conectados en serie (ver figura 2-6) y con un flujo de alimentación de aire y agua de mar

de 150 [kg/h] y 180 [kg/h] respectivamente. La figura 4-13 muestra la radiación y el destilado obtenido para ambas plantas HDH.

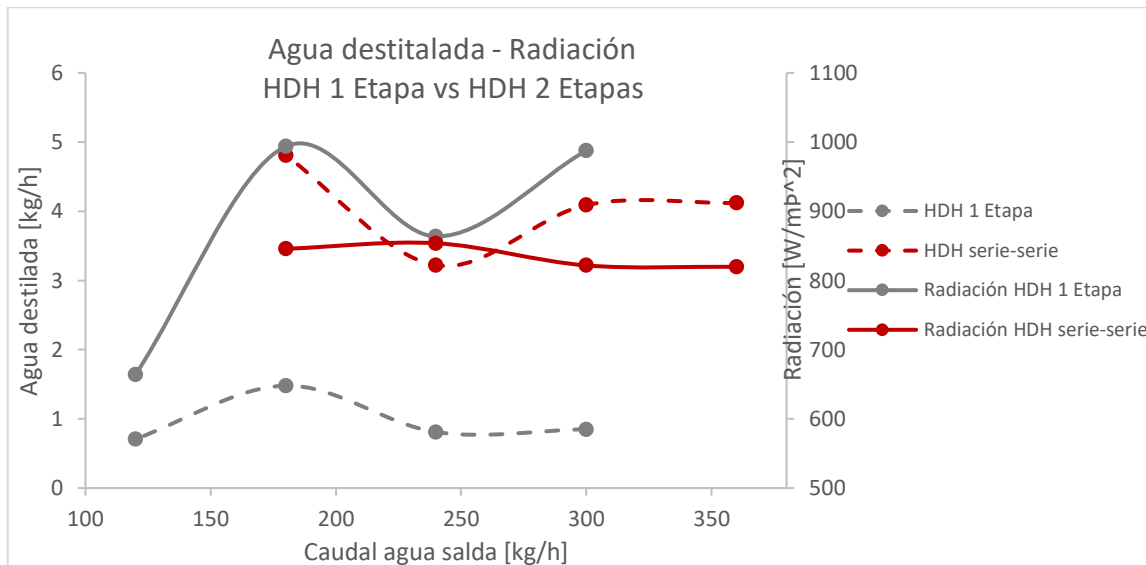


Figura 4-13 Agua destilada y radiación incidente, planta HDH una etapa vs dos etapas.

Es claro notar que el destilado obtenido con la planta HDH de dos etapas es mayor que el obtenido con la planta HDH de una etapa. Además, se refleja un máximo en los 180 [kg/h] para ambas plantas HDH, tal como se explicó anteriormente. A pesar de presentar radiaciones incidentes similares, los resultados obtenidos son significativos. En la figura 4-14 se presentan los GOR y SIDR obtenidos para ambas plantas.

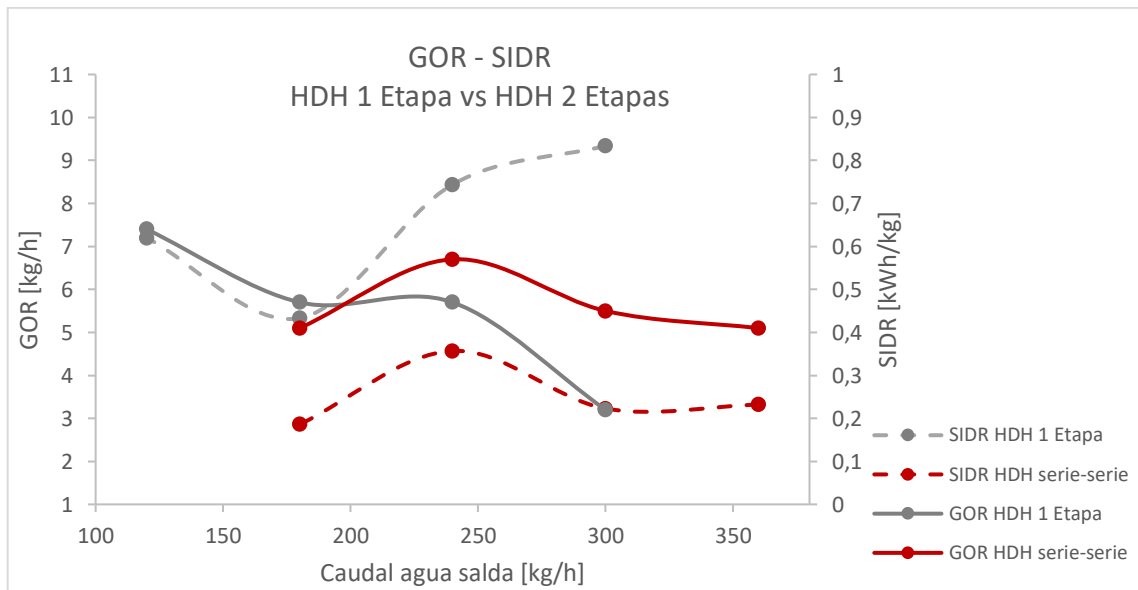


Figura 4-14 GOR y SIDR, planta HDH una etapa vs dos etapas.

La figura 4-14 refleja que el SIDR de la planta HDH de dos etapas es siempre menor al que de la planta HDH de una etapa. En contraste, el GOR de la planta HDH de una planta es mayor que la de dos etapas, hasta que el flujo de alimentación de agua salada alcanza los 180 [kg/h], donde el GOR de una planta HDH de dos etapas supera al de una planta HDH de una etapa. Al ver el comportamiento de las curvas de la planta HDH de dos etapas, se observa una tendencia similar, lo que puede conllevar a conclusiones erróneas, ya que el GOR máximo obtenido se presenta a los 240 [kg/h] de agua salada, mientras que el SIDR más bajo se obtiene a los 180 [kg/h], tal como ya se explicó anteriormente.

4.4 Conclusiones

Se debe tener presente que debido al tiempo que tomó la planta HDH en estar en óptimas condiciones de operar en forma correcta, las mediciones se realizaron en los meses de junio, julio y agosto, los que representan prácticamente los meses de menor radiación durante el año [11]. La información que detalla el comportamiento de la radiación anual presente en el LER se encuentra en el anexo A.

Como se observa en las figuras 4-3 y 4-9, la producción de agua destilada se ve directamente afectada al variar el flujo de agua de mar de alimentación. La mayor producción de destilado, en ambas plantas HDH, ocurre cuando por cada sistema desalinizador circulan 180 [kg/h] de agua de mar, mostrando una tendencia de disminución del destilado producido a medida que se aumenta el caudal de alimentación. Esto se puede explicar por la variación de las temperaturas dentro de los equipos del sistema. La temperatura del agua de mar y del aire que ingresan al humidificador y deshumidificador respectivamente aumentan, obteniendo una mayor diferencia de temperatura en el proceso, lo que conlleva a una mayor diferencia de humedad, y por ende del agua destilada. Por lo tanto, para lograr la mayor producción de agua destilada posible, es necesario operar la planta HDH con un flujo de agua de mar de 180 [kg/h], corroborando el estudio hecho por Leiva [5], que para la planta HDH de una etapa operando a un flujo de agua de alimentación entre 100 y 200 [kg/h], independiente del caudal de aire suministrado, se alcanza la mayor producción para la planta HDH de una etapa presente en el LER.

En ambas plantas desalinizadoras las gráficas del GOR muestran que, al disminuir el flujo de agua de mar de alimentación el GOR aumenta, indicando que a medida que se trabaje con caudales masicos menores a 100 [kg/h] la producción de GOR aumenta. En contraste, la figura 4-14 muestra que el SIDR de ambos sistemas, representan de mejor manera la

eficiencia de las plantas HDH de una y dos etapas, ya que considera el proceso del colector solar a diferencia del GOR.

Los resultados obtenidos para las plantas HDH de una y dos etapas reflejan una tendencia lineal entre la radiación solar incidente y la producción de agua destilada. A pesar de que las condiciones iniciales, como la temperatura ambiente promedio y la temperatura del agua de alimentación son influyentes en la producción de destilado, la radiación solar muestra ser un parámetro clave para analizar, con el objetivo de maximizar la producción de agua dulce. Tomando en cuenta los resultados obtenidos, es claro notar que considerar al GOR como parámetro principal de rendimiento lleva a conclusiones erróneas. Las gráficas de la producción de destilado, SIDR y radiación promedio muestran una fuerte tendencia en indicar que el óptimo para alcanzar un máximo de destilado, en ambas plantas desalinizadoras, es para un flujo de agua de mar de alimentación de 180 [kg/h], donde la irradiación solar es aprovechada de mejor manera que en otras condiciones de operación. El GOR no es capaz de reflejar este análisis, ya que, al no considerar el sistema de paneles solares, cuando la temperatura de operación en el intercambiador de calor se incrementa, la eficiencia del colector térmico baja, mientras que el GOR aumenta, haciendo un menor uso de la irradiación solar en el sistema.

5 Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Ante la escasez de agua dulce que existe en la actualidad, la desalinización por método HDH aparece como una buena alternativa a implementar, sobre todo en lugares donde el acceso al agua es precario y existe una alta radiación solar incidente. En el primer capítulo se dan a conocer sistemas de desalinización acoplados con energía solar que contienen mejoras en su operación en comparación a las plantas existentes en el LER, agregando sistemas de control que permiten analizar el rendimiento de un sistema HDH con mayor precisión, pero con un costo de inversión más elevado que los prototipos desarrollados en este trabajo, por lo que aumentar la eficiencia en la producción de destilados en las plantas HDH conlleva un análisis técnico económico para evaluar la rentabilidad de incorporar nuevas tecnologías. Además, un sistema HDH que opere continuamente puede presentar incrustaciones de sal debido al agua salada, por lo que se debe invertir en equipos que permitan operar continuamente sin problemas por la salinidad del agua. También se puede apreciar que un sistema CAOW es el que mejores resultados da, y para el caso de un sistema HDH de dos etapas, la configuración con todos sus elementos en serie (figura 2-6) tiende a mostrar un mejor rendimiento en la obtención del destilado producido, tal como se refleja en los resultados presentados anteriormente. Huang [7] propone un parámetro de rendimiento (STEC) muy similar al SIDR, con el fin de analizar el efecto de la radiación en la producción de destilado, obteniendo resultados similares a los obtenidos en este trabajo, donde a menor caudal de aire la producción de destilado aumenta concluyendo, además, que el consumo total de energía se ve directamente relacionado por la radiación incidente en comparación al consumo de las bombas y ventiladores.

En la revisión del estado operacional que se encontraba la planta HDH de dos etapas construida por Rodríguez [2] se apreciaron ciertas fugas y conexiones mal realizadas que

impedían un correcto funcionamiento. Una vez ajustadas todas las imperfecciones existentes, se instalan la mitad faltante de tubos Heat Pipe para completar el sistema de colección solar. Se instala un circuito que permita aprovechar la energía presente en el circuito solar al momento de poner en marcha el sistema, mientras se alcanza un estado estacionario de funcionamiento. Una vez finalizados los arreglos, se utiliza aislante térmico en las tuberías y equipos por donde circulan los flujos de aire y agua de alimentación, con el fin de disminuir al mínimo las pérdidas por transferencia de calor. La planta HDH de dos etapas queda operativa para poder hacer mediciones y análisis más en profundidad, que permitan conocer el principio de funcionamiento de cada equipo que compone el sistema de desalinización.

El estado operacional del prototipo de dos etapas queda correctamente funcional e instrumentado, de manera que pueda trabajar de forma autónoma logrando el máximo de destilado posible. Los registros de temperatura, radiación y humedad son almacenados de forma digital en sistemas data logger, mientras que parámetros como la presión y los caudales de agua y aire son registrados de manera análoga mediante los equipos que se presentaron en el capítulo 3. La medición del destilado de agua producida es de manera indirecta, ya que se registra el volumen de agua producido en un intervalo de tiempo. Esta medición puede obtenerse de manera digital, al invertir económicamente en un equipo capaz de almacenar el destilado producido en cada instante, y así, analizar el efecto de la radiación incidente en cada intervalo de tiempo.

La máxima producción de agua destilada, obtenida en los prototipos de una y dos etapas, fue de 1,46 [kg/h] y 4,81 [kg/h], con un requerimiento energético de 5,33 [kWh/kg] y 2,86 [kWh/kg] respectivamente. Las producciones de agua registradas muestran cierto contraste con los valores numéricos previstos en trabajos anteriores. Esto se debe a que al modelar y simular ambas plantas HDH no se consideran ciertas condiciones de operación, como el intervalo transitorio de la puesta en marcha y lo variable de los parámetros que

se ingresan a un software. También se debe considerar el comportamiento estacional, ya que las condiciones de operación en las cuales se experimentó en ambas plantas HDH, son en los meses de junio a agosto, cuando el hemisferio sur presenta sus mínimos registro de radiación debido al invierno. Además, se aprecia que la cantidad de agua que circula por cada sistema puede controlar la cantidad de agua destilada a producir, debido a que como se explicó en el capítulo 4, al existir menores flujo de agua y aire que calentar, la temperatura del sistema puede ser mayor, generando así una mejor transferencia de calor y, por ende, una mayor producción de destilado.

Por último, se puede ver que el GOR no muestra ser un buen parámetro para medir el desempeño de las plantas presentes, ya que maximizar este parámetro no significa aumentar el flujo de deshilado producido, mientras que el SIDR muestra una relación más directa entre la radiación y el agua producida, mostrando ser un mejor indicador al tener una correlación directa con la producción máxima.

5.2 Recomendaciones

Una forma de automatizar de mejor manera la medición de los parámetros claves a analizar, es implementar una balanza capaz de almacenar mediante un software la producción de agua destilada en cada instante de tiempo. Además, se debe tener en cuenta que, el estanque que recepciona el agua producida en el prototipo de dos etapas supera las dimensiones necesarias para almacenar el agua que se produce durante un día, además, de diferir con las dimensiones de una balanza comercial, por lo que se recomienda cambiar por uno que tenga menor capacidad, para un volumen máximo de 100 litros. Además, se observa como una buena alternativa la conexión de ambos prototipos al mismo sistema colector solar con tubos Heat Pipe, para así distribuir de mejor manera los espacios que ocupan ambas plantas, y disminuir el consumo energético, al necesitar una bomba de recirculación menos, y recuperar el calor perdido al solo tener un sistema HDH conectado para todos los tubos instalados.

6 Referencias

- [1] M. Reyes, “Diseño Y Construcción De Sistema De Desalinización Por Método De Humidificación-Deshumidificación (HDH) Acoplado Con Energía Solar,” *Tesis Pregr. Ing. Civ. Mec.*, p. 88, 2017.
- [2] M. Rodriguez, “CONSTRUCCION Y PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA DE DESALINIZACION POR HUMIDIFICACION Y DESHUMIDIFICACION DE DOS ETAPAS ACOPLADO CON ENERGIA SOLAR,” 2019.
- [3] J. Aburto, “REDISEÑO DE PROTOTIPO DE DESALINIZACION SOLAR CON SISTEMA HDH,” 2018.
- [4] G. P. Narayan, M. H. Sharqawy, E. K. Summers, J. H. Lienhard, S. M. Zubair, and M. A. Antar, “The potential of solar-driven humidification-dehumidification desalination for small-scale decentralized water production,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 4, pp. 1187–1201, 2010.
- [5] E. Leiva, “Modelamiento numérico y análisis de configuraciones de sistemas de destilación por Humidificación y Deshumidificación (HDH),” 2018.
- [6] Govindan et al, “Transiently-operated desalination systems with heat recovery and associated methods. Gradiant Corporation. United States Patent US 9617169 B2, April 11,2017,” 2017.
- [7] X. Huang, T. Ke, Y. Li, and X. Ling, “Experimental investigation and optimization of total energy consumption in humidification-dehumidification system,” *Energy Procedia*, vol. 158, no. 2018, pp. 3488–3493, 2019.
- [8] E. W. C. J. J. C. H. D. Y. C. P. WENHAO, “Sistema de desalinización de agua de mar humidificado y deshumidificador de refrigeración cerrada y método de trabajo del mismo.” vol. 31, no. 19, 2019.
- [9] A. Sulaiman, *SOLAR HUMIDIFIER AND DEHUMIDIFIER DESALINATION METHOD AND SYSTEM FOR THE DESALINATION OF SALINE WATER*, vol. 1.

2019.

- [10] J. T. Simpson, "TRANSIENTLY - OPERATED DESALINATION SYSTEMS AND ASSOCIATED METHODS," vol. 2, no. 12, 2019.
- [11] "Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas Universidad de Chile. Explorador solar, 2017."

7 Anexos

7.1 Anexo A

Datos obtenidos desde el explorador solar de la Universidad de Chile.



Figura 7-1 Radiación anual LER, UTFSM Viña del Mar

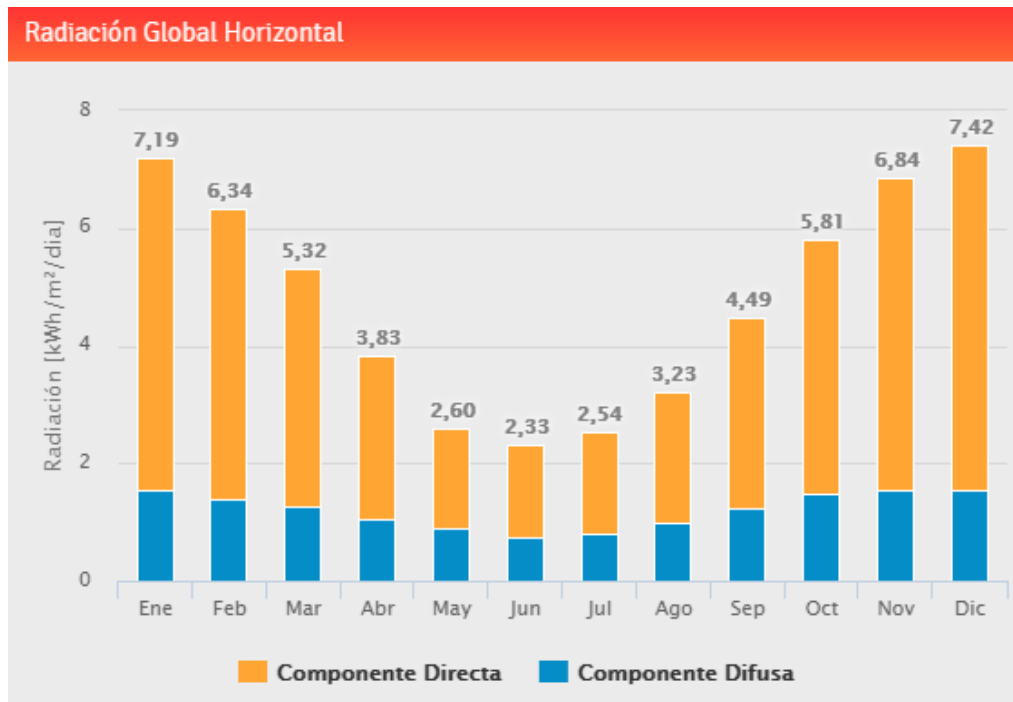


Figura 7-2 Radiación global Horizontal LER, UTFSM Viña del Mar

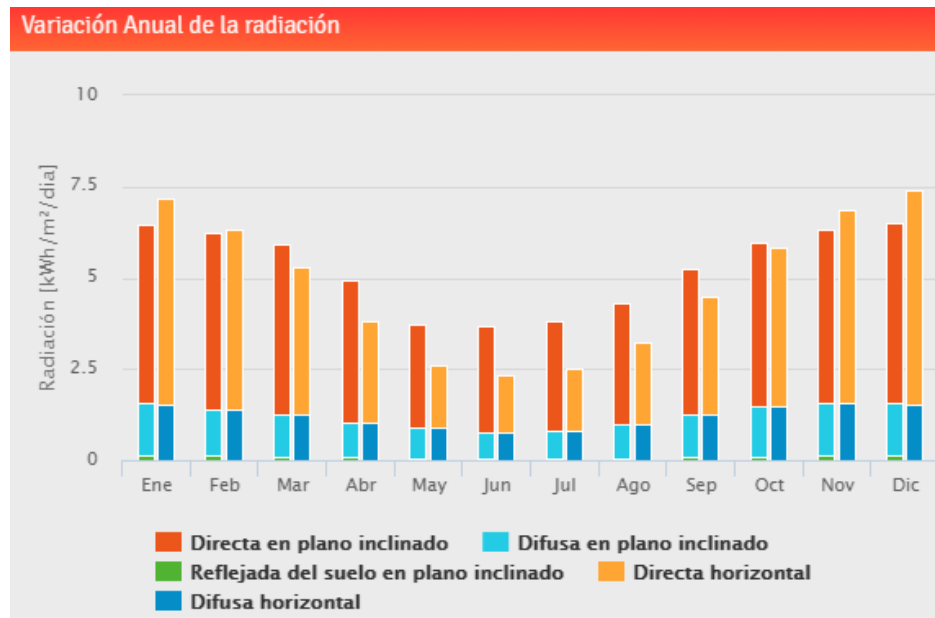


Figura 7-3 Variación anual de la radiación LER, UTFSM Viña del Mar

7.2 Anexo B

Resultados de la calibración hecha a las sondas PT100 disponibles en el LER.

	Baño termostático a 0°C	Baño termostático a 100°C
	Temperatura promedio °C	Temperatura promedio °C
T ₁	-0,15	100,61
T ₂	-0,16	100,69
T ₃	-0,1800 °C	100,03
T ₄	0,02	100,29
T ₅	-0,67	100,52
T ₆	-0,68	100,21
T ₇	-0,35	100,07
T ₈	-1,7	98,69
T ₉	-0,26	100,09
T ₁₀	-0,82	100,94
T ₁₁	120,41	144,57
T ₁₂	-0,27	100,27
T ₁₃	-0,66	100,14
T ₁₄	-0,14	100,66
T ₁₅	-0,77	100,33

Figura 7-4 Resultados temperaturas promedios a 0°C y 100°C de sondas PT100

Las sondas T₈ y T₁₁ se excluyen de los análisis debido a que presentan mediciones claramente erróneas. Para las demás sondas se realiza una correlación para poder ajustar los datos que se obtengan durante las mediciones (*ecuación 4*). La figura 7-5 muestra los factores de la linealización que se hacen para ajustar las mediciones.

$$T_C = a \cdot T_m + b$$

Ecuación 4: Temperatura corregida

T_C: Temperatura corregida

T_m: Temperatura medida

a,b: coeficientes a determinar

N° Sonda PT100	a	b
T 1	0,99246	0,14887
T 2	0,99157	0,15865
T 3	0,9979	0,17962
T 4	0,99731	-0,0199
T 5	0,98824	0,66212
T 6	0,99118	0,674
T 7	0,99582	0,34854
T 8	0,99612	1,6934
T 9	0,99651	0,25909
T 10	0,9827	0,80582
T 11	4,13907	-498,39
T 12	0,99463	0,26855
T 13	0,99206	0,65476
T 14	0,99206	0,13889
T 15	0,98912	0,76162

Figura 7-5 Coeficientes de corrección de temperatura.

7.3 Anexo C

Resultados obtenidos para las 4 configuraciones de la planta HDH de dos etapas.

