

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA.
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL MECÁNICA.
SANTIAGO – CHILE.



OPTIMIZACIÓN MULTIVARIABLE DEL
MODELO COMPUTACIONAL DE UN SISTEMA
DE DESALINIZACIÓN POR MÉTODO DE
HUMIFICACIÓN Y DESHUMIDIFICACIÓN

JOSÉ LUIS VIDAL BRAVO.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO.

PROFESOR GUÍA: RODRIGO BARRAZA.

PROFESOR CORREFERENTE: DAVID SALDIVIA

Resumen

Este trabajo tiene como finalidad crear un código de optimización numérica para un programa de simulación numérica existente, el cual refleja el comportamiento de una planta desalinizadora de agua de mar que utiliza el método de humidificación y deshumidificación, alimentado por medio de energía solar. El fin de agregar una optimización numérica a este sistema simulado, es buscar mejorar la cantidad de agua producida por medio de la modificación de las variables de entrada de la simulación, lo que permitirá posteriormente aplicar estas variaciones a una planta real.

Para esto se realizó un estudio de las tecnologías que se han implementado en los sistemas de humidificación y deshumidificación, tanto en sus componentes y sus variaciones como en los efectos que provocan las modificaciones de los valores de entrada del proceso.

El software utilizado para la optimización es “Engineering Equation Solver”, en el cual fue desarrollado con anterioridad el modelo numérico correspondiente a la planta HDH. Para el desarrollo de la optimización, se creó un código macros que utiliza el método de Hookes and Jeeves para obtener un valor máximo de una función objetivo por medio de la variaciones de las variables de entrada. En el caso de este trabajo se decidió dejar como función objetivo la producción de agua destilada y como variables de entrada los flujos máscicos de aire seco y agua de mar.

La optimización aplicada al modelo permite mejorar la cantidad de agua producida por el modelo de la planta desalinizadora, con solo modificar estos dos valores de entrada, permitiendo así un mejor aprovechamiento de la energía disponible.

Además se realizan estudios de la modificación del área efectiva de los colectores, la radiación incidente y la temperatura de entrada del agua de mar, demostrando que el comportamiento tanto del modelo numérico como de la optimización, están de acuerdo a lo esperado teóricamente.

De este trabajo, se desprende la necesidad de verificar los datos entregados por la optimización con la planta de desalinización instalada en la sede de Viña del mar, de la Universidad Técnica Federico Santa María, a la cual representa el modelo numérico que se utilizó en la optimización.

Índice

Resumen	2
Índice	3
Índice de Ilustraciones	6
Índice de Tablas.....	8
Simbología.....	9
1. Introducción	10
1.1 Objetivos.....	10
1.1.1 Objetivo general:	10
1.1.2 Objetivos específicos:.....	10
2. Marco Teórico	11
2.1 Sistemas de desalinización tradicionales	11
2.1.1 Osmosis reversa (RO).....	12
2.1.2 Electrodiálisis (ED)	13
2.1.3 Multietapa-Flash (MEF).....	14
2.1.4 Destilación de múltiple efecto (MED)	15
2.1.5 Compresión de vapor (VD)	17
2.2 Sistemas de desalinización no convencionales	18
2.3 Sistema de desalinización HDH	19
2.3.1 Análisis termodinámico de un ciclo HDH.....	20
2.3.2 Parámetros de rendimiento	24
3 Estado del Arte	27
3.1 Modificaciones en los componentes del sistema HDH	27
3.2 Estudios paramétricos en sistemas HDH.....	36
3.3 Gained Output Ratio.	37

4. Modelo Existente.....	38
4.1 Software EES	38
4.2 Componentes	39
4.2.1 Colector solar e intercambiador de calor.....	39
4.2.2 Humidificador	40
4.2.3 Deshumidificador	41
4.3 Funcionamiento	42
5 Métodos de Optimización	44
5.1 Método de Hookes and Jeeves	47
6. Implementación de la optimización	50
6.1 Pasos Previos	50
6.1.1 Modificaciones al modelo existente	50
6.1.2 Evaluación del comportamiento de las modificaciones en el humidificador.....	53
6.1.3 Evaluación del comportamiento de las modificaciones en el modelo del sistema HDH.	56
6.2 Elaboración del algoritmo para la optimizar el modelo.....	57
7. Resultados	60
7.1 Estudio de optimización multi-objetivo.....	60
7.2 Estudio de Óptimo Respecto a Área Colector	63
7.3 Estudio de Óptimo Respecto a Radiación Solar	65
7.4 Estudio de Óptimo Respecto a Temperatura del Agua Salobre.....	66
8. Conclusiones	69
Referencias	71
Anexos.....	76
A1: Variables de Entrada de Estudio Respecto de Área de Colectores Solares	76

A2: Variables de Entrada de Estudio Respecto de Radiación Solar..... 77

A3: Variables de Entrada de Estudio Respecto de Temperatura de Entrada del Agua
Salobre. 78

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Representación del proceso de osmosis reversa (2)	13
Ilustración 2: Esquema del funcionamiento del proceso de electrodiálisis (2)	14
Ilustración 3: Esquema de una planta de desalinización de multietapa-flash (2).....	15
Ilustración 4: Esquema de un destilador de múltiple efecto (2)	17
Ilustración 5: Representación de una planta de destilación por medio del método de compresión de vapor (2).....	18
Ilustración 6: Clasificación de sistemas HDH (4).	20
Ilustración 7: Esquema representativo del balance de masa y energía de un humidificador.	21
Ilustración 8: Esquema representativo del balance de masa y energía de un deshumidificador, con intercambio de calor entre fluidos.	22
Ilustración 9: Esquema de colector solar simple (a), colector con turbuladores convexos (b) y colector con turbuladores cóncavos (c) (5).....	27
Ilustración 10: Esquema propuesto en el trabajo de Yildirim y Solmus (14).	29
Ilustración 11: Esquema utilizado por Rajaseenivasan y Srithar (7), de un sistema HDH CWOA, donde se utiliza un humidificador con pulverización de agua.	29
Ilustración 12: Esquema utilizado por Srithar y Rajaseenivasan (6), de un sistema HDH CWOA, donde se utiliza un humidificador por columnas de burbujas.	30
Ilustración 13: Esquema utilizado por He et al. (17), de un sistema HDH CAOW.	31
Ilustración 14: Esquema de un sistema HDH de tres etapas (20).....	32
Ilustración 15: Esquema de sistema HDH CAOW acoplado a destiladores solares (22)....	33
Ilustración 16: Esquema de un sistema HDH CWOA acoplado a un sistema de aire acondicionado (23).	34
Ilustración 17: Esquema de un sistema que reutiliza el calor de un panel fotovoltaico para utilizarlo en un ciclo HDH CAOW (26).....	34
Ilustración 18: Fotografía de sistema implementado por Kabeel y Abdelgaid, donde se muestra el acoplamiento de un desalinizador HDH a un secador de dos etapas (27).	35
Ilustración 19: Esquema de un desalinizador HDH CWOA con estanque de almacenamiento para aumentar las horas de operación del sistema (16).	36

Ilustración 20: Esquema representativo del modelo utilizado para la simulación numérica (35)	38
Ilustración 21: Ciclo del proceso iterativo del modelo numérico (35).....	43
Ilustración 22: Función unidimensional, donde se aprecian mínimos locales, máximos locales, mínimos globales y máximos globales.....	44
Ilustración 23: Descripción gráfica del método de optimización univariante.....	46
Ilustración 24: Diagrama de obtención de direcciones conjugadas (a) Diagrama del método de Powell (b).....	47
Ilustración 25: Diagrama de flujo del proceso de optimización utilizado, elaboración propia.	49
Ilustración 26: Interfaz del sistema de simulación y optimización creado a través del software EES.....	52
Ilustración 27: Grafico con temperaturas de aire y agua de torre de enfriamiento, de acuerdo a los datos tomados por Alean (37), las simulaciones realizadas por Hernández (35) y la simulación del nuevo modelo modificado.....	55
Ilustración 28: Grafico con humedades relativas de torre de enfriamiento, de acuerdo a los datos tomados por Alean (37), las simulaciones realizadas por Hernández (35) y la simulación del nuevo modelo modificado.....	55
Ilustración 29: Gráfico de la relación existente entre el área efectiva total y la producción de agua por medio de la simulación y optimización del sistema HDH CAOW.	64
Ilustración 30: Gráfico de la relación existente entre la radiación incidente y la producción de agua por medio de la simulación y optimización del sistema HDH CAOW.....	66
Ilustración 31: Gráfico de la relación existente entre la temperatura de entrada del agua de mar y la producción de agua por medio de la simulación y optimización del sistema HDH CAOW.....	67

Índice de Tablas

Tabla 1: Valores de GOR obtenidos en los distintos trabajos revisados en el estado del arte.	37
Tabla 2: Parámetros utilizados en la simulación correspondientes al colector solar (35)...	40
Tabla 3: Parámetros utilizados en la simulación correspondientes al intercambiador del ciclo cerrado (35).....	40
Tabla 4: Parámetros utilizados en la simulación correspondientes al humidificador (35)..	41
Tabla 5: Parámetros utilizados en la simulación correspondientes al condensador (35). ..	42
Tabla 6: Resultados entregados por simulación numérica respecto al humidificador en distintas iteraciones.	51
Tabla 7: Variables de entrada en simulación de torre de enfriamiento.	54
Tabla 8: Datos de entrada registrados mediante las mediciones del 27 de abril del 2017, correspondientes a la planta HDH de la Universidad Técnica Federico Santa María.....	56
Tabla 9: Valores de temperatura en cada uno de los puntos del proceso de la planta HDH simulada, se aprecian los datos medidos en la planta de la Universidad Técnica Federico Santa María, los valores calculados por Hernandez y los valores calculados con el modificado.....	57
Tabla 10: Parámetros utilizados en la optimización numérica.	58
Tabla 11: Valores de las variables de entrada que se mantuvieron fijos al momento de realizar las optimizaciones en la primera parte del estudio.	60
Tabla 12: Valores de flujos máxicos de aire y agua utilizados como puntos de partidas para las optimizaciones realizadas.	61
Tabla 13: Variables de entrada obtenidas por medio de la optimización numérica.	61
Tabla 14: Resultados obtenidos de las simulaciones de los puntos de partida y de las optimizaciones obtenidas.....	62
Tabla 15: Resultados obtenidos de las simulaciones y optimizaciones realizadas con distintos valores de área de colector.....	64
Tabla 16: Resultados obtenidos de las simulaciones y optimizaciones realizadas con distintos valores de radiación incidente.	65
Tabla 17: Resultados obtenidos de las simulaciones y optimizaciones realizadas con distintos valores de temperatura de entrada del agua de mar.....	67

Simbología

CAOW: Closed-air open-water (cerrado-aire abierto-agua)

CWOA: Closed-water open-air (cerrado-agua abierto-aire)

ED: Electrodiálisis

EES: Enginnering equation solver

GOR: Gained-output-ratio

HDH: Humidificación- deshumidificación

MED: Destilación multiefecto

MEF: Evaporación flash multi-etapa

PE: Producción específica

PR: Performance ratio

RO: Reversed osmosis (osmosis reversa)

RR: Recovery Ratio

TDS: Solidos totales disueltos

VC: Compresión de vapor

1. Introducción

El problema de la escasez de agua potable no es nuevo. Alrededor de un tercio de la población se encuentra ubicada en sectores de escasez física de recursos hídricos (1), donde no hay suficiente agua para satisfacer la demanda actual de esas regiones. Las principales regiones que presentan estos problemas corresponden a zonas áridas, en donde la radiación de energía solar se encuentra disponible en grandes cantidades. Uno de los métodos estudiados con anterioridad es el sistema de desalinización por humidificación-deshumidificación, el cual tiene la particularidad de ser autónomo en estas regiones al aprovechar la energía proveniente del sol para todo el proceso.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general:

El objetivo general de este trabajo es implementar un método para optimizar un modelo numérico existente de una planta desalinizadora HDH.

1.1.2 Objetivos específicos:

Con la finalidad de lograr el objetivo general de este trabajo, se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Analizar críticamente estado del arte disponible sobre la desalinización HDH.
- Analizar el modelo numérico existente de la planta desalinizadora por método de humidificación-deshumidificación, haciendo énfasis en el funcionamiento de cada uno de sus componentes.
- Generar un código de optimización que entregue la configuración óptima de las variables de entrada, de acuerdo a un mejor rendimiento del sistema de desalinización.
- Evaluar los efectos de los cambios en los parámetros de los componentes del sistema, en el funcionamiento global del modelo numérico.

2. Marco Teórico

2.1 Sistemas de desalinización tradicionales

Para categorizar la calidad del agua se utiliza un parámetro denominado “Total Dissolved Solids” (TDS) o en español sólidos totales disueltos, el cual se representa los miligramos de solutos por cada litro de agua. De acuerdo a este valor es posible denominar al agua de tres maneras. En primer lugar, se encuentra el agua potable, la que cuenta con una concentración de TDS menor a los 500 mg/L, de acuerdo a la Organización Mundial de Salud. En segundo lugar, se encuentra el agua salobre, el cual contiene un valor de concentración de sólidos en el rango de 500 a 1500 mg/L. Por último, se llama agua de mar al agua cuya cantidad de sólidos totales disueltos supera los 1500 mg/L (2).

De acuerdo a estos parámetros se puede decir que la distribución de los recursos de agua potable del planeta no está equilibrados. Un 97,5% de la masa de agua del planeta corresponde a agua de mar y salobre. El porcentaje restante corresponde a agua dulce, la cual se concentra principalmente en lugares de muy bajo acceso, como los polos norte y sur, dejando solo con un 0,7% del total como recurso para las ciudades y pueblos por medio de aguas subterráneas, lagos, ríos, entre otras fuentes (2).

A esto se debe agregar que los aumentos de temperatura producidos por la contaminación y el cambio climático, así como el aumento de población y la creación de nuevos asentamientos, han incrementado esta necesidad, aumentando la demanda de este recurso. Debido a esto es que en las últimas décadas se han incrementado los estudios y la inversión en nuevas tecnologías que permitan la obtención de agua potable a partir de agua salobre y agua de mar, con el fin de abastecer las múltiples demandas de este escaso bien. El proceso por el cual se logra este propósito se denomina desalinización.

En la actualidad, existen distintos métodos de desalinización que se pueden dividir en dos grandes grupos. Por un lado, se encuentran los procesos que utilizan una membrana selectiva que permite la separación del agua de los elementos salinos por medio de la aplicación de energía al sistema. En este método se encuentran los procesos de Osmosis Reversa y Electrodiálisis. Por otro lado, se encuentran los procesos que por medio de la adición energética térmica al fluido logran un cambio de fase que permite la separación del agua a

partir de su evaporación y posterior condensación. Los principales procesos de este método son la desalinización por Multietapa-Flash, desalinización por destilación múltiple efecto y desalinización por compresión de vapor.

2.1.1 Osmosis reversa (RO)

El proceso de osmosis reversa se encarga de separar los componentes indeseados del agua de mar o agua salobre por medio de una membrana semi-permeable. Para lograr esto, es necesario producir un aumento de presión por medio de una bomba, lo que permite cambiar la dirección natural del proceso de osmosis, llevando el agua desde un sector con mayor concentración salina a uno con menor concentración.

La membrana semi-permeable se encarga de no dejar pasar los elementos que están contenidos dentro del agua de mar o agua salobre, dejando en un sector el concentrado con la mayor parte de los solutos. Generalmente este tipo de instalaciones utiliza energía eléctrica para su funcionamiento, la que se asocia principalmente al consumo de las bombas. En la ilustración 1, se observa el funcionamiento de las capas semipermeables en el proceso de osmosis reversa, donde al pasar el agua a través de ellas van dejando atrás los elementos disueltos. Esta es la tecnología más utilizada en procesos de desalinización. Alrededor de un 60% de las plantas a nivel mundial funciona de acuerdo a este proceso. Esto se debe principalmente a su bajo coste de instalación y su fácil adaptación a las condiciones locales. Por contraparte, una de sus desventajas es la necesidad de un pre-tratamiento del agua para proteger la membrana y la necesidad de contar con personal calificado para su operación y mantenimiento (3).

Es necesario destacar que este proceso es el que posee un consumo específico que varía entre $0,3-4,0 \text{ kWh/m}^3$ y un costo de producción $0,2-3,0 \text{ USD/m}^3$, los cuales son menores en comparación con otros procesos (2).

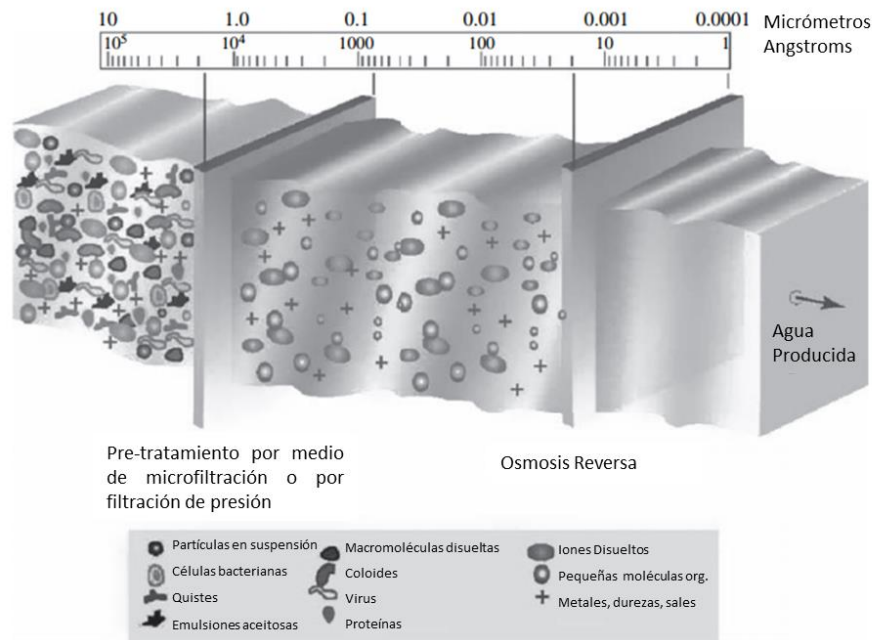


Ilustración 1: Representación del proceso de osmosis reversa (2)

2.1.2 Electrodiálisis (ED)

Los sistemas de desalinización por electrodiálisis utilizan corriente continua para separar los iones disueltos en el agua. La implementación de esta energía hace que los iones sean atraídos por medio de campos eléctricos hacia electrodos con carga opuesta. Para impedir que estos iones vuelvan a mezclarse con el agua en tratamiento, se utilizan membranas selectivas que impiden su retorno. Estas membranas son diferentes a las utilizadas en osmosis reversas, ya que cuentan con poros, son más gruesas, más resistentes al cloro y al ensuciamiento. En la ilustración 2, se observan los elementos que se utilizan para el proceso de electrodiálisis, en conjunto con los flujos de las microparticulas.

En el mundo, un 5% de las plantas en funcionamiento utilizan este tipo de procesos. Uno de los factores fundamentales de esto es que el costo de instalación de una planta de electrodiálisis respecto a la tecnología de osmosis reversa es mayor. Aun así cuenta con menores requerimientos para su operación y mantenimiento (3).

Para este proceso el consumo de energía depende principalmente de la cantidad de solutos sueltos que contenga el agua a tratar, por lo que, generalmente, se implementa en la

desalinización de agua salobre, en donde alcanza valores de consumo de energía específico y costo de producción de agua potable similares a los de la osmosis reversa (2).

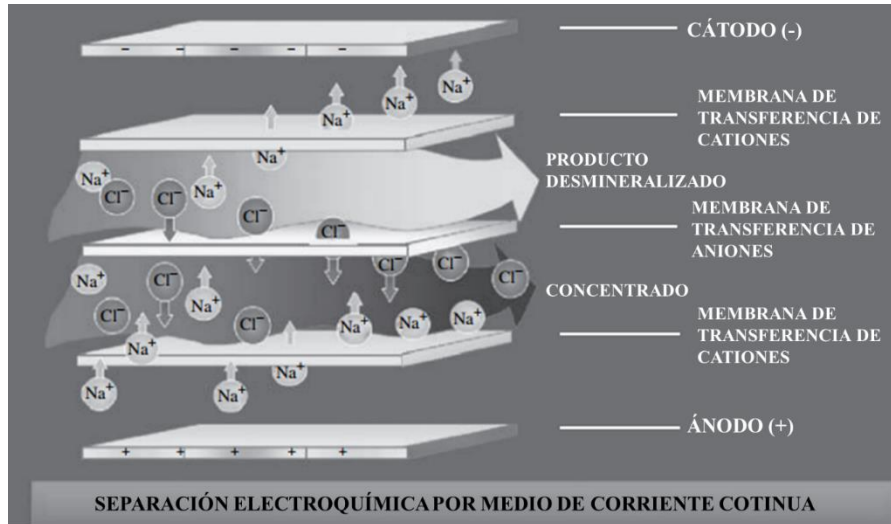


Ilustración 2: Esquema del funcionamiento del proceso de electrodiálisis (2)

2.1.3 Multietapa-Flash (MEF)

La desalinización por el proceso de evaporación flash de múltiples etapas consta de un circuito por el cual fluye agua con alta concentración salina, la que es calentada por una fuente externa de calor a una temperatura un poco menor que la de evaporación del fluido (90-115°C). Este fluido circula por cámaras que se encuentran a una presión inferior a la de saturación, lo que permite la evaporación súbita de una pequeña porción del líquido. La mezcla de agua-vapor pasa por un sistema de separadores de arrastre los que se encargan de separar el agua con salinidad elevada, dejando pasar solo vapor con baja cantidad de sales. Por medio de tubos intercambiadores de calor se logra condensar el vapor generado, obteniendo así el agua destilada. En estos tubos intercambiadores circula el agua de alta concentración salina, que viene a baja temperatura, lo que permite transferir una parte del calor latente del vapor condensado a este fluido, con el fin de disminuir la cantidad de energía térmica requerida en el ciclo. En cada etapa se repite el proceso, logrando destilar aproximadamente un 1% del líquido que ingresa por etapa. Los sistemas actuales comúnmente utilizan entre 20 y 30 etapas (2).

etapa, el agua es pulverizada por medio de rociadores en la parte superior. La energía externa, necesaria para el proceso, se le entrega a un fluido que circula por tubos intercambiadores, los cuales reciben las gotas pulverizadas de agua. El contacto con los tubos evapora parte del líquido, el cual pasa por eliminadores de niebla, que separan el concentrado del vapor.

El líquido no evaporado pasa a una segunda etapa, en donde nuevamente se pulveriza y se le entrega calor por medio de intercambiadores de tubos. Esta etapa se encuentra a una presión menor, por lo que la temperatura necesaria para lograr la evaporación de las gotas del fluido es también lo es. El calor es entregado por el vapor generado en la etapa anterior, logrando evaporar parte del fluido concentrado y al mismo tiempo condensar el vapor con baja concentración de solutos. Estos pasos se repiten en cada una de las etapas del proceso. En la ilustración 4 se muestra un esquema de un proceso de desalinización por el método MED, el cual está acompañado del diagrama de flujos de los fluidos.

A diferencia de la desalinización por evaporación flash de múltiples etapas, la temperatura necesaria para lograr la evaporación es menor, alcanzando valores entre 62 y 75 °C (2).

De los procesos de destilación que utilizan energía térmica, este es el más utilizado para la desalinización de agua a nivel mundial, alcanzando un 14% de la producción. Dentro de sus principales beneficios, se encuentra la posibilidad de trabajar entre un 0 y 100% de su capacidad nominal, además de la gran facilidad para implementar energías renovables en el proceso. Por otro lado, el líquido tratado requiere la aplicación de productos desincrustantes, con el fin de reducir la posibilidad de que se creen paredes aislantes en las tuberías intercambiadoras de calor, debido a la alta concentración de sales en el fluido (3).

Dado que la temperatura necesaria es menor que en el caso anterior, el consumo específico del proceso es menor, alcanzando valores entre los 5,7 y los 7,8 kWh/m³. En el caso del costo de producción de agua dulce, los valores van desde los 0,7 a los 3,5 USD/m³, lo que la hace competitivo con respecto a los otros procesos, sobre todo cuando se requiere tratar agua de mar. Otro dato importante a mencionar, es que en cuanto a el parámetro de rendimiento GOR, los equipos más avanzados alcanzan hasta $24 \left[\frac{kg_w}{kg_v} \right]$ (2).

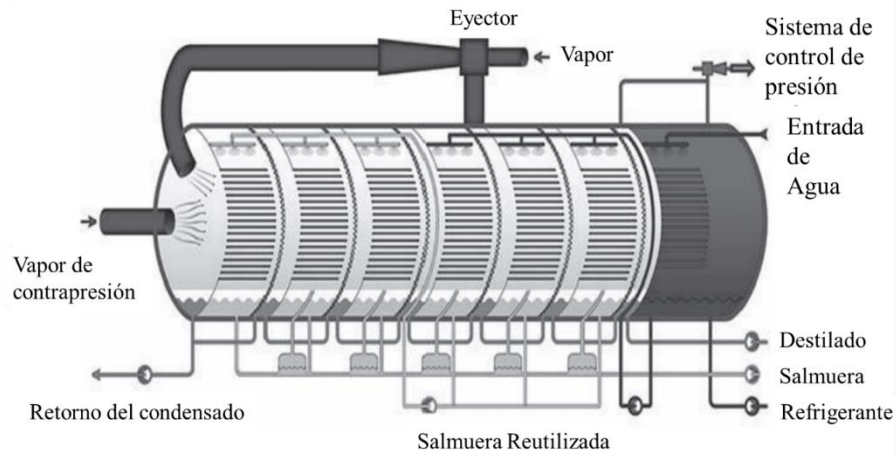


Ilustración 4: Esquema de un destilador de múltiple efecto (2)

2.1.5 Compresión de vapor (VD)

Este tipo de proceso usa como fuente calórica el vapor producido por medio de un compresor mecánico o un termocompresor. Ese vapor pasa por un sistema intercambiador de calor, sobre el cual se deja caer el líquido concentrado. La función del intercambiador de calor es entregar energía térmica al agua de mar o agua salobre y al mismo tiempo condensar el vapor generado. Al aumentar la temperatura del líquido, el mecanismo que disminuye la presión logra la evaporación de parte de este y lo transporta hacia el intercambiador. Lo anteriormente mencionado se aprecia en la ilustración 5, donde aparece un diagrama de un sistema de destilación por compresión de vapor junto a su diagrama de flujos.

En cuanto a su uso, el método de desalinización por este medio es ocupado para la producción de un 5% del total del agua desalinizada a nivel mundial (3). El consumo específico de energía en este proceso se encuentra en el rango de 8,0 a 12,0 kWh/m^3 y el costo de producción de agua destilada esta entre 1,0 a 3,5 USD/m^3 (2).

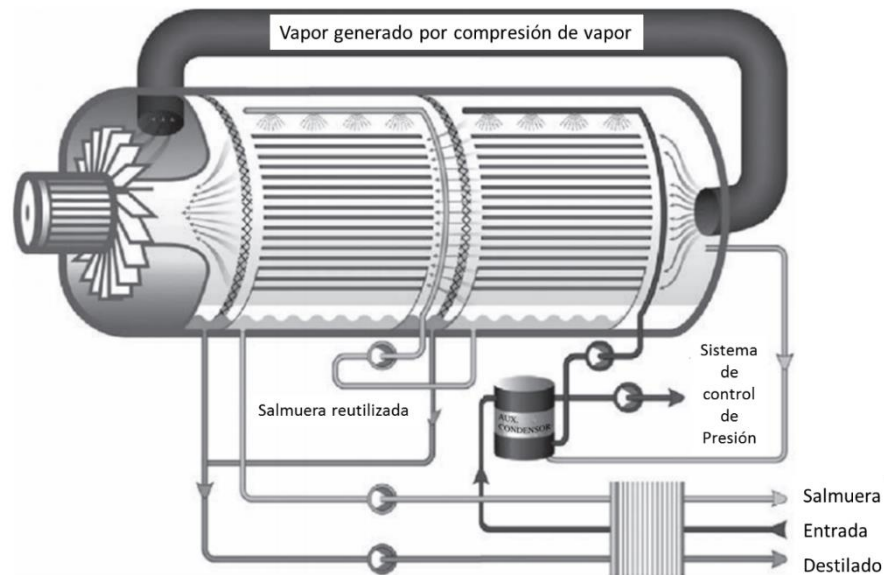


Ilustración 5: Representación de una planta de destilación por medio del método de compresión de vapor (2)

2.2 Sistemas de desalinización no convencionales

Además de los modelos convencionales de desalinización de agua, se puede encontrar otros métodos que se están implementando en la actualidad, como por ejemplo, los métodos que utilizan energías renovables no convencionales para su funcionamiento. Estos métodos se están convirtiendo en una nueva posibilidad para combatir los problemas de escasez de agua en el mundo. Aun cuando presentan costos más elevados que las tecnologías convencionales, estos sistemas poseen fortalezas al momento de ser utilizados a pequeña escala y sobre todo en lugares donde, además de falta de recursos hídricos, existen problemas de suministros energéticos, lo que los hace mucho más llamativos de implementar.

Es posible observar al menos cuatro tipos de ERNC utilizadas en proceso de desalinización. En primer lugar, está la desalinización por medio de energía geotermal, en donde se utiliza la energía extraída para implementar principalmente procesos del tipo térmico. En el caso de energías eólicas o mareomotrices, los sistemas de desalinización utilizados principalmente son los que usan membranas selectivas como electrodiálisis y osmosis reversa, aun cuando también es posible la implementación de compresión de vapor mecánica. Por último está el caso de la energía solar, la cual permite la utilización de ambas técnicas, utilizando sistemas fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica en los métodos con membranas y por

medio de la utilización de energía térmica aplicada directamente en los destiladores solares o indirectamente por medio de colectores entregando el calor para procesos como destilación multiefecto, evaporación flash multietapa, compresión de vapor térmica o sistemas de humidificación y deshumidificación (3).

2.3 Sistema de desalinización HDH

Dentro de los métodos solares de desalinización, aparece un método no mencionado con anterioridad, el cual se denomina desalinización por humidificación y deshumidificación (HDH). Este método consiste en la réplica del proceso natural del agua, generando primero una evaporación de parte de una fuente de agua de mar o agua salobre por medio de la circulación de aire no saturado, el que se encarga de absorber parte de su masa. Luego, este aire húmedo se enfría permitiendo la separación del agua como líquido condensado. Para poder obtener una mayor cantidad de agua evaporada, se utiliza una fuente de calor que aumente la temperatura del aire y/o el agua antes de entrar en contacto entre sí.

Los sistemas más básicos de desalinización HDH están formado por tres unidades básicas: el calentador de aire o agua, el humidificador y el condensador o deshumidificador. En el caso de los sistemas de calentamiento agua, los elementos más utilizados para realizar esta labor son los colectores solares, los cuales se encuentran conectados por medio de un circuito cerrado a intercambiadores de calor de contacto indirecto que se encargan de entregar la energía térmica al agua salobre. Para el caso del calentamiento de aire, los calentadores de directos de doble paso son los más utilizados. En el caso de los humidificadores, los que más se utilizan corresponden a intercambiadores de calor por contacto directo, en donde el agua pulverizada cae por gravedad y en contra flujo se inyecta aire para aumentar su humedad, lo cual es muy similar a una torre de enfriamiento. Por último los deshumidificadores más utilizados corresponden a intercambiadores de calor de contacto indirecto, los cuales cuentan con un sistema de extracción de condensado.

Estos sistemas pueden clasificarse de acuerdo a su configuración como cerrado-aire abierto-agua o cerrado-agua abierto-aire, o por el fluido que se calienta, ya sea aire, agua o ambos, y por cómo se produce el flujo de aire de manera natural o por tiro forzado (4), tal y como se presenta en el esquema de la ilustración 6.

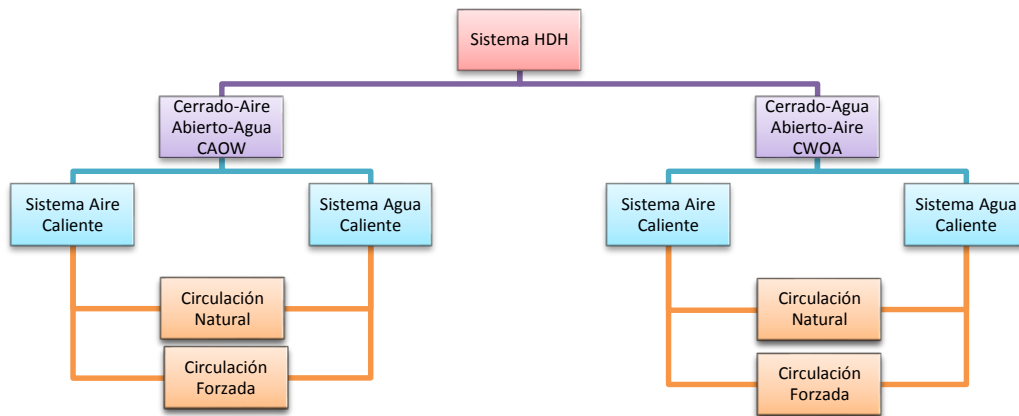


Ilustración 6: Clasificación de sistemas HDH (4).

A diferencia de los sistemas convencionales de desalinización de agua, el método HDH solar es factible de aplicar a baja escala, en lugares donde las temperaturas son elevadas y el acceso al agua potable es escaso, logrando alcanzar rendimientos similares a los procesos tradicionales en estas condiciones.

2.3.1 Análisis termodinámico de un ciclo HDH

El sistema de desalinización por medio de la ciclo HDH se encuentra basado principalmente en los fenómenos de transferencia de calor y transferencia de masa, los cuales ocurren de manera diferente en cada uno de sus componentes. En la siguiente sección se mostraran las ecuaciones más características que dominan el comportamiento de los fenómenos para los principales componentes de un sistema HDH tradicional.

Humidificador (torre de enfriamiento)

En el caso de este tipo de humidificadores, se puede apreciar tanto el fenómeno de transferencia de calor como el de transferencia de masa, donde ambos fluidos comparten el mismo espacio interactuando entre sí.

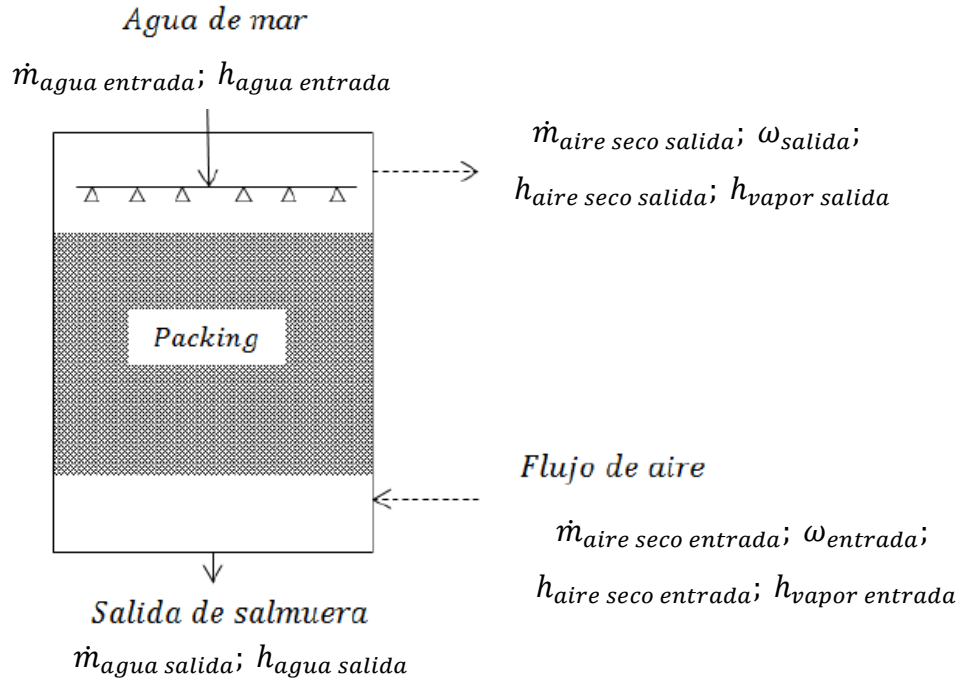


Ilustración 7: Esquema representativo del balance de masa y energía de un humidificador.

De acuerdo a los flujos de entrada y salida de la ilustración 7, las ecuaciones principales que corresponden a balances de masa y energéticos son las siguientes:

Balance de masa

$$\dot{m}_{\text{aire seco entrada}} = \dot{m}_{\text{aire seco salida}} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{\text{agua entrada}} + \dot{m}_{\text{vapor entrada}} = \dot{m}_{\text{agua salida}} + \dot{m}_{\text{vapor salida}} \quad (2)$$

$$\dot{m}_{\text{vapor entrada}} = \omega_{\text{entrada}} \dot{m}_{\text{aire seco entrada}} \quad (3)$$

$$\dot{m}_{\text{vapor salida}} = \omega_{\text{salida}} \dot{m}_{\text{aire seco salida}} \quad (4)$$

Balance Energético

$$\dot{Q}_{Torre} = \dot{m}_{aire\ seco\ salida} h_{aire\ seco\ salida} + \dot{m}_{vapor\ salida} h_{vapor\ salida} - \dot{m}_{aire\ seco\ entrada} h_{aire\ seco\ entrada} - \dot{m}_{vapor\ entrada} h_{vapor\ entrada} \quad (5)$$

$$\dot{Q}_{Torre} = \dot{m}_{agua\ entrada} h_{agua\ entrada} - \dot{m}_{agua\ salida} h_{agua\ salida} \quad (6)$$

Deshumidificador (intercambiador de calor de flujo no mezclado)

Este dispositivo se encarga de transferir el calor del aire húmedo a otro fluido para así poder condensar parte del vapor que es transportado por el aire. El diagrama que representa el balance de masa se puede ver en la ilustración 8.

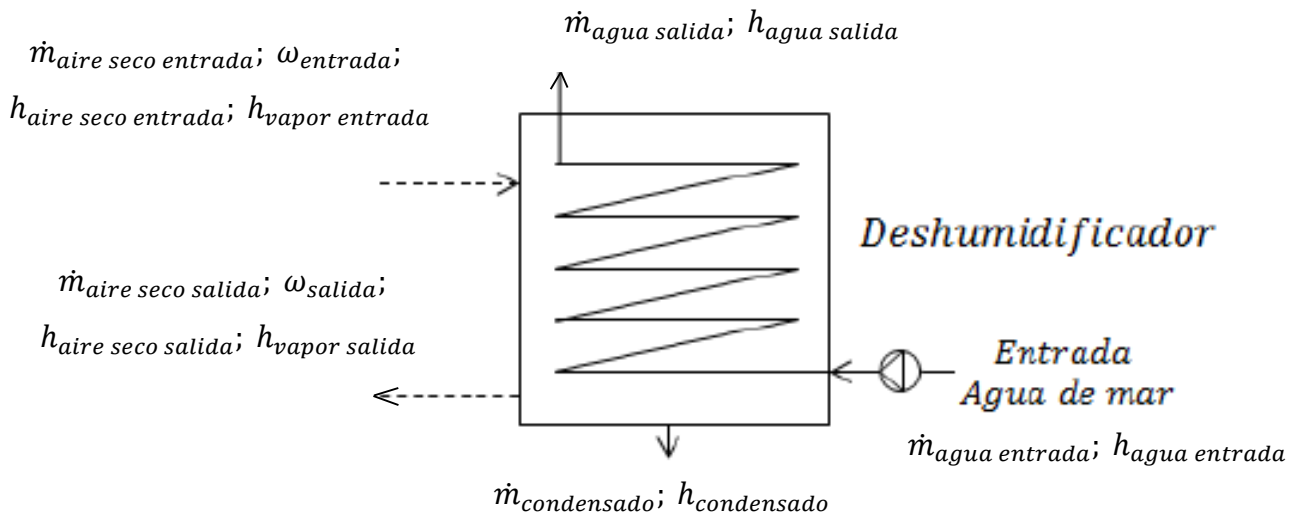


Ilustración 8: Esquema representativo del balance de masa y energía de un deshumidificador, con intercambio de calor entre fluidos.

Los balances de masa y energía para el flujo de aire húmedo son los siguientes:

Balance de Masa

$$\dot{m}_{air\ eseco\ entrada} = \dot{m}_{aire\ seco\ salida} \quad (7)$$

$$\dot{m}_{vapor\ entrada} = \dot{m}_{vapor\ salida} + \dot{m}_{condensado} \quad (8)$$

Balance de Energia

$$\dot{Q}_{condensador} = \dot{m}_{aire\ seco\ entrada} h_{aire\ seco\ entrada} + \dot{m}_{vapor\ entrada} h_{vapor\ entrada} - \dot{m}_{aire\ seco\ salida} h_{aire\ seco\ salida} - \dot{m}_{vapor\ salida} h_{vapor\ salida} - \dot{m}_{condensado} h_{condensado} \quad (9)$$

En algunos casos el fluido con el que se intercambia calor es la misma agua a utilizarse en el proceso de desalinización, por lo que a las ecuaciones anteriores se les agregan los siguientes balances de masa y energía:

Balance de Masa

$$\dot{m}_{agua\ entrada} = \dot{m}_{agua\ salida} \quad (10)$$

Balance de Energia

$$\dot{Q}_{condensador} = \dot{m}_{agua\ entrada} h_{agua\ entrada} - \dot{m}_{agua\ salida} h_{agua\ salida} \quad (11)$$

Sistema de trasferencia de calor

En este equipo el proceso principal es el de transferencia de calor al sistema, agregándose al fluido a calentar según el ciclo. En caso de ser un ciclo con calentamiento de agua, se tiene que los balances que dominan el fenómeno son los siguientes.

Balance de Masa

$$\dot{m}_{agua\ entrada} = \dot{m}_{agua\ salida} \quad (12)$$

Balance de Energia

$$\dot{Q}_{intercambiador} = \dot{m}_{agua\ entrada} h_{agua\ entrada} - \dot{m}_{agua\ salida} h_{agua\ salida} \quad (13)$$

En el caso de calentamiento de aire, se cambian los balances de masa y energía por los siguientes:

Balance de Masa

$$\dot{m}_{\text{air eseco entrada}} = \dot{m}_{\text{aire seco salida}} \quad (14)$$

$$\dot{m}_{\text{vapor entrada}} = \dot{m}_{\text{vapor salida}} \quad (15)$$

Balance de Energia

$$\dot{Q}_{\text{Intercambiador}} = \dot{m}_{\text{aire seco entrada}} h_{\text{aire seco entrada}} + \dot{m}_{\text{vapor entrada}} h_{\text{vapor entrada}} - \dot{m}_{\text{aire seco salida}} h_{\text{aire seco salida}} - \dot{m}_{\text{vapor salida}} h_{\text{vapor salida}} \quad (16)$$

2.3.2 Parámetros de rendimiento

Una forma para comparar los diferentes sistemas de desalinización es por medio de la utilización de parámetros de rendimiento que nos permitan, por medio de un valor numérico, saber cuál de los sistemas es el que funciona mejor de acuerdo a lo requerido. En especial para sistemas desalinizadores solares se utilizan cuatro tipos de parámetros distintos

Gained-Output-Ratio (GOR) “Relación entre entrada y salida”

Este es uno de los parámetros más utilizados para las comparaciones de sistemas desalinizadores térmicos. El parámetro representa la relación existente entre el calor latente requerido para cambiar desde el estado gaseoso al líquido el agua condensada, respecto de la energía recibida de los paneles o colectores solares. Es posible calcular el valor de este parámetro como:

$$GOR = \frac{\dot{m}_{\text{condensado}} h_{\text{evaporación}}}{\dot{Q}_{\text{entrada}}} \quad (17)$$

Este número entre mayor sea indica que mejor es el rendimiento energético de la planta desalinizadora, debido a que indica que se produjo más agua por unidad de energía consumida

Performance Ratio (PR) “Razón de desempeño”

La razón de rendimiento es otro valor utilizado para la comparación de sistemas desalinizadores. Al igual que el GOR, este parámetro relaciona la producción de agua condensada con la energía térmica utilizada en el proceso, por lo que es posible calcularlo como:

$$PR = \frac{\dot{m}_{condensado}}{Q_{entrada}} \quad (18)$$

El valor entregado en este caso no es adimensional y está representado por las unidades $[kg/kJ]$. Al ver la forma en cómo se calcula es posible observar que existe una relación directa entre este parámetro y el GOR, la cual está dada por:

$$GOR = (PR)h_{condensado} \quad (19)$$

Producción Específica (PE)

En el caso de la producción específica, el parámetro muestra una relación entre la masa de agua condensada respecto al área de colectores solares utilizados. El valor de este parámetro es medido en unidades de $[kg/m^2]$ y es posible de calcularlo de acuerdo a la ecuación:

$$PE = \frac{m_{cond}}{A_{efectiva}} \quad (20)$$

Recovery Ratio (RR) “Razón de recuperación”

Otro parámetro importante utilizado, es razón de recuperación. En este caso el parámetro mide la relación entre el flujo másico de agua producido respecto del flujo másico de salmuera ingresada al sistema desalador. Principalmente el valor de este parámetro es entregado en forma de porcentaje. Los sistemas con alto valor de RR indican que gran parte del agua salobre ingresada es transformada en agua dulce. En algunos casos se busca que

este valor no sea tan alto, ya que puede afectar el funcionamiento de los equipos y elementos de la planta desaladora, por los efectos provocados por la descarga salmuera con alta concentración de solutos. La ecuación que permite obtener este parámetro es la siguiente:

$$RR = \frac{m_{\text{condensado}}}{m_{\text{agua salobre entrada}}} \quad (21)$$

3 Estado del Arte

3.1 Modificaciones en los componentes del sistema HDH

Los estudios en sistemas de desalinización por medio del método HDH han aumentado en los últimos años, debido a su gran viabilidad para ser implementados en lugares donde la energía eléctrica escasea. Es debido a esto que los últimos estudios apuntan a la mejora de los principales componentes del sistema, como a su acoplamiento con otros sistemas. A continuación se presentan algunos de estos trabajos, de acuerdo a las mejoras propuestas.

Calentadores solares de aire

Los calentadores solares de aire se encargan de recibir la radiación solar y transferir esa energía al aire que circula por su interior, aumentando su temperatura. Esto permite aumentar la cantidad de agua que puede ser transportada por el aire. Dentro de los estudios realizados a los calentadores de aire, se puede apreciar que uno de los factores en los cuales se ha tenido énfasis es cómo se puede transferir más energía térmica al fluido. Es por esto que se ha estudiado la implementación de elementos que permitan aumentar la turbulencia del aire que se circula por los calentadores solares (5) (6) (7) (8), como los que se pueden observar en la ilustración 9. Estos trabajos demuestran que la efectividad del sistema HDH se ve incrementada al agregar elementos turbuladores al calentamiento del aire, permitiendo una mayor producción de agua, un menor consumo específico y un mejor aprovechamiento de la energía solar.



Ilustración 9: Esquema de colector solar simple (a), colector con turbuladores convexos (b) y colector con turbuladores cóncavos (c) (5).

Otro estudio realizado por Al-sulaiman et al. (9) corresponde a un sistema HDH con calentamiento de aire por medio de un concentrador solar. En este se determina que la implementación del calentador solar después del humidificador logra generar una mayor cantidad de agua que al ser ubicado antes del humidificador.

Calentadores solares de agua

Al igual que en el caso del calentamiento de aire, los calentadores de agua se encargan de entregar la energía recibida por el sol al agua en tratamiento. Esto se puede realizar de dos maneras: recibiendo la energía a un colector solar por el cual pasa de manera directa al agua salobre o por medio de un circuito cerrado en donde otro fluido recibe el calor y luego se lo entrega al agua de mar por medio de un intercambiador de calor.

Uno de los factores más influyentes en la producción de agua destilada para los sistemas HDH es la temperatura con la que entra el agua de mar al humidificador. Es por esto que estudios en donde se utilizan colectores de tubos evacuados (10) (11) logran generar un aumento de temperatura mayor en el agua que entra al humidificador, aumentando la producción de agua en comparación con sistemas en los cuales se usan colectores planos. Otra forma de lograr aumentos en la temperatura de entrada al humidificador, es utilizar aceites orgánicos en un circuito cerrado para el calentamiento, como se proponen en los modelos numéricos de Juárez-Trujillo et al. (12) y Mahmoud et al. (13), debido a que por su calor específico es menor le permiten alcanzar mayores valores de temperatura.

Calentadores solares en ambos fluidos

El análisis del aumento de la eficiencia al realizar ambos aumentos de temperaturas en los distintos fluidos es estudiado en algunos trabajos actuales. Por ejemplo, en el estudio realizado por Rajaseenivasan & Srithar (7) mencionado con anterioridad al estudiar el comportamiento del colector solar con elementos que aumentan la turbulencia, también se registraron los efectos que se obtienen al utilizar un colector de doble propósito, el cual logra aumentar la efectividad del sistema HDH. Tal como fue mencionado, el efecto de aumento en la temperatura, tanto en el aire como en el agua aumenta la producción de destilado (10). No obstante, el efecto al aumentar la temperatura del agua es mayor que el de aumentar la temperatura del aire, en el resultado final del sistema (14). Este resultado fue obtenido de un

estudio en donde se consideraban un ciclo CWOA con calentadores de agua y calentadores de aire por separado, tal y como lo muestra la ilustración 10.

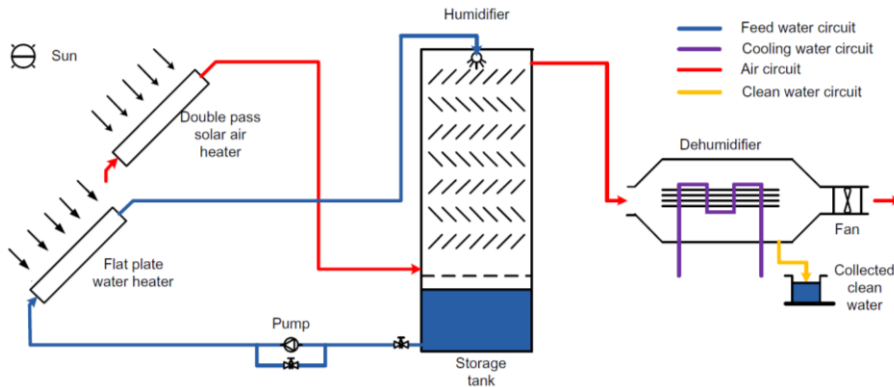


Ilustración 10: Esquema propuesto en el trabajo de Yildirim y Solmus (14).

Humidificadores

Otro de los elementos importantes al analizar el comportamiento de los sistemas HDH es el humidificador, elemento en el cual el aire absorbe vapor del agua salada. Al comparar dos sistemas que mantienen constantes los demás equipos como el calentador de doble propósito y el deshumidificador, pero difieren en el humidificador utilizado, se puede comparar el efecto que se produce al utilizar uno u otro. Por un lado, en un estudio se utiliza un humidificador con pulverización de agua y lecho empacado (7), en donde la función de este último es aumentar el área de transferencia entre el agua y el aire. Este sistema se aprecia en la ilustración 11.

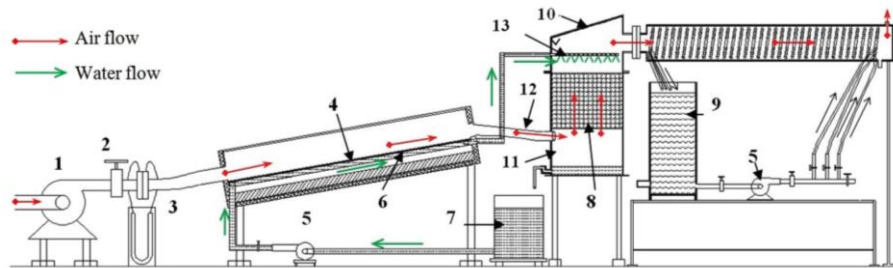


Ilustración 11: Esquema utilizado por Rajaseenivasan y Srithar (7), de un sistema HDH CWOA, donde se utiliza un humidificador con pulverización de agua.

Por otro lado se utiliza un humidificador de columnas de burbujas (6), donde se inyecta aire por la parte inferior de un estanque con agua creando burbujas que luego se liberan, transportando vapor en conjunto con el aire, tal y como se observa en la ilustración 12.

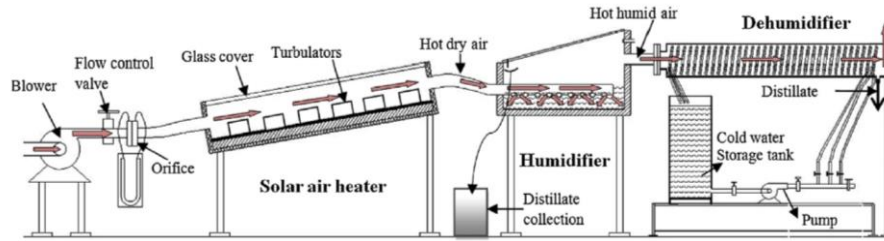


Ilustración 12: Esquema utilizado por Srithar y Rajaseenivasan (6), de un sistema HDH CWOA, donde se utiliza un humidificador por columnas de burbujas.

De este análisis es posible observar que existe un aumento en la producción de destilado al utilizar el método de humidificación por columna de burbujas por sobre el primer método. Otros sistemas humidificadores utilizados corresponde a torres de pared mojada o el módulo de membrana hueca de flujo cruzado (15) (16).

Deshumidificadores

Los deshumidificadores forman parte importante del sistema HDH. En estos equipos se produce la condensación del vapor que es transportado por el aire al ser enfriado. Una de las principales formas de disminuir la temperatura del aire es por medio de un intercambiador de calor de contacto indirecto, en el cual circula el aire húmedo por un lado y por el otro agua de mar permitiendo la recuperación de parte del calor sensible del aire. Uno de los estudios realiza la comparación entre la utilización de un deshumidificador de coraza y tubos normal, en el que se realiza la inserción de elementos que aumentan el área de transferencia de calor, permitiendo aumentar la eficiencia del sistema (8). Otra forma es el modelo estudiado por He et al. (17) que utiliza un tipo diferente de deshumidificador, en donde el aire y el agua se encuentran en contacto directo, el cual está representado en la ilustración 13. Además, en la revisión realizada por Srithar y Rajaseenivasan (18) se mencionan los deshumidificadores por columnas de burbujas y por medio de intercambiadores de calor de tubos y placas como tecnologías aplicadas en otros estudios.

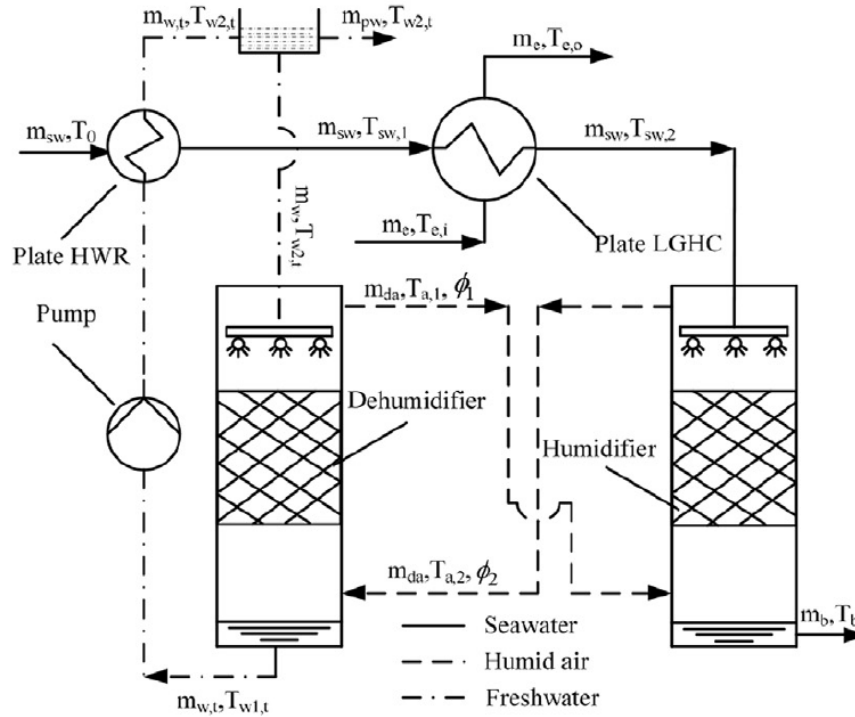


Ilustración 13: Esquema utilizado por He et al. (17), de un sistema HDH CAOW.

Sistema HDH multi-etapa

Una configuración diferente de los sistemas de desalinización HDH es estudiada en algunos textos. Esta corresponde al sistema de multi-etapa HDH, en donde se realizan los procesos de humidificación y deshumidificación más de una vez con el fin de aprovechar los calores residuales del sistema. En el estudio de El-Agouz (19) se revisa un modelo numérico de un sistema de dos etapas, al cual se le agregan otros elementos adicionales. En primer lugar, se utiliza una rueda desecante cual recupera el calor y aumenta la humedad del aire a la salida de la primera etapa entregándole esta energía al aire de entrada. Además de esto cuenta con un calentador de aire extra, el cual permite elevar aún más la temperatura del aire que va hacia la segunda etapa. En este trabajo se ve que la utilización la rueda desecante aumenta la eficiencia del sistema HDH multi-etapa en alrededor de un 34% a una temperatura ambiente de 40 [°C].

Por otro, lado el trabajo de Wu et al. (20) Estudia el comportamiento de un sistema de tres etapas, donde se busca recuperar el calor sensible del concentrado en las etapas superiores. Este experimento logra alcanzar una producción de 182.47 kg/h al utilizar un flujo másico de agua de 2 t/h y una temperatura dentro del estanque intercambiador de 90 ° C. En este

trabajo se obtiene un GOR de 2.65, con las condiciones anteriormente mencionadas. El esquema del estudio mencionado se aprecia en la ilustración 14.

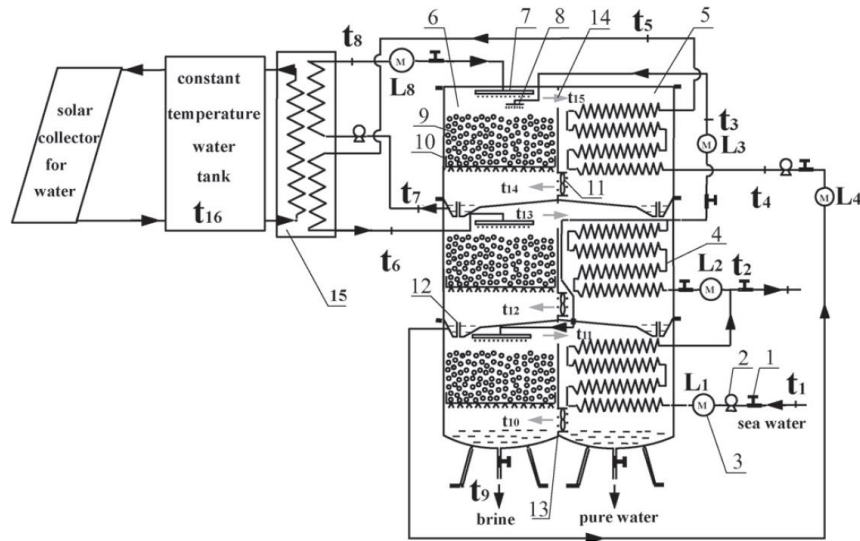


Ilustración 14: Esquema de un sistema HDH de tres etapas (20).

Sistema HDH con destilador solar

Además de estudiar el comportamiento de los sistemas HDH por si solos, se busca el incorporar este proceso a algún otro proceso térmico. En este caso, se estudia el comportamiento de la unión entre un sistema HDH con la destilación solar.

Uno de los trabajos estudiados utiliza el destilador solar como el calentador solar de aire, ya que al hacer circular el aire por su interior le permite absorber la energía térmica recibida por el sol (21). Junto a esto, el sistema HDH descarga el concentrado en el mismo destilador, aprovechando el calor sensible en la etapa de destilación. Esto aumenta considerablemente el rendimiento del sistema completo.

Otro caso de estudio se da en donde se utiliza un sistema HDH CAOW con calentamiento de agua por medio de un colector solar plano (11). La descarga de concentrado del sistema HDH se conecta a un estanque aislado, el cual va a parar en un destilador solar. Esto le permite al sistema completo aprovechar el calor sensible del concentrado, el cual normalmente es desechado, aumenta la eficiencia del destilador solar solo por este fenómeno.

Posterior a este trabajo se realizó un estudio similar, en donde en lugar de utilizar un destilador solar, se utilizaron cuatro unidades (22), el cual está representado en la ilustración

15. En este caso la reutilización del concentrado en los destiladores, permitió aumentar el rendimiento individual de estos y además aumentar la cantidad de destilado producido por el sistema.

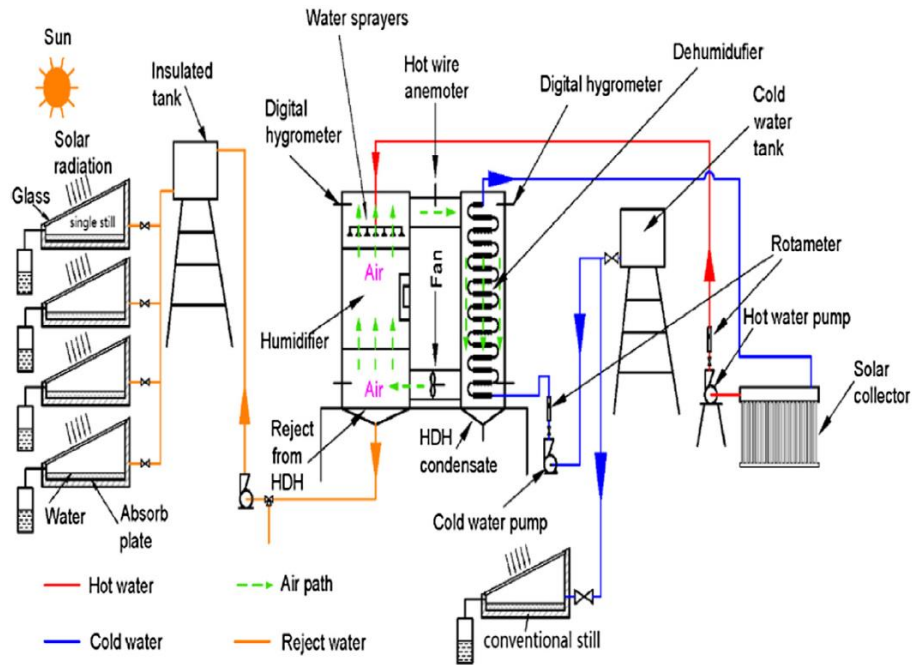


Ilustración 15: Esquema de sistema HDH CAOW acoplado a destiladores solares (22).

Sistema HDH conectado a aire acondicionado

Otra opción de aprovechamiento del sistema HDH se da en las zonas de altas temperaturas y humedades. La implementación de sistemas de aire acondicionado en conjunto con la desalinización por medio del método en HDH, como el del esquema de la ilustración 16, es estudiada por algunos autores (23) (24). Estos trabajos demuestran que al utilizar un aire acondicionado aprovechando el aire húmedo del sistema HDH CWOA se logra una mayor tasa de recuperación de agua, debido a que no solo se produce agua en el deshumidificador, sino que también el enfriador del aire acondicionado genera otra fracción de destilado. Además de esto, se logran aumentos en la capacidad de enfriamiento y mejoras en los índices de rendimiento del aire acondicionado. El trabajo de Kabeel et al. (25) muestra una leve diferencia con los otros trabajos propuestos, ya que en este caso se simula un sistema en donde el aire acondicionado es implementado antes del sistema desalinizador. Aun así, en los tres trabajos se determina que el conjunto es una buena opción para las regiones mencionadas anteriormente.

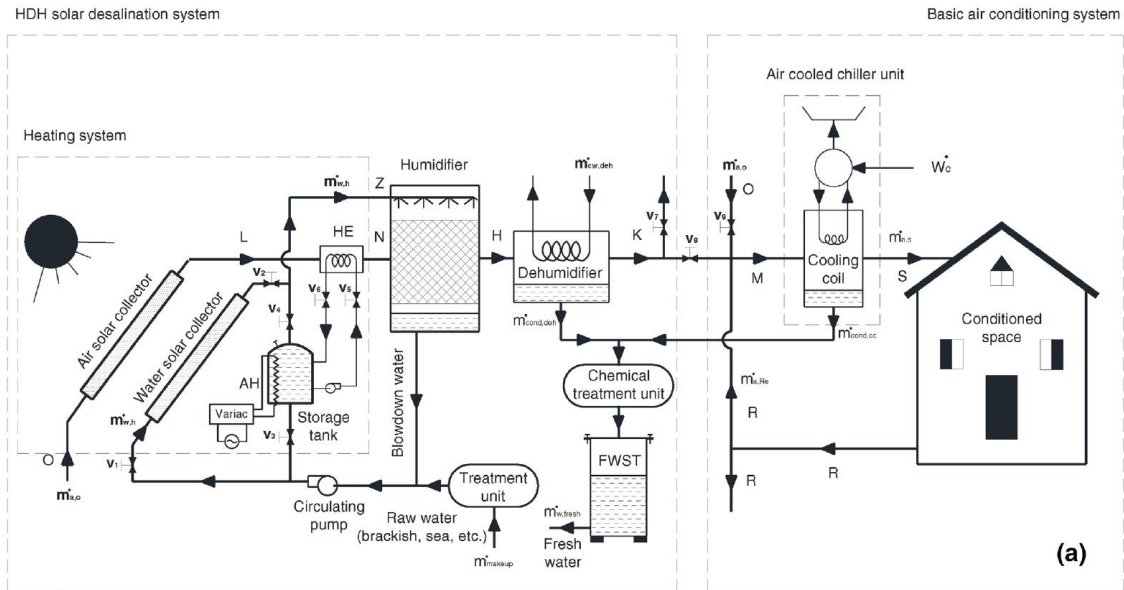


Ilustración 16: Esquema de un sistema HDH CWOA acoplado a un sistema de aire acondicionado (23).

Sistema HDH con recuperación de calor de paneles fotovoltaicos

Una aplicación diferente del sistema HDH es expuesta por Giwa, Fath & Hasan (26), en donde además de producir agua destilada se produce energía eléctrica. En este estudio se realiza un modelo numérico, en donde se simula el aprovechamiento del calor residual de un panel fotovoltaico, tal y como se aprecia en la ilustración 17. Cabe mencionar que el aumento de temperatura en los paneles fotovoltaicos produce un efecto negativo en la generación de electricidad, por lo que la implementación del ciclo PV-HDH aumenta la producción. El autor propone finalmente que este sistema debe ser estudiado experimentalmente, con el fin de comprobar su aplicabilidad y sus beneficios medioambientales.

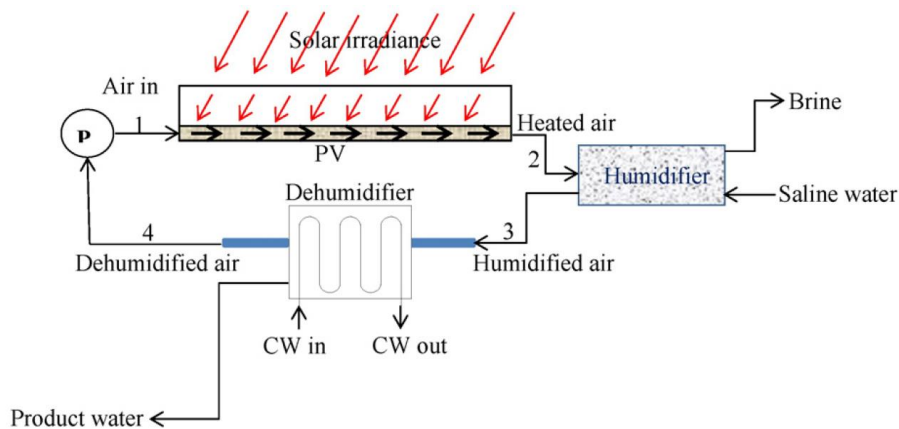


Ilustración 17: Esquema de un sistema que reutiliza el calor de un panel fotovoltaico para utilizarlo en un ciclo HDH CAOW (26).

Sistema HDH conectado a secador

El trabajo experimental realizado por Kabeel & Abdelgaied (27), muestra una nueva configuración que puede ser utilizada en conjunto con el sistema de desalinización HDH CWOA. En este caso, se propone la utilización de una unidad secadora de dos etapas, la cual posee un calentador por cada etapa. Esto permite aumentar la humedad absoluta y la temperatura del aire previo al ingreso en el humidificador. De acuerdo a los resultados expuestos por los autores, el sistema logra una mayor eficiencia que en el caso de un sistema HDH tradicional. El equipo utilizado y sus componentes se observa en la ilustración 18.



Ilustración 18: Fotografía de sistema implementado por Kabeel y Abdelgaied, donde se muestra el acoplamiento de un desalinizador HDH a un secador de dos etapas (27).

Sistemas HDH continuos

Los sistemas tradicionales HDH solares debido a su dependencia de la energía solar térmica están capacitados para funcionar solamente en los momentos donde exista radiación solar, imposibilitando su uso en la noche. Una forma de eliminar esta desventaja es la implementación de un estanque de almacenamiento de agua caliente, como el representado en la ilustración 19, utilizado en los trabajos de Li & Zhang (15) (16). Esto le permite eliminar la desventaja de no poder trabajar en horas donde existe baja radiación e incluso de noche, logrando así aumentar la eficiencia con respecto a un sistema convencional. Otro sistema propuesto está relacionado con el almacenamiento del agua residual del sistema

a medida que aumenta la temperatura del agua salobre, se logra un aumento en los valores del GOR obtenido.

Otros autores que realizaron un estudio similar son Yildirim & Solmus (14), los cuales determinaron que la temperatura con la que entra el agua al humidificador es uno de los principales factores que influyen en la producción de agua destilada. Además en este trabajo se demuestra que a una menor temperatura de enfriamiento del aire, se logra mejorar el aumento de agua condensada.

El trabajo de Wu, Kutlu, Zheng, Su, & Cui (31), por un lado muestra el comportamiento del GOR con respecto a la radiación incidente. En este caso se comprueba que tanto al aumentar la radiación incidente, se logra mejorar el rendimiento del sistema. Por el otro logra relacionar el parámetro de rendimiento respecto de la temperatura del ambiente, de manera que se logra una disminución lineal a medida que el valor de la temperatura crece.

3.3 Gained Output Ratio.

De los trabajos mencionados con anterioridad, se recopiló la información sobre dos de los parámetros para su análisis, el GOR y la producción específica. En la tabla 1 se puede ver los valores obtenidos en 15 trabajos distintos, donde se puede apreciar que en el caso del GOR los valores se encuentran dentro del rango 0,9 a 4,7.

Autor	Tipo de Ciclo	GOR [-]
Kabeel & Abdelgaied, En prensa (27)	CWOA	1,8
Deniz & Çınar, 2016 (32)	CWOA	0,97-1
Al-Sulaiman, y otros, 2015 (9)	OWOA	4,7
Wu, y otros, 2016 (20)	CAOW-Multietapa	2,65
Li & Zhang, 2016 (15)	CWOA	2,3
Elminshawy, Siddiqui, & Addas, 2016 (28)	CWOA	2,12
El-Agouz, Sathyamurthy, & Manokard, en prensa (19)	CWOA- Dos etapas	4,49
Sharshir S. , y otros, 2016 (22)	CAOW-Destilador Solar	3,18
Rajaseenivasan, Shanmugam, Hareesh, & Srithar, 2016 (5)	CWOA-Destilador Solar	3,3
He, Han, Yue, & Pu, 2015 (29)	CWOA	2,44
He, y otros, 2017 (17)	CAOW	2,01
He, Xu, Han, & Gao, 2016 (33)	CAOW	3,04
He, Xu, & Han, 2016 (30)	CAOW	3,89
He, y otros, 2016 (34)	CAOW	2,51

Tabla 1: Valores de GOR obtenidos en los distintos trabajos revisados en el estado del arte.

4. Modelo Existente

El alcance de este trabajo de título es optimizar un modelo numérico ya existente, el cual fue desarrollado en el trabajo de Hernandez (35). Este modelo utiliza un software comercial denominado Engineering Equation Solver, y su finalidad es determinar la capacidad de producción de una planta desalinizadora que funciona por medio de energía solar, utilizando el método de humidificación y deshumidificación en un ciclo CAOW. Para esto, se determinó realizar modelos por separado de cada uno de los componentes de la planta (colector solar, intercambiador de calor, humidificador y deshumidificador). En la ilustración 20 se aprecia la distribución de los elementos considerados para la simulación numérica. En los siguientes puntos se hará una breve reseña de la herramienta utilizada para este modelo y el método utilizado.

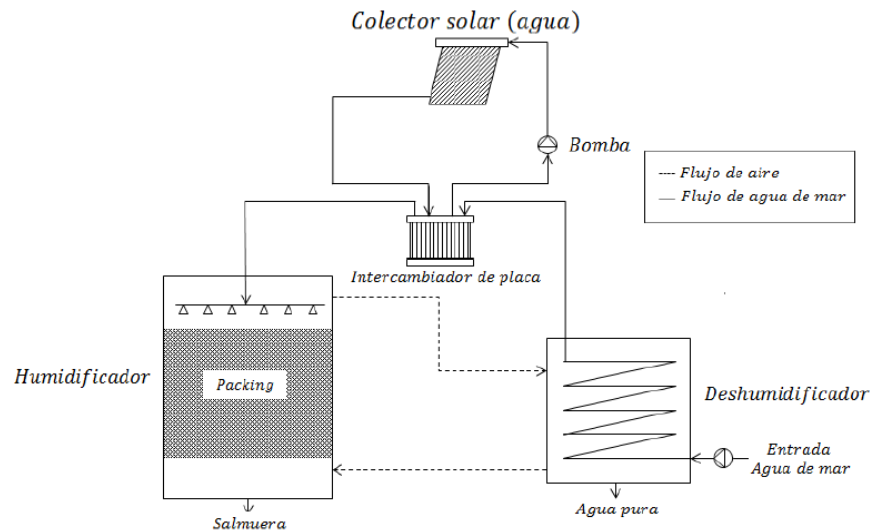


Ilustración 20: Esquema representativo del modelo utilizado para la simulación numérica (35)

4.1 Software EES

El software Engineering equation solver (EES) es un programa creado por la compañía F-Chart, que software permite resolver miles de ecuaciones algebraicas y ecuaciones diferenciales no lineales de manera simultánea. Una de las principales ventajas de este software es la inclusión de una librería de propiedades termodinámicas, en conjunto con funciones matemáticas, de transferencia de calor, mecánica de fluidos y termodinámica, lo que facilita la resolución de problemas aplicados a estas áreas, transformando este programa en una gran herramienta para su utilización en los diversos campos de la ingeniería mecánica.

Otra particularidad con la que cuenta EES, es la facilidad de incorporar funciones escritas en otros lenguajes de programación, permitiendo así implementar funciones propias de los usuarios con mayor facilidad.

Por medio de la utilización del software, se facilitó la forma en cómo se realizaron los cálculos para el modelo existente, ya que se utilizaron las funciones de transferencia de calor para poder simular los elementos de la planta y las funciones de termodinámica correspondientes a psicometría y propiedades de los fluidos agua y aire húmedo. Además para la unión de cada uno de los elementos, se utilizó un código macros, el cual se encarga de tomar las variables de salida de uno de los elementos del sistema e ingresarlas como variables de entrada para el próximo elemento del ciclo.

4.2 Componentes

En la ilustración 18 se puede apreciar el ciclo cerrado de aire – abierto agua, en el cual está basado el modelo numérico en estudio. En este se pueden apreciar cuatro elementos que lo componen, aun así, el modelo solo divide el ciclo en tres etapas.

4.2.1 Colector solar e intercambiador de calor

Los primeros elementos que se encuentran en la simulación son los colectores solares y el intercambiador de calor, los que se encargan de tomar la radiación incidente proveniente del sol y entregársela a algún fluido que circule por él, para luego intercambiar esta energía térmica con el agua salobre que ingresa al intercambiador. El fluido utilizado para la modelación del circuito entre colectores e intercambiador de calor es agua, debido a que la idea principal del modelo es representar la planta existente en la universidad.

El modelo del colector solar utiliza las ecuaciones de calor útil y balance de energía, descritas en la referencia (35). En el caso del intercambiador de calor, este corresponde a un intercambiador de placas, en donde se utiliza el método de $\varepsilon - NTU$ para determinar las temperaturas de los fluidos a la salida de éste. Los coeficientes de convección para cada uno de los fluidos que circulan por el intercambiador, son calculados por medio de una de las funciones propias del software EES, la cual considera las dimensiones interiores del intercambiador para su cálculo. El coeficiente global de transferencia de calor es obtenido utilizando estos coeficientes de convección, además de considerar la resistencia formada por

incrustaciones en el intercambiador. Las ecuaciones que modelan el fenómeno están descritas en detalle en la referencia (35).

A continuación se presentan las tablas 2 y 3 con la lista de los parámetros de los colectores e intercambiador de calor considerados para sus cálculos.

Radiación	G_t	600	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
Cantidad de Colectores	N_{colec}	4	$[-]$
Área Efectiva de Cada Colector	A_{colec}	1,91	$[m^2]$
Presión Agua Colector	P	500	$[kPa]$
Temperatura Ambiente	T_{amb}	20	$[^{\circ}C]$
Producto de Factor de remoción y coeficientes de pérdidas	$FrUI$	4,31	$\left[\frac{W}{m^2K}\right]$
Producto de Factor de remoción y transmitancia-absorbancia efectiva	$FrTa$	0,788	$[-]$
Flujo másico de agua	\dot{m}_{agua}	0,2677	$[kg/s]$

Tabla 2: Parámetros utilizados en la simulación correspondientes al colector solar (35).

Ancho	W	140	$[mm]$
Alto	H	380	$[mm]$
Espesor	th	2,4	$[mm]$
N° Placas	N_p	12	$[-]$
Área Efectiva de transferencia	A_e	0,2524	$[m^2]$

Tabla 3: Parámetros utilizados en la simulación correspondientes al intercambiador del ciclo cerrado (35).

4.2.2 Humidificador

El modelo considera que la entrada del agua es por la parte superior del equipo humidificador, el cual es pulverizado y esparcido por medio de rociadores, moviéndose a la parte inferior por medio de la fuerza de gravedad. En el caso del aire se considera que entra desde la parte inferior del equipo, por lo que los fluidos van en contra corriente, con el fin de aumentar la humedad y la temperatura de salida del aire. En el modelo se considera transferencia de calor y transferencia de masa en el proceso.

En este caso se tuvieron algunas consideraciones con el fin de simplificar la modelación del fenómeno. Por un lado, se consideró que no existe transferencia de calor hacia el exterior. Por otro lado, se toma como simplificación que la temperatura del aire y el agua en la sección transversal del equipo es siempre la misma, dejando el modelo como un problema unidimensional.

También, se utilizó un área transversal uniforme en toda la altura, con el fin de eliminar efectos provocados por cambios de sección y forma en este. Además, para realizar los cálculos se realizó una discretización de la torre, en la cual se divide en 8 partes iguales de acuerdo a la altura, con el fin de ver los cambios que se producen por los efectos de transferencia de calor y masa. Las ecuaciones encargadas de modelar el comportamiento del fenómeno, tanto de transferencia de masa como de energía, están descritas en la referencia (35). Los parámetros utilizados en este modelo se muestran en la tabla 4:

Diámetro	D	1640	$[mm]$
Altura	H	0,6	$[m]$
Coefficiente de transferencia de calor	HDA	1,5	$\left[\frac{kg}{m^3 S}\right]$
Área específica de transferencia	a	266	$\left[\frac{m^2}{m^3}\right]$
Velocidad del Aire	Vel	2,15	$\left[\frac{m}{s}\right]$

Tabla 4: Parámetros utilizados en la simulación correspondientes al humidificador (35).

4.2.3 Deshumidificador

En el deshumidificador o condensador considera el intercambio de calor del aire húmedo con el agua salobre entrante al ciclo CAOW, con el fin de condensar el vapor de agua contenido en el aire y recuperar el calor transfiriéndolo al agua. Para esto se considera un intercambiador de flujo cruzado, en donde por un lado ingresa el agua salobre a unos tubos con placas transversales y por el exterior circula el aire con alto contenido de agua. En el modelo se toma en cuenta la transferencia de calor producida por las aletas.

Para realizar los cálculos se realizó una discretización del elemento considerando como volúmenes de control secciones determinadas por las columnas de tubos. Además, se dejaron fuera los fenómenos de pérdidas al exterior, los efectos de pérdida de presión y variaciones de energía cinética.

Por último, se consideró como gases ideales tanto el vapor de agua como el aire seco, y que las temperaturas de salida del condensado y del aire húmedo sean iguales. Para el cálculo de la transferencia de calor se utiliza el método $\varepsilon - NTU$. Las ecuaciones correspondientes al modelo se pueden encontrar en detalle en la referencia (35). En este caso, se consideraron los parámetros constructivos del intercambiador como parámetros del modelo, los cuales están expuestos en la tabla 5.

Cantidad de Filas de Tubos	N_f	12	[—]
Cantidad de Columnas de Tubos	N_c	4	[—]
Largo del banco	L	0,33	[m]
Ancho del banco	W	1,1	[m]
Alto del Banco	H	0,47	[m]
Espesor tubo	th	1,2446	[mm]
Espesor Aleta	th_{fin}	0,33	[mm]
Paso de las Aletas	p_{fin}	3	[mm]
Diámetro Exterior Tubos	D_{ext}	12	[mm]
Rugosidad de los tubos	E	0,0015	[mm]

Tabla 5: Parámetros utilizados en la simulación correspondientes al condensador (35).

4.3 Funcionamiento

Para modelar el ciclo completo se utilizó un código macros que permitió la unión de todos los modelos de los componentes. Al iniciar el programa del sistema, el software solicita el ingreso de los parámetros de entrada para el condensador, (el cual es el punto de partida del proceso. Los parámetros de entrada para el agua son: el flujo volumétrico, la presión y la temperatura. En el caso del aire se necesita ingresar el flujo másico, la presión, la temperatura y la humedad al ingreso del deshumidificador.

El sistema comienza a calcular las variables de salida del primer elemento, las cuales se utilizan como variables de entrada del siguiente paso. Luego el programa continúa con los cálculos del intercambiador de calor en conjunto con los colectores solares, encargados de ingresar energía térmica al sistema y por último el humidificador, en donde se aumenta la humedad del aire del ciclo. Al llegar al último elemento, el código utiliza los valores de salida del aire para iniciar un nuevo ciclo, con el fin de llegar a un estado estacionario, en donde las variables en el ciclo se mantienen constantes. Debido a que no se produce de manera inmediata se decidió repetir el ciclo 6 veces, donde la diferencia de temperatura del aire en la entrada del condensador entre el inicio y el fin del ciclo es inferior a 0,006 K. La ilustración 21 muestra el diagrama de flujo del proceso de cálculo mencionado anteriormente.

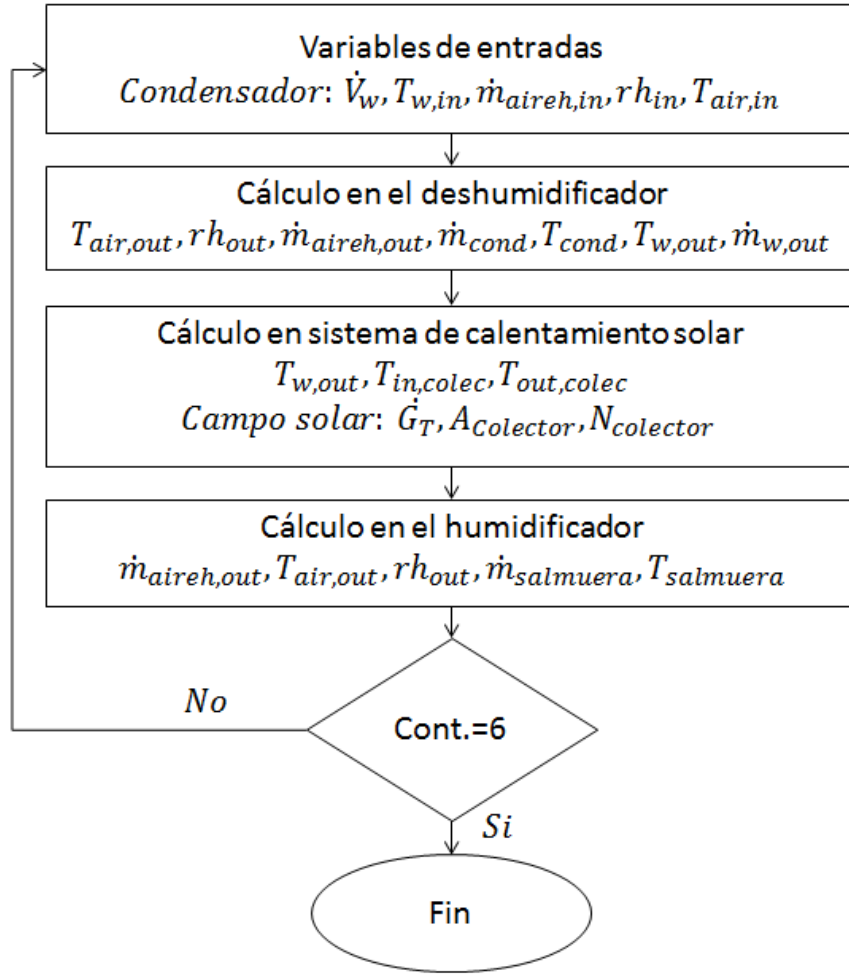


Ilustración 21: Ciclo del proceso iterativo del modelo numérico (35).

5 Métodos de Optimización

Muchas de las aplicaciones en ingeniería requieren buscar los mejores resultados para un problema manteniendo sus condiciones iniciales dentro de rangos establecidos. Para resolver este tipo de problemas es que se utilizan las técnicas de optimización. Estas técnicas se encargan de minimizar o maximizar funciones matemáticas que representan el comportamiento de algún fenómeno por medio de un modelo descriptivo. Uno de los principales problemas de la búsqueda de un óptimo, es el encontrar el óptimo global de la función, debido a que existen funciones que presentan más de un valle o cresta donde se encuentran puntos denominados máximos o mínimos locales. El problema se da, al momento de implementar la optimización, al considerar un máximo o mínimo local como si fuese el máximo o mínimo global. En la ilustración 22 se observa una función que posee tanto máximo y mínimos globales como máximos y mínimos locales.

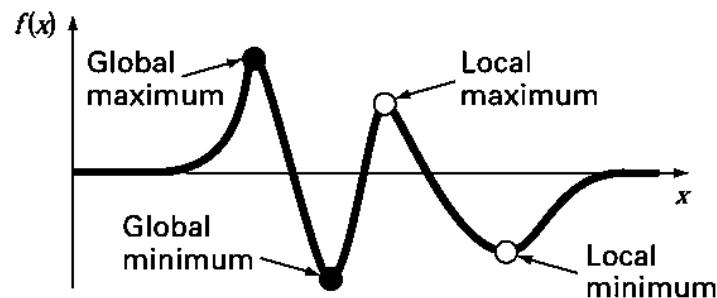


Ilustración 22: Función unidimensional, donde se aprecian mínimos locales, máximos locales, mínimos globales y máximos globales.

Dependiendo de la cantidad de variables de entrada que utilicen los modelos, la optimización puede clasificarse como unidimensional o multi-objetivo.

Por una parte, se tiene el caso unidimensional, como su nombre lo dice, busca la mejor solución de un problema con una sola variable de entrada. Para resolver este tipo de problemas existen varios métodos donde se destacan el método de sección aurea, el método de interpolación parabólica, el método de Newton y el método de Brent, entre otros.

Por otra parte, la optimización multi-objetivo busca encontrar la solución a un problema de máximo o mínimo, en donde el valor de la función objetivo depende de más de una variable de entrada. Para este caso, los métodos se dividen en dos grandes grupos: los métodos por gradiente y los métodos directos.

En un lado están los métodos por gradiente, los que usan los valores entregados por las derivadas de las funciones para poder generar algoritmos que buscan los óptimos de la función. De los métodos utilizados, se pueden destacar el método de ascenso inclinado, el método de gradiente conjugado (Fletcher-Reeves), el método de Newton, el método Marquardt, el método DFP (Davidon-Fletcher-Powell) y el método BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno). En caso de no conocer las derivadas de la función o que no sea posible obtenerlas de manera directa, es posible realizar una aproximación de estas por medio de diferencias finitas. La realización de estos cálculos para obtener una aproximación del gradiente obliga a realizar una mayor cantidad de cálculos, disminuyendo la efectividad de estos métodos.

Por otro lado, los métodos directos van desde la realización de una búsqueda bruta en donde se revisan muchos puntos del problema, los cuales se comparan entre sí, hasta algoritmos en donde se busca de manera más elegante la convergencia al valor óptimo. El método de búsqueda aleatoria es uno de los métodos de búsqueda bruta más utilizados. En este método se revisa una cantidad determinada de puntos al azar dentro de un rango conocido, guardando y comparando la mejor opción en cada paso.

Otro método directo es el método de búsqueda univariante, en donde la búsqueda del óptimo se realiza cambiando una variable a la vez para mejorar la aproximación, dejando constante las demás variables. Esto cambia el problema a una secuencia de búsqueda unidimensional, las cuales se pueden realizar por medio de los métodos unidimensionales mencionados anteriormente.

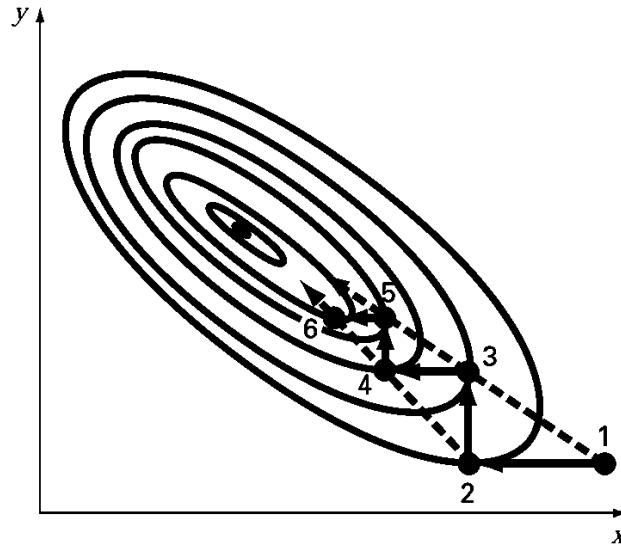


Ilustración 23: Descripción gráfica del método de optimización univariante.

En la ilustración 23 se aprecia el comportamiento de búsqueda del método univariante. En esta imagen se puede apreciar que a medida que se acerca al óptimo de la función objetivo, el método de optimización se vuelve más ineficiente. Además, se pueden ver que los puntos 1-3-5 de la ilustración 21 están ubicados de tal manera que crean un vector que apunta en dirección del óptimo, al igual que en el caso de los puntos 2-4-6. Estas direcciones se denominan direcciones de patrones. El método de Hookes and Jeeves es otro método directo, en el cual se aprovechan estas direcciones de patrones para avanzar más rápidamente en la búsqueda del óptimo, aumentando la efectividad de la optimización. Otro método directo que es muy utilizado es el método de Powell, el cual realiza una búsqueda de vectores que apunten en la dirección donde posiblemente se ubica el máximo, las que se llaman direcciones conjugadas. Estas direcciones se obtienen a partir de la optimización univariante de la misma variable en dos puntos distintos de la función. Lo anteriormente mencionado puede apreciarse en la ilustración 24.

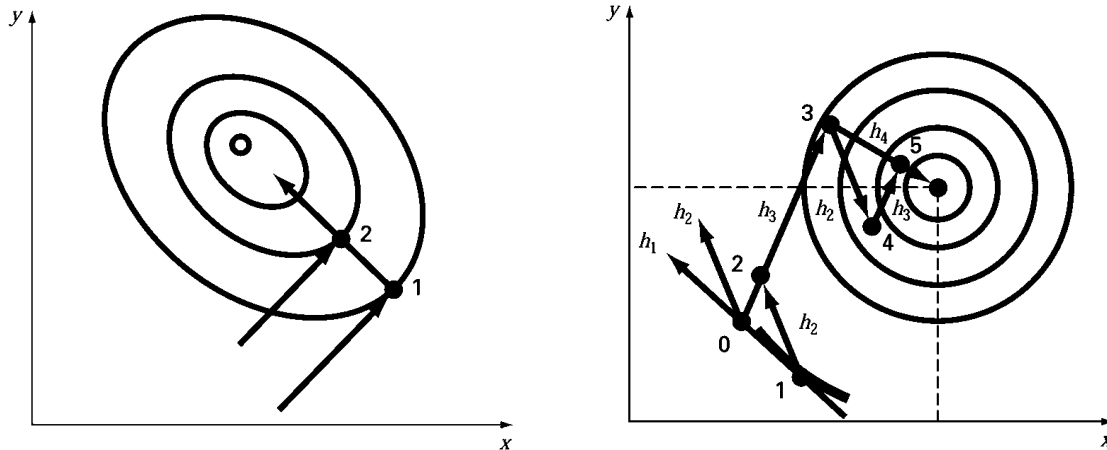


Ilustración 24: Diagrama de obtención de direcciones conjugadas (a) Diagrama del método de Powell (b)

Además de los métodos mencionados anteriormente, existen métodos de optimización más sofisticados que permiten obtener resultados para problemas en donde los métodos clásicos no son capaces de lograrlo. Dentro de estos métodos se encuentran la búsqueda tabú, el método de recocido simulado, las redes neuronales artificiales y los algoritmos genéticos, siendo estos últimos los más utilizados en la actualidad para resolver los problemas de optimización.

5.1 Método de Hookes and Jeeves

Como se mencionó con anterioridad, el método de Hooke and Jeeves es uno de los métodos de optimización multi-objetivo de búsqueda directa. El método comienza realizando un avance univariante por cada una de las variables de la función objetivo. Esto le permite generar una dirección de patrón, por la cual se realiza el siguiente movimiento. El proceso inicia en un punto cualquiera y termina cuando el valor obtenido se encuentra cercano al valor óptimo requerido. A continuación, se presenta la forma en cual se desarrolla el algoritmo de este método:

Inicialización del algoritmo:

Se definen un conjunto de direcciones coordenadas d_1, \dots, d_n . Se debe elegir un valor escalar $\varepsilon > 0$, el cual se utilizará para finalizar el algoritmo. Luego, se definen dos valores de los parámetros de la optimización: el tamaño de paso $\Delta > \varepsilon$ y el factor de aceleración $\alpha < 0$. Por último, se elige un punto de partida x_1 , se define $y_1 = x_1$ y se crean los contadores $k = j = 1$.

Paso Principal

1. Se evalúa si $f(y_j + \Delta d_j) < f(y_j)$, si cumple la condición se toma $y_{j+1} = y_j + \Delta d_j$, y se avanza al paso 2. En caso contrario, si $f(y_j + \Delta d_j) \geq f(y_j)$, se realiza una nueva evaluación en el sentido contrario, es decir, si $f(y_j - \Delta d_j) < f(y_j)$. De ser así se toma $y_{j+1} = y_j - \Delta d_j$ y se avanza al paso 2, Si se obtuviese el caso contrario, si $f(y_j - \Delta d_j) \geq f(y_j)$ se toma $y_{j+1} = y_j$, y se avanza al paso 2.
2. Si $j < n$, se reemplaza j por $j + 1$ y se repite el paso 1. En caso de que $j > n$, se evalúa si $f(y_{n+1}) < f(x_k)$, de ser así se avanza al paso 3 y en el caso contrario se avanza al paso 4.
3. Se toma $x_{k+1} = y_{n+1}$, luego se reinicia el valor de y_1 , el cual se calcula como $y_1 = x_{k+1} + \alpha(x_{k+1} - x_k)$. Se reemplaza k por $k + 1$ y se reinicia el valor de j a 1. Luego se vuelve al paso 1.
4. Se evalúa si $\Delta < \varepsilon$, de ser así se toma como valor mínimo x_k . En el caso contrario, se reemplaza $\Delta = \Delta/2$, $y_1 = x_k$, $k = k + 1$ y $j = 1$ y se vuelve a comenzar desde el paso 1.

En pocas palabras se puede decir que el paso 1 y el paso 2 se encargan de realizar los avances unidimensionales con el fin de encontrar la dirección de patrón, el paso tres realiza el avance a través de esta dirección y por último el paso cuatro se encarga de reducir el valor de Δ con el fin de aumentar la precisión del resultado. La ilustración 25, muestra gráficamente el proceso de optimización anteriormente descrito.

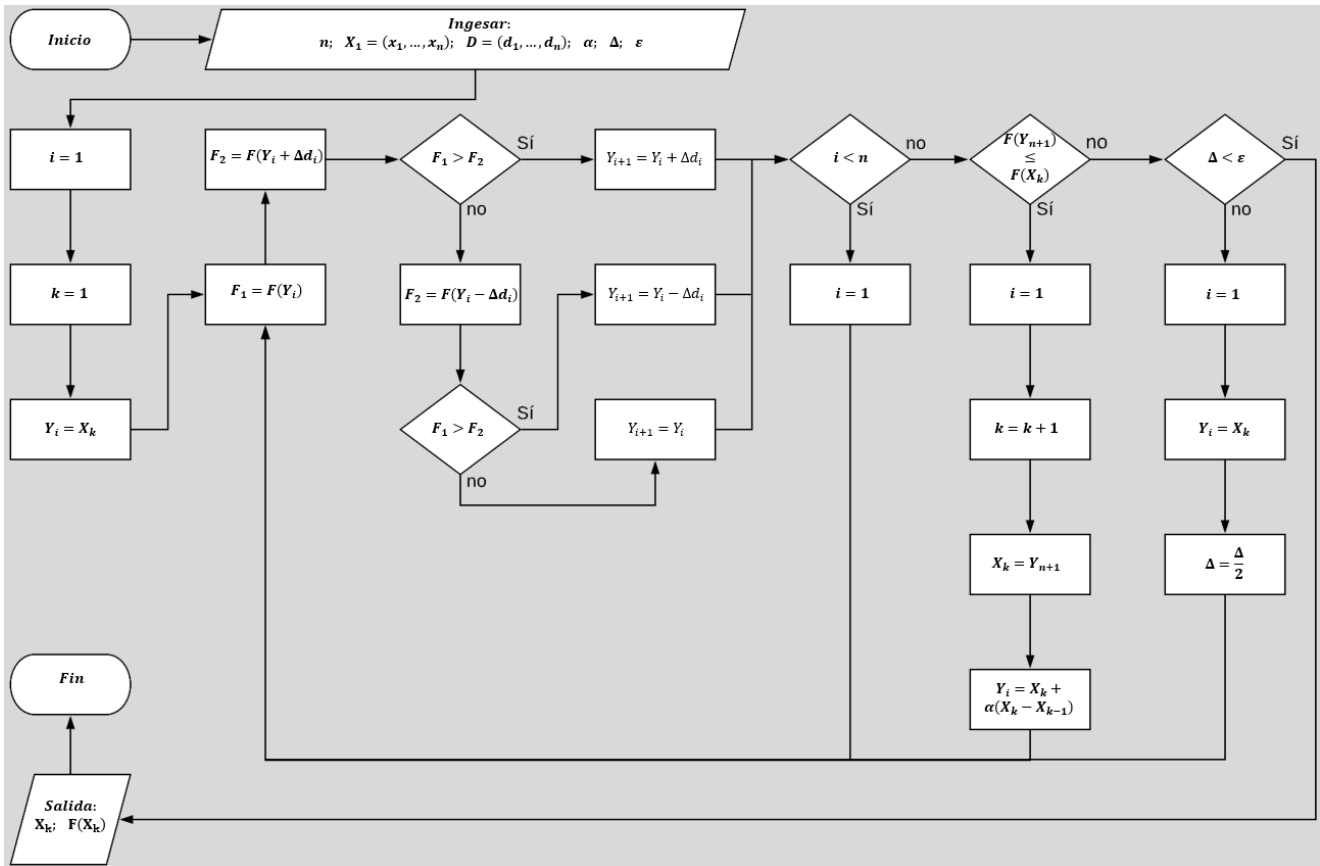


Ilustración 25: Diagrama de flujo del proceso de optimización utilizado, elaboración propia.

Se decide utilizar este método en la optimización multivariable, debido a que no requiere de calcular las derivadas parciales de la función, además de ser más fácil de aplicar para este tipo de problemas, donde no se conocen los gradientes de la función objetivo.

6. Implementación de la optimización

6.1 Pasos Previos

Antes de comenzar a realizar la optimización del modelo existente, se revisó el comportamiento de cada uno de los elementos modelados y el funcionamiento de estos como un ciclo cerrado. Al analizarlos se encontró que algunas condiciones que simplificaban el problema afectaban el cálculo final del modelo, por lo que fue necesario modificarlas antes de optimizarlo.

6.1.1 Modificaciones al modelo existente

Lo primero que se realizó fue revisar el comportamiento de las unidades por separado. Se tomó el mismo punto de partida del trabajo presentado por Catalina Hernández, partiendo por el deshumidificador, luego el sistema de calentamiento de agua y por último el humidificador, tomando como variables de entrada las variables de salida de su antecesor. Los valores entregados en cada elemento coincidían con los presentados en el trabajo anterior.

Luego se revisó el ciclo cerrado considerando a los tres elementos como un todo. En este caso, se encontraron algunos problemas respecto a los valores que entregaba finalmente el proceso. La simulación se detenía a la sexta simulación debido a que después de esa cantidad de iteraciones la temperatura del aire dejaba de cambiar. Aun así, no se alcanzaba un estado estacionario en el ciclo cerrado del aire. Por otro lado, al ver el comportamiento de los flujos másicos de aire húmedo, se observó que a medida que la simulación se repetía, el valor de esta magnitud física disminuía. Debido a esto, se revisó el comportamiento del modelo al realizar 1000 iteraciones, encontrándose que en cada una de ellas el valor del flujo másico de aire seco disminuía, pero no en la misma cantidad que el flujo másico de agua condensada. Se analizó la relación entre el aire seco y el vapor que transportaba el aire y se observó que el flujo másico de aire seco, el cual debía ser constante, debido a que está en un ciclo cerrado, disminuía en cada iteración, lo que se aprecia en la tabla 6.

Iteración	Temperatura Aire salida [K]	Flujo Másico aire salida [kg/s]	Humedad Relativa [-]	Temperatura agua salida [K]	Flujo másico condensado [kg/s]	Flujo Másico agua salida [kg/s]
1	301,99	0,10665	0,99	314,28	0,0033521	0,049772
10	300,08	0,09215	0,99	312,33	0,0027855	0,049782
50	295,80	0,05434	0,99	308,43	0,0020273	0,049778
100	294,57	0,04043	0,99	305,10	0,0014893	0,049782
200	294,24	0,03359	0,99	303,12	0,0011926	0,049787
300	294,18	0,03188	0,99	302,63	0,0011221	0,049788
400	294,16	0,03128	0,99	302,46	0,0010992	0,049788
500	294,16	0,03105	0,99	302,40	0,0010903	0,049788
600	294,15	0,03095	0,99	302,37	0,0010866	0,049788
700	294,15	0,03090	0,99	302,36	0,0010851	0,049788
800	294,15	0,03089	0,99	302,35	0,0010844	0,049788
1.000	294,15	0,03087	0,99	302,35	0,0010840	0,049788

Tabla 6: Resultados entregados por simulación numérica respecto al humidificador en distintas iteraciones.

De los datos obtenidos, es posible observar que entre la última iteración y la primera, existen diferencias para las temperaturas y los flujos másicos. Presentando las mayores alteraciones porcentuales en los flujos másicos de aire húmedo y condensado, con un 71.05% y 67.66% de disminución en el valor inicial.

Para eliminar esta distorsión en la simulación, se decidió modificar las variables de entrada. En el caso del aire se cambió el flujo de aire húmedo por flujo de aire seco, eliminando así la posibilidad de que este varié al realizar iteraciones en el ciclo. Además se modificó el flujo volumétrico de agua, el cual paso a ser flujo másico de agua. Por último, se agregaron como variables de entrada la cantidad de colectores solares, el área efectiva de los colectores y la radiación solar incidente, lo que fue agregado a la interface del modelo como es presentado en la ilustración 26.

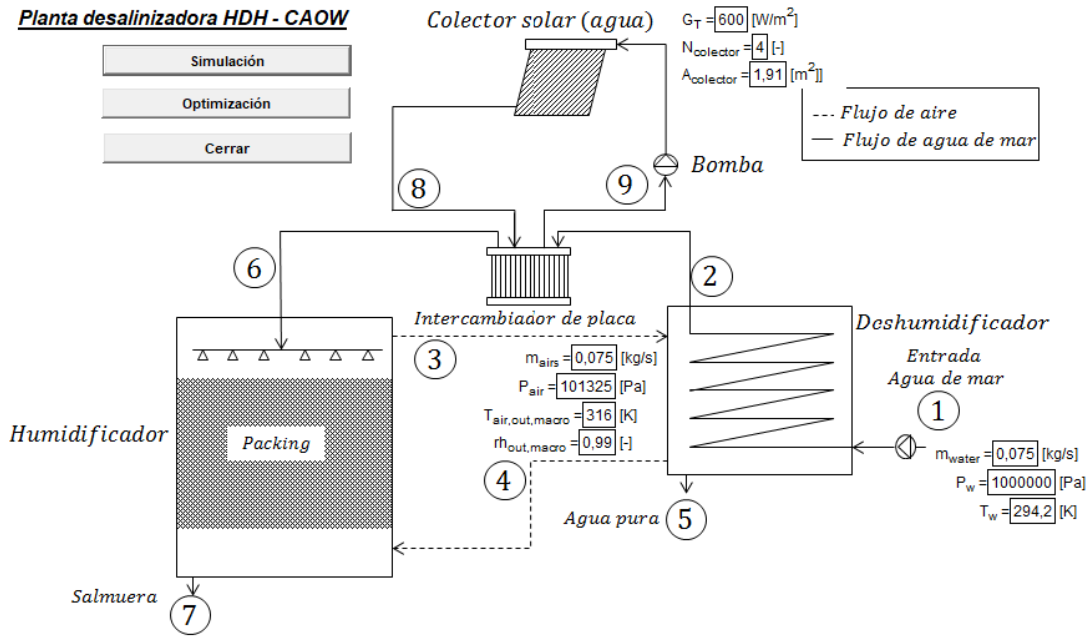


Ilustración 26: Interfaz del sistema de simulación y optimización creado a través del software EES.

Además de estas modificaciones, se realizaron algunos cambios en el código del humidificador, debido a que se encontraron algunas incongruencias. Primero, se cambió la forma en cual se considera velocidad del aire en el humidificador, debido a que esta se encontraba fija en el código, se ajustó de acuerdo a la ecuación de continuidad de la manera

$$v_{aire} = \frac{m_{aireentrada}}{\rho A} \quad (23)$$

Segundo, para poder obtener el valor del coeficiente de transferencia de calor, se utilizó el número de Lewis, el cual relaciona los coeficientes de calor y masa de acuerdo a la ecuación:

$$Le = \frac{h a}{k c_p} \quad (24)$$

Tercero, se agregó un valor para el número de Lewis, dejándolo en función de las humedades relativas del aire de entrada y del aire saturado a la temperatura del agua de acuerdo a lo mencionado en el trabajo de Kloppers & Kröger (36), por lo que se consideró la ecuación:

$$Le = \frac{0,865^{\frac{2}{3}} \left(\frac{\omega_s + 0,622}{\omega_a + 0,622} - 1 \right)}{\ln \left(\frac{\omega_s + 0,622}{\omega_a + 0,622} \right)} \quad (25)$$

Cuarto, se modificó la ecuación de balance energético de aire, que consideraba los flujos másicos de aire húmedo en vez de utilizar los flujos másicos de aire seco. Por último, se modificó la condición de que a la salida del humidificador la humedad relativa fuese siempre de 99%, permitiendo que el programa la calculase de manera autónoma.

Otras modificaciones se hicieron en la macros con el fin de simplificar la obtención de datos de la simulación. Lo primero fue modificar la cantidad de iteraciones que se repetiría el ciclo, aumentando desde 6 iteraciones a 10 iteraciones, ya que fue en ese número en cual se logró alcanzar un estado estacionario para el ciclo. Segundo, se decidió guardar los 10 valores de las variables de entrada en cada uno de los componentes del ciclo, por lo que se creó un archivo para cada uno de los componentes donde permanecerían los valores de cada una de las iteraciones. Tercero, se creó un archivo para almacenar los valores que se calculaban del flujo de condensado, para poder analizar su comportamiento en caso de ser necesario. Por último, se creó un archivo adicional para cada punto del sistema, en donde se guardan los resultados obtenidos en la última iteración, para poder revisar cada punto con mayor facilidad,

6.1.2 Evaluación del comportamiento de las modificaciones en el humidificador.

Debido a que se realizaron modificaciones en el código del humidificador, es que fue necesario validar el comportamiento de este respecto del modelo que se utilizó anteriormente para validarlo. El trabajo realizado por Alean, Gutierrez, Chejne & Bastidas (37), muestra la simulación de una torre de enfriamiento y su comparación con curvas experimentales. Este trabajo fue el utilizado para la validación del modelo numérico del humidificador en el trabajo anterior. Los datos de entrada que se utilizaron para el cálculo tanto de temperatura como de humedad relativa a lo largo de la torre se presentan en la tabla 7:

Variable de entrada	Magnitud
Flujo de aire húmedo	0,0742 $\left[\frac{kg}{s}\right]$
Temperatura de aire entrante	32 [°C]
Humedad relativa entrante	0,65 [-]
Flujo másico de agua entrante	0,1262 $\left[\frac{kg}{s}\right]$
Temperatura de agua entrante	40,8 [°C]
Área Transversal	0,0625 [m ²]
Área efectiva de transferencia por unidad de Volumen	121,78 $\left[\frac{m^3}{m^2}\right]$
Altura de la torre	1,42 [m]
Coefficiente de transferencia de masa	1,4 $\left[\frac{kg}{m^3s}\right]$

Tabla 7: Variables de entrada en simulación de torre de enfriamiento.

Con estos valores de entrada se realizaron las simulaciones en el modelo planteado por Hernández (35) los que se utilizaron en la comparación respecto de los datos tomados experimentalmente por el autor del texto. Debido a esto, es que se utilizó la misma comparación para evaluar el comportamiento de las modificaciones realizadas al modelo del humidificador. Para el caso de comparación se utilizan las temperaturas del aire, del agua y la humedad relativa del aire, tal y como se realizó en el trabajo anterior, las cuales fueron calculadas mediante el modelo modificado considerando los datos de entrada de la tabla 7. Los resultados se pueden apreciar en los gráficos de las ilustraciones 27 y 28:

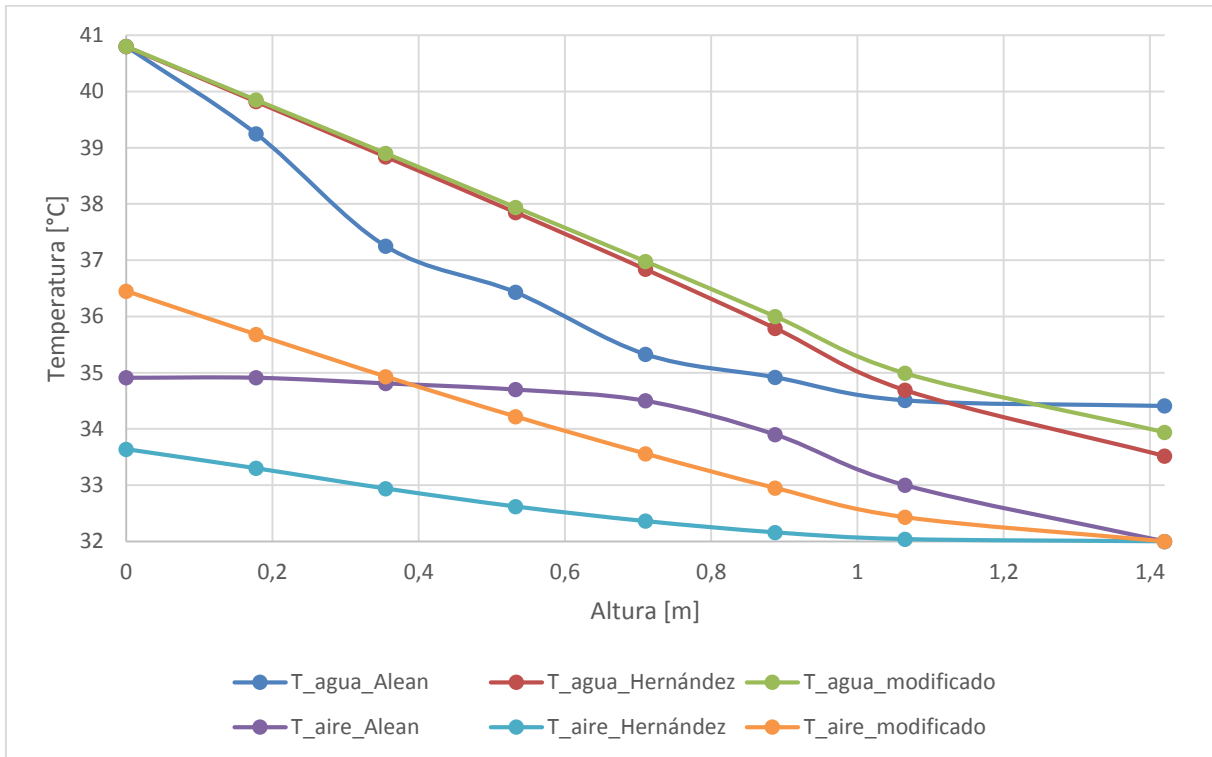


Ilustración 27: Grafico con temperaturas de aire y agua de torre de enfriamiento, de acuerdo a los datos tomados por Alean (37), las simulaciones realizadas por Hernández (35) y la simulación del nuevo modelo modificado.

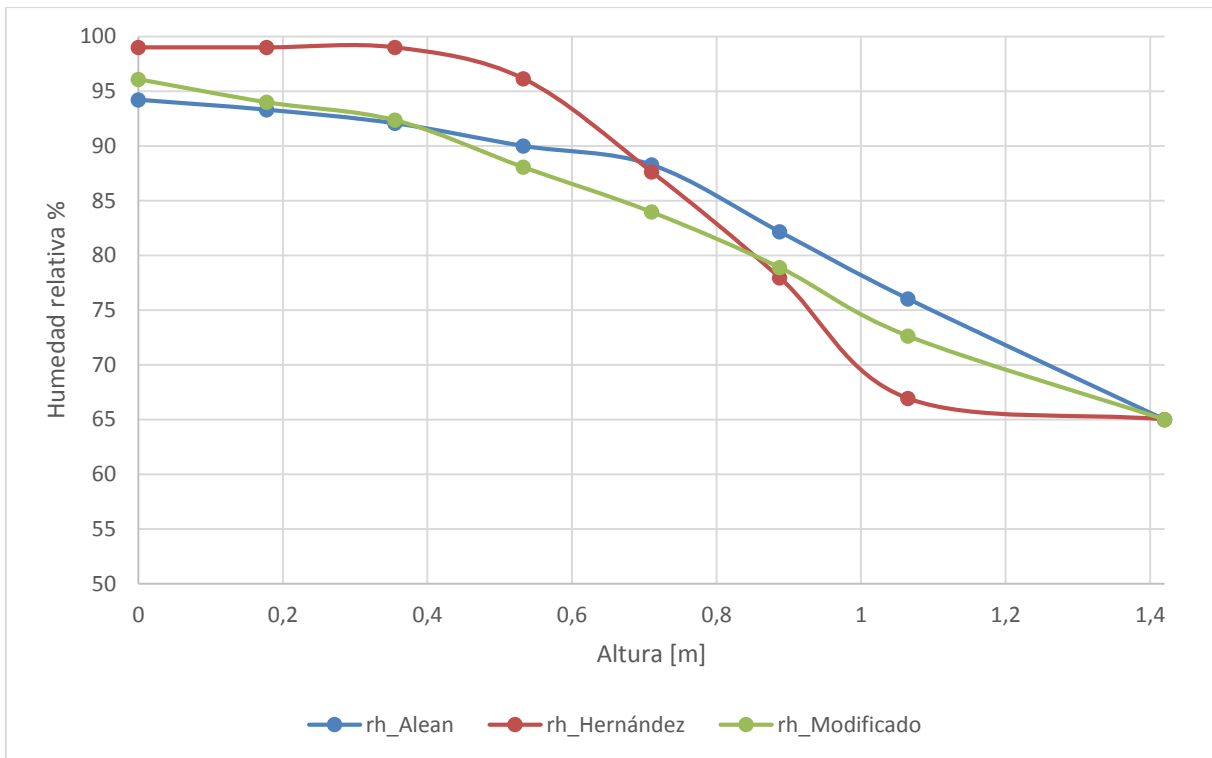


Ilustración 28: Grafico con humedades relativas de torre de enfriamiento, de acuerdo a los datos tomados por Alean (37), las simulaciones realizadas por Hernández (35) y la simulación del nuevo modelo modificado.

Por un lado, al igual que en el trabajo anterior la curva obtenida con las temperaturas de ambos fluidos corresponde a un intercambiador de flujo cruzado, sin embargo, la curva de los datos experimentales muestra un comportamiento peculiar disminuyendo su diferencia en el centro de la torre de enfriamiento. Aun así, las temperaturas de salida de agua y salida de aire se mantienen en valores cercanos al experimental, con una diferencia del 4,4% en el caso del aire y un 1,4% en el caso del agua. Por otro lado la curva correspondiente a la humedad relativa, mantiene una forma más parecida a la experimental, logrando un valor cercano al valor calculado con el valor obtenido experimentalmente al final del proceso, generando un error entre los valores de un 2%. Lo errores mencionados con anterioridad se calcularon de acuerdo a la ecuación B.1 del trabajo realizado por Hernández (35). Debido a estos resultados se puede determinar que el modelo es una aproximación válida respecto del fenómeno que se busca simular.

6.1.3 Evaluación del comportamiento de las modificaciones en el modelo del sistema HDH.

Al igual que para el caso del humidificador, se utilizó el mismo sistema para verificar si las modificaciones afectaron significativamente los resultados entregados por el modelo numérico completo del sistema HDH. En este caso se utilizó la comparación con datos obtenidos el 27 de abril de la planta ubicada en la sede de Valparaíso de la Universidad Técnica Federico Santa María, los cuales fueron registrados en el trabajo de Hernandez (35). Las mediciones arrojaron los siguientes datos de entrada para ser utilizados en el modelo son presentadas en la tabla 8:

Variable de entrada	Magnitud
Flujo Másico de aire entrada	$0,11 \left[\frac{kg}{s} \right]$
Temperatura aire de entrada	316.2 [K]
Humedad relativa entrante	0,99 [-]
Flujo Volumétrico de agua	$3 \left[\frac{l}{min} \right]$
Temperatura de agua de entrada	294 [K]

Tabla 8: Datos de entrada registrados mediante las mediciones del 27 de abril del 2017, correspondientes a la planta HDH de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Al utilizar el modelo para calcular las temperaturas en cada uno de los puntos del proceso se obtuvieron los valores ubicados en la cuarta columna de la tabla 9:

Punto de Medición	Valor Experimental	Simulación Hernández	Simulación Modificada	Error Hernández	Error S. Modificada
T1	294	294	294,2	0,00%	0,07%
T2	304,3	312,6	305,2	2,73%	0,30%
T3	316,2	314,9	306,3	0,41%	3,13%
T4	312,8	300,7	298,6	3,87%	4,54%
T6	329,3	323,3	316,8	1,82%	3,80%
T8	335,4	337,4	332,2	0,60%	0,95%
T9	332,8	335,4	330,1	0,78%	0,81%

Tabla 9: Valores de temperatura en cada uno de los puntos del proceso de la planta HDH simulada, se aprecian los datos medidos en la planta de la Universidad Técnica Federico Santa María, los valores calculados por Hernandez y los valores calculados con el modificado.

En la tabla anterior es posible observar que los errores obtenidos en cada uno de los puntos medidos son mayores que en el caso del trabajo realizado por Hernandez, no obstante, estos valores no sobrepasan el 5% de error, por lo que aun así el modelo es aceptable como aproximación del fenómeno. Por otro lado, la cantidad de agua producida por medio de la optimización modificada es de 4,18 litros por hora, lo que en comparación con los 10 litros por hora presentados en el trabajo de Hernández. Aun así, estos valores calculados no han podido ser comparados con un dato experimental de la producción de la planta, debido a que no se ha logrado realizar alguna medición fidedigna del condensado que se produce en el proceso.

6.2 Elaboración del algoritmo para la optimizar el modelo

La elaboración de un algoritmo para optimizar el modelo existente requiere de definir las variables de entrada y las funciones objetivo. Las variables de entrada con las que cuenta el modelo son diez en total, pero para realizar la optimización se tomaran solo los flujos de masa de aire seco y de agua salada en la entrada del condensador, debido a que son los que se pueden manipular de manera más simple en el equipo.

En el caso de la función objetivo, se buscará el máximo valor posible de obtener del flujo de agua condensada en el ciclo, valor que es entregado al terminar el ciclo completo de la simulación numérica (10 iteraciones).

Ya definidas las variables a optimizar y la función objetivo, se decidió definir algunos parámetros que son necesarios para el funcionamiento del método escogido. En primer lugar,

se genera un vector de direcciones conjugadas y el valor del tamaño de paso inicial Δ , correspondientes a los cambios que se aplicaran en la búsqueda direccional. Además, se definen el factor de aceleración α , que se encarga de dar los avances en la dirección del patrón de búsqueda. Por último, se define el valor ε el cual dará el término del ciclo de optimización. Los valores utilizados para la optimización se aprecian en la tabla 10.

Parámetros	Valor	Dimensiones
δ_1	0,1	[kg/s]
δ_2	0,1	[kg/s]
Δ	1	[–]
ε	$9,7656 \times 10^{-4}$	[–]
α	0,8	[–]

Tabla 10: Parámetros utilizados en la optimización numérica.

Los valores de los vectores para la búsqueda unidimensional del óptimo se decidieron debido a la magnitud de las variables que se utilizan en el modelo numérico existente.

Para poder utilizar la optimización, primero se deben ingresar las diez variables de entrada por parte del usuario en la interfaz creada de acuerdo a la ilustración 23. Luego de eso se presiona el botón optimización y comienza el ciclo de cálculo.

En primer lugar, el software calcula el valor del flujo másico de agua condensada utilizando las variables ingresadas. Este valor es guardado, para ser comparado con los resultados obtenidos posteriormente. Luego el código crea un aumento en la primera variable a optimizar, el flujo másico de aire, equivalente a $\Delta\delta_1$. Este valor incrementado es utilizado para calcular un nuevo valor del flujo másico de agua condensada, el cual es comparado con el resultado obtenido al inicio del ciclo, de no existir una mejora, se realiza el mismo proceso anterior, pero con una disminución en $\Delta\delta_1$, buscando realizar una mejora en el valor del flujo másico de agua condensada. Con este proceso se busca encontrar un valor mejor o igual de la función objetivo. Al encontrarlo, se repite el proceso con la segunda variable, utilizando un incremento y posterior disminución de $\Delta\delta_2$ unidades. El valor obtenido de este proceso se compara con el valor inicial, guardando el mayor de estos para las siguientes comparaciones.

Luego se utiliza un avance distinto, en la dirección de acuerdo al patrón al encontrado, el cual debe apuntar hacia el óptimo. Para esto se obtienen nuevos valores de las variables a optimizar, los cuáles se calculan como:

$$x_{1nueva} = x_{1mejorada} + \alpha (x_{1mejorada} - x_{1inicial})$$
$$x_{2nueva} = x_{2mejorada} + \alpha (x_{2mejorada} - x_{2inicial})$$

Al obtener este nuevo valor de las variables a optimizar, se realiza un cambio en donde las variables mejoradas pasan a ser las variables iniciales. Luego se parte desde el punto de las variables nuevas y se repite el proceso anterior donde se calculan los flujos máxicos de agua condensada antes del aumento o disminución de los valores.

Al encontrar una nueva mejora, se sigue repitiendo el ciclo, en caso contrario se regresa al último punto guardado como inicial, se disminuye el valor de Δ a la mitad, disminuyendo así los avances unidimensionales. El ciclo completo se repite hasta que se alcanza la siguiente desigualdad:

$$\Delta < \varepsilon$$

Al cumplirse esta desigualdad, se define como valor óptimo el último punto inicial guardado. Ya que el código de optimización utiliza el mismo código que la simulación para realizar los cálculos, los valores calculados son guardados en los mismos archivos que la simulación numérica. Además, el código utiliza una nueva carpeta, donde se almacenarían los datos propios de la optimización, como lo son las variables de entrada al ciclo de optimización, las variables modificadas en la optimización (inicial, modificada y nueva) la optimización, los resultados obtenidos, los parámetros de búsqueda utilizados, entre otros valores necesarios para la realización del ciclo. Por último, con el fin de guardar los datos obtenidos anteriormente se creó un archivo de historial, el que permite almacenar los valores iniciales y finales de cada optimización se realice por medio de la interfaz.

7. Resultados

En esta sección del trabajo se muestran los resultados obtenidos para cuatro casos de estudio diferentes. En primer lugar, se realizó un estudio del comportamiento del modelo de optimización, en donde se quiere demostrar que el método aplicado es capaz de cumplir con el objetivo principal deseado. En segundo lugar, se buscó identificar los efectos que produce una variación en la radiación incidente, ingresada como variable de entrada en el modelo, registrándose los resultados obtenidos tanto de las simulaciones como de las optimizaciones. En tercer lugar, se calcularon los valores óptimos del modelo para diversos valores de área efectiva en el colector solar, registrando cada uno de los resultados entregados. Por último, se realizó un análisis a la variación en la temperatura del agua de mar que ingresa al sistema, registrando los resultados entregando por medio de la simulación y optimización. A continuación, se detallan los resultados obtenidos

7.1 Estudio de optimización multi-objetivo

Con el fin de comprobar que la optimización multi-objetivo cumple con su propósito, es que se tomaron 17 puntos iniciales distintos, en donde se consideró variar solamente los flujos máxicos de aire seco y agua de mar, manteniendo fijos las demás variables del modelo al inicio.

Variable Entrada	Magnitud	Variable Entrada	Magnitud
Temperatura Agua	294 [K]	Presión Agua	1 [MPa]
Temperatura Aire	316 [K]	Presión Aire	101,325 [kPa]
Humedad Aire	0,99 [-]	Área Colectores	1,91 [m ²]
Radiación Incidente	600 [$\frac{W}{m^2}$]	Numero Colectores	4 [-]

Tabla 11: Valores de las variables de entrada que se mantuvieron fijos al momento de realizar las optimizaciones en la primera parte del estudio.

Los valores utilizados para los flujos de masa de aire y agua fueron:

Simulación N°	Flujo Másico Aire Kg/s	Flujo Másico Agua Kg/s	Simulación N°	Flujo Másico Aire Kg/s	Flujo Másico Agua Kg/s
1	0,0500	0,0500	10	0,0750	0,0750
2	0,0500	0,0625	11	0,0750	0,0875
3	0,0500	0,0750	12	0,0750	0,1000
4	0,0500	0,1000	13	0,0875	0,0625
5	0,0625	0,0625	14	0,0875	0,0875
6	0,0625	0,0750	15	0,1000	0,0500
7	0,0625	0,0875	16	0,1000	0,0750
8	0,0750	0,0500	17	0,1000	0,1000
9	0,0750	0,0625			

Tabla 12: Valores de flujos másicos de aire y agua utilizados como puntos de partidas para las optimizaciones realizadas.

El objetivo de este estudio es ver que el código de optimización entregue el mejor resultado posible para el modelo, buscando la mejor combinación de variables de entrada. En el caso en cuestión, como es una optimización en dos dimensiones, se modificaron los valores de flujos másicos de agua y aire por medio del código, obteniéndose las siguientes combinaciones de variables de entrada:

Simulación N°	Temperatura Aire K	Humedad Relativa -	Flujo Másico Aire Kg/s	Flujo Másico Agua Kg/s	Razón de Flujo Aire- Agua -
1	309,9	0,9803	0,05738	0,04263	1,35
2	308,6	0,9881	0,06500	0,04750	1,37
3	308,0	0,9888	0,07050	0,04950	1,42
4	307,9	0,9914	0,07040	0,05060	1,39
5	308,4	0,9882	0,06688	0,04813	1,39
6	309,8	0,9786	0,05890	0,04260	1,38
7	306,6	0,9898	0,08550	0,05450	1,57
8	307,7	0,9867	0,07500	0,05000	1,50
9	308,2	0,9878	0,06890	0,04860	1,42
10	308,5	0,9872	0,06640	0,04760	1,39
11	309,0	0,9852	0,06287	0,04582	1,37
12	309,0	0,9856	0,06269	0,04589	1,37
13	309,3	0,9833	0,06109	0,04466	1,37
14	309,2	0,9849	0,06127	0,04522	1,35
15	308,8	0,9863	0,06452	0,04672	1,38
16	309,2	0,9835	0,06170	0,04491	1,37
17	308,9	0,9862	0,06382	0,04647	1,37

Tabla 13: Variables de entrada obtenidas por medio de la optimización numérica.

En la tabla anterior además de los valores de flujo másico se muestran las temperaturas de del aire y la humedad relativa antes de ingresar al condensador, debido a que estas cambian desde su punto inicial, hasta alcanzar el equilibrio en la simulación. También se observa la relación de flujos de aire y agua, la cual se encuentra en un rango entre 1,37 y 1,57 [-] con un promedio de 1,4 [-].

Otros valores importantes a comparar en este estudio corresponden al *GOR*. En la siguiente tabla se pueden apreciar los valores obtenidos al inicio del ciclo de cálculo y al momento de encontrar el valor óptimo tanto para el flujo de masa de agua condensada, como para el valor calculado del *GOR*.

Simulación n N°	Entrada		Optimo		Aumento Flujo Agua	Aumento GOR
	Flujo Másico Agua destilada Kg/s	GOR -	Flujo Másico Agua destilada Kg/s	GOR -		
1	0,001148	1,240	0,001230	1,328	7%	7%
2	0,000964	0,951	0,001230	1,328	28%	40%
3	0,000791	0,780	0,001228	1,266	55%	62%
4	0,000540	0,510	0,001228	1,326	128%	160%
5	0,001094	1,128	0,001230	1,268	12%	12%
6	0,000941	0,928	0,001230	1,328	31%	43%
7	0,000797	0,753	0,001218	1,256	53%	67%
8	0,001225	1,323	0,001225	1,323	0%	0%
9	0,001166	1,202	0,001229	1,267	5%	5%
10	0,001042	1,027	0,001230	1,328	18%	29%
11	0,000911	0,898	0,001231	1,329	35%	48%
12	0,000790	0,747	0,001231	1,329	56%	78%
13	0,001200	1,237	0,001231	1,329	3%	7%
14	0,000992	0,937	0,001231	1,329	24%	42%
15	0,001173	1,209	0,001230	1,328	5%	10%
16	0,001140	1,124	0,001231	1,329	8%	18%
17	0,000946	0,894	0,001230	1,268	30%	42%

Tabla 14: Resultados obtenidos de las simulaciones de los puntos de partida y de las optimizaciones obtenidas.

Al comparar los valores de flujo másico de agua destilada calculados al inicio y al término de la optimización, se logra apreciar que existe un incremento del valor en cada una de las secuencias de optimización realizada, sin importar el punto de partida inicial. Es necesario mencionar que en la mayor parte de los casos se logró un aumento significativo de la cantidad

de agua producida, donde los valores de la función objetivo toman valores cercanos al promedio, que en este caso es de 1,229 [gr/s]. También es posible observar que la eficiencia también aumento al mismo tiempo que la producción de agua, obteniéndose un valor promedio para el GOR de 1,3. Las combinaciones obtenidas por medio de la optimización, correspondientes a los flujos máscicos de agua y aire en la entrada del proceso, logran entregar un mayor rendimiento y flujo de agua respecto a un valor inicial cualquiera. Además, es posible observar que estos valores tienden a una pequeña vecindad de puntos, lo que se ve reflejado en los valores de la razón de flujos de aire y agua de la tabla 13. Al analizar el caso particular de la optimización n°7, es posible ver que los flujos máscicos de agua y aire al final de la optimización toman valores mayores que en los demás casos y también se calcula una menor cantidad de agua destilada. Esto puede ser producido por que en ese punto la función objetivo presentaría un máximo local. Por último, es necesario destacar que es posible que debido a la resolución con la que trabaja el software, que no se llegó a una única combinación de flujos de agua y aire en las optimizaciones, obteniéndose así más de una combinación de valores que llegaba al mismo resultado final de agua destilada producida.

7.2 Estudio de Óptimo Respecto a Área Colector

La segunda parte del estudio busca ver los efectos producidos por la modificación del área total de colección de la radiación, con el fin de aumentar la energía ingresada al sistema. Acá se realizaron 9 secuencias de cálculo. En este caso se utilizó el mismo punto de partida manteniendo fijas las 8 variables de entrada y solo modificando el número de colectores y el área efectiva del colector. Las variables de entrada utilizadas en las 9 iteraciones se pueden ver en el Anexo A1.

Por otro lado, se estudió el cómo afectaba este cambio en la energía entrante al sistema, a la configuración del optimo obtenido mediante el código aplicado. Los resultados obtenidos de las simulaciones y las configuraciones óptimas se pueden ver a continuación:

Simulación n N°	Entrada		Optimo		Aumento Flujo Agua -	Aumento GOR -
	Flujo Másico Agua destilada Kg/s	GOR -	Flujo Másico Agua destilada Kg/s	GOR -		
1	0,000582	1,014	0,000756	1,429	30%	41%
2	0,000705	0,999	0,000888	1,438	26%	44%
3	0,000825	1,040	0,001009	1,271	22%	22%
4	0,000937	1,012	0,001125	1,276	20%	26%
5	0,001042	1,027	0,001230	1,328	18%	29%
6	0,001142	1,079	0,001330	1,311	16%	21%
7	0,001236	1,038	0,001422	1,290	15%	24%
8	0,001324	1,035	0,001502	1,261	13%	22%
9	0,001410	1,066	0,001585	1,239	12%	16%

Tabla 15: Resultados obtenidos de las simulaciones y optimizaciones realizadas con distintos valores de área de colector.

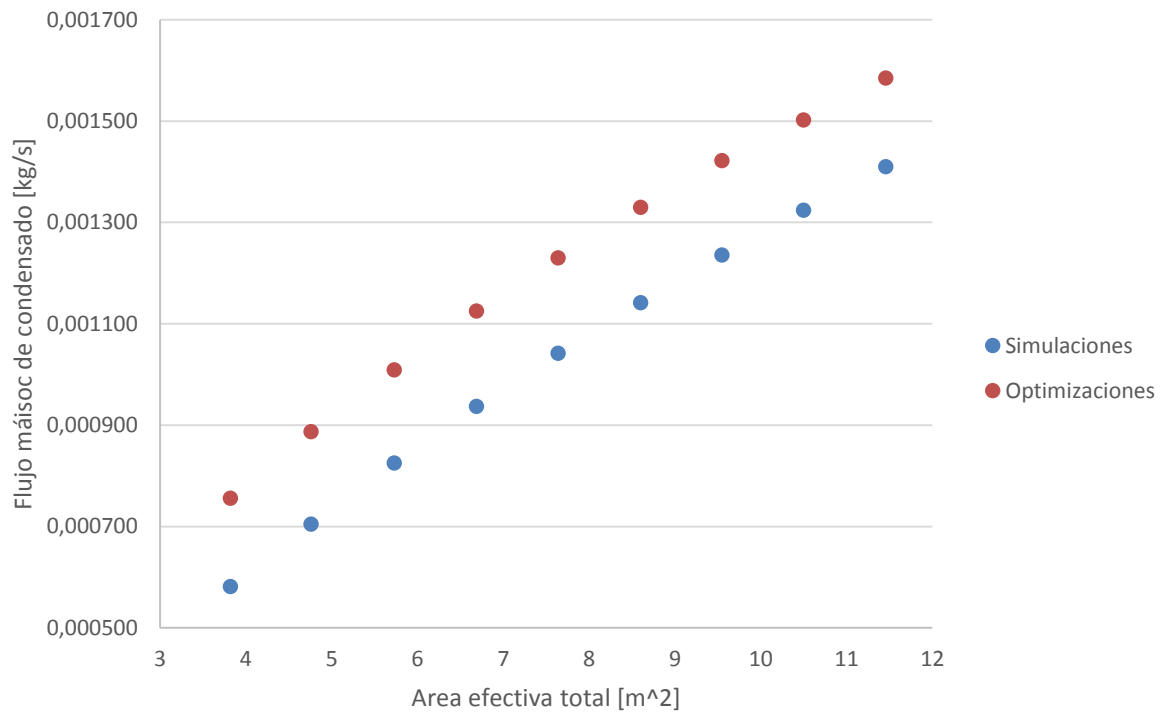


Ilustración 29: Gráfico de la relación existente entre el área efectiva total y la producción de agua por medio de la simulación y optimización del sistema HDH CAOW.

Al igual que en el caso anterior, se puede ver que la optimización logra mejorar los resultados de la producción de agua del sistema y del GOR, con solo modificar los flujos másicos de agua y aire en el sistema.

Además, al ver los resultados entregados tanto por las simulaciones como por la optimización, es posible observar que existe una mejora en la producción de agua solo al aumentar el área efectiva de los colectores solares.

7.3 Estudio de Óptimo Respecto a Radiación Solar

En esta parte del estudio se modificó la cantidad de radiación incidente en el modelo, con el fin de conocer los efectos provocados en el modelo numérico. Se realizaron nueve secuencias de cálculo manteniendo las condiciones iniciales de entrada de las nueve variables restantes y solo modificando la cantidad de radiación incidente. Los valores utilizados de cada variable se pueden apreciar en el Anexo A2.

Al igual que en el caso anterior se realizó un estudio del efecto de estas variaciones en la optimización planteada. Los resultados pueden apreciarse a continuación:

Simulación n N°	Entrada		Óptimo		Aumento Flujo Agua	Aumento GOR
	Flujo Másico Agua destilada Kg/s	GOR	Flujo Másico Agua destilada Kg/s	GOR		
1	0,000312	2,361	0,000396	1,282	27%	-46%
2	0,000486	1,376	0,000603	1,368	24%	-1%
3	0,000666	1,006	0,000814	1,420	22%	41%
4	0,000851	1,016	0,001022	1,363	20%	34%
5	0,001042	1,027	0,001230	1,328	18%	29%
6	0,001237	1,039	0,001437	1,303	16%	25%
7	0,001435	1,050	0,001645	1,285	15%	22%
8	0,001638	1,061	0,001852	1,271	13%	20%
9	0,001844	1,071	0,002058	1,258	12%	18%

Tabla 16: Resultados obtenidos de las simulaciones y optimizaciones realizadas con distintos valores de radiación incidente.

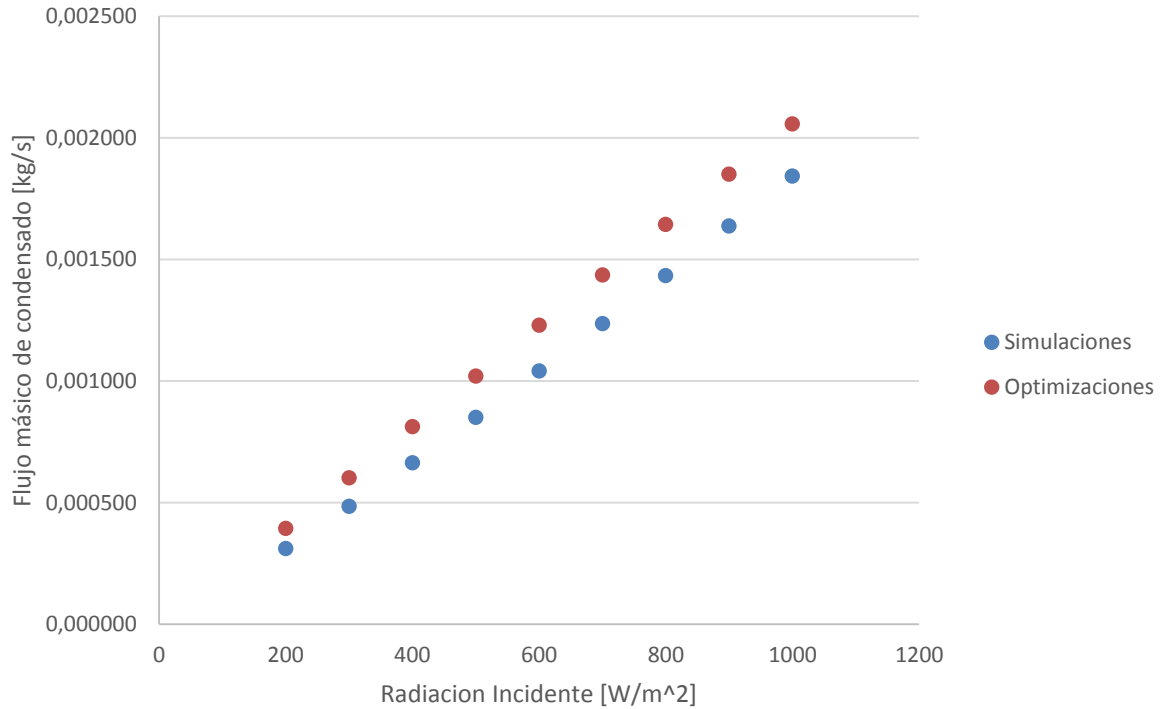


Ilustración 30: Gráfico de la relación existente entre la radiación incidente y la producción de agua por medio de la simulación y optimización del sistema HDH CAOW.

Tal y como sucedió con el caso del área efectiva de los colectores, es posible observar que es posible obtener un mejor valor de producción de agua destilada, solo al modificar las variables de flujos másicos entrantes.

Por otro lado, se puede determinar que el aumento de la radiación incidente logra mejorar tanto los valores obtenidos por la simulación, como los obtenidos por la optimización.

7.4 Estudio de Óptimo Respecto a Temperatura del Agua Salobre.

Otra forma de ver el efecto de los factores externos en el ciclo es por medio de la modificación de la temperatura de sumidero de calor. En esta parte del estudio se decidió realizar 10 simulaciones con diferentes temperaturas de entrada para el modelo planteado, manteniéndose constante las demás variables de entrada. Los valores utilizados pueden apreciarse en el Anexo A3.

Al igual que en los casos anteriores se estudió el comportamiento del valor óptimo que entrega la secuencia de cálculo utilizada en este trabajo, al modificar el valor de la

temperatura de entrada de agua salobre al sistema. Los valores calculados se pueden apreciar a continuación:

Simulación n N°	Entrada		Óptimo		Aumento Flujo Agua -	Aumento GOR -
	Flujo Másico Agua destilada Kg/s	GOR -	Flujo Másico Agua destilada Kg/s	GOR -		
1	0,000821	0,738	0,001262	1,290	54%	75%
2	0,000884	0,830	0,001226	1,201	39%	45%
3	0,000942	0,887	0,001253	1,286	33%	45%
4	0,000994	0,978	0,001243	1,339	25%	37%
5	0,001042	1,027	0,001230	1,328	18%	29%
6	0,001076	1,063	0,001202	1,242	12%	17%
7	0,001104	1,143	0,001195	1,361	8%	19%
8	0,001124	1,222	0,001171	1,272	4%	4%
9	0,001122	1,283	0,001142	1,305	2%	2%
10	0,001103	1,264	0,001111	1,273	1%	1%

Tabla 17: Resultados obtenidos de las simulaciones y optimizaciones realizadas con distintos valores de temperatura de entrada del agua de mar.

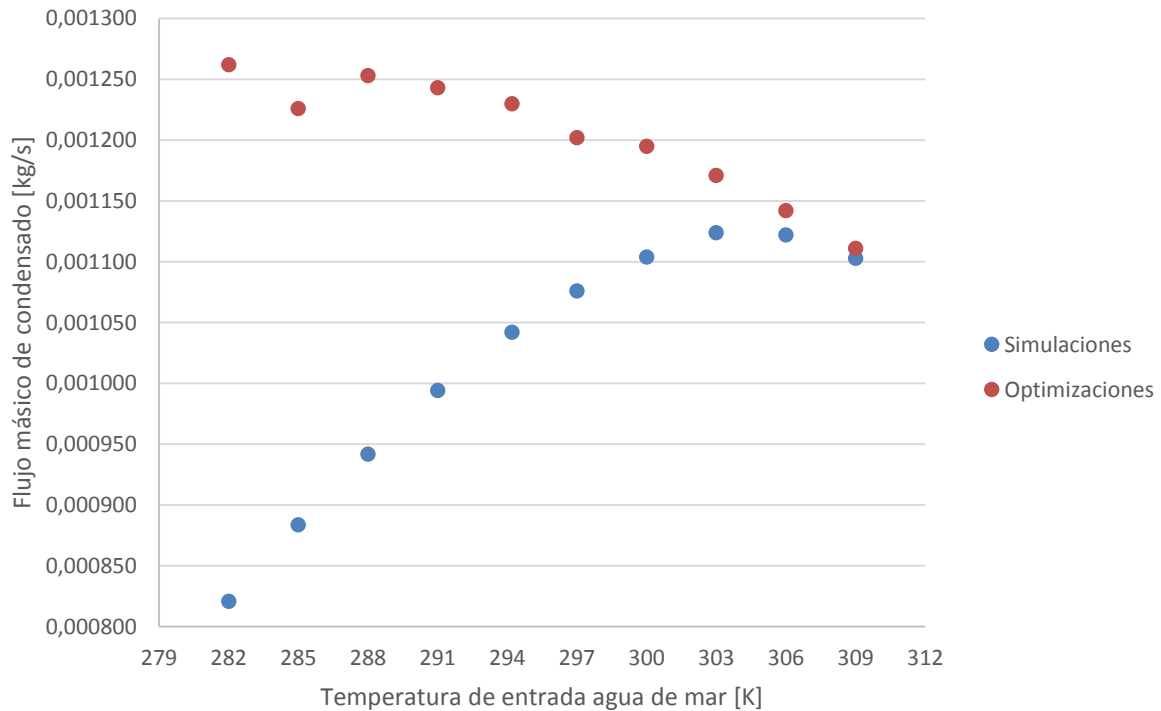


Ilustración 31: Gráfico de la relación existente entre la temperatura de entrada del agua de mar y la producción de agua por medio de la simulación y optimización del sistema HDH CAOW.

En este caso de estudio, la optimización nuevamente logra generar mejores resultados tanto de la producción de agua como del parámetro GOR en cada uno de los resultados obtenidos. A diferencia de los casos anteriores, el efecto de un aumento en la temperatura en el agua salobre no afecta de la misma manera a la simulación como a la optimización. En el caso de la simulación, a medida que aumenta la temperatura de agua salobre entrante, el agua que se produce es cada vez mayor, llegando a un punto en donde comienza a decaer el valor. Por el contrario, en el caso de la máxima producción que se puede lograr respecto a la modificación de los flujos másicos entrantes, vemos que a medida que aumenta la temperatura de agua salobre, el valor máximo que se puede obtener va decayendo, acercándose cada vez más al valor del punto de partida., por lo que el aumento logrado es cada vez menor. Es importante destacar que la máxima producción de agua se logra al tener una temperatura más baja de agua salobre.

8. Conclusiones

En este trabajo se realizó un análisis de los estudios donde se han llevado a cabo modificaciones a los sistemas HDH, tanto en sus componentes como en el acoplamiento del ciclo a un proceso más complejo. Además, se revisaron los efectos de las modificaciones en los factores externos e internos de los equipos, presentados en estos trabajos.

En el caso del modelo numérico existente, se verificó el funcionamiento de este respecto al comportamiento teórico esperado, encontrando algunas anomalías que fueron corregidas.

Por medio del estudio de los modelos de optimización multivariables, en especial el correspondiente a Hookes and Jeeves, se creó un código de optimización bidimensional por medio de una macros en EES, que se acopla al modelo numérico existente.

La optimización del modelo numérico planteado en este trabajo permite aumentar la generación de agua destilada, aprovechando así de mejor manera la energía que ingresa al sistema de desalinización HDH.

En cuanto al código macros creado para realizar la optimización del modelo numérico, se deja demostrado que se puede lograr aumentos en la cantidad de agua destilada solo modificando los flujos máscicos de aire y agua que ingresan al sistema desalinizador. Además, es posible observar que considerando las condiciones iniciales del modelo, al elegir cualquier punto de partida, la optimización alcanza una máxima producción de agua de 1,229 [gr/s] de agua destilada y un valor del parámetro de rendimiento GOR de 1,3 [-].

Al ver los casos de estudio correspondiente al área efectiva de los colectores solares y la radicación solar incidente, es posible observar que a medida que aumenta la energía que entra al sistema se mejora la producción de agua del sistema, tal y como se menciona en el trabajo de Wu, Kutlu, Zheng, Su, & Cui (31). Esto se debe a que se genera un aumento de temperatura del agua que ingresa al humidificador, lo que también concuerda con lo indicado en el trabajo de Yildirim & Solmus (14).

Con respecto al último caso de estudio, se demuestra que un aumento en la temperatura con la que entra el agua salobre al sistema logra aumentar la generación de agua destilada al mantener las demás variables fijas. Pero, aun así, la mayor producción del sistema se da al utilizar una mejor combinación de flujos máscicos de aire y agua en conjunto con la menor temperatura posible del agua salobre. Esto se debe a que la temperatura del sumidero de

calor, encargado de la condensación del agua contenida en el aire húmedo, influye de manera significativa en la producción de agua destilada tal y como también fue mencionado en el estudio de Yildirim & Solmus (14).

Por último, es necesario mencionar que se deben cotejar los resultados entregados tanto por la simulación numérica como por la optimización del modelo, con datos experimentales reales de acuerdo a la producción que se obtenga de la planta desalinizadora de la cual es reflejo el modelo numérico.

Referencias

1. *Is physical water scarcity a new phenomenon? Global assessment of water shortage over the last two millennia.* **Kummu, Matti, y otros.** 2016, Environmental Research Letters, Vol. 5.
2. **Voutchkov, Nikolay.** *Desalination Engineering Planning and Design.* s.l. : McGraw-Hill, 2013. ISBN 978-0-07-177716-2.
3. *A review of the water desalination systems integrated with renewable energy.* **Alkaisi, Ahmed, Mossad, Ruth y Sharifian-Barforoush, Ahmad.** Melbourne : s.n., 2016. 1st International Conference on Energy and Power. págs. 268-274.
4. *The potential of solar-driven humidification–dehumidification desalination for small-scale decentralized water production.* **Narayan, G. Prakash, y otros.** 2010, Renewable and Sustainable Energy Reviews, págs. 1187–1201.
5. *Combined probation of bubble column humidification dehumidification desalination system using solar collectors.* **Rajaseenivasan, T., y otros.** 2016, Energy, Vol. 116, págs. 459-469.
6. *Performance analysis on a solar bubble column humidification dehumidification desalination system.* **Srithar, K. y Rajaseenivasan, T.** 2017, Process Safety and Environmental Protection, Vol. 105, págs. 41-50.
7. *Potential of a dual purpose solar collector on humidification dehumidification desalination system.* **Rajaseenivasan, T. y Srithar, K.** 2017, Desalination, Vol. 404, págs. 35-40.
8. *Energy saving potential in humidification-dehumidification desalination system.* **Muthusamy, C. y Srithara, K.** 2017, Energy, Vol. 118, págs. 729-741.
9. *Humidification dehumidification desalination system using parabolic trough solar air collector.* **Al-Sulaiman, Fahad A., y otros.** 2015, Applied Thermal Engineering, Vol. 75, págs. 809-816.
10. *Examination of a solar desalination system equipped with an air bubble column humidifier, evacuated tube collectors and thermosyphon heat pipes.* **Behnam, Pooria y Shafii, Mohammad Behshad.** 2016, Desalination, Vol. 397, págs. 30-37.

11. *A continuous desalination system using humidification – dehumidification and a solar still with an evacuated solar water heater.* **Sharshir, S. W., y otros.** 2016, Applied Thermal Engineering, Vol. 104, págs. 734-742.
12. *Using TRNSYS Simulation to Optimize the Design of a Solar Water Distillation System.* **Juarez-Trujillo, Armando, Martín-Domínguez, Ignacio R. y M. Teresa, Alarcón-Herrera.** 2014, Energy Procedia, Vol. 57, págs. 2441-2450.
13. *Development of design optimized simulation tool for water desalination system.* **Mahmoud, Abo Elkasem, Mahmoud, Osama E. y Fatouh, M.** 2016, Desalination, Vol. 398, págs. 157-164.
14. *A parametric study on a humidification–dehumidification (HDH) desalination unit powered by solar air and water heaters.* **Yıldırım, Cihan y Solmuş, Ismail.** 2014, Energy Conversion and Management, Vol. 86, págs. 568-575.
15. *Investigation of a solar energy driven and hollow fiber membrane-based humidification–dehumidification desalination system.* **Li, Guo-Pei y Zhang, Li-Zhi.** 2016, Applied Energy, Vol. 177, págs. 393-408.
16. *Energy and economic analysis of a hollow fiber membrane-based desalination system driven by solar energy.* **Zhang, Li-Zhi y Li, Guo-Pei.** 2017, Desalination, Vol. 404, págs. 200-214.
17. *Parametric analysis of a humidification dehumidification desalination system using a direct-contact dehumidifier.* **He, W. F., y otros.** 2017, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 120, págs. 31-40.
18. *Recent fresh water augmentation techniques in solar still and HDH desalination – A review.* **Srithar, K. y Rajaseenivasan, T.** 2017, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 82, págs. 629-644.
19. *Improvement of humidification–dehumidification desalination unit using a desiccant wheel.* **El-Agouz, S. A., Sathyamurthy, Ravishankar y Manokard, A. Muthu.** en prensa, Chemical Engineering Research and Design.
20. *Experimental investigation of a multi-effect isothermal heat with tandem solar desalination system based on humidification–dehumidification processes.* **Wu, Gang, y otros.** 2016, Desalination, Vol. 378, págs. 100-107.

21. *Solar desalination system of combined solar still and humidification–dehumidification unit.* **Ghazy, Ahmed y Fath, Hassan E. S.** 2016, Heat and mass transfer, Vol. 52, págs. 2497-2506.
22. *A hybrid desalination system using humidification-dehumidification and solar stills integrated with evacuated solar water heater.* **Sharshir, S. W., y otros.** 2016, Energy Conversion and Management, Vol. 124, págs. 287-296.
23. *Performance investigation of a novel solar hybrid air conditioning and humidification–dehumidification water desalination system.* **Elattar, H. F., Fouda, A. y Nada, S. A.** 2016, Desalination, Vol. 382, págs. 28-42.
24. *An integrated A/C and HDH water desalination system assisted by solar energy: Transient analysis and economical study.* **Fouda, A., Nada, S. A. y Elattar, H. F.** 2016, Applied Thermal Engineering, Vol. 108, págs. 1320-1335.
25. *Performance evaluation of a solar energy assisted hybrid desiccant air conditioner integrated with HDH desalination system.* **Kabeel, A. E., Abdelgaied, Mohamed y Zakaria, Yehya.** 2017, Energy Conversion and Management, Vol. 150, págs. 382-391.
26. *Humidification–dehumidification desalination process driven by photovoltaic thermal energy recovery (PV-HDH) for small-scale sustainable water and power production.* **Giwa, Adewale, Fath, Hassan y Hasan, Shadi W. .** 2016, Desalination, Vol. 377, págs. 163-171.
27. *Experimental evaluation of a two-stage indirect solar dryer with reheating coupled with HDH desalination system for remote areas.* **Kabeel, A. E. y Abdelgaied, Mohamed.** en prensa, Desalination.
28. *Development of an active solar humidification-dehumidification (HDH) desalination system integrated with geothermal energy.* **Elminshawy, Nabil A. S., Siddiqui, Farooq R. y Addas, Mohammad F.** 2016, Energy Conversion and Management, Vol. 126, págs. 608-621.
29. *A parametric study of a humidification dehumidification (HDH) desalination system using low grade heat sources.* **He, W. F., y otros.** 2015, Energy Conversion and Management, Vol. 105, págs. 929-937.
30. *Parametric analysis of an air-heated humidification-dehumidification (HDH) desalination system with waste heat recovery.* **He, W. F., Xu, L. N. y Han, D.** 2016, Desalination, Vol. 398, págs. 30-38.

31. *A study on the maximum gained output ratio of single-effect solar humidification-dehumidification desalination.* **Wu, Gang, y otros.** 2017, *Solar Energy*, Vol. 157, págs. 1-9.
32. *Energy, exergy, economic and environmental (4E) analysis of a solar desalination system with humidification-dehumidification.* **Deniz, Emrah y Çınar, Serkan.** 2016, *Energy Conversion and Management*, Vol. 126, págs. 12-19.
33. *Performance analysis of an air-heated humidification–dehumidification desalination plant powered by low grade waste heat.* **He, W. F., y otros.** 2016, *Energy Conversion and Management*, Vol. 118, págs. 12-20.
34. *Thermodynamic investigation of waste heat driven desalination unit based on humidification dehumidification (HDH) processes.* **He, W. F., y otros.** 2016, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 100, págs. 315-324.
35. **Hernandez, Catalina.** Modelamientos computacional de sistema de desalinización por método de humidificación-deshumidificación. (*Memoria de pregrado inedita*). s.l. : Universida Técnica Federico Santa María, 2017.
36. *Cooling tower performance evaluation: Merkel, Poppe and e-NTU methods of analysis.* **Kloppers, Johannes C. y Kröger, Detlev G.** 1, Stellenbosch : ASME, Enero de 2005, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 127, págs. 1-7. doi:10.1115/1.1787504.
37. *Simulación de una Torre de Enfriamiento Mecánica Comparada con Curvas Experimentales.* **Alean, Jader D., y otros.** 3, [Online] : s.n., 2009, *Información Tecnológica*, Vol. 20, págs. 13-18.
38. *Performance and cost assessment of solar driven humidification dehumidification desalination system.* **Zubair, M. Ifras, y otros.** 2017, *Energy Conversion and Management*, Vol. 132, págs. 28-39.
39. *Mathematical Modeling for Performance Prediction of a Humidification – Dehumidification Solar Water Desalination System in Egypt.* **El-Ghetany, H. H. y Khattab, N. M.** 2016, *J. Chem*, Vol. 59, págs. 145-162.
40. *Thermodynamic analysis of humidification dehumidification desalination cycles.* **Narayan, G. Prakash, y otros.** 2010, *Desalination and water treatment*, Vol. 16, págs. 339-353.

41. *Entropy generation minimization of combined heat and mass transfer devices.* **Narayan, G. Prakash, Lienhard V, John H. y Zubair, Syed M.** 2010, Vol. 49, págs. 2057-2066.

Anexos

A1: Variables de Entrada de Estudio Respecto de Área de Colectores Solares

N°	Temperatura Aire [K]	Humedad Relativa [-]	Temperatura Agua [K]	Presión Aire [Pa]	Presión Agua [Pa]
1	301,2	0,999	294,2	101325	1000000
2	302,3	0,999	294,2	101325	1000000
3	303,4	0,999	294,2	101325	1000000
4	304,3	0,999	294,2	101325	1000000
5	305,2	0,999	294,2	101325	1000000
6	305,9	0,999	294,2	101325	1000000
7	306,6	0,999	294,2	101325	1000000
8	307,2	0,999	294,2	101325	1000000
9	307,8	0,999	294,2	101325	1000000

N°	Flujo Másico Aire [kg/s]	Flujo Másico Agua [kg/s]	Radiación [$\frac{W}{m^2}$]	Numero de Colectores [-]	Área Efectiva Colector [m ²]
1	0,075	0,075	600	2	1,91
2	0,075	0,075	600	2	2,38
3	0,075	0,075	600	3	1,91
4	0,075	0,075	600	3	2,23
5	0,075	0,075	600	4	1,91
6	0,075	0,075	600	4	2,15
7	0,075	0,075	600	5	1,91
8	0,075	0,075	600	5	2,1
9	0,075	0,075	600	6	1,91

A2: Variables de Entrada de Estudio Respecto de Radiación

Solar.

N°	Temperatura	Humedad	Temperatura	Presión	Presión
	Aire [K]	Relativa [-]	Agua [K]	Aire [Pa]	Agua [Pa]
1	298,3	0,999	294,2	101325	1000000
2	300,2	0,999	294,2	101325	1000000
3	302	0,999	294,2	101325	1000000
4	303,6	0,999	294,2	101325	1000000
5	305,2	0,999	294,2	101325	1000000
6	306,6	0,999	294,2	101325	1000000
7	308	0,999	294,2	101325	1000000
8	309,3	0,999	294,2	101325	1000000
9	310,5	0,999	294,2	101325	1000000

N°	Flujo	Flujo	Radiación	Numero	Área
	Másico Aire [kg/s]	Másico Agua [kg/s]	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$	de Colectores [-]	Efectiva Colector [m ²]
1	0,075	0,075	200	4	1,91
2	0,075	0,075	300	4	1,91
3	0,075	0,075	400	4	1,91
4	0,075	0,075	500	4	1,91
5	0,075	0,075	600	4	1,91
6	0,075	0,075	700	4	1,91
7	0,075	0,075	800	4	1,91
8	0,075	0,075	900	4	1,91
9	0,075	0,075	1000	4	1,91

A3: Variables de Entrada de Estudio Respecto de Temperatura de Entrada del Agua Salobre.

N°	Temperatura Aire [K]	Humedad Relativa [-]	Temperatura Agua [K]	Presión Aire [Pa]	Presión Agua [Pa]
1	297,1	0,999	282	101325	1000000
2	299,1	0,999	285	101325	1000000
3	301,1	0,999	288	101325	1000000
4	303,1	0,999	291	101325	1000000
5	305,2	0,999	294,2	101325	1000000
6	307	0,999	297	101325	1000000
7	309	0,999	300	101325	1000000
8	311	0,999	303	101325	1000000
9	313,1	0,9953	306	101325	1000000
10	315,2	0,9902	309	101325	1000000

N°	Flujo Másico Aire [kg/s]	Flujo Másico Agua [kg/s]	Radiación [$\frac{W}{m^2}$]	Numero de Colectores [-]	Área Efectiva Colector [m ²]
1	0,075	0,075	600	4	1,91
2	0,075	0,075	600	4	1,91
3	0,075	0,075	600	4	1,91
4	0,075	0,075	600	4	1,91
5	0,075	0,075	600	4	1,91
6	0,075	0,075	600	4	1,91
7	0,075	0,075	600	4	1,91
8	0,075	0,075	600	4	1,91
9	0,075	0,075	600	4	1,91
10	0,075	0,075	600	4	1,91