

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



**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO
COMPACTO DE DESALINIZACIÓN HDH
ACOPLADO A UN COLECTOR PVT”**

Luis Antonio Droguett Sepúlveda

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

Profesor Guía: Ph.D. Rodrigo Barraza Vicencio
Profesor Correferente: Ing. Mauricio Reyes Valenzuela

ENERO de 2021

Dedico mi tesis a dos personas fundamentales de mi vida. En primer lugar, a mi madre, que, aunque no pueda acompañarme en esta etapa, siempre me apoyo incondicionalmente, y tuvo fe de que podría algún día podría sacar mi título profesional. En segundo lugar, a mi pareja, Dhaniella Bustamante, que ha estado siempre apoyándome y creyendo en mí, tanto en los buenos como en los malos momentos que he pasado. Fueron, son y serán lo más importante.

Resumen

En el año 2019, se realizó la inscripción de la patente N°201901906 por parte del equipo de desalinización HDH de la Universidad Técnica Federico Santa María, correspondiente a un Humificador de aire, compuesto por un panel fotovoltaico acoplado a una cámara de humidificación, en donde se aprovecha el calentamiento de un panel PV para calentar aire y humidificarlo de forma simultánea. En este trabajo se adaptó esta idea con la finalidad de comprobar su desempeño, que se le nombro, a lo largo de esta memoria, como Humificador PVT, puesto que consistió en un dispositivo híbrido que permite convertir la radiación solar en energía eléctrica y térmica.

La primera etapa consistió en exponer los antecedentes más relevantes de la desalinización HDH, especialmente, de los dos últimos prototipos desarrollados en la Universidad en los años de investigación y desarrollo de este tema, que sirvió de base para el avance de este proyecto. En segundo lugar, se desarrolló el diseño mecánico de un nuevo prototipo de desalinización HDH de pequeña escala, detallando la selección de los equipos necesarios, criterios utilizados y objetivos a lograr con este diseño, dentro de los cuales destacan generar un equipo de fácil instalación y construcción. Finalmente, se realizó la construcción y puesta en marcha del desalinizador, detallando las operaciones y las decisiones tomadas en el proceso, además, de las modificaciones realizadas que no estuvieron previstas en el diseño. Siendo registrados 400 ml de agua pura en dos horas y treinta minutos de funcionamiento, obtenidos el 14 de enero del año 2021.

La principal mejora que se podría realizar al prototipo es modificar la configuración del ciclo, siendo la actual configuración del equipo CACW (ciclo de aire y de agua cerrados), el cual se cambiaría a una configuración CAOW (ciclo de aire cerrado y de agua abierto) con la disposición de un estanque más en el sistema., y de esta manera se podría, en un futuro, incrementar la cantidad de destilado al evitar el calentamiento del agua por la recirculación.

Abstract

In 2019, the patent N°201901906 was registered by the HDH desalination team of the Federico Santa María University Technical, corresponding to an air humidifier, made up of a photovoltaic panel coupled to a humidification chamber, where the heating of a PV panel is used to heat air and humidify it simultaneously. In this project, the idea was adapted to verify its performance, which is named, throughout this report, as a PVT Humidifier, since it consisted of a hybrid device that allows converting solar radiation into electrical and thermal energy.

The first stage consisted in exposing the most relevant antecedents of HDH desalination, especially of the last two prototypes developed at the University in the years of research and development of this topic, which served as the basis for the advancement of this project. Secondly, the Mechanical design of a new small-scale HDH desalination prototype was developed, checking the selection of the necessary equipment, criteria used and goals to achieve with this design, among which the generation of equipment that is easy to install and build stands out. Finally, the construction and start-up of the desalinator, the final operations and the decisions made in the process were carried out, as well as the modifications made that were not planned in the design. Registering 400 ml of pure water in two hours and thirty minutes of operation, obtained on January 14, 2021.

The main improvement that can be made to the prototype is to modify the configuration of the cycle, being the current configuration of the equipment CACW (closed air and water cycle), which would be changed to a CAOW configuration (closed air and open water cycle) with the provision of one more pond in the system, and in this way it could, in the future, increase the amount of distillate by avoiding the heating of the water by recirculation.

ÍNDICE GENERAL

1.	Introducción	1
1.1.	Introducción	1
1.2.	Objetivos	3
1.2.1.	General	3
1.2.2.	Específicos	3
2.	Estado del arte	4
2.1.	Principios de la Desalinización por HDH	4
2.2.	Precedentes teóricos y experimentales de la Desalinización Solar HDH.....	7
2.3.	Sistemas de desalinización Actualmente utilizado.....	12
2.4.	Sistema de desalinización con incorporación de colector con aspersión PVT.....	14
3.	Diseño del prototipo de desalinizadora HDH.....	17
3.1.	Humificador	19
3.1.1.	Rociadores.....	21
3.1.2.	Panel Fotovoltaico.....	23
3.1.3.	Cámara de Humidificación.....	25
3.1.4.	Estructura de Soporte	27
3.2.	Deshumificador	28
3.3.	Conexiones y Subsistemas	31
3.3.1.	Entrada del Aire	32
3.3.2.	Salida del Aire.....	36
3.3.3.	Entrada del Agua.....	37
3.3.3.1.	Succión.....	37
3.3.3.2.	Descarga (Antes del Deshumificador).....	42
3.3.3.3.	Descarga (Después del Deshumificador)	42
3.3.4.	Salida del Agua	44
3.4.	Instrumentación.....	46
3.5.	Medidas principales.....	52
4.	Construcción del desalinizador	53
4.1.	Estructuras de soporte	53
4.2.	Humificador PVT.....	54
4.3.	Deshumificador	56
4.4.	Ubicación de los equipos.....	58

4.5.	Conexiones del Aire y Agua	59
4.6.	Instalación de los subsistemas.....	61
4.7.	Instrumentación.....	63
4.8.	Receptor de agua pura.....	65
5.	Puesta en marcha.....	66
5.1.	Verificación del caudal.....	67
5.2.	Montaje Final	68
6.	Conclusión.....	71
7.	Bibliografía	73
8.	Anexos.....	76
8.1.	Planos cámara de humidificación.....	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2- 1.	Esquema de los distintos métodos de desalinización solar. Fuente [4]	4
Figura 2- 2.	Diagrama con las distintas clasificaciones de los sistemas HDH. Fuente: elaboración propia.....	5
Figura 2- 3.	Esquema de sistema HDH a contraflujo con configuración CAOW, acoplado a colector solar encargado de calentar agua salada. Fuente: [4].	7
Figura 2- 4.	Sistema propuesto por Giwa et al. . Fuente: extraído de referencia [5].....	8
Figura 2- 5.	Modelo de PVT utilizado por Giwa et al. Fuente: extraído de referencia [5].	8
Figura 2- 6.	Sistema estudiado por B. Anand y T. Srinivas. Fuente: extraído de referencia [6].....	9
Figura 2- 7.	Sistema estudiado por Gabrielli et al.. Fuente: extraído de referencia [7].....	9
Figura 2- 8.	Diagrama esquemático e instrumentación del banco de pruebas experimentales. Fuente: [3].....	10
Figura 2- 9.	Línea temporal de memorias sobre Desalinización HDH desarrolladas en la Universidad Federico Santa María.	11
Figura 2- 10.	Esquema de sistema HDH de Mauricio Reyes. Fuente: [4]	12
Figura 2- 11.	Esquema del diseño de la planta HDH de dos etapas a construir. Fuente [9]	13
Figura 2- 12.	Esquema tradicional de sistema HDH solar acoplado a colectores solares. Fuente [4].	15
Figura 2- 13.	Esquema del sistema HDH con humidificador PVT.	16
Figura 3- 1.	Vista Isométrica del prototipo de desalinización HDH. Fuente: Elaboración propia....	18
Figura 3- 2.	Vista lateral derecha del prototipo de desalinización HDH. Fuente: Elaboración propia.	19
Figura 3- 3.	Vista Superior del prototipo de desalinización HDH. Fuente: Elaboración propia.	19
Figura 3- 4.	Vista isométrica del Humificador PVT. Fuente: Elaboración propia.....	20
Figura 3- 5.	Grapa Final de 40 mm. Fuente: [14].....	20

Figura 3- 6. Vista del interior del Humificador y sus distintos componentes. Fuente: Elaboración propia.....	21
Figura 3- 7. Rociador SPIRELJET. Fuente: [15].....	22
Figura 3- 8. Aspersión cónica de un rociador. Fuente: [15].....	23
Figura 3- 9. Características técnicas del módulo fotovoltaico. Fuente: [22].....	23
Figura 3- 10. Modulo PV serie ASM6612P Series. Fuente: [22].....	24
Figura 3- 11. Detalle de las medidas del PV. Fuente: [22]	24
Figura 3- 12. Esquema de la ubicación de los rociadores y la superficie del PV alcanzada por el agua. Fuente: Elaboración propia.	25
Figura 3- 13. Referencia de la estructura del Humificador PVT.....	28
Figura 3- 14. Dimensiones principales del intercambiador de tubo y carcasa. Fuente: [24].....	28
Figura 3- 15. Serie de deshumificadores Modelos SP, incluye vista los tubos corrugados en el interior. Fuente: [24].	29
Figura 3- 16. Vista isométrica del deshumificador en su respectiva estructura y con las distintas conexiones del agua salada y Aire. Fuente: Elaboración Propia.....	30
Figura 3- 17. Descripción de las tuberías de PPR utilizadas. Fuente:[28].	31
Figura 3- 18. Fittings PN-25 utilizados. Fuente: [28].	32
Figura 3- 19. Máquina de termofusión. Fuente: Elaboración propia.	32
Figura 3- 20. Tramo que transporta el aire que ingresa al humificador. Fuente: Elaboración propia.	33
Figura 3- 21. Extractor Centrifugo VK-125. Fuente: [25]	34
Figura 3- 22. Potenciómetro. Fuente: [26].	34
Figura 3- 23. Ducto Flexible de aluminio con recubrimiento en PVC. Fuente: [27].	34
Figura 3- 24. Salida de estanque de PVC hidráulico HE/Sol. BSP 4". Fuente [29].....	35
Figura 3- 25. Vista isométrica de los sifones utilizados en el tramo de la entrada de aire (imagen de la izquierda). Además, se muestra la trampa de agua generada al interior del sifón (imagen de la derecha). Fuente: Elaboración propia.....	35
Figura 3- 26. Receptor de Agua pura. Fuente: Elaboración propia.....	36
Figura 3- 27. Tramo de la salida del aire del humificador. Fuente: Elaboración propia.	37
Figura 3- 28. Succión del agua salada. Fuente: elaboración propia.	38
Figura 3- 29. Estanque de agua salada. Fuente:[30].....	38
Figura 3- 30. Filtro tipo Y. Fuente: [16]	39
Figura 3- 31. Curva de la bomba LRP25-70/130. Fuente: [31].....	41
Figura 3- 32. By-pass de la unidad de filtrado. Fuente: Elaboración propia.....	42
Figura 3- 33. Tramo de la entrada del agua al humificador después del deshumificador. Fuente: Elaboración propia.	43
Figura 3- 34. Tramo que transporte el agua de retorno al estanque de agua salada. Fuente: Elaboración propia.....	44
Figura 3- 35. Curva de la bomba GRS 25/6 Marca TAIFU. Fuente: [32]	45
Figura 3- 36. Esquema con los distintos puntos de medición. Fuente: Elaboración propia.	46
Figura 3- 37. Manómetro utilizado en el desalinizador. Fuente: [16].	47
Figura 3- 38. Caudalímetro utilizado. Fuente: [33].	47
Figura 3- 39. Termistores PT-100. Fuente: [34].	48
Figura 3- 40. Sensor de nivel de líquido sin contacto. Fuente: [35].	49
Figura 3- 41. Válvula solenoide. Fuente: [36].	50
Figura 3- 43. Datalogger CR310. Fuente: [37].	51

Figura 3- 44. Vista lateral izquierda. Fuente: Elaboración propia.	52
Figura 3- 45. Vista frontal. Fuente: Elaboración propia.....	52
Figura 4- 1. Estructura del humidificador PVT.....	53
Figura 4- 2. Estructuras del deshumificador, la unidad de filtrado, calentador de agua, soportes y el extractor de aire.....	54
Figura 4- 3. Vista Frontal y trasera de la cámara de humidificación.	55
Figura 4- 4. Ramal de los rociadores instalado en el humidificador.	56
Figura 4- 5. Deshumificador instalado en su respectiva estructura, junto el estanque del agua salada y la estructura de la unidad de filtrado.	57
Figura 4- 6. Unidad de filtrado.....	57
Figura 4- 7. Disposición de los equipos del desalinizador.	58
Figura 4- 8. Vista trasera de la ubicación de los equipos.	58
Figura 4- 9. Salidas de estanque de PVC de 4” utilizadas en el humidificador.	58
Figura 4- 10. Conexión de las tuberías de PPR utilizadas para conector los equipo.....	59
Figura 4- 11. Conexiones de PPR entre el extractor y el deshumificador.....	60
Figura 4- 12- Vista frontal de las conexiones en PPR entre el extractor y el humidificador.	60
Figura 4- 13. Conexión entre la unidad de filtrado y el deshumificador.....	60
Figura 4- 14. Extractor junto con los ductos flexibles y las abrazaderas (izquierda). Potenciómetro (derecha).....	61
Figura 4- 15. Vista de la succión del agua salada.	62
Figura 4- 16. Filtro Y.	62
Figura 4- 17. Bomba Circuladora de la succión del agua salada.....	62
Figura 4- 18. Sifón y bomba del retorno de la salmuera.	63
Figura 4- 19. Manómetros a la entrada y salida de la unidad de filtrado.	64
Figura 4- 20. Manómetro de glicerina y flujómetro en la conexión de la entrada del agua al humidificador.	64
Figura 4- 21. Sensor PT100.....	65
Figura 4- 22. Botella graduada junto con el solenoide y el estanque de agua pura.....	65
Figura 4- 23. Receptor y sifón de agua pura.	65
Figura 5- 1. Vista frontal de la cámara de humidificación de los rociadores.....	67
Figura 5- 2. Montaje final del desalinizador HDH.....	69
Figura 5- 3. Destilado de agua pura. La primera línea corresponde cuando al comienzo de la prueba, la segunda a la hora de funcionamiento y la tercera al término de la prueba.	70
Figura 8- 1. Plano 1 de la cámara de humidificación.....	76
Figura 8- 2. Plano 2 de la cámara de humidificación.....	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3- 1. Información Correspondiente a los rociadores. Fuente: Elaboración propia.	22
Tabla 3- 2. Características técnicas del intercambiador de tubo y carcasa. Parámetros A, B, C y D correspondientes a la figura 3-11.	29
Tabla 3- 3. Características técnicas de Extractor VK-125.	33
Tabla 3- 4. Características técnicas de la bomba utilizada para la alimentación de agua salada.	41
Tabla 3- 5. Características técnicas de la bomba de retorno del agua salada.	45
Tabla 3- 6. Características técnicas del Flujómetro	48
Tabla 3- 7. Características técnicas del sensor de nivel.	50
Tabla 3- 8. Características técnicas de la válvula solenoide.	50
Tabla 5- 1. Primera prueba de medición del caudal	67
Tabla 5- 2. Segunda prueba de medición del caudal.	68

1. Introducción

1.1. Introducción

Actualmente, las sequías y la escasez de agua dulce son temas preocupantes tanto a nivel nacional como internacional. Sumado a esto, existen elementos como el crecimiento de la población, migración e industrialización que han contribuido en el aumento del consumo de agua, generando una sobreexplotación de este recurso, por ende, se ha vuelto primordial la búsqueda de una solución a este gran desafío.

Analizando el contexto hídrico, según el último informe del Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos 2020 [1] de la ONU indica que el consumo de agua ha estado creciendo a más del doble de la tasa de aumento de la población en el siglo. Asimismo, considerando que alrededor de 4 mil millones de personas viven bajo condiciones de escasez de agua física severa, durante al menos un mes al año y casi una cuarta parte de la población mundial, carecen de la infraestructura necesaria para acceder al agua [1]. Además, dentro de 10 años, incluso aumentando la eficiencia en el consumo, la humanidad requeriría un 40% más de la cantidad de agua dulce de la que la Tierra puede suministrar hoy en día [2]. De esta manera, se estima que el consumo de agua a nivel global implementado para la agricultura representa un 70% del total de las extracciones y se calcula que el 15% del consumo de agua dulce se destina al sector de la generación de energía eléctrica, que para el año 2035 se espera un aumento de un 20%, de acuerdo con estimaciones de la Agencia Internacional de Energía (IEA). Por lo que la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) calcula que generar una solución a esta problemática tiene un impacto significativo a nivel social e industrial [3].

Hoy por hoy, junto a la búsqueda de una solución a la escasez de agua potable, coexiste otro tema importante, que es la utilización de energías que sean eficientes y amigables con el medio ambiente. Una solución que cumple a cabalidad con ambos perfiles es la desalinización solar, específicamente, los sistemas HDH, por lo que el desarrollo de esta tecnología se vuelve tan conveniente en estos tiempos.

El sistema HDH funciona mediante un proceso de dos etapas, la humidificación y deshumidificación. La primera consiste en aumentar la humedad absoluta de un flujo de aire, en un

dispositivo conocido como “Humificador”. En cambio, la segunda disminuye la humedad del aire, en otro dispositivo llamado “Deshumificador” y es en este proceso que se obtiene el condensado de agua pura.

Estas plantas de desalinización solar HDH pueden tener distintas configuraciones y pueden tener acoplados uno o varios Humificadores o Deshumificadores junto con colectores solares y paneles fotovoltaicos, encargados de entregar calor al agua de mar y producir energía para las unidades mecánicas (Ventiladores y bombas), respectivamente. Cuando utilizan estos componentes en conjunto, se llaman sistemas de cogeneración.

Analizando las ventajas de los sistemas HDH, a pesar de que la concentración de sales del agua desalada con un sistema HDH es de las más altas (400 ppm) y que el costo de producción por métodos convencionales para estos sistemas ronda los 3.39 dólares por m^3 [3], la desalinización HDH es una de alternativas más atractivas para la purificación de agua salada a pequeña escala en localidades remotas en donde no se cuente con una conexión a la red eléctrica, ya que permite una mayor diversificación en la aplicación de fuentes alternativas de energía, puesto que la energía térmica que usa es de baja temperatura, además de ser sistemas de desalinización de bajo consumo de energía eléctrica.

Desde el año 2015, en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María se han realizado modelaciones, diseños y construcciones de sistemas de desalinización HDH, finalizando el año 2019 con la construcción de un desalinizador por etapas. En ese mismo año, se realizó la inscripción de la patente N°201901906 [8], por parte del equipo de desalinización de la Universidad correspondiente a un Humificador de aire, compuesto por un panel fotovoltaico acoplado a una cámara de humidificación, con una entrada y salida de aire y un rociador encargado de suministrar el agua de mar.

Este Humificador es planteado como un humificador PVT, puesto que consiste en un dispositivo híbrido conformado por un panel fotovoltaico al que está asociado a un intercambiador de calor, en este caso la cámara de humidificación, capaz de calentar un fluido (Agua salada) gracias a la parte de radiación solar no convertida a energía eléctrica.

Por último, la propuesta de este trabajo es desarrollar un equipo desalinizador por el método de humidificación-deshumidificación (HDH) acoplado con energía solar por medio de un Humificador

con un sistema PVT implementado el concepto propuesto en la patente anteriormente mencionada. De esta manera, se busca generar una innovación tecnológica con una solución sostenible en el tiempo otorgando accesibilidad de agua dulce.

1.2. Objetivos

1.2.1. General

El objetivo general de este trabajo es diseñar y construir un equipo desalinizador por el método de humidificación-deshumidificación (HDH) acoplado a un sistema híbrido compuesto de un colector fotovoltaico PVT.

1.2.2. Específicos

Para cumplir con el objetivo general se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Estudiar el estado del arte de los sistemas PVT y de la desalinización por método de humidificación-deshumidificación (HDH) para obtener sus parámetros principales de funcionamiento.
- Diseño de los equipos adecuados para el sistema de desalinización y PVT.
- Construcción y montaje del sistema desalinizador y PVT.
- Puesta en marcha del equipo desalinizador adecuado a las condiciones de lugar.

2. Estado del arte

2.1. Principios de la Desalinización por HDH

La desalinización consiste en separar la sal que proviene del agua de mar o salobre, resultando dos productos; agua potable o agua pura y salmuera de rechazo. El enfoque de este trabajo es la desalinización solar, que consiste en realizar dicho proceso, utilizando la radiación solar ya sea como fuente de calor (Solar Térmicos) o para la generación eléctrica (Solar Fotovoltaico), y la cual posee distintos métodos, como se observa en la figura 2-1.

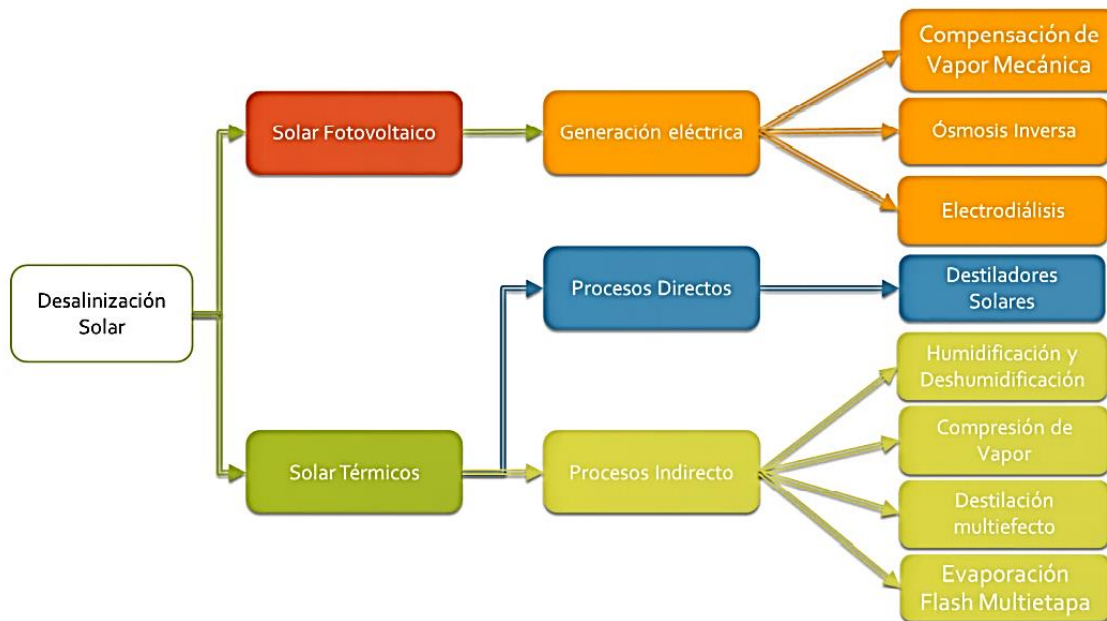


Figura 2- 1. Esquema de los distintos métodos de desalinización solar. Fuente [4].

Dependiendo del sistema de desalinización solar, se podrá utilizar un campo de colectores, en el caso de requerir energía térmica o paneles fotovoltaicos si se necesita energía eléctrica. Sin embargo, existen casos en que se utilizan ambos equipos, estos se conocen como sistemas de cogeneración.

El sistema que específicamente se estudiará corresponde a los sistemas humidificación-deshumidificación (HDH). Este plantea ciertas ventajas como el no requerir un mantenimiento tan complejo ni periódico, ya que se utilizan componentes comunes como lo son bombas y ventiladores. Además, al utilizar estos equipos el consumo eléctrico es relativamente bajo. Asimismo, otra propiedad atractiva es que la temperatura del agua salada de entrada al sistema no tiene que alcanzar

el punto de ebullición (100 °C) para convertirse en humedad, por lo cual los procesos térmicos son de baja temperatura. Por consiguiente, esto se hace interesante para comunidades pequeñas con cercanías a costas u otras fuentes de agua salobre.

Un desalinizador HDH consiste en dos equipos principales, en los que se hace ingreso de dos fluidos que, al entrar en contacto, intercambian calor y masa. El primer componente es la cámara de humidificación donde se hace circular agua salada y aire, este último absorbe humedad por medio de la evaporación del agua. Posterior a esto, el aire entra en otro equipo, conocido como Deshumificador, en esta etapa se recupera una proporción importante de calor al usar el agua salada como fluido de enfriamiento en el condensador, aprovechando así el calor latente de condensación del aire húmedo para producir el agua pura y precalentar el agua salada.

Por otro lado, estos sistemas se pueden clasificar de distintas maneras, como se puede observar en figura 2-2. La primera, depende de la dirección de los flujos de los fluidos de trabajo, tanto en el Humificador como en el Deshumificador, en el que existen tres tipos; Flujos Paralelo, Contraflujo o Flujos Cruzados. En los flujos paralelos, los fluidos que intercambian calor se mueven en la misma dirección. Por el contrario, los flujos contraflujos se mueven en direcciones opuestas. Por último, los flujos cruzados, se mueven de manera perpendicular respecto el uno al otro.

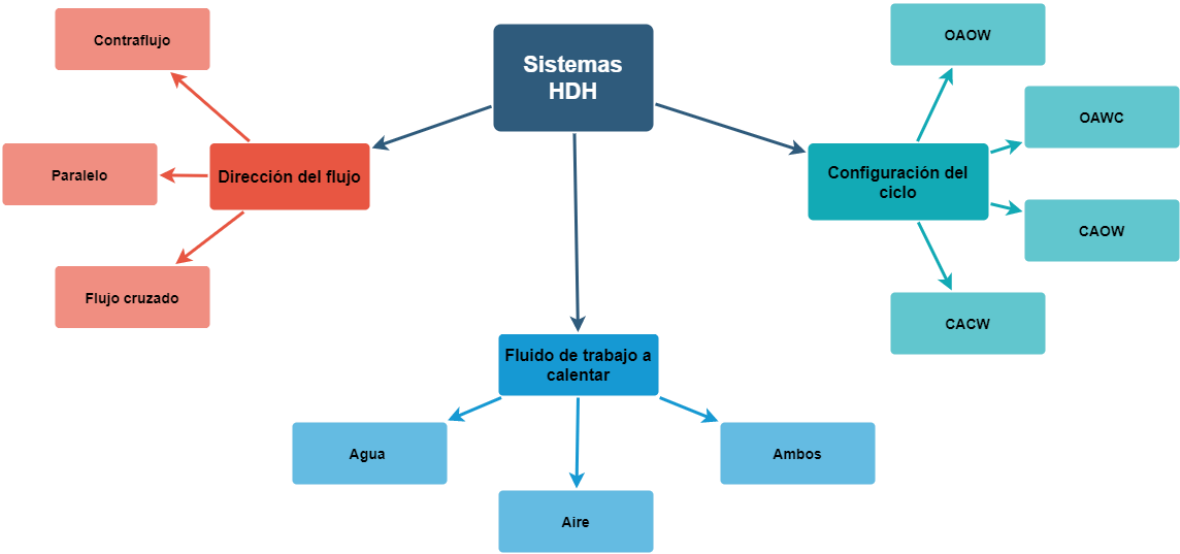


Figura 2- 2. Diagrama con las distintas clasificaciones de los sistemas HDH. Fuente: Elaboración propia.

En la segunda clasificación, el criterio se basa en el fluido de trabajo que se procede a calentar, ya que antes de ingresar a la cámara de humidificación, se puede aumentar la temperatura del agua salada, el aire o ambos.

La última clasificación, corresponde a la configuración del ciclo. Cabe mencionar que un ciclo puede ser cerrado, en donde el fluido, luego de haber recorrido los componentes del ciclo, repite la secuencia anterior. Por el contrario, cuando el fluido no vuelve a entrar al sistema después de terminar su recorrido, el ciclo será abierto. De esta forma se puede obtener cuatro configuraciones, según la combinación del agua salada y aire al estar en un ciclo abierto o cerrado. Así las configuraciones posibles son las siguientes:

1. CAOW: Corresponde a los sistemas HDH de ciclo de aire cerrado y de agua abierto, en el cual el aire circula en un circuito cerrado entre el humidificador y el deshumidificador, mientras el agua salada al final del proceso es eliminada del sistema.

2. CWOA: Corresponde a sistemas HDH de ciclo de aire abierto y ciclo agua cerrado, donde el aire que es calentado, humidificado y parcialmente deshumidificado, se deja escapar al ambiente y la salmuera se calienta y se regresa nuevamente al evaporador con un incremento de agua de mar como repuesto al agua evaporada.

3. OWOA: Corresponde a sistemas HDH de ciclo de aire y de agua abiertos, en este caso los dos fluidos se desechan del sistema después de pasar por el proceso de evaporación y condensación.

4. CACW: Corresponde a sistemas HDH de ciclo de aire y de agua cerrados, en este caso los dos fluidos no se eliminan del sistema después de pasar por el proceso de evaporación y condensación.

A modo de ejemplo, en la figura 2-3 se puede ver un esquema simplificado con las tres clasificaciones anteriormente mencionadas y su respectiva configuración.

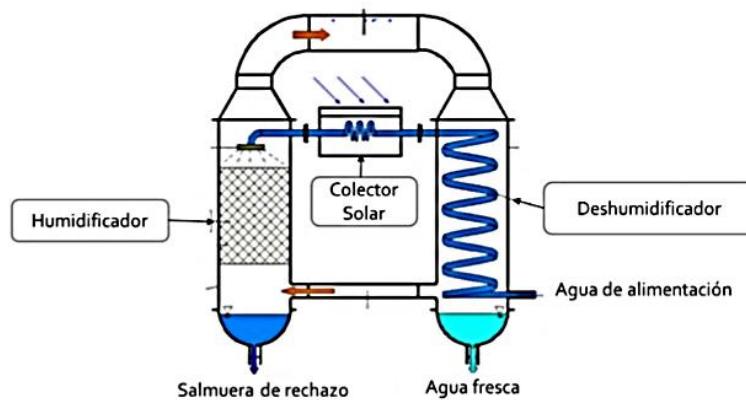


Figura 2- 3. Esquema de sistema HDH a contraflujo con configuración CAOW, acoplado a colector solar encargado de calentar agua salada. Fuente: [4].

Estas características permiten tener un gran espectro de rendimientos según la configuración utilizada. Por ende, existen diversos trabajos que han determinado los desempeños de cada una de las configuraciones anteriormente mencionadas, por lo que se puede determinar el sistema más eficiente y con menor costo para su fabricación. Cada uno de estos trabajos serán profundizados en la siguiente unidad.

2.2. Precedentes teóricos y experimentales de la Desalinización Solar HDH

La desalinización ha sido aplicada hace ya bastantes años. Sin embargo, en el 2016 se propuso un modelo muy particular, como se observa en la figura 2-4, ya que combinaba la desalinización HDH con los sistemas PVT, generando energía eléctrica y agua pura. Giwa et al. [5] propuso un sistema CAOW con un PVT de aire (véase figura 2-5) ubicado después del deshumificador y antes del humificador. Logrando obtener un aumento de la eficiencia eléctrica del 3,1 % en los paneles y una producción de aproximadamente 2,29 [kg/día] y 278 [kWh].

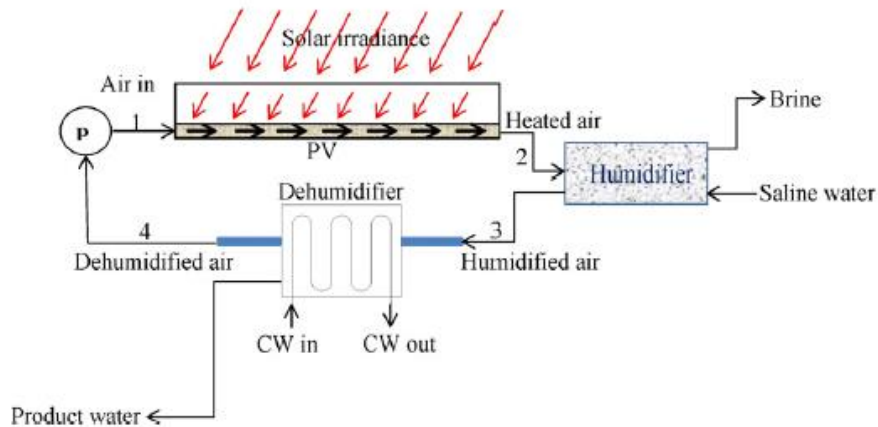


Figura 2- 4. Sistema propuesto por Giwa et al. Fuente: extraído de referencia [5].

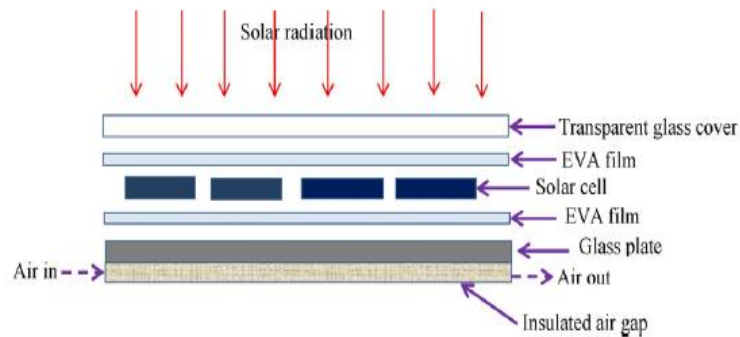


Figura 2- 5. Modelo de PVT utilizado por Giwa et al. Fuente: extraído de referencia [5].

En otro estudio, B. Anand y T. Srinivas combinaron un sistema HDH con un PVT de agua de placa y tubo, como se observa el esquema representado en la figura 2-6. De esta manera, establecieron algunas conclusiones, como, por ejemplo, si aumentan el flujo másico del fluido de refrigeración en el panel, mejorarán la eficiencia, pero disminuirán las temperaturas de salida de los PVT. Establecieron los máximos parámetros de funcionamiento para su prototipo y de esta manera lograr la mayor obtención de agua, los resultados fueron $0,41 \frac{L}{hr}$ por m^2 de área de colección con una radiación de $1000 \frac{W}{m^2}$ y un caudal masico de entrada de $30 \frac{kg}{hr}$.

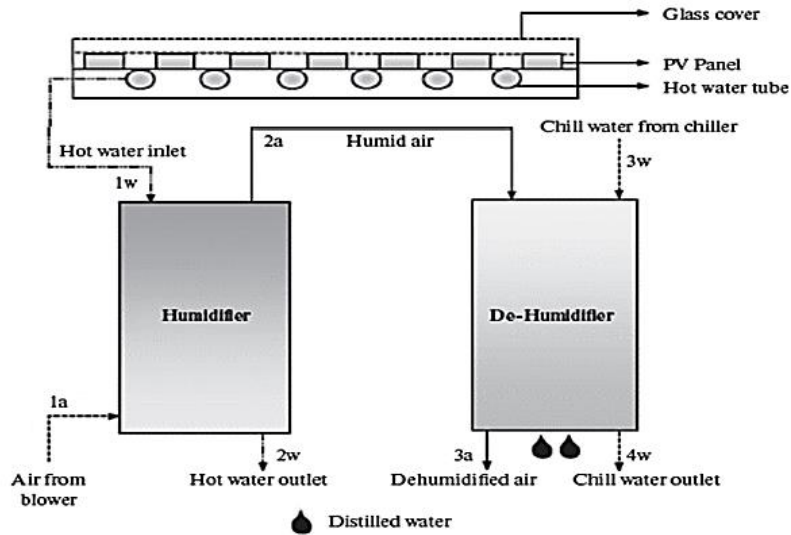


Figura 2- 6. Sistema estudiado por B. Anand y T. Srinivas. Fuente: extraído de referencia [6]

En el año 2019, se realiza uno de los estudios más recientes sobre los sistemas HDH-PVT, Gabrielli et al. realiza un análisis tecnológico - económico del rendimiento de una planta CAOW, según el esquema de la figura 2-7, por medio de un modelamiento numérico. Llegando por conclusión que estos tipos de plantas son recomendadas para zonas que no puedan conectarse a la red eléctrica o su costo sea muy alto y cuyo consumo de agua no sea tan alto para analizar la opción de otras tecnologías más costosas y complejas.

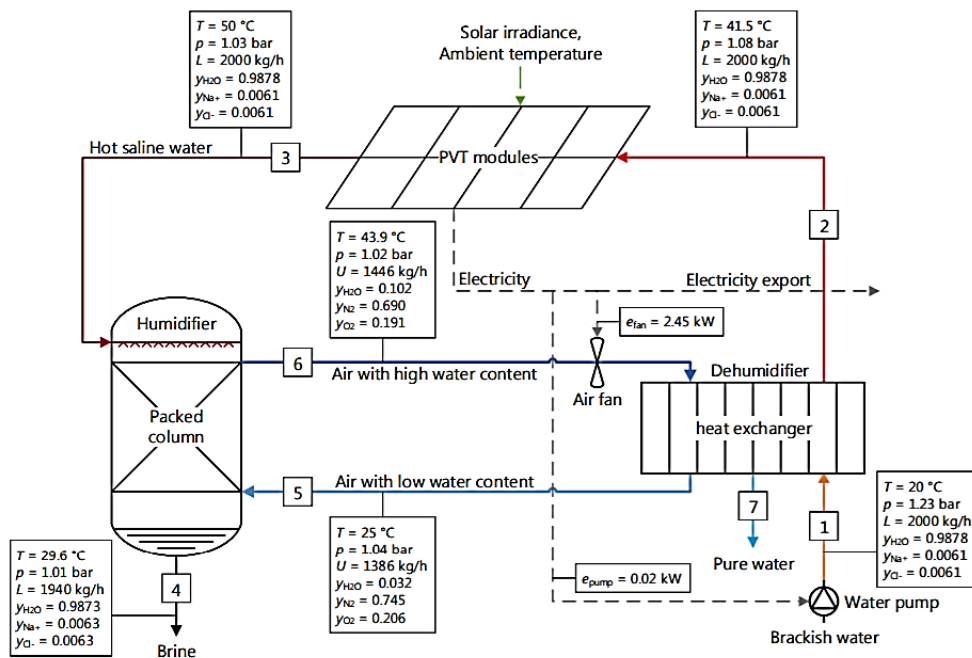


Figura 2- 7. Sistema estudiado por Gabrielli et al. Fuente: extraído de referencia [7].

Por otro lado, en el año 2019, se presenta una investigación numérica y experimental de un sistema de desalinización por humidificación-deshumidificación, empero, se utiliza otro tipo de tecnología, como se observa en el esquema de la figura 2-8, los cuales son intercambiadores de calor de contacto directo tanto en el humidificador como el deshumidificador, donde se hace pasar el agua por medio de rociadores y aire por medio del ventilador a contraflujo, sin un material de relleno entre sí. Se realizó un estudio experimental donde se obtuvo un GOR de 0,58, el cual fue relativamente bajo, ya que no se consideró ningún proceso de recuperación de calor. Además, se obtuvo una producción de $3,2 \frac{L}{día}$, con un suministro de energía térmica de 88 kWh. Por último, estos resultados experimentales se compararon con los teóricos obteniendo errores relativos no mayores al 10% para las temperaturas del aire de salida del humidificador y errores relativos menores a un 4.5% para la temperatura de salida del deshumidificador.

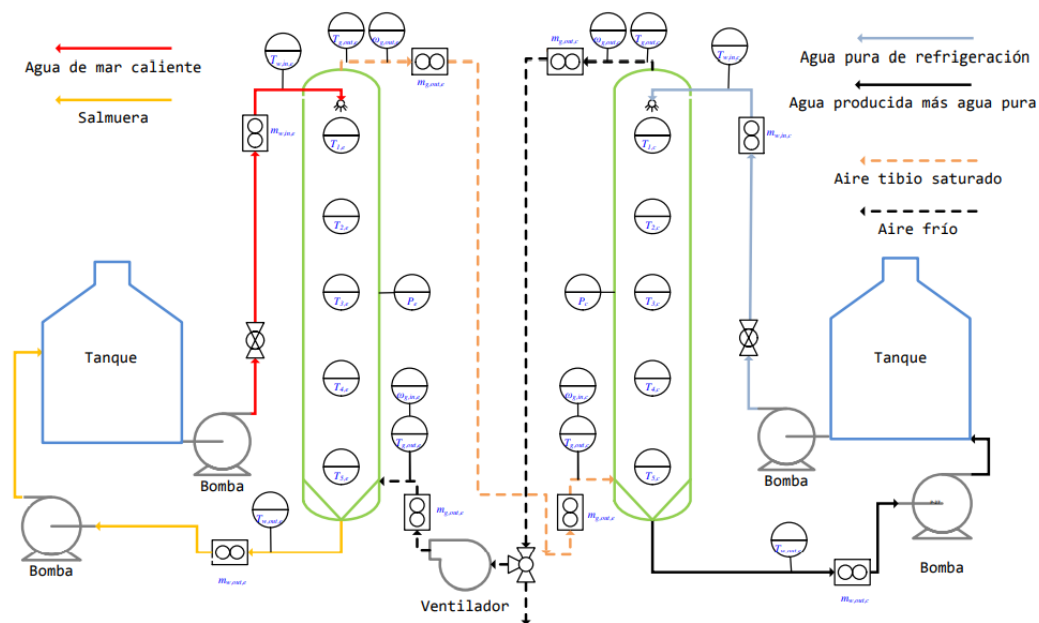


Figura 2- 8. Diagrama esquemático e instrumentación del banco de pruebas experimentales. Fuente: [3].

Por otro lado, en la Universidad Técnica Federico Santa María, se han realizado simulaciones y prototipos a cargo del Departamento de Ingeniería Mecánica desde el 2015. Estos sistemas se han ido mejorando a lo largo de los años, ya sea, en costos de construcción, eficiencia energética y producción de destilado. En la figura 2-9 se puede visualizar las distintas memorias de los sistemas HDH desde el 2015 hasta la actualidad.



Figura 2- 9. Línea temporal de memorias sobre Desalinización HDH desarrolladas en la Universidad Federico Santa María. Fuente: Elaboración propia.

Constructivamente, se logró crear el primer prototipo HDH acoplado con energía solar en el año 2017 por Mauricio Reyes [4]. El funcionamiento de este sistema se inicia con el agua salada llegando al deshumidificador, captando el calor del aire humedecido y luego pasando a un intercambiador de calor, el cual consiste en un IDC de placas, calentándose nuevamente, donde finalmente llegará al Humificador, rociando agua sobre una malla, la que es atravesada por un flujo de aire que se calentara y aumentara su humedad absoluta manteniendo su humedad relativa constante. Por otro lado, se tiene otro sistema, el cual consiste en unos colectores donde se recirculará el agua captando la radiación solar y entregando esta energía por medio de un intercambiador de placas anteriormente mencionado. Por último, se tiene un sistema destinado al aire, el cual consiste en un ventilador que lo impulsara por el humificador y el deshumidificador. En la figura 2-10 se muestra un esquema simplificado del sistema de desalinización por este método.

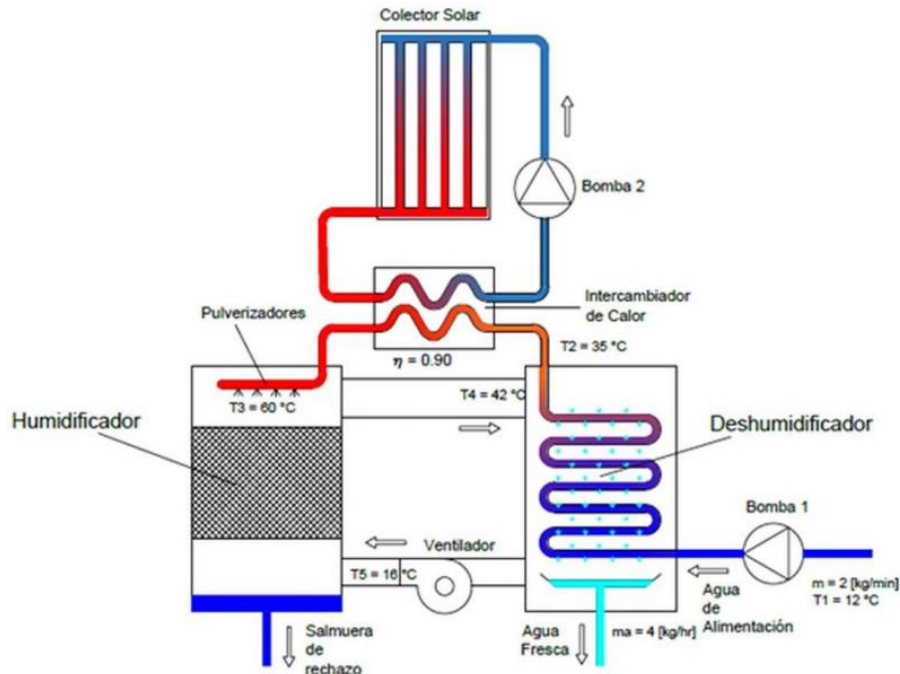


Figura 2- 10. Esquema de sistema HDH de Mauricio Reyes. Fuente: [4].

2.3. Sistemas de desalinización Actualmente utilizado

Posterior al trabajo de Mauricio Reyes, Aburto [10] realizó mejoras y reacondiciono este prototipo para tener un mejor desempeño. Después de finalizar estos mejoramientos, diseñó un nuevo equipo con la finalidad de obtener una mayor cantidad de agua pura y, además, tener varias configuraciones posibles, logrando de esta manera poder experimentar el desempeño de estas. En paralelo, Leiva [17] desarrollaba un modelo numérico mediante el software EES que serviría para adaptarlo finalmente a este diseño. En este estudio se analizaron numéricamente todas las posibles configuraciones (CAOW, CWOA, OWOA, CACW) y llegando a la conclusión que la mejor configuración es CAOW. Finalmente, Rodríguez [9] logró combinar este modelo numérico con el diseño, realizando la construcción y puesta en marcha de este nuevo sistema.

Este sistema se encuentra en el LER (Laboratorio de energías renovables) perteneciente a la Universidad, sede de Viña del Mar, Valparaíso. Este consiste en dos humidificadores y dos deshumificadores, de esta manera se logra que funcione en dos etapas gracias a un sistema de válvulas, permitiendo que funcione con ambos humidificadores en serie o en paralelo y con ambos deshumificadores en serie o en paralelo.

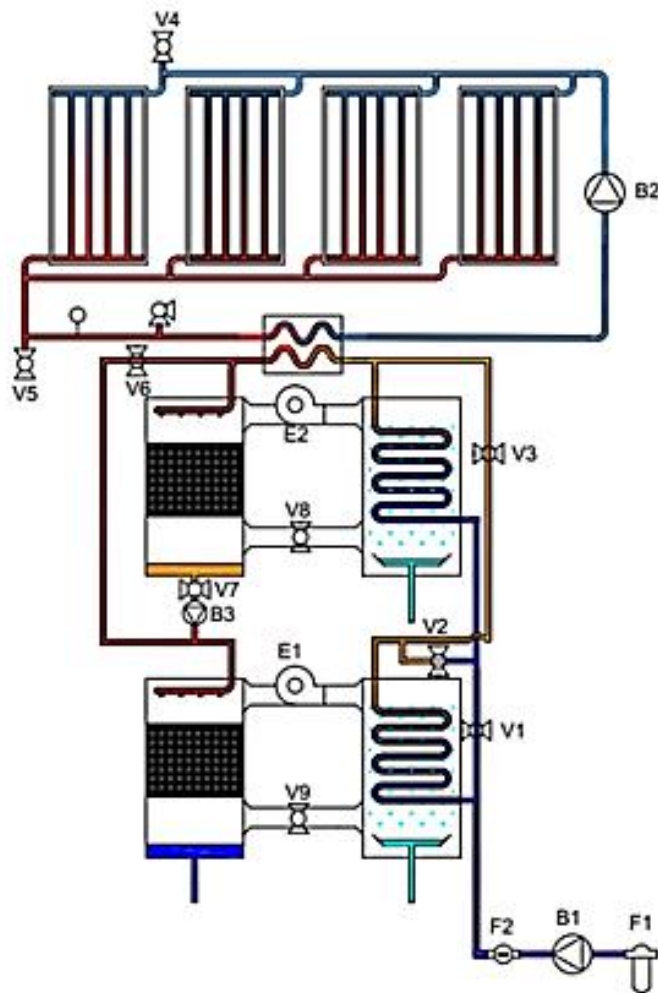


Figura 2- 11. Esquema del diseño de la planta HDH de dos etapas a construir. Fuente [9].

Como se observa en la Figura 2-11, los humidificadores y deshumidificadores se pueden acoplar en paralelo o en serie según la posición de las válvulas V1, V2, V3, V4, V6 y V7. De esta manera, se pueden establecer cuatro configuraciones, las cuales serán presentadas a continuación:

- A. Deshumidificadores y humidificadores conectados en paralelo: Este sistema funciona con ambos equipos en paralelo, mediante las posiciones de 5 válvulas; V6 abierta y V7 cerrada para el humidificador y las válvulas V1, V3 abierta y V2 cerrada en el deshumidificador.

- B. Deshumidificadores y humidificadores conectados en Serie: Este sistema funciona con ambos equipos en Serie, mediante las posiciones de 5 válvulas; V6 cerrada y V7 abierta para el humidificador y V1, V3 cerradas y V2 abierta en el deshumidificador.

- C. Deshumidificadores conectados en paralelo y humidificadores conectados en serie: Este sistema funciona con un comportamiento distinto entre el humidificador y el deshumidificador, a través de las posiciones de 5 válvulas; V6 cerrada y V7 abierta para el humidificador y las válvulas V1, V3 abiertas y V2 cerrada en el deshumidificador.
- D. Deshumidificadores conectados en serie y humidificadores conectados en paralelo: Este sistema funciona mediante las posiciones de 5 válvulas; V6 abierta y V7 cerrada para el humidificador y las válvulas V1, V3 cerradas y V2 abierta en el deshumidificador

Por lo tanto, como se ha visto en los últimos años, el principal desafío en que se ha dirigido el desarrollo de las nuevas tecnologías en sistemas HDH es crear nuevos diseños que sean más económicos y viables para su implementación, especialmente en zonas que sean aisladas de redes públicas de energía y litorales con regiones áridas. Las principales medidas que se han aplicado son, en primer lugar, modificar la configuración de estos sistemas y la segunda es conectar otros aparatos térmicos, logrando de esta manera de mejor manera un mejor aprovechamiento en los fluidos de trabajo en estos sistemas. A continuación, se presentará.

2.4. Sistema de desalinización con incorporación de colector con aspersión PVT

Las unidades de desalinización comunes tienden a producir menos de 1 m³/día en agua destilada. A pesar de ello, se ha intentado aumentar esta producción a través de sistemas HDH acoplados con otros procesos energéticos como, por ejemplo, los sistemas PVT. Además, en conjunto de este aumento en la producción, está la búsqueda de reducir los costos de inversión y de esta manera, hacerlo más atractiva en la inversión de esta tecnología.

En los sistemas que se han desarrollado, el calentamiento de agua ocurre en equipos periféricos, como, por ejemplo, los colectores solares, tal como se muestra en la figura 2-12, que luego ingresan a la cámara de humidificación realizando el intercambio de masa (evaporación). En cambio, el sistema propuesto en este trabajo cambia este factor, en este se aprovecha el calentamiento de un panel PV para calentar aire y humidificarlo en forma simultánea. Para esto se fabrica un cámara de humidificación acoplada a un panel PV, denominado Humificador PVT.

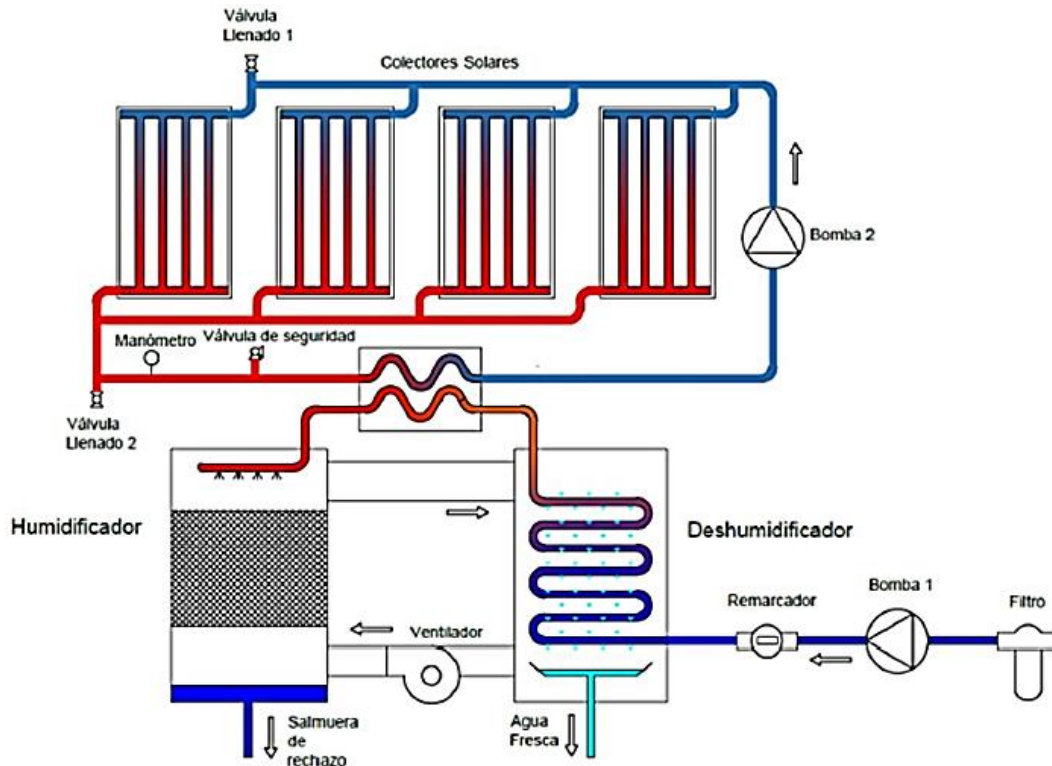


Figura 2- 12. Esquema tradicional de sistema HDH solar acoplado a colectores solares. Fuente [4].

Otro cambio que tiene este modelo es retirar el material de relleno en el humificador. Es sabido que este material es utilizado para mejorar la eficiencia de la tasa de evaporación del agua de mar, al aumentar al máximo el área de contacto entre agua de mar y aire, pero esto conlleva ciertos costos, como el alto valor de inversión y mantenimiento junto con la acumulación de sales e incrustaciones. De hecho, un estudio [3] plantea que el 4,85 % del costo total del sistema corresponde al relleno del humificador. Por lo tanto, al disminuir este relleno, se pueden disminuir los costos globales.

Para eliminar este relleno dentro del humificador se rociará agua de mar caliente en el flujo de aire. De este modo, el área de contacto entre estos fluidos será mucho menor, ya que corresponderá al área de las gotas de agua. Esta situación ya fue analizada en el trabajo [3] concluyendo que no se logra una diferencia notoria en la producción de agua destilada al dejar de utilizar este material.

La gran diferencia que ocurre en este sistema, en comparación con el modelo antiguo es que se unificará el sistema de calentamiento de agua con el Humificador. En el humificador PVT propuesto ocurren dos procesos simultáneamente, el intercambio de masa y energía. El agua pasa por

un cambio de fase producto del calor entregado del panel fotovoltaico por las pérdidas de calor entre la radiación que llega al panel y la energía eléctrica generada, que al encontrarse a distinta temperatura con el aire y tener una diferencia de concentración de vapor de agua con la interfase de gotas en el aire, esta agua se transforma a vapor de agua que se difundirá en el aire. Finalmente, por el proceso de evaporación de vapor de agua se produce la transferencia de masa y calor, provocando un aumento de temperatura y humedad en el aire. Por resultado, se tiene aire humidificado y gotas de agua, pero con una concentración salina mayor, conocida como salmuera.

El sistema final incluye el humidificador PVT junto con un Deshumificador, el mismo que fue utilizado en el sistema actual, visto en la sección anterior. A continuación, se presenta la figura 2-13, en el que se presenta el esquema del prototipo.

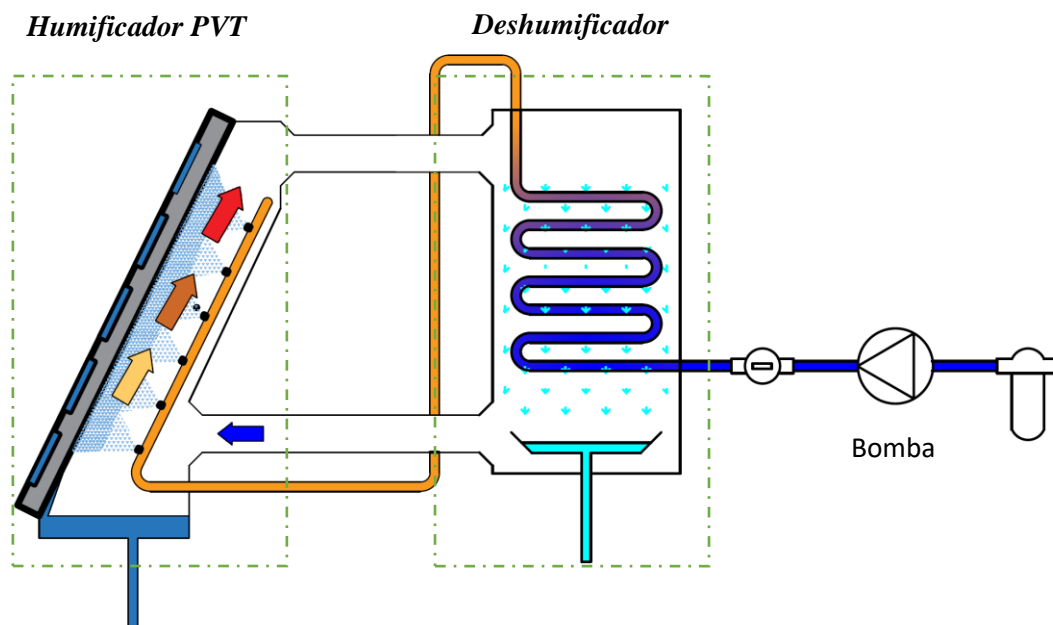


Figura 2- 13. Esquema del sistema HDH con humidificador PVT.

En primer lugar, en esta sección se recopiló la información general de la destilación solar HDH, presentando las distintas configuraciones y las que serán consideradas para el diseño. En segundo lugar, se seleccionaron y analizaron distintos modelos, diseños y experimentos de plantas y prototipos HDH PVT, obteniendo una perspectiva del panorama actual, llegando a la conclusión que estos tipos de plantas son recomendados especialmente para zonas que no puedan conectarse a la red eléctrica o que su costo sea muy alto y cuyo consumo de agua no sea tan alto para analizar la opción de otras tecnologías más costosas y complejas. Además, el uso de colectores PVT en sistemas HDH

se ha limitado al uso principalmente de tipo tubos y/o canales, en el que circula aire y/o agua por tubos captando el calor residual del panel fotovoltaico, por lo que este prototipo resulta totalmente novedoso en esta área.

Finalmente, se recopiló información para el desarrollo del diseño del prototipo, verificando que el relleno del humificador no logra una diferencia notoria en la producción de agua destilada, por lo que este material no será utilizado. Asimismo, la información obtenida de los dos prototipos anteriores desarrollados en el Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad será utilizada como base para el diseño que se presentará a continuación.

3. Diseño del prototipo de desalinizadora HDH

En este capítulo se presentará el proceso del dimensionamiento de los sistemas principales y la especificación de equipos primordiales utilizados en este proyecto. Además, se mostrarán las distintas vistas utilizadas para la instalación los distintos equipos y construcción del sistema desalinizador solar HDH, que serán expuestas en el capítulo siguiente.

En el capítulo dos se presentó el estado del arte de los sistemas HDH, donde se describieron las distintas configuraciones existentes. En este diseño se utilizó la configuración CACW (circuito cerrado de aire y agua), a pesar de que en los trabajos anteriores se demostró que se obtiene un mejor rendimiento en un circuito CAOW (circuito cerrado de aire y abierto de agua), se tendrá por prioridad el espacio, ya que al tener un sistema abierto de agua implicaría otro estanque de Agua, lo que aumentará el área utilizada. Por otro lado, como el enfoque principal es comprobar el funcionamiento y comportamiento del humificador PVT, el agua se calentará por medio del panel PV junto con un calentador instantáneo de agua, ubicado antes de entrar al humificador, reemplazando el uso de los colectores solares utilizados anteriormente. Por último, la dirección del flujo de los fluidos será Cruzado en el humificador y en Contraflujo en el des humificador.

Este diseño fue realizado en Autodesk Inventor Professional 2020. La configuración propuesta en las figuras 3-1, 3-2 y 3-3 de este dispositivo cuenta con los siguientes elementos: Humificador PVT; Unidad de deshumidificación; Entradas y salidas de las conexiones utilizadas en el humificador, encargadas de conectar con los otros equipos; Subsistemas de bombeo, tanto para la entrada como la salida del agua al humificador; Unidad de filtrado; Calentador instantáneo de agua, y el extractor del

aire. Los equipos serán alimentados en un principio por la red domiciliaria, pero en un futuro será adaptado para funcionar con el sistema fotovoltaico.

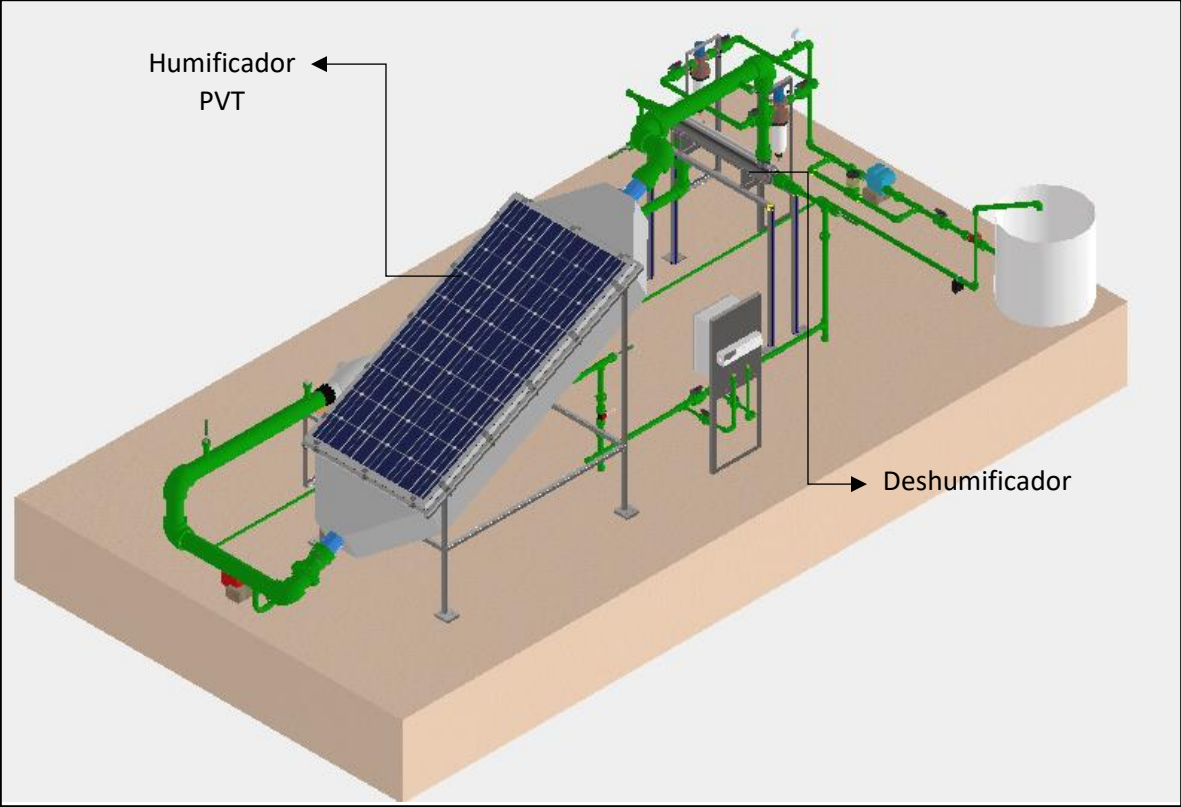


Figura 3- 1. Vista Isométrica del prototipo de desalinización HDH. Fuente: Elaboración propia.

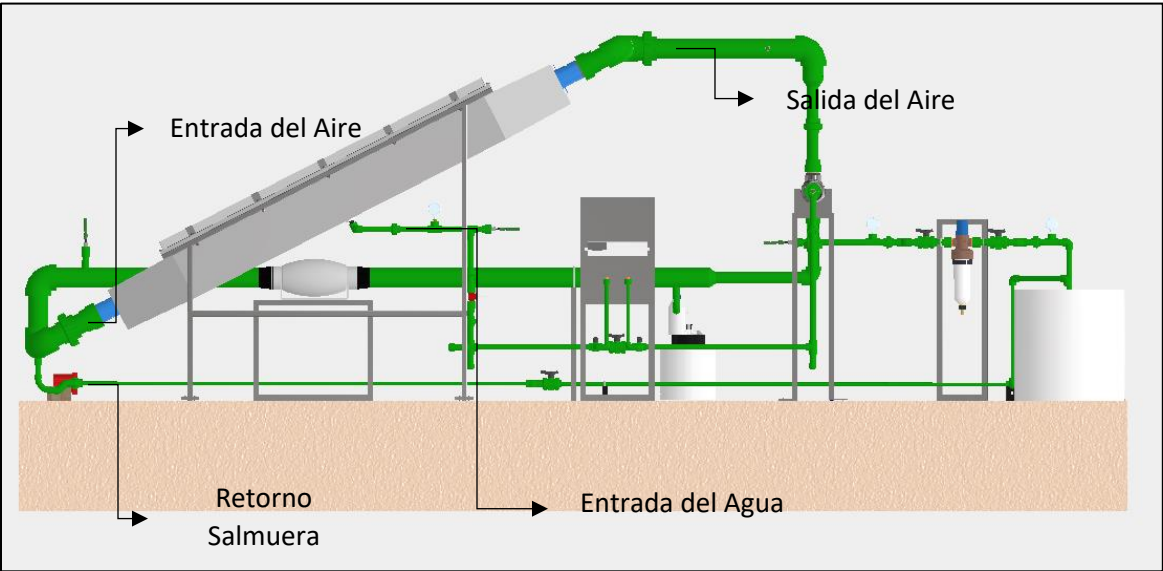


Figura 3- 2. Vista lateral derecha del prototipo de desalinización HDH. Fuente: Elaboración propia.

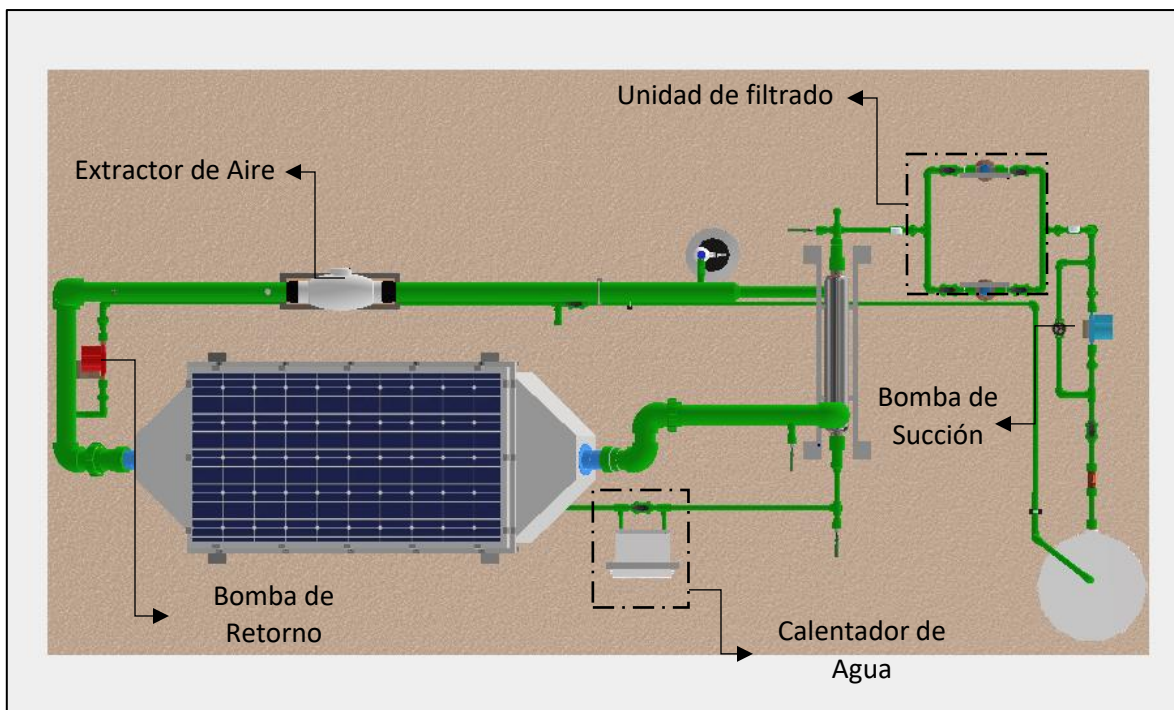


Figura 3- 3. Vista Superior del prototipo de desalinización HDH. Fuente: Elaboración propia.

3.1. Humificador

El equipo por diseñar consiste en un dispositivo compuesto por un Panel Fotovoltaico acoplado en la parte trasera a una cámara de humificación (véase Figura 3-4) unidos por medio de Grapas Finales de 50 mm de Aluminio (véase Figura 3-5), estas, además, generan presión de forma uniforme para asegurar la estanqueidad entre estas estructuras mediante un Sello de Caucho flexible multiuso de marca Mvp de 22x1,2x3000 mm, ubicado en medio de estas.

En su interior, el agua ya precalentada es rociada por un ramal de tubería (véase Figura 3-6) conectada a unos rociadores y esta es impactada en la zona anterior del PV, transfiriéndole el calor generado producto de la energía residual de la radiación que no se transforma en energía eléctrica. Luego, esta se transforma en vapor de agua donde se pone en contacto con el aire (sin estar saturado de vapor de agua), que es ingresado por la parte de abajo de la cámara, difundándose estos fluidos, resultando en la elevación de la humedad y temperatura del aire producto de la diferencia de concentración entre la interfase agua-aire y el vapor de agua en el aire, fluyendo por la parte superior

del humidificador. Por último, de este proceso se genera una salmuera de rechazo que se encuentra más fría al transferir el calor al aire y es desechada en contraflujo del aire que entra.

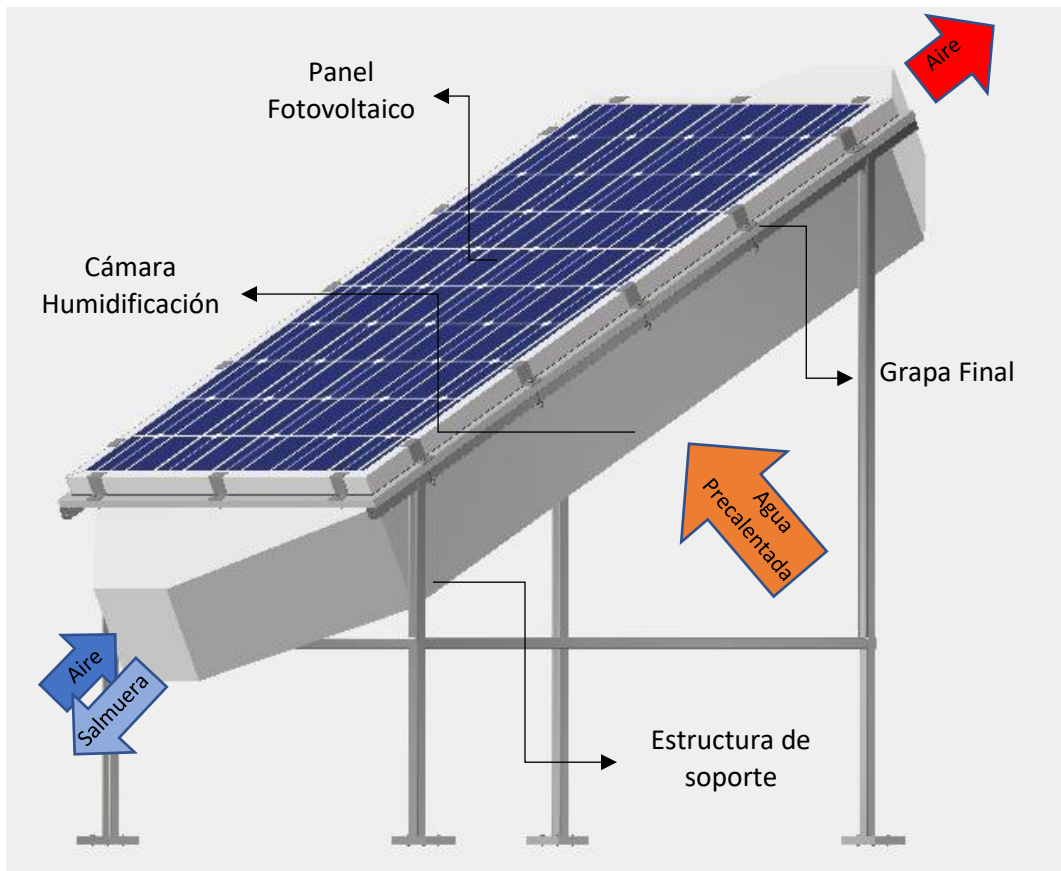


Figura 3- 4. Vista isométrica del Humidificador PVT. Fuente: Elaboración propia.



Figura 3- 5. Grapa Final de 40 mm. Fuente: [14].

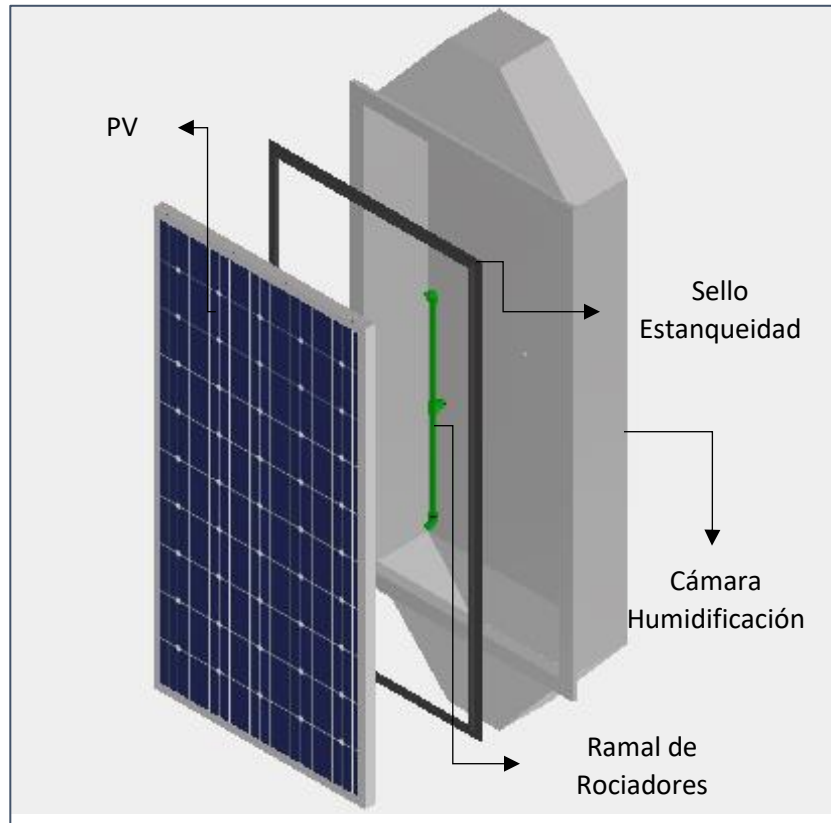


Figura 3- 6. Vista del interior del Humificador y sus distintos componentes. Fuente: Elaboración propia.

3.1.1. Rociadores

En el ramal de rociadores se conectan dos pulverizadores, cada uno en un extremo, permitiendo que el agua salada ingrese en forma de gotas en el interior del Humificador. Estos rociadores corresponden a las Boquillas SPIRALJET (véase figura 3-7) de aspersion estándar y cono lleno, modelo 1/4 HHSJ-SS1207, de la marca Spraying Systems. Estos fueron utilizados en la tesis de Rodríguez [9], demostrando un buen desempeño al tener un diámetro de boquilla grande, aproximadamente de 3,18 mm, permitiendo que no se generen obstrucciones por algún material que no se haya filtrado, además, está fabricado de acero inoxidable, material resistente a los desgastes que pudiera originar la corrosión del agua salada caliente.



Figura 3- 7. Rociador SPIRELJET. Fuente: [15].

Modelo	TF8 ¼ HHSJ-SS1207
Conexión	¼" BSP
Angulo de aspersión	120°
Diámetro nominal orificio [mm]	3,18
Capacidad a 0,7 bar [l/min]	4,96
Capacidad a 3 bar [l/min]	10,3
Coefficiente K	5,93
Material	Acero inoxidable AISI 316

Tabla 3- 1. Información Correspondiente a los rociadores. Fuente: Elaboración propia.

Estos aspersores generan un riego de cono lleno, tal como se logra visualizar en la figura 3-8, logrando cubrir una determinada área de la parte trasera del panel fotovoltaico. Dichos rociadores cumplen un papel esencial para el diseño de la cámara de humidificación, el cual será visto en profundidad en la siguiente unidad, definiendo las dimensiones para lograr la máxima área de rocío del panel.

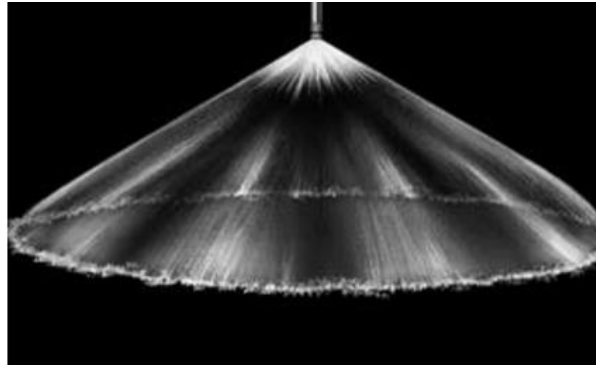


Figura 3- 8. Aspersión cónica de un rociador. Fuente: [15].

3.1.2. Panel Fotovoltaico

El módulo fotovoltaico utilizado corresponde al tipo policristalino de 310 W (véase figura 3-10) y tiene una superficie de $1,94 \text{ m}^2$. El cual presenta las siguientes características técnicas:

Eficiencia del módulo [%]	16
Tipo de celda	Policristalina
Números de celda	72
Dimensiones (LxWxH) [mm]	1956X994X50
Material del marco	Aluminio anodizado
Composición del modulo	Vidrio/ EVA/ Backsheet
Peso [kg]	23,5

Figura 3- 9. Características técnicas del módulo fotovoltaico. Fuente: [22].



Figura 3- 10. Modulo PV serie ASM6612P Series. Fuente: [22].

Además, como se observa en la figura 3-11, el panel presenta cables en su parte anterior, utilizados en caso de conectarlo con otros equipos para la generación eléctrica. Estos cables pueden ser posicionados hacia el exterior del humidificador por medio de prensas estopas conectadas en el marco de aluminio del panel, generando estanqueidad y aislamiento al momento de encontrarse en funcionamiento.

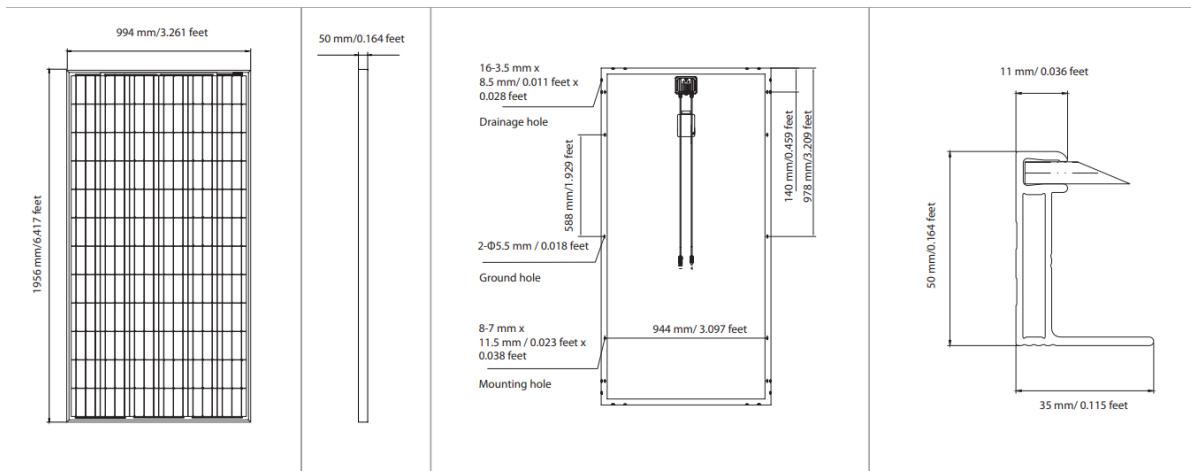


Figura 3- 11. Detalles dimensionales del PV. Fuente: [22] .

3.1.3. Cámara de Humidificación

La relación entre el diámetro del chorro de pulverización y la parte que debe ser rociada en el panel fotovoltaico es un parámetro esencial para el diseño de la cámara de humidificación, ya que, de ser menor, no se aprovechará totalmente el calor proveniente del panel. Por el contrario, si el diámetro de pulverización es mayor, impactará en las paredes de la cámara, volviendo ineficaz el sistema. Por lo tanto, con la configuración de los rociadores y del chorro entregado por estos, se puede encontrar la geometría adecuada para aprovechar al máximo el sistema y dimensionar de la mejor manera el equipo.

En la Figura 3-12, se muestra el planteamiento procedido para determinar el ancho de la cámara, el cual consiste, primero, en tener las dimensiones del área trasera del panel, de acuerdo con la ficha técnica del PV a utilizar, y luego, con los rociadores ubicados a una distancia simétrica desde el centro se proyectan el flujo cónico en un ángulo de 120° , resultando en 290 mm desde el punto donde comienza a salir el agua de los rociadores hasta el PV, por lo que es necesario adicionarle la medida desde el punto más alto del rociador hasta la base de la cámara, correspondiente al alto de la unión del ramal de rociadores y los aspersores, Finalmente, alcanzando una medida de 370 mm de ancho.

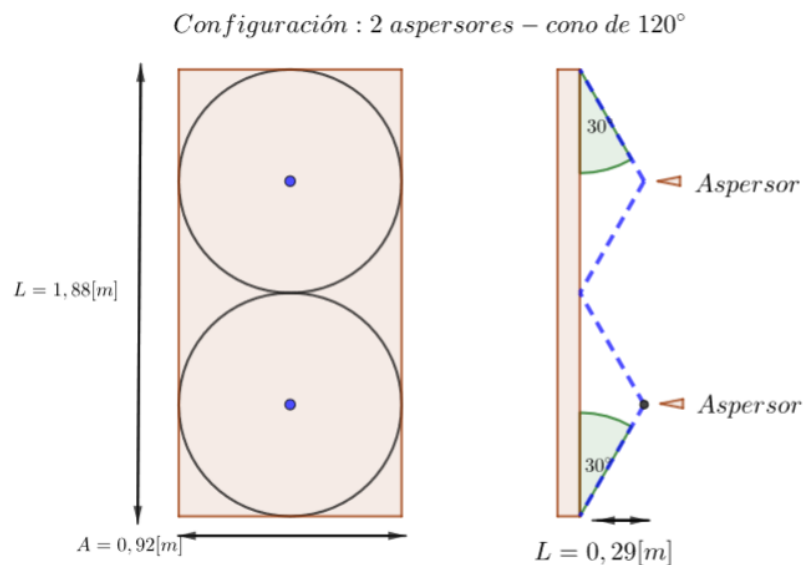


Figura 3- 12. Esquema de la ubicación de los rociadores y la superficie del PV alcanzada por el agua.

Fuente: Elaboración propia.

Otro parámetro que se tomó en cuenta es adaptar una superficie de apoyo para el panel fotovoltaico y las grapas, y de esta manera poder fijar estas dos estructuras. También, se le adicionaron conos de ensanchamiento y estrechamiento del flujo, de esta manera se evita que se generen recirculación del aire en el caso de tener esquinas con ángulos rectos y que afecte a la transferencia de calor.

Finalmente, el ultimo parámetro es el espesor de la base de estructura, para esto se utilizó la ecuación del libro de diseño de estanque rectangulares Magyesy, del año 1992 [20], esta ecuación consiste en:

$$t = 2,45 \cdot L \cdot \sqrt{\alpha_n \cdot \frac{P_n}{S}} \quad (1)$$

Donde t representa el espesor requerido en pulg, L corresponde a la longitud del tanque en pulg, α_n es un factor que depende de la longitud y altura, P_n es la presión del fluido (aire en este caso) en $\frac{lb}{pulg^2}$ y el valor del esfuerzo del material en $\frac{lb}{pulg^2}$ es representado por S .

Además, la presión del fluido P_n corresponde a la presión del aire producto de la presión dinámica de este, la que utiliza la siguiente ecuación para determinar la presión:

$$P_n = 0,036 \cdot G \cdot \frac{H_{n-1} - H_n}{2} \quad (2)$$

Donde G es la densidad específica del fluido y H_n es la longitud desde el borde hasta el atiesado en pulg. Con esta información se determinó el espesor, basado en el uso de fibra de vidrio, dando por resultado 4,12 mm. Además, se complementó esta información con la norma BS 4994 [38], la cual especifica el diseño y construcción de recipientes y tanques de almacenamiento en plásticos reforzados, determinando que el espesor mínimo en estos tipos de recipientes corresponde a 5 mm. De esta manera, el espesor de diseño para su construcción fue de 5 mm.

Finalmente, para la construcción de la cámara de humidificación se mandó a fabricar en Fibra de vidrio reforzado con poliéster, según los planos adjuntados en el anexo (véase figura 8-1 y 8-2), puesto que es un material que tiene una facilidad de generar casi cualquier estructura, siendo una excelente alternativa. Asimismo, este material tiene una serie de propiedades ideales para la cámara de

humidificación como lo es la alta resistencia mecánica; resistencia solar e intemperie; liviano, reparable y modificable en toda ocasión; su mantención es sencilla, y tiene una vida útil extensa. Para su fabricación, en primer lugar, se desarrolla un molde de madera, según los planos, y luego con capas de fibra de vidrio se va dando el espesor y la forma de la estructura.

3.1.4. Estructura de Soporte

La estructura de soporte (véase figura 3-13) debe soportar el peso del panel fotovoltaico y de la base del humidificador, además, de la velocidad y dirección del viento, por lo tanto, es de suma importancia verificar si los sistemas de anclaje serán lo suficientemente robustos, por lo que serán utilizados Pernos de anclaje de 5/16"x 2" de acero recubierto con Zinc.

Asimismo, se determinó que el material utilizado para la construcción de las estructuras serán ángulos ranurados de acero galvanizado, fabricadas en norma ASTM 653, de 38x38x1,9 mm, puesto que al ser de acero galvanizado tiene distintas propiedades excelentes como: Resistencia a la corrosión, el sol, lluvia y humedad, siendo excelente para la intemperie; no necesita mantenimiento; enorme durabilidad, y tiene una buena relación costo beneficio. Al mismo tiempo, al ser ranurados permite una mayor manejabilidad para la unión de las estructuras, ya que solo se necesitan pernos y tuercas, de esta manera se seleccionaron pernos hexagonales M8x20 mm de acero cincado junto con sus correspondientes tuercas y golillas planas.

Por último, como la estructura estará fija, es necesario determinar el ángulo de inclinación para lograr la mayor irradiancia posible que llegara al panel solar a lo largo del año. De acuerdo con el análisis realizado por Fabricio Advis [23], se determinó que el ángulo de inclinación corresponde a 27°.

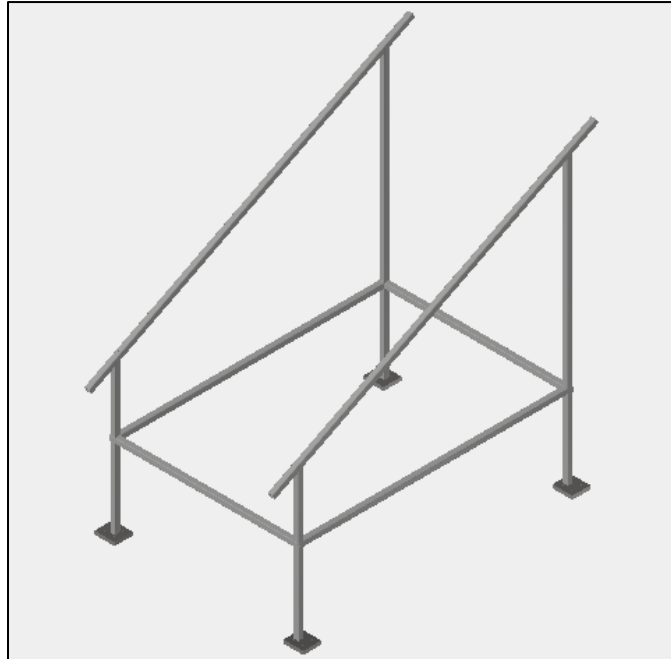


Figura 3- 13. Estructura del Humificador PVT.

3.2. Deshumificador

Para esta unidad se utilizó un intercambiador de tubo y carcasa, ya que presenta características interesantes, tales como tener conexiones roscadas, lo que permite la conexión con el resto de los equipos que tiene el sistema. También, los tubos corrugados que se encuentran en el interior del IDC (véase figura 3-15) permite una mayor área de transferencia de calor entre el agua que circula por estos y el aire húmedo que los recorre exteriormente.

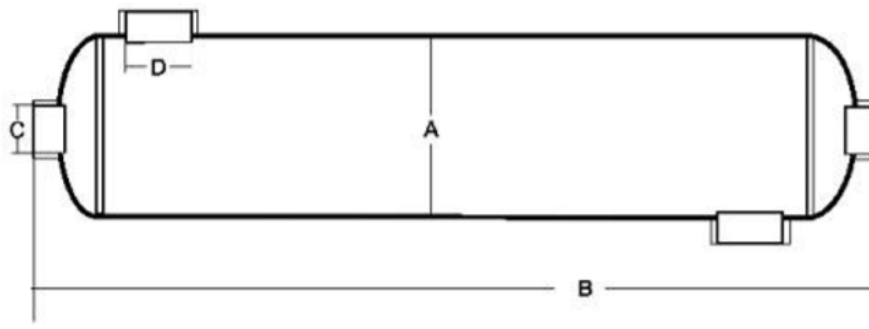


Figura 3- 14. Dimensiones principales del intercambiador de tubo y carcasa. Fuente: [24].



Figura 3- 15. Serie de deshumificadores Modelos SP, incluye vista los tubos corrugados en el interior.
Fuente: [24].

El intercambiador de calor presenta las siguientes características:

Modelo	SP-1200
Potencia [kW]	352
Área de transferencia de calor [m ²]	2,01
A [mm]	133
B [mm]	900
C [in]	2"
D [in]	2 ½"
Numero de tubos	84
Diámetro interior de tubos [mm]	7, 825
Diámetro exterior de tubos [mm]	9,525
Longitud tubos [mm]	760

Tabla 3- 2. Características técnicas del intercambiador de tubo y carcasa. Parámetros A, B, C y D correspondientes a la figura 3-14.

Además, para el diseño del deshumificador se tomaron en consideración las recomendaciones de la norma de sistemas solares [19]:

- Utilizar válvulas de corte en todas las salidas y entradas del intercambiador.
- Tener un manómetro en la salida y entrada del intercambiador permite tener control sobre la evolución en las pérdidas de carga en función del factor del ensuciamiento.
- Es recomendable instalar los intercambiadores en espacios interiores y aislados para que se minimicen las pérdidas entre fluidos y medio ambiente.
- Que el intercambiador esté localizado en un lugar que permita fácil acceso para operaciones de mantención o reemplazo.

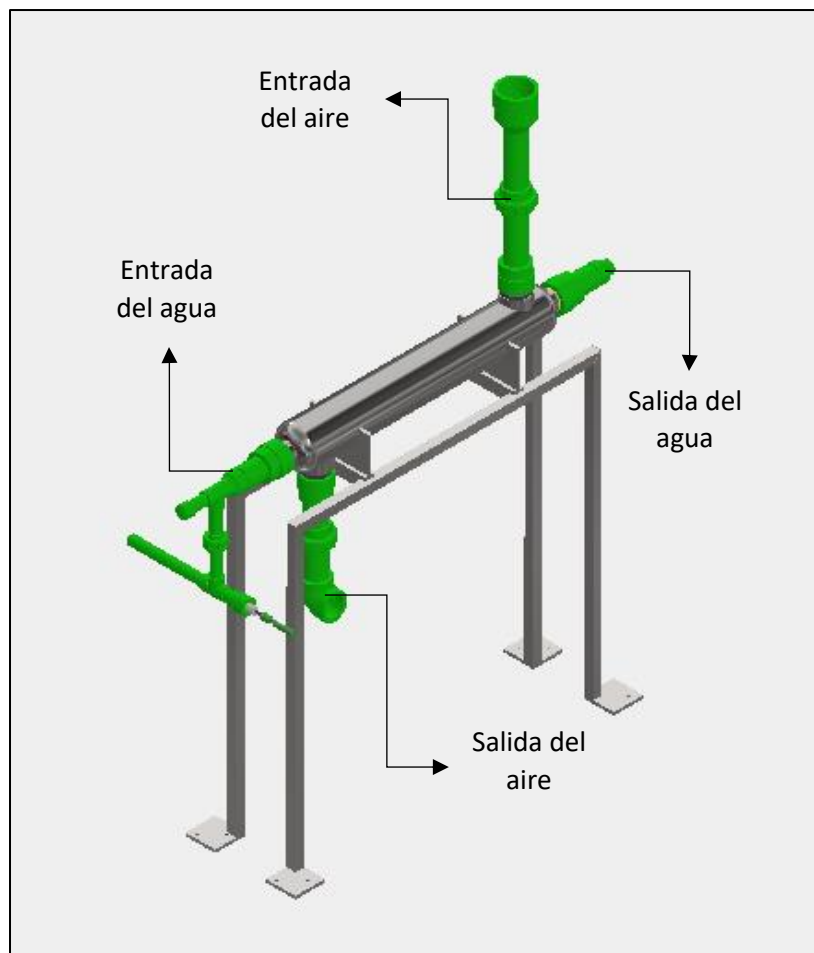


Figura 3- 16. Vista isométrica del deshumificador en su respectiva estructura y con las distintas conexiones del agua salada y Aire. Fuente: Elaboración Propia.

3.3. Conexiones y Subsistemas

En esta sección se detallarán los distintos tubos, fittings, válvulas y filtros utilizados para conectar los sistemas principales, que corresponden al Humificador y Deshumificador. Igualmente, se señalarán los subsistemas utilizados encargados de la impulsión tanto del aire como del agua (Ventilador y Bombas, respectivamente), así pues, se explicará el procedimiento para la elección de estos equipos.

Tanto para las tuberías que transportan agua y aire se utilizaron tuberías de Polipropileno Random (PPR) de presión nominal PN-10 y fittings de PN-25, medida estándar para estos. Este material necesita una maquina termofusora (Véase figura 3-19) para poder unir las tuberías y los fittings que, básicamente, calienta y derrite las juntas para unirlos y formar una sola pieza.

De esta manera, se seleccionó este material, el cual presenta propiedades que resultan atractivas para su uso en este proyecto como la resistencia a radiación UV, la resistencia a la intemperie, su baja rugosidad, la resistencia a la corrosión, Atoxica y no genera incrustación de sarro.



Figura 3- 17. Descripción de las tuberías de PPR utilizadas. Fuente:[28].



Figura 3- 18. Fittings PN-25 utilizados. Fuente: [28].



Figura 3- 19. Máquina de termofusión. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, para un análisis ordenado y en detalle, esta sección estará dividida en 4 apartados según la entrada o salida tanto del aire como del agua desde el humidificador.

3.3.1. Entrada del Aire

Este segmento conecta el deshumificador con el humidificador, circulando el aire desde la derecha a la izquierda según la figura 3-20, entrando finalmente por la parte inferior del humidificador. Para conducir el aire se utiliza al comienzo tubos de 63 mm compatibles con la salida roscada de HE (hilo exterior) 2" del deshumificador para luego conectar una copla que permita conectar la tubería de PRR de 110 mm.

La circulación de aire se lleva a cabo por medio de un extractor de aire centrífugo VK 125 (Véase figura 3-21), el cual tiene la facilidad de poder acoplarse a las tuberías de PPR por medio de un ducto flexible de aluminio de 125 mm con recubrimiento de PVC y abrazaderas regulables de 125-

110 mm (véase figura 3-22). Además, tiene una alta capacidad de caudal en función de su tamaño o en comparación a un extractor axial, conjuntamente, posee un potenciómetro de la marca VDL (Véase figura 3-21) el cual permite variar el caudal del extractor. Este subsistema presenta las siguientes características:

Modelo	Tubular VK-125
Potencia [w]	61
Voltaje [V]	220
Diámetro Boca [mm]	125
Caudal [m3/h]	430
Nivel de Ruido [dA/b]	47
Rev/min	2500

Tabla 3- 3. Características técnicas de Extractor VK-125.

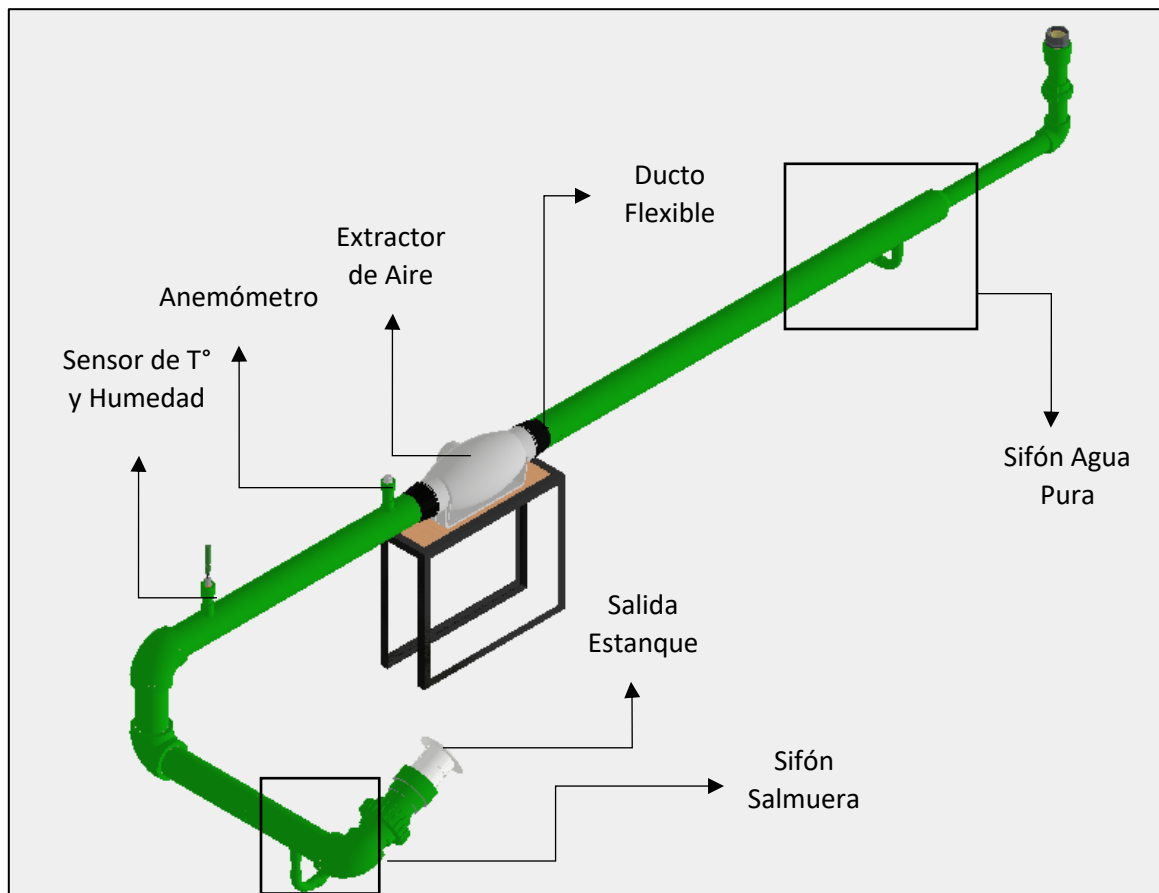


Figura 3- 20. Tramo que transporta el aire que ingresa al humidificador. Fuente: Elaboración propia.



Figura 3- 21. Extractor Centrifugo VK-125. Fuente: [25].



Figura 3- 22. Potenciómetro. Fuente: [26].



Figura 3- 23. Ducto Flexible de aluminio con recubrimiento en PVC. Fuente: [27].

Otro componente importante en este segmento corresponde a las salidas de estanque, estas se utilizan tanto para la salida como para la entrada del aire, las cuales permite conectar el tramo de tuberías con el humidificador. Estas al poseer dos anillos roscables (Véase figura 3-24), uno para el interior del humidificador y otro para exterior, junto con un anillo de caucho ubicado entre estos dos anillos, se pueden roscar formando la estanquidad del humidificador y una salida roscada exterior permitiendo conectarlo con un Terminal de PPR HI de 4" y al segmento en cuestión.



Figura 3- 24. Salida de estanque de PVC hidráulico HE/Sol. BSP 4". Fuente [29].

Por último, para producir el circuito cerrado de aire se necesitan dos sifones de agua, los cuales al estar con agua cierran el paso del aire como se observa en la figura 3-25. Se utilizan dos sifones, uno para la recolección del agua pura y otro para el retorno de la salmuera al estanque.

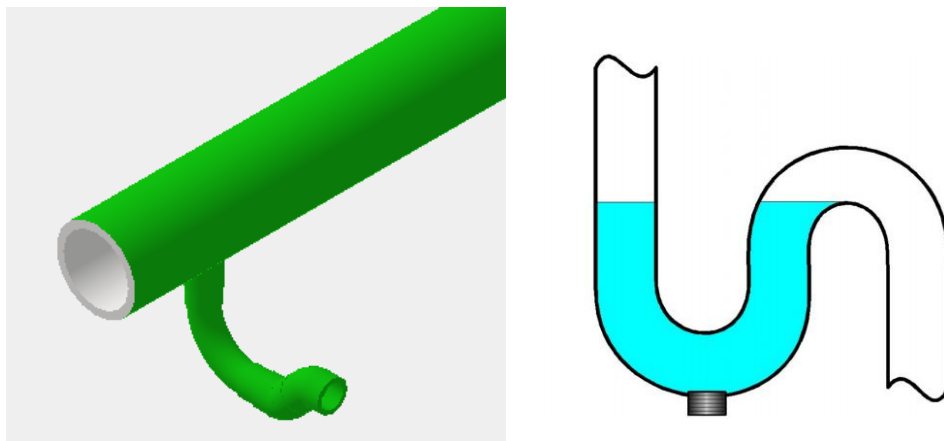


Figura 3- 25. Vista isométrica de los sifones utilizados en el tramo de la entrada de aire (imagen de la izquierda). Además, se muestra la trampa de agua generada al interior del sifón (imagen de la derecha). Fuente: Elaboración propia.

Luego que el agua destilada comience a caer por goteo desde el sifón de agua pura, esta es ingresada a una botella graduada que al llenarse llega al límite del sensor de nivel, llevando una señal al Datalogger y registrando la cantidad de ml de agua pura destilada, además de activar la válvula

solenoides permitiendo el paso del líquido al estanque de agua pura, vaciando la botella graduada y reiniciando la medición del agua pura.

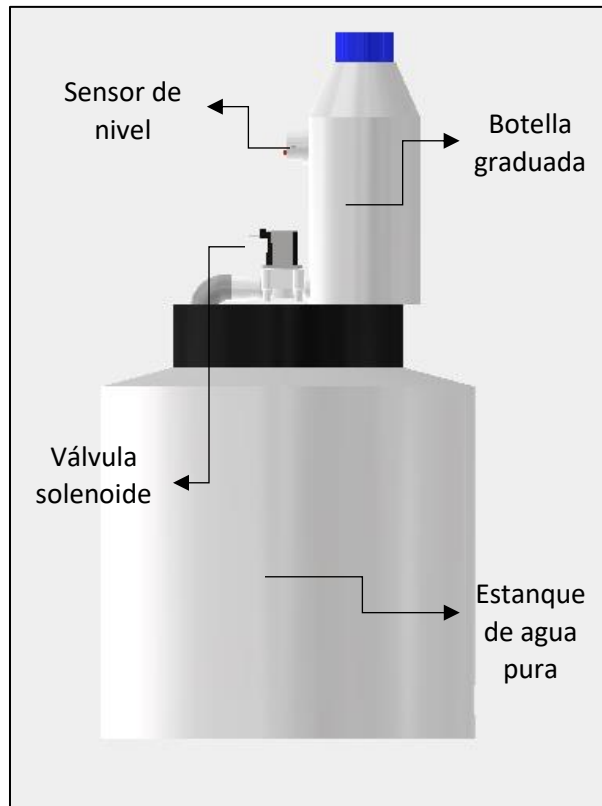


Figura 3- 26. Receptor de Agua pura. Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Salida del Aire

Este tramo permite la salida del aire humidificado desde el humidificador al deshumificador. Este segmento tiene una salida de estanque de 4” y un sensor de temperatura y de humedad, tal como se ve en la figura 3-27. Asimismo, este recorrido finaliza con la reducción de tuberías de PPR de 110 a 63 mm, tal como ocurre en la entrada del aire.

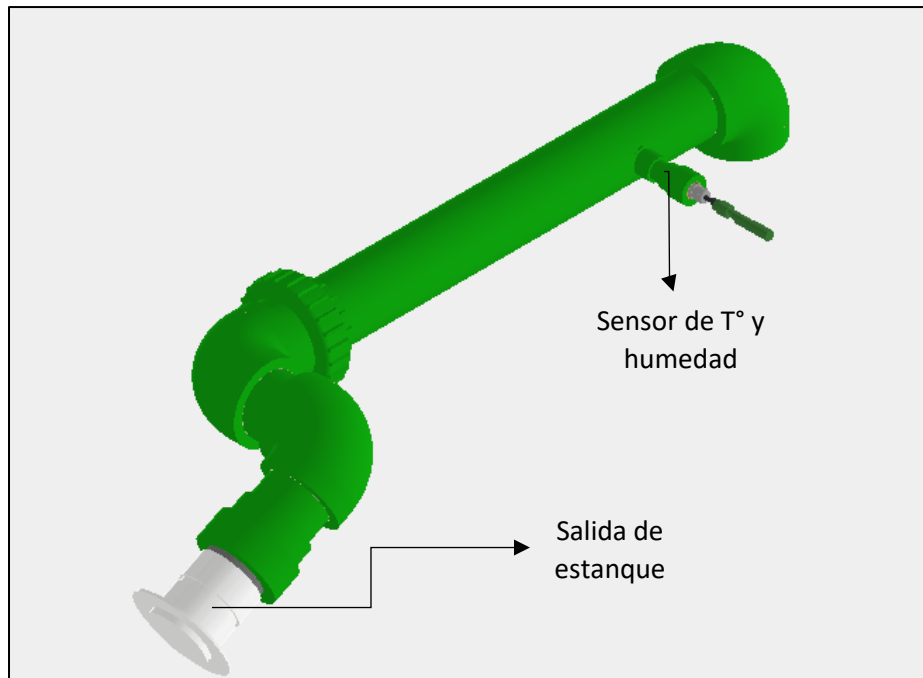


Figura 3- 27. Tramo de la salida del aire del humidificador. Fuente: Elaboración propia.

3.3.3. Entrada del Agua

La entrada del agua al humidificador para tener más detalles se dividirá en tres secciones; la primera se enfocará en la succión del agua salada, la segunda y tercera en la descarga, tanto antes como después del deshumificador respectivamente.

3.3.3.1. Succión

Este segmento (Véase figura 3-28) comienza con un estanque cónico de agua salada de 200 L (Véase figura 3-29), fabricado por rotomoldeo en polietileno atóxico, de 89 cm. de alto, con un diámetro inferior de 45 cm., un diámetro superior 63,5 cm. y espesor de 7 mm. Posteriormente, debido a la naturaleza del agua salada, esta presenta una gran cantidad de sedimentos y contaminantes que podrían afectar al correcto funcionamiento del equipo, por esto se instalará uno de los dos filtros que tendrá el sistema, el cual será un filtro de tipo Y HI/HI de 1" de bronce (Véase figura 3-30) con una malla de acero inoxidable.

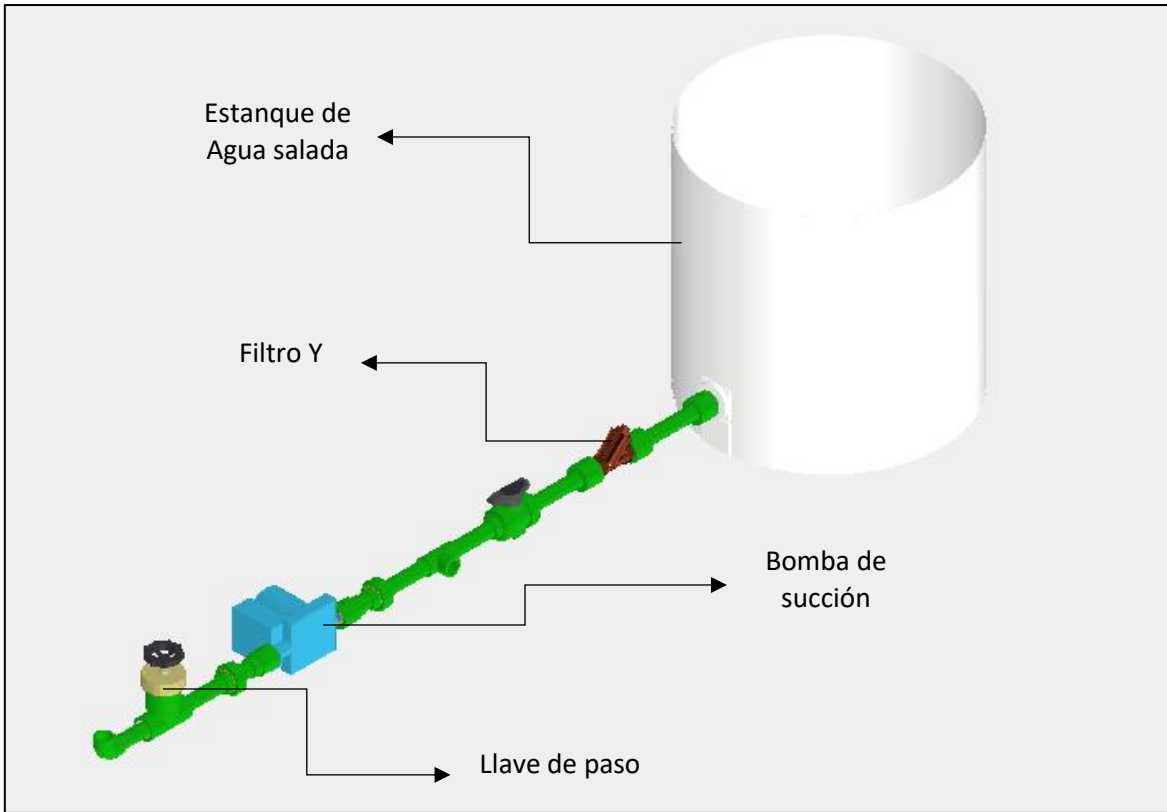


Figura 3- 28. Succión del agua salada. Fuente: elaboración propia.



Figura 3- 29. Estanque de agua salada. Fuente:[30].



Figura 3- 30. Filtro tipo Y. Fuente: [16].

Para determinar la bomba se determinaron las pérdidas de carga tomando en cuenta los fittings utilizados, rociadores, filtros, IDC (Deshumificador), longitud de las tuberías y la diferencia de altura del fluido.

La temperatura de trabajo del agua salada fue de 15 [°C], por lo que la densidad ρ corresponde a 999 $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ y viscosidad cinemática de $1,15 \cdot 10^{-6} \left[\frac{m^2}{s}\right]$. El caudal de trabajo del sistema es 4 $\left[\frac{l}{min}\right]$, las tuberías principales del agua salada son tubos de PPR de 32 mm con un diámetro interior de 26,2 mm, por lo que su velocidad promedio es 0,12 $\left[\frac{m}{s}\right]$, con estos datos se pudo determinar el número de Reynolds, dando por resultado 2830, por lo que corresponde a flujo en transición. Esto se determinó mediante la siguiente expresión:

$$Re = \frac{v \cdot \rho \cdot D}{\mu} \quad (3)$$

De acuerdo con los manuales de las tuberías de PPR [28], se utiliza la ecuación de Hazen-Williams para determinar las pérdidas:

$$f = \frac{13,69 \cdot g}{C^{1,85} \cdot V^{0,15} \cdot D^{0,17}} \quad (4)$$

Donde g corresponde a la aceleración de gravedad 9,81 $\left[\frac{m}{s^2}\right]$, el coeficiente C depende del material utilizado y el estado, en este caso como son tuberías de plásticos y nuevas, C es igual a 150. V corresponde a la velocidad del flujo y D es el diámetro interno de la tubería.

Finalmente, se determinan las pérdidas totales de presión en el sistema con la siguiente ecuación:

$$H_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (5)$$

Realizando el cálculo en todos los tramos del paso del agua según los fitting utilizados y la longitud de los tramos, adicionalmente, se tiene una diferencia entre el eje de la bomba y el ramal de rociadores de 0,77 [m] y una presión inicial de 104,76 [kPa], y las pérdidas de los distintos equipos se estimaron según otros equipos similares y cálculos de memorias anteriores, resultando en 1000 [Pa] para el Filtro de línea, 342 [Pa] para el Deshumidificador y 4000 [Pa] para el calentador de agua.

Asimismo, los rociadores necesitan una presión mínima para un determinado caudal, según la siguiente ecuación:

$$Q = k\sqrt{P} \quad (6)$$

Donde Q es el caudal en l/min, P es la presión en bar y k es la constante de aspersión de los rociadores correspondiente a 3,16. Como los rociadores están a una altura distinta los caudales serán distintos y siguiendo la ley de Bernoulli junto con la ecuación de continuidad, el caudal para el rociador más alto es 1,95 $\left[\frac{l}{min}\right]$ y 2,05 $\left[\frac{l}{min}\right]$ para el más bajo, resultando en 61,13 [kPa] y 64,26 [kPa], respectivamente.

Con todos estos datos se determinó que la altura del sistema es 4,44 [m. c. a], que, debido a la incertidumbre de los filtros y el IDC, se le adiciono un 10 % adicional, resultando finalmente en 4,89 [m. c. a].

La bomba seleccionada corresponde a una Electrobomba Recirculadora LRP25-70/130 de la marca LEO, la cual presenta tres niveles distintos de funcionamiento. A continuación, se presenta la curva de la bomba y el punto de funcionamiento del sistema:

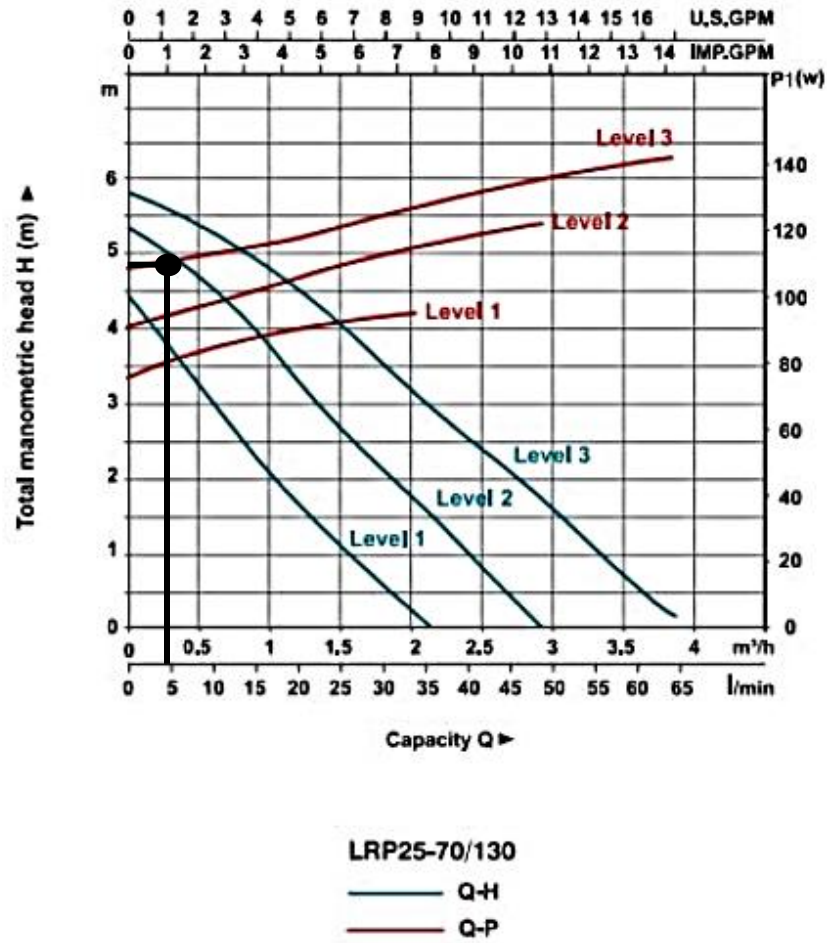


Figura 3- 31. Curva de la bomba LRP25-70/130. Fuente: [31].

Marca	LEO
Modelo	LRP 25-70/130
Voltaje [V]	220
Caudal Máximo [l/min]	63/48/35
Altura Máxima [m]	5,8/5,3/4,2
Potencia [W]	146/123/97

Tabla 3- 4. Características técnicas de la bomba utilizada para la alimentación de agua salada.

3.3.3.2. Descarga (Antes del Deshumificador)

Subsiguiente a la bomba, comienza la descarga del agua salada hasta llegar finalmente a los rociadores. En este segmento se analizará hasta antes del deshumificador, teniendo principalmente la unidad de filtrado que se puede visualizar en la figura 3-32, el cual consiste en un sistema en By-pass permitiendo el funcionamiento continuo del sistema mediante el cierre o la apertura de las válvulas de paso, además, al tener un manómetro antes y después del filtro se podrá determinar el estado del ensuciamiento de este. Este segundo filtro por instalar será un filtro de paso de malla lavable de tamaño 250 micrones, el cual será el encargado de atrapar las partículas más pequeñas que puedan haber pasado por el primer filtro. Cabe destacar que este tipo de filtros generan una caída mínima de presión por lo cual son ideales para esta aplicación.

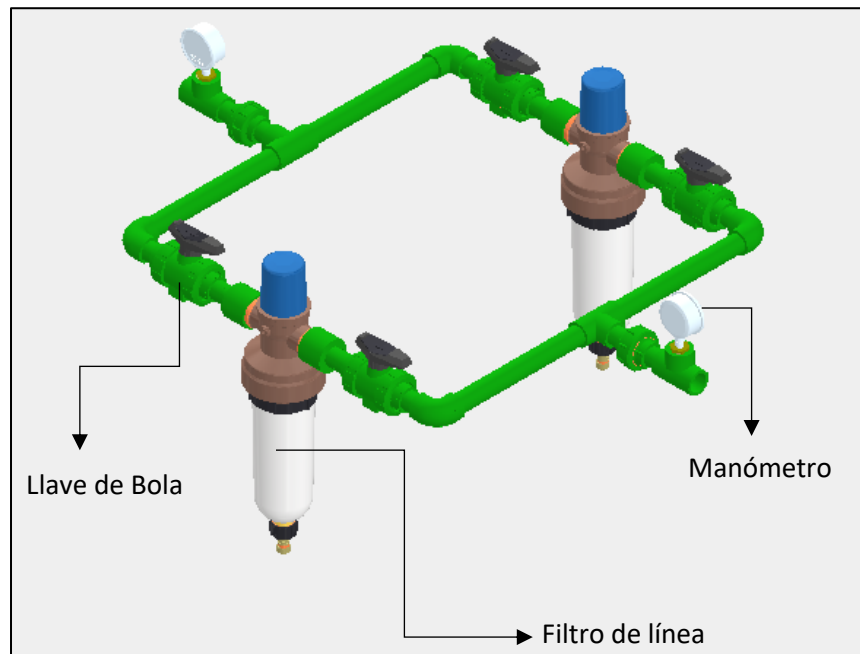


Figura 3- 32. By-pass de la unidad de filtrado. Fuente: Elaboración propia.

3.3.3.3. Descarga (Después del Deshumificador)

En este segmento, como se observa en la figura 3-33, se utilizaron dos sensores de temperatura, el motivo de esto es por el uso de un calentador eléctrico de agua, el cual se encuentra conectado en un sistema By-pass, que servirá para complementar las pruebas del sistema, ya que con este equipo se podrá fijar una temperatura del agua que entra a los rociadores y realizar las pruebas.

Además, se instaló un flujómetro digital para determinar el caudal de funcionamiento del equipo, junto con un manómetro de glicerina para determinar cuánta es la presión que llegan a los rociadores.

Finalmente, en la estructura donde está ubicado el calentador de agua, se colocó en la parte trasera un gabinete eléctrico donde se encontrará el Datalogger, protegiéndolo de la intemperie, y un alargador múltiple de 4 tomas para un voltaje de 220 V y 10 A, brindando la posibilidad de conectar los equipos (Bombas, Ventilador, Calentador de agua) y permitir el paso de corriente eléctrica para su funcionamiento.

Cabe mencionar, que se instalaron salidas de tuberías con tapones para conectar el deshumificador y humidificador en serie o en paralelo con otro sistema, en caso de construir otro desalinizador en un futuro.

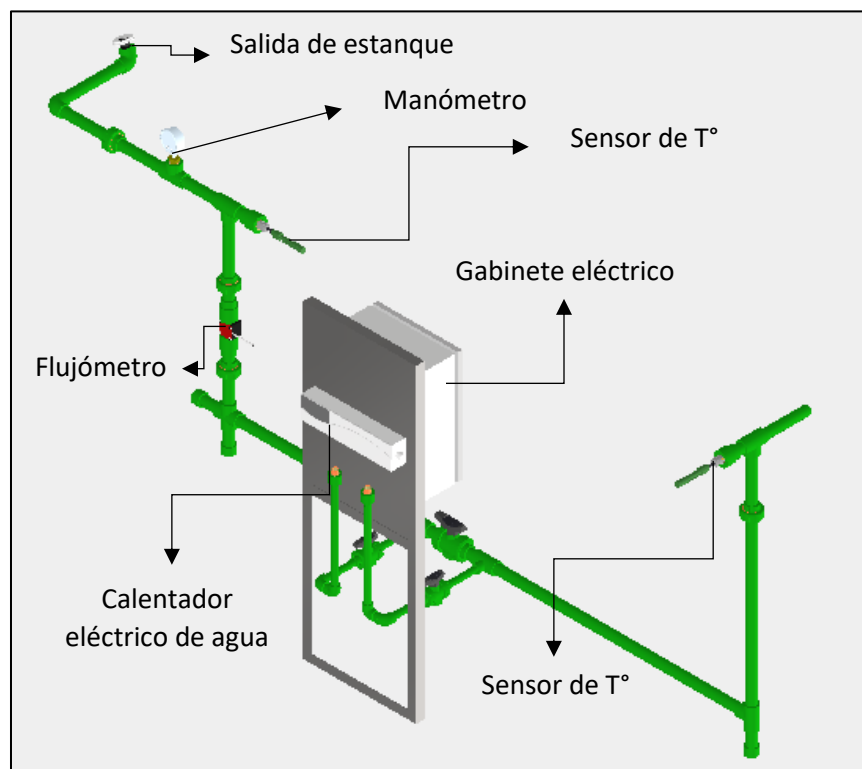


Figura 3- 33. Tramo de la entrada del agua al humidificador después del deshumificador. Fuente: Elaboración propia.

3.3.4. Salida del Agua

Este segmento (Véase figura 3-34) se encuentra conectado al sifón de agua salada, y lleva la salmuera de rechazo al estanque por medio de una bomba de circulación. En este caso no se realizó algún cálculo hidráulico para la bomba, ya que al ser una altura pequeña (menos de 1 m) y tener solo pérdidas de carga por fittings y la longitud de la tubería, se seleccionó la bomba de circulación más pequeña en el mercado, correspondiendo a la GRS 25/6 de la marca TAIFU, conjuntamente, se puede observar la curva de la bomba en la Figura 3-35.

Además, se montó una llave de bola con la función de desviar la salmuera, y de esta manera conectar en serie el Humificador con otro que esté construido en un futuro.

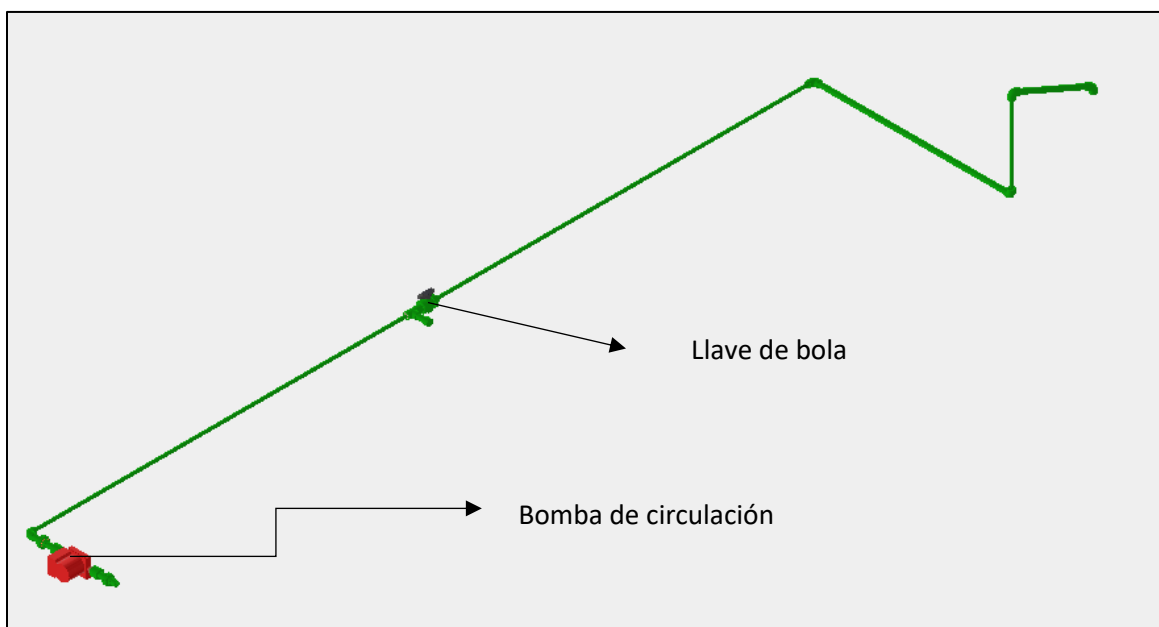


Figura 3- 34. Tramo que transporte el agua de retorno al estanque de agua salada. Fuente: Elaboración propia.

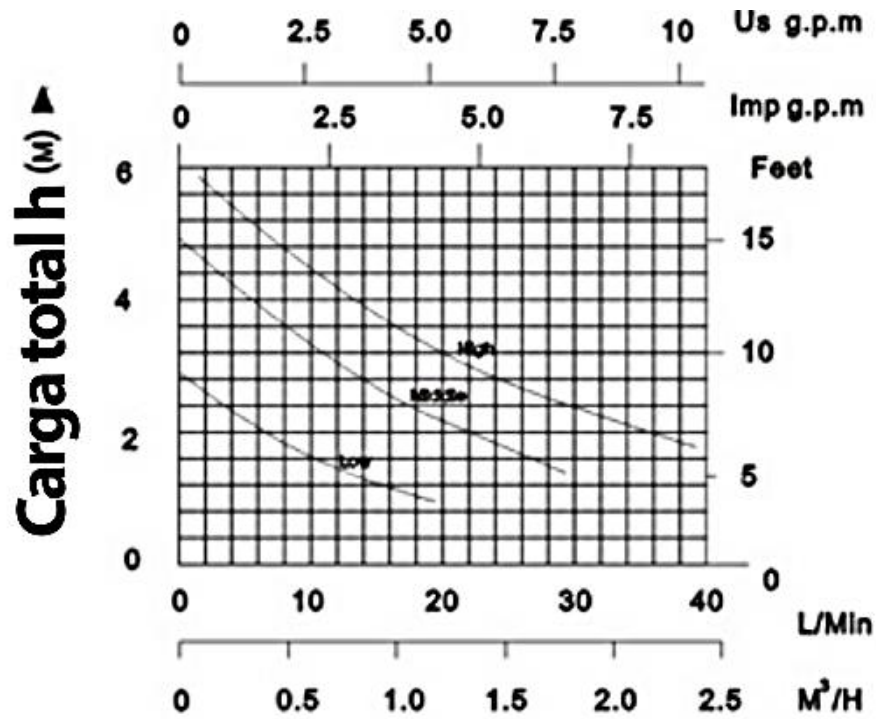


Figura 3- 35. Curva de la bomba GRS 25/6 Marca TAIFU. Fuente: [32].

Marca	TAIFU
Modelo	GRS26/6
Caudal Máximo [l/min]	40/30/20
Altura Máxima [m]	6/5/3
Potencia [W]	90/60/40

Tabla 3- 5. Características técnicas de la bomba de retorno del agua salada.

Aislación de tubería

Finalmente, es necesario comentar el uso de aislación en las tuberías, donde el grosor del aislamiento está sujeto a una normativa. Como orden de magnitud, las pérdidas térmicas en las tuberías no deberían superar el 2,5% del calor máximo transportado. Por lo tanto, al tener tuberías con un coeficiente de conductividad tan bajo y al manejar fluidos con temperaturas que no son altas, no se utilizaron algún tipo de aislación, pero no se descarta que un futuro se pueda instalar si permite alguna mejora al sistema.

3.4. Instrumentación

Por último, este sistema deberá contemplar el análisis de información en tiempo real y directo de algunas variables funcionales, tales como temperaturas y presiones a lo largo de la red. Adicionalmente, conocer caudales y flujos térmicos ayuda a caracterizar de mejor forma el sistema, su eficiencia y estado de funcionamiento. Para poder evaluar la correcta operación del sistema, se utilizan principalmente los siguientes instrumentos:

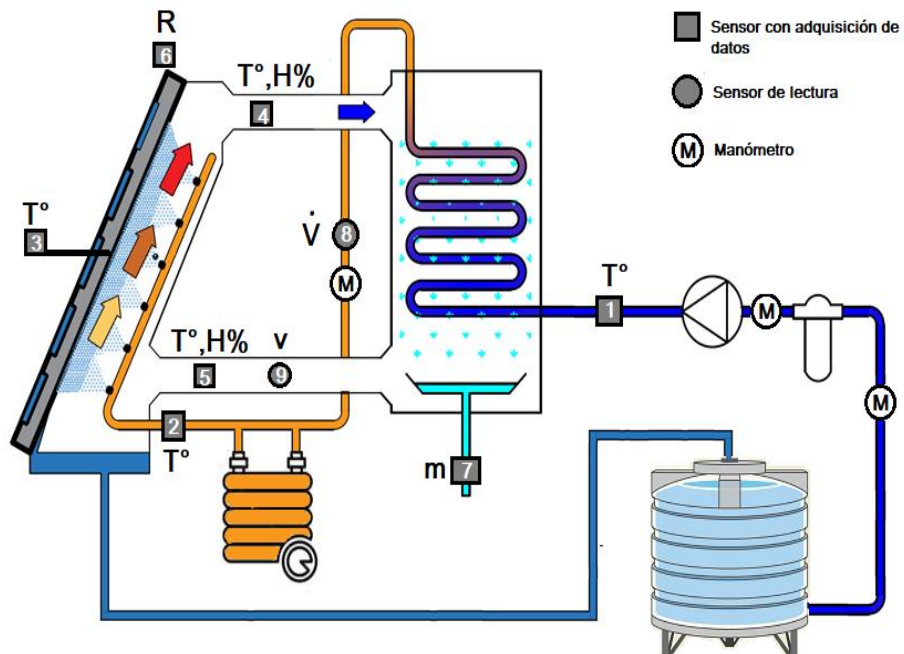


Figura 3- 36. Esquema con los distintos puntos de medición. Fuente: Elaboración propia.

Manómetros

Los manómetros se utilizaron para la medida de la presión manométrica, ya que su presencia es muy recomendable a la entrada y salida de equipos que generen presión o de equipos que generen pérdidas de carga muy relevantes, por esto se instalaron cerca de los filtros, el deshumificador y del ramal de rociadores.

Estos son graduados de 0 a 4 bar, con conexión de 1/4" BSP, fabricados en latón y de la marca Kr Kröne, se utilizaron dos secos y uno con glicerina colocado antes de ingresar al ramal de los rociadores.

Se utilizaron para evaluar cómo se comporta el sistema frente a diferentes estímulos y fenómenos, como cambios drásticos en la presión, fugas o filtraciones, estancamiento, golpes de ariete y otra serie de eventualidades que podrían alterar el funcionamiento normal del sistema o averiar algún componente.



Figura 3- 37. Manómetro utilizado en el desalinizador. Fuente: [16].

Caudalímetro

Los caudalímetros permiten medir el caudal y en algunos casos velocidad del fluido. Existen diversos tipos, de turbina, flujo magnético, de flujo de desplazamiento positivo, desplazamiento gravimétrico, etc. Conocer el caudal, en conjunto con las temperaturas, permite conocer los flujos térmicos dentro del sistema, lo cual a su vez es información necesaria para conocer la eficiencia y energía disponible para operar. En este caso se seleccionó un caudalímetro de engranajes como se puede observar a continuación:



Figura 3- 38. Caudalímetro utilizado. Fuente: [33].

Marca	AICHI
Modelo	OF05ZAT
Caudal [L/h]	5-600
Pulso de flujo indicado por fabricante $[\frac{Hz \cdot min}{L}]$	2,5
Voltaje funcionamiento [V]	DC 3,5-12
Material	Plástico y metal
Tamaño Rosca	½"
Precisión	±1%

Tabla 3- 6. Características técnicas del Flujómetro

Sensores de temperatura

Las cinco temperaturas medidas a la entrada y a la salida de los equipos principales se miden con termistores, los cuales se basan en el efecto de cambio de la resistencia de los materiales con diferentes temperaturas. Pueden ser PTC (incrementan resistencia con la temperatura) o NTC (la disminuyen).

En este proyecto se utilizaron de la marca Allied de modelo PT-100, con un intervalo de temperaturas de -20–100°C, con una señal de salida de 0–5V directamente proporcional a la temperatura medida y de 3 cables de salida.



Figura 3- 39. Termistores PT-100. Fuente: [34].

Sensores irradiancia

Se utilizará un Piranómetro, como se indica en el punto seis de la Figura 3-36, el cual será facilitado por la Universidad.

Sensor de nivel

Los sensores de nivel se utilizan para medir el cambio en la altura de un fluido o sólido dentro de un estanque o tubería. En este caso se utilizará para determinar la cantidad de agua purificada al llenar una botella graduada. El tipo de sensor a utilizar es un sensor sin contacto para Arduino, el cual utiliza tecnología avanzada de procesamiento de señal mediante el uso de un potente chip (XKC-Y25-T12V) con capacidad de operación de alta velocidad para lograr la detección de nivel de líquido sin contacto. Este corresponde al punto siete de la figura 3-36.



Figura 3- 40. Sensor de nivel de líquido sin contacto. Fuente: [35].

Voltaje de funcionamiento (InVCC) [V]	DC 5-24
Consumo de corriente [mA]	5
Voltaje de salida (nivel más alto) [V]	InVCC
Voltaje de salida (nivel más bajo) [V]	0
Tiempo de respuesta [ms]	500
Temperatura de funcionamiento [°C]	0-105
Gama de espesor de inducción (sensibilidad) [mm]	0-13
Humedad [%]	5-100

Material	ABS
Funcionamiento impermeable	IP67

Tabla 3- 7. Características técnicas del sensor de nivel.

Además, se le adiciona una válvula solenoide eléctrica, la cual se encuentra normalmente cerrada y con un filtro de acero inoxidable a la entrada, que se acciona mediante la señal del sensor de nivel, permitiendo el reinicio de la medición.



Figura 3- 41. Válvula solenoide. Fuente: [36].

Voltaje de funcionamiento [V]	DC 12
Corriente máxima [mA]	455
Modo de funcionamiento	Normalmente cerrado
Puertos de entrada/salida	G $\frac{1}{2}$ "
Material	Nylon/ Acero inox. / Polioximetileno
Temperatura de funcionamiento máxima [°C]	120
Rango de presión de trabajo [MPa]	0,02-0,8

Tabla 3- 8. Características técnicas de la válvula solenoide.

Medición del flujo aire

La medición se realizará con un anemómetro de hilo caliente, el cual será facilitado por la Universidad. Este presenta una varilla que se ingresara al interior de las tuberías que transportan aire, permitiendo tomar la medida y luego retirar dicho instrumento. Además, este instrumento permitirá medir la humedad relativa del aire.

Sistema de adquisición de datos

Con la finalidad de recaudar las señales analógicas proporcionadas por los instrumentos usados en las pruebas experimentales se usa un sistema de adquisición de datos formado por un Datalogger CR310, que tiene integrado puerto 10/100 Ethernet y borneros removibles. El CR310 es compatible con la mayoría de los sensores. Esto incluye sensores con salida de voltaje (0 a 2.5 V), corriente (0 a 20 mA o 4 a 20 mA), termistores, y RTDs, entre otros. El CR310 requiere alimentación externa y tiene integrado un regulador de carga para batería recargable.



Figura 3- 42. Datalogger CR310. Fuente: [37].

3.5. Medidas principales

A continuación, se presentan las medidas principales del diseño en alto, ancho y profundidad del desalinizador HDH.

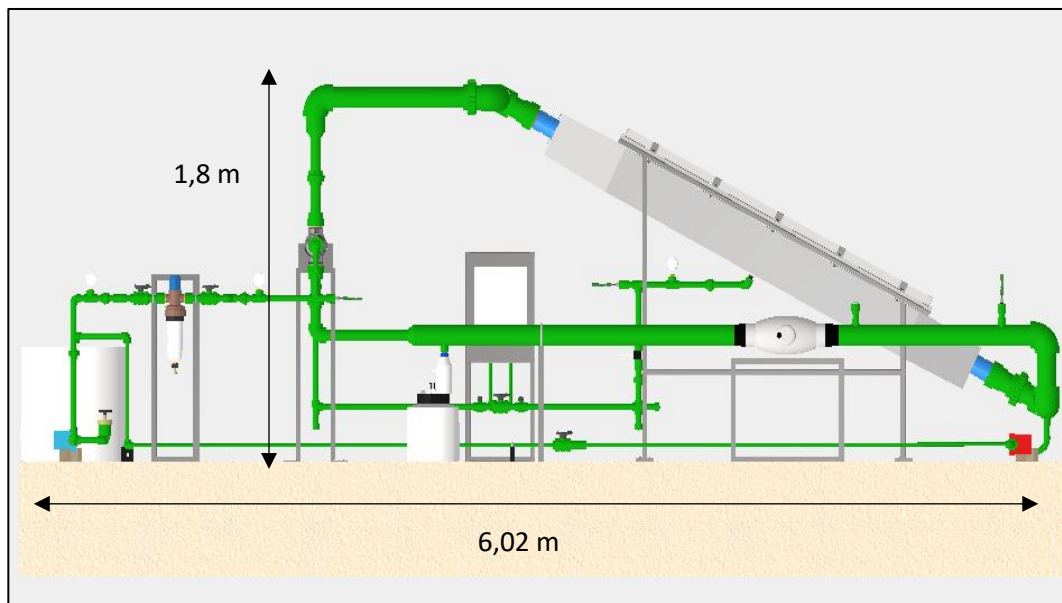


Figura 3- 43. Vista lateral izquierda. Fuente: Elaboración propia.

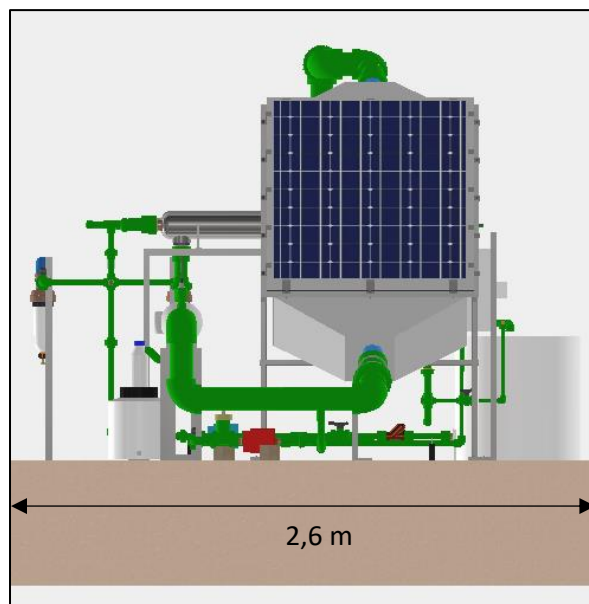


Figura 3- 44. Vista frontal. Fuente: Elaboración propia.

4. Construcción del desalinizador

La construcción del desalinizador se llevó a cabo en un domicilio particular, ubicado en la región Metropolitana, comuna de San Bernardo, debido a la emergencia sanitaria que enfrenta el país por el Covid-19, y, en consecuencia, el cierre de todos los establecimientos de la Universidad.

Luego de haber preparado el lugar para la construcción del desalinizador, se pudo determinar que el espacio es más pequeño de lo que se había considerado para el diseño, por lo que este prototipo fue adaptado para la construcción. Posteriormente, al haber finalizado las compras de todos los equipos necesarios, se inició la fase de construcción en la primera semana de noviembre del 2019.

4.1. Estructuras de soporte

Para instalar los equipos del desalinizador, se comenzó en primer lugar con la fabricación de sus estructuras de soporte. Estas estructuras fueron fabricadas en base a las medidas del diseño hecho en Inventor y se realizó por medio ángulos ranurados galvanizados unidos mediante pernos que, adicionalmente, se le incluyeron escuadras tensoras para darle mayor rigidez y estabilidad a las estructuras. Finalmente, estas fueron pintadas con pintura anticorrosivo gris.



Figura 4- 1. Estructura del humidificador PVT.



Figura 4- 2. Estructuras del deshumificador, la unidad de filtrado, calentador de agua, soportes y el extractor de aire.

4.2. Humificador PVT

En primer lugar, se fijó la cámara de humidificación en su respectiva estructura mediante hileras de pernos hexagonales, como se observa en figura 4-3. Luego, se realizaron tres perforaciones por medio de un taladro y sierras copas para posicionar más adelante las salidas de estanque en sus respectivos orificios.



Figura 4- 3. Vista Frontal y trasera de la cámara de humidificación.

El arreglo de los pulverizadores se realiza mediante termofusión, conexiones y tubos de PPR de 20 mm y los rociadores se conectan por medio de bujes de reducción de cobre de $\frac{1}{2}$ " a $\frac{1}{4}$ " a los codos roscados HI de $\frac{1}{2}$ ". Este ramal se fija mediante una Tee de 20 mm roscada HE de $\frac{1}{2}$ ", que se encuentra al centro del ramal, al hilo interior de la salida de estanque de $\frac{1}{2}$ ", como muestra en la figura 4-4. Además, este ramal presenta dos uniones americanas para poder roscar el arreglo en el interior de la cámara de humidificación.

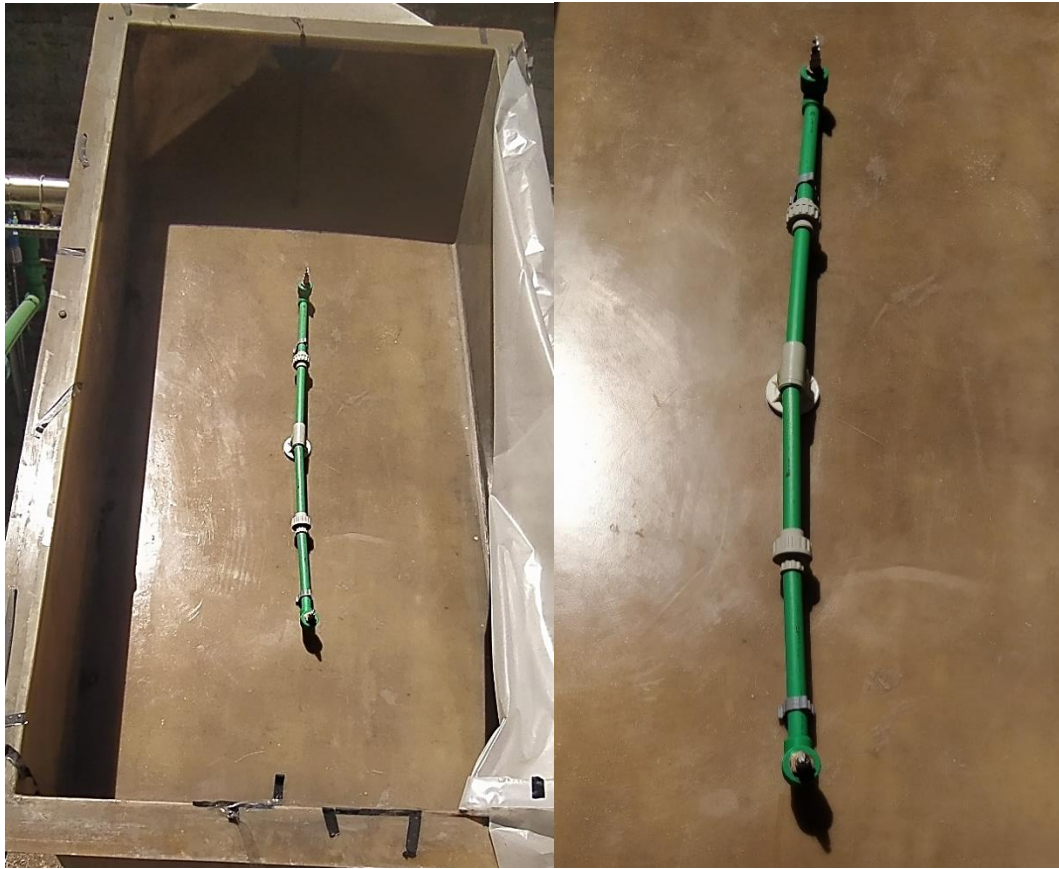


Figura 4- 4. Ramal de los rociadores instalado en el humidificador.

4.3. Deshumificador

El intercambiador de tubo y carcasa se instala mediante soportes de madera a la estructura metálica y se fijan por medio de abrazaderas cincadas en U de 6"x 3/8", como se observa en la figura 4-5. Además, se ubicó la estructura de la unidad de filtrado y el estanque de agua salada para dimensionar las conexiones necesarias entre estas.



Figura 4- 5. Deshumificador instalado en su respectiva estructura, junto el estanque del agua salada y la estructura de la unidad de filtrado.

La unidad de filtrado se lleva a cabo por la termofusión entre los distintos componentes de fittings y las tuberías de 32 mm de PPR, y las llaves de bola de 32 mm con uniones americanas. Finalmente se roscaron en sus respectivos terminales HE de 1" los dos filtros de líneas en paralelo (véase figura 4-6). La unidad de filtrado es fijada a su estructura a través de abrazadera de 32 mm apernadas en los ángulos ranurados verticales.



Figura 4- 6. Unidad de filtrado.

4.4. Ubicación de los equipos

A continuación, se ubican los equipos y estructuras en su respectiva posición con tal determinar el espacio disponible para las conexiones del aire y agua, como se muestra en la figura 4-7 y 4-8. Además, se ubican las salidas de estanque del humidificador tanto para el aire como el agua. Cabe mencionar que las salidas de estanque del aire (véase figura 4-9), en la sección donde se inserta el tubo de PVC para cementar, fue cortada para dejar una entrada o salida del aire más pequeña al interior de humidificador.



Figura 4- 7. Disposición de los equipos del desalinizador.



Figura 4- 9. Salidas de estanque de PVC de 4” utilizadas en el humidificador.



Figura 4- 8. Vista trasera de la ubicación de los equipos.

4.5. Conexiones del Aire y Agua

Las tuberías de aire conectan el humidificador con el deshumidificador por la parte inferior y superior. La parte superior del ducto (véase figura 4-10) fue elaborado por termofusión con PPR de 110 mm y reducido a PPR de 63 mm para conectarlo al deshumidificador. Además, presenta dos uniones americanas permitiendo aislar los equipos en caso de tener que realizar algún mantenimiento o movilizarlo a otro lugar. En la parte inferior es similar a la parte superior, pero en este es conectado el ventilador, como se puede ver en la figura 4-11 y 4-12.

Asimismo, se montó las tuberías y fittings de la entrada del agua del humidificador que conecta a este con el deshumidificador. Este tramo se confecciono por termofusión entre los fittings y las tuberías PPR 32 mm con sus respectivas uniones americanas en la entrada y salida de los sistemas principales. Es preciso mencionar que se conectó este tramo al deshumidificador por un buje de reducción de 63 a 32 mm, el cual fue termofusionado con el terminal de 63 mm HE de 2". Este recorrido es sujetado por medio de abrazaderas de 32 mm que están apernadas a la estructura metálica del calentador de agua, que, por cierto, no fue posible conectarlo al sistema, ya que el equipo llegó con fallas, presentando grandes filtraciones al utilizarlo.



Figura 4- 10. Conexión de las tuberías de PPR utilizadas para conectar los equipo.



Figura 4- 11. Conexiones de PPR entre el extractor y el deshumificador.



Figura 4- 12- Vista frontal de las conexiones en PPR entre el extractor y el humidificador.

Además, se conectó la unidad de filtrado con el deshumificador (véase figura 4-13), en donde, luego del manómetro, se encuentran dos Tee con salidas roscadas HI de $\frac{1}{2}$ " , cerradas por medio de tapones roscados, esto con la finalidad de poder conectar, en una salida, un sensor de temperatura, y en la otra, vincular otro deshumificador, y de esta manera, comprobar el desempeño en paralelo o en serie de los equipos.



Figura 4- 13. Conexión entre la unidad de filtrado y el deshumificador.

4.6. Instalación de los subsistemas

Para realizar la instalación eléctrica del ventilador se conectó un cable a los terminales L y N del bloque de los terminales de entrada en el interior del equipo, y luego es retirado por una prensa estopa en la parte superior, siendo acoplado a un enchufe para conectarse a la red monofásica de 220 V. Luego para conectarlo con las tuberías de PPR se utilizaron las abrazaderas regulables de 125-110 mm y el ducto flexible de aluminio, como se observa en la figura 4-14. Este equipo en su respectivo enchufe es conectado con el potenciómetro permitiendo variar el caudal.

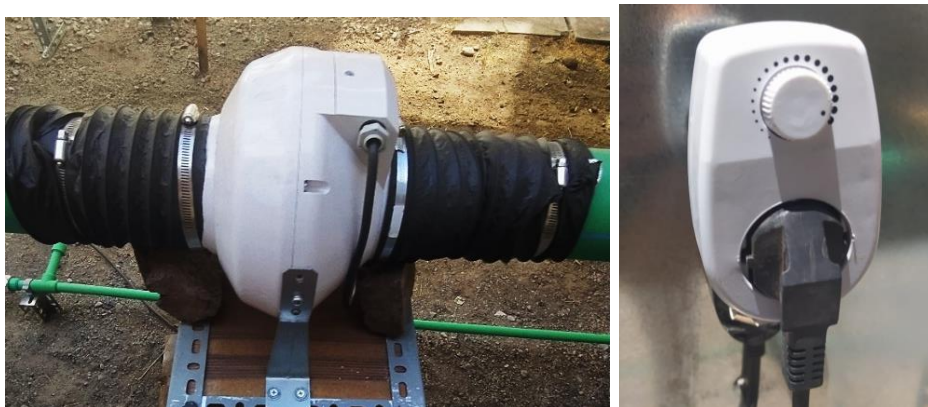


Figura 4- 14. Extractor junto con los ductos flexibles y las abrazaderas (izquierda). Potenciómetro (derecha).

La bomba de circulación encargada de la succión del agua salada fue puesta en una de las posiciones permitidas, indicadas en el manual del equipo (véase figura 4-17). Este dispositivo ya disponía de sus respectivas uniones americanas, por lo que solo se conectó a los terminales de 32 mm HI de 1", a las que se le adicionaron niples HE/HE de 1" de PVC.

En el tramo de la succión del agua (véase figura 4-15), antes de la succión, se termofusionó una llave de bola con uniones americanas permitiendo la abertura y cierre del líquido en caso de retirar la bomba para mantenimiento. Además, se rosco un filtro (véase figura 4-16) para evitar la sedimentación que pueda llevar el agua a la bomba. Finalmente, se termofusionó una llave de paso de 32 mm, esta permitirá regular el caudal que pueda entregar la bomba.



Figura 4- 15. Vista de la succión del agua salada.



Figura 4- 16. Filtro Y.



Figura 4- 17. Bomba Circuladora de la succión del agua salada.

Finalmente, se conectó la bomba circulatoria encargada del retorno de la salmuera, esta es unida al sifón que se encuentra ensamblado por medio de una montura a la tubería de 110. Luego de la bomba, este tramo es reducido a PPR de 20 mm, por medio de un buje reductor de 32 a 20, ubicado en la unión americana que se observa en la figura 4-18, llegando hasta el estanque principal.



Figura 4- 18. Sifón y bomba del retorno de la salmuera.

4.7. Instrumentación

Cabe mencionar que, por motivos de tiempo en la entrega de los distintos equipos, esencialmente el Datalogger, la mayor parte de la instrumentación que fue considerada en el diseño no fue implementada en este trabajo.

Los instrumentos que fueron emplazados corresponden a los tres manómetros, dos de ellos en la unidad de filtrado (véase figura 4-19) y el tercero antes de entrar al ramal de rociadores (véase figura 4-20). Además, se acoplo el caudalímetro junto de uniones americanas, como se observa en la figura 4-20, en caso de tener que retirar por algún motivo. Este aparato no puede medir caudal, ya que necesita el Datalogger, por lo tanto, no tiene utilidad funcional. Finalmente, se montaron los sensores PT100, probando principalmente la estanqueidad de las prensas estopas, las que cumplieron perfectamente su función de ajustar el sensor en el interior de la tubería sin filtrar agua, como se observa en la figura 4-21.



Figura 4- 19. Manómetros a la entrada y salida de la unidad de filtrado.

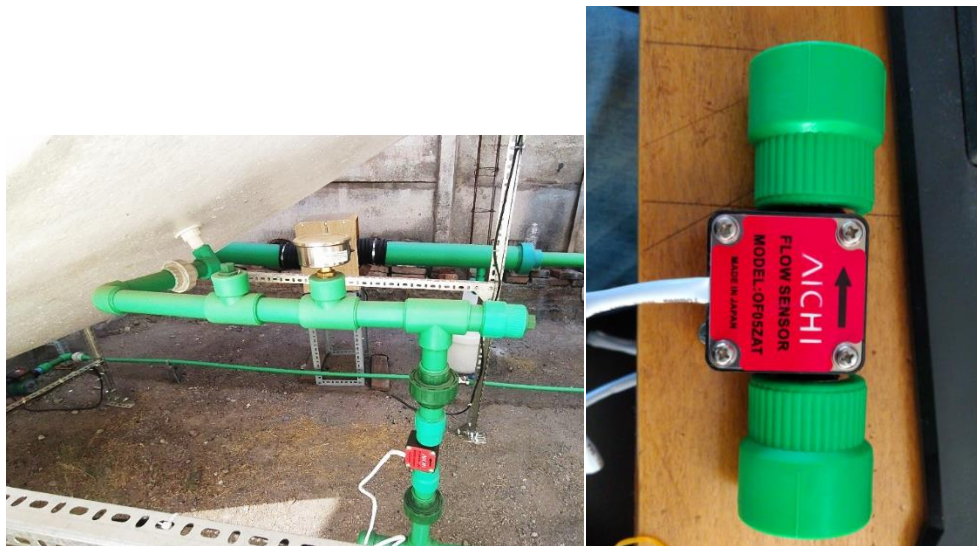


Figura 4- 20. Manómetro de glicerina y flujómetro en la conexión de la entrada del agua al humidificador.



Figura 4- 21. Sensor PT100 ajustado en el interior de la tubería por medio de una prensa estopa.

4.8. Receptor de agua pura

El receptor de agua en un principio fue armado según la figura 4-22, uniendo la botella graduada y el estanque de agua pura por medio de la válvula solenoide y dos salidas de estanque de ½”, pero al ser más alto que el sifón de agua pura, la válvula solenoide fue incluida en el interior del estanque de agua pura, como se observa en la figura 4-23.



Figura 4- 22. Botella graduada junto con el solenoide y el estanque de agua pura.



Figura 4- 23. Receptor y sifón de agua pura.

Como se observa en las imágenes, fue posible instalar de manera exitosa la gran mayoría de componentes del desalinizador HDH, de acuerdo con el diseño planteado en la sección anterior. Esta construcción fue llevada a cabo, mayoritariamente por una persona, a excepción del acoplado de la cámara de humidificación en su estructura y la termofusión en PPR de las conexiones de 110 mm, lo que indica que la complejidad de la construcción resultó ser sencilla, ya que el montaje de los equipos no ameritaba una capacitación especial para la fabricación y disposición de estos.

5. Puesta en marcha

Una vez instalados y acoplados los componentes al prototipo, se conectaron los equipos eléctricos a la red para inspeccionar el funcionamiento. También, se implementó una superficie de Nylon transparente que cubriera la cámara de humidificación, de esta manera se visualizó el desempeño de los rociadores. Es importante considerar que para el sistema de agua salada se utilizó agua potable estancada, debido a que el proyecto fue llevado a cabo en un domicilio particular en Santiago.

Al observar el patrón generado en el plástico al impactar el agua de los rociadores, como se advierte en la figura 5-1, se forma una mayor concentración en el centro de los rociadores, creando un cono no uniforme de aspersion. Además, se observa que el rociador inferior genera mayores puntos de concentración, pero sin lograr, igualmente, una distribución uniforme. Se probaron los tres niveles de la bomba principal, sin notar una gran diferencia entre estos. Por lo que procedió a medir el caudal de la bomba de circulación principal y buscar alternativas para aumentar este.

Asimismo, al comprobar el funcionamiento del ventilador este funciono en perfectas condiciones, logrando circular el aire en todas conexiones sin ninguna filtración. Al igual que el extractor, la bomba de retorno de la salmuera logro funcionar como se esperaba, retornando el agua de rechazo al estanque.



Figura 5- 1. Vista frontal de la cámara de humidificación con los rociadores en funcionamiento.

5.1. Verificación del caudal

Para determinar el caudal de la bomba principal, se desenroscó la unión americana del caudalímetro dejando fluir el agua y determinando la cantidad de litros de agua en un tiempo de aproximadamente treinta segundos. La primera medición corresponde al sistema en funcionamiento con la bomba principal en el nivel tres, el nivel de agua del estanque cercano a los 35 litros y utilizando el filtro de línea. En la segunda medición se aumentó el nivel del agua del estanque de agua salada a casi 140 litros. En la tercera medición se cerró el paso del bypass de la unidad de filtrado y se abrió al otro filtro, pero, esta vez, sin la malla de micrones en su interior.

Medición	P1 [bar]	Caudal [L/min]
Actual	0,28	4,54
Con mayor nivel de agua	0,33	6,34
Sin filtro	0,33	6,20

Tabla 5- 1. Primera prueba de medición del caudal

Posteriormente, se tomó otro punto de medición del caudal, determinando la cantidad de agua directamente desde el ramal de rociadores. En primer lugar, se midió retirando los dos aspersores, comprobando cuánta agua fluía de la zona inferior, y sin utilizar el filtro de línea. La segunda prueba, fue igual a la primera, pero empleando el filtro de línea. Luego, se volvió a instalar un rociador, específicamente el inferior, y finalmente, se midió el superior aisladamente.

Medición	P1 [bar]	P3 [bar]	Caudal [L/min]
Sin rociadores sin filtro	0,55	0,5	13,74
Sin rociadores con filtro	0,5	0,44	13,63
Rociador inferior	0,39	0,33	2,25
Rociador Superior	0,39	0,33	1,99

Tabla 5- 2. Segunda prueba de medición del caudal.

5.2. Montaje Final

Con las pruebas de la medición del caudal se logró determinar que los filtros no tenían una gran pérdida de carga, por lo que no se retiraron para la destilación del agua. Sin embargo, los rociadores presentaron la gran pérdida del sistema, pero al ser esenciales para el funcionamiento del sistema, no fue posible retirarlos. Asimismo, se observó un aumento del caudal con un nivel de agua del estanque principal en 140 L, por lo que se procedió a realizar el montaje final al instalar el panel fotovoltaico en la cámara de humificación, como se observa en la siguiente figura:



Figura 5- 2. Montaje final del desalinizador HDH.

Al instalar el panel y verificar la aislación del sello de caucho y los clips solares, esta no fue la óptima al presentar grandes filtraciones por la zona inferior del humificador, por lo que fue necesario utilizar espuma expansiva para la aislación. Seguidamente, al examinar la zona del destilado de agua pura, se observó que el ventilador presentaba fugas de agua, provenientes del interior del equipo, esto se debía a que el destilado no caía directamente en el orificio del sifón, ya que la montura del sifón al realizar la termofusión había dejado un relieve al interior de tubería de 110 mm, impidiendo que el agua pudiera caer de manera libre al sifón, por lo que fue necesario retirar dicha protuberancia del interior de la tubería, y al mismo tiempo, se le dio una inclinación al tramo que conecta al deshumificador con el extractor, consiguiendo que el agua que no ingrese al sifón no llegue al extractor de aire. Finalmente, con las filtraciones controlados y el sifón funcionando correctamente, se inició la prueba final del equipo.

Se realizó la primera prueba el día 14 de enero del 2021, a las 13:47, donde se destilaron 400 ml hasta las 16:15 hrs. de ese día, comenzando la prueba en la primera línea, por efecto del llenado del sifón, como se observa en la figura 5-3, donde luego de una hora de funcionamiento se registraron 250 ml (segunda línea roja) y al finalizar la prueba, en casi dos horas y media de funcionamiento, se registraron los otros 150 ml (tercera línea roja). De esta manera se pudo corroborar el principio de funcionamiento de acuerdo con lo diseñado, considerando que aún no se ha alcanzado la estabilidad de operación de caudal y sin tener alguna medida específica de la temperatura de funcionamiento del equipo.



Figura 5- 3. Destilado de agua pura. La primera línea corresponde al comienzo de la prueba, la segunda a la hora de funcionamiento y la tercera al término de la prueba.

En esta sección se mostró principalmente el funcionamiento de los aspersores en función del caudal, el cual fue determinado de manera manual, generando un patrón al impactar una superficie de Nylon, de esta manera, se logró comprobar que el caudal estaba dentro de lo diseñado y que el ángulo de dispersión del chorro de agua no alcanzaba a impactar de manera completa el plástico. Sin embargo, se procedió al montaje final del prototipo, acoplando el panel fotovoltaico a la cámara de humidificación.

En esta oportunidad fue destilado una cantidad aceptable de agua (400 ml de agua), de acuerdo con el desempeño de los prototipos anteriores y considerando que se encontraba trabajando con solo un panel fotovoltaico. Si bien se obtuvo un funcionamiento correcto del equipo, para llegar a valores mayores aún se requiere tener mayor control de los parámetros operacionales para mejorar la operación, lo que no fue posible al no poder montar la instrumentación en el prototipo.

Por último, se realizaron un total de 5 pruebas posteriores para comprobar que los datos obtenidos de la primera prueba no fueran circunstanciales, como resultado se obtuvo una destilación

similar a la primera, no variando significativamente en las mismas horas de uso del prototipo, comprobando así, que su desempeño se mantiene constante.

6. Conclusión

En el inicio de este trabajo se recopilaron y analizaron antecedentes de distintos prototipos HDH y prototipos HDH-PVT, en primer lugar, se seleccionaron las distintas clasificaciones consideradas para el diseño del sistema HDH, ya sea la dirección de los flujos (contraflujo y flujo cruzado), el fluido a calentar (agua) y la configuración del ciclo del sistema (CACW). Luego, se pudo determinar que el uso del relleno del humidificador no era relevante de acuerdo con el estudio y pruebas realizadas del Trabajo Doctoral de Alejandro Álvarez, por lo que fue retirado del diseño. Finalmente, con los prototipos anteriormente diseñados y construidos del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad, se pudo obtener la información de los distintos componentes que fueron utilizado para el nuevo diseño, al tener como diferencia principal el Humificador PVT.

El diseño de este nuevo prototipo cumplió con los objetivos principales tales como la facilidad para su construcción y su desinstalación en caso de trasladar el desalinizador a otro lugar. Además, se precisó en utilizar el menor espacio posible en su instalación, pudiendo implementarse en un espacio de $15m^2$ y emplear equipos con un bajo consumo eléctrico, considerando que su consumo no supera los 250 W. Asimismo, al ser un prototipo experimental, se diseñó para instrumentar la mayor cantidad de variables relevantes y poder analizar diversos puntos de interés, ya sea temperaturas, caudal, presión, radiación y humedad. También, este diseño puede ser fácilmente modificable, pues al tener equipos eléctricos con una amplia oferta en el comercio, cualquier cambio que se desee hacer en el sistema, ya sea reparación, mejora o reacondicionamiento resulta muy sencillo. Por último, se incluyeron diversos puntos en las conexiones de PPR para poder conectarlo, en un futuro, en serie o en paralelo con otro desalinizador, y de esta manera, comprobar su desempeño con distintas configuraciones.

De esta forma, al ser un prototipo experimental, el diseño y los recursos fueron centrados en parámetros y equipos claves dentro del proceso, por lo que no se implementó el sistema con alimentación eléctrica fotovoltaica, sino que estuvo planteado para funcionar conectado a la red eléctrica doméstica, sin embargo, en caso de acoplar el panel fotovoltaico a los equipos necesarios para la generación eléctrica autónoma, puede ser implementado sin mayor problema, dado que el

consumo de los equipos es bajo, de acuerdo a las fichas técnicas de estos, y teniendo en consideración que el panel fotovoltaico puede producir la energía suficiente para su funcionamiento.

Fue posible instalar de manera exitosa el desalinizador HDH, de acuerdo con el diseño planteado, sin embargo, tuvo que ser reducido en su tamaño, en consideración a las condiciones del espacio en el que fue implementado. Esta construcción fue llevada a cabo principalmente por una persona, lo que indica que la complejidad de la construcción resulto ser sencilla, ya que el montaje de los equipos no ameritaba una capacitación especial para la fabricación y disposición de estos.

La producción de agua destilada registrada al 14 de enero del 2021 fue de 400 ml en casi dos horas y treinta minutos de funcionamiento, la cual resulto ser la primera prueba, trabajando con agua potable estancada en el sistema de agua salada. En esta oportunidad, el sistema comenzó a producir las primeras gotas de destilado a los diez minutos de uso, produciendo a la hora de funcionamiento 250 ml y 150 ml en el tiempo restante. Este destilado fue una cantidad aceptable de agua, de acuerdo con el desempeño de los prototipos anteriores, considerando que se encontraba trabajando con solo un panel fotovoltaico. Si bien se obtuvo un funcionamiento correcto del equipo, para ser posible llegar a valores mayores aún se quiere tener mayor control de los parámetros operacionales para mejorar la operación, optimizando el rendimiento de la maquina a través de mediciones por medio de la instrumentación, especialmente de temperatura, junto a la posibilidad de usar modelos de simulación, y de esta forma, ajustar los parámetros de entrada para obtener un mejor desempeño.

A pesar de que la configuración del ciclo del equipo es CACW, esta podría, en un futuro, modificarse en una configuración CAOW con la disposición de un estanque más en el sistema, y de esta manera se podría incrementar la cantidad de destilado al evitar el calentamiento del agua por la recirculación, el cual fue posible observar al disminuir notoriamente el destilado pasada la hora de funcionamiento.

Finalmente, el método de la desalinización HDH acoplado a un colector PVT es una alternativa con un gran potencial para desalinizar en lugares remotos que no tengan acceso a energía eléctrica, que cuenten con una alta radiación solar y estén ubicados en sitios cercanos a fuentes hídricas no potables, debido a que se puede instalar en espacios reducidos, no necesita una gran cantidad de mano de obra, tiene la posibilidad de alimentación energética mediante el panel fotovoltaico, por lo que le otorga autonomía en su funcionamiento y es de fácil mantenimiento.

7. Bibliografía

- [1] ONU (2020). WWDR 2020: Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020. Recuperado en: <https://en.unesco.org/themes/water-security/wwap/wwdr/2020>
- [2] 2030 WRGAR (2020). The 2030 water resources group annual report. Reporte técnico, Recuperado enero de 2021: https://www.2030wrg.org/wp-content/uploads/2020/11/WRG-Annual-Report_2020_Sprds_12_4.pdf
- [3] Álvarez Morales, Alejandro (2019). Investigación teórico experimental de un desalinizador de tipo humidificación-deshumidificación dispuesto con intercambiadores de calor y masa de contacto directo. Tesis Doctorado. CICESE, Baja California.
- [4] Reyes Valenzuela, Mauricio. Diseño y construcción de sistema de desalinización solar por método de humidificación-deshumidificación (hdh) acoplado con energía solar. B.S. thesis, Santiago/Universidad Técnica Federico Santa María, 2017.
- [5] Giwa Adewale, Fath Hassan, and W. Hasan. Shadi. Humidification-dehumidification desalination process driven by photovoltaic thermal energy recovery (pv-hdh) for small-scale sustainable water and power production. *Desalination* 377, pages 163–171, 2016.
- [6] Anand, B., Srinivas, T. Performance evaluation of photovoltaic/thermal–HDH desalination system. *Appl. Sol. Energy* 53, 243–249, 2017.
- [7] Gabrielli, P., Gazzani, M., Novati, N., Sutter, L., Simonetti, R., Molinaroli, L., ... & Mazzotti, M. Combined water desalination and electricity generation through a humidification-dehumidification process integrated with photovoltaic-thermal modules: Design, performance analysis and techno-economic assessment. *Energy Conversion and Management*: X, 1, 100004, 2019.
- [8] Barraza Vicencio R., Reyes Valenzuela M., Ramírez Riveros R., Castillo Burns F. Humidificador de aire para un sistema para destilar agua por humidificación-deshumificación, que comprende un panel solar fotovoltaico, que posee una superficie anterior y una superficie posterior, una cámara de humidificación, unida a dicha superficie posterior de dicho panel solar fotovoltaico; sistema para destilar agua. https://www.2030wrg.org/wp-content/uploads/2019/11/WRG-Annual-Report_Web-11_21.pdf 201901906. 09 Julio 2019.
- [9] Rodríguez Bahamondes, Mauricio (2019). Construcción y puesta en marcha del sistema de desalinización por humidificación y deshumidificación de dos etapas acoplado con energía solar. B.B. Thesis. Universidad Técnica Federico Danta María, Santiago.

- [10] Aburto Valenzuela, Jose. Rediseño de prototipo de desalinización solar con sistema hdh. b.s. thesis, santiago/Universidad Técnica Federico Santa María, 2018.
- [11] Klein, S. A., and Alvarado, F.L., 2001, Engineering Equation Solver (EES), F-Chart Software, Madison. WI
- [12] Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J.. Heat and mass transfer: Fundamentals & applications. New York: McGraw-Hill. 2011.
- [13] Jahn Galdames, Natalia. Modelación numérica de sistema de desalinización HDH con incorporación de PVT. B.S. thesis, Santiago/Universidad Técnica Federico Santa María, 2020.
- [14] AUTOENERGIAS. Recuperado en diciembre 2020: <https://www.autoenergias.cl/product/conector-grapa-lateral-panel-solar-40mm/>
- [15] Spraying Systems Co. References Technical, 2008
- [16] COSMOPLAS. COSMOPLAS lista de precios, 2020.
- [17] Leiva Flores, Esteban. Modelamiento numérico y análisis de configuraciones de sistemas de destilación por humidificación y deshumidificación (hdh). B.S. thesis, Santiago/Universidad Técnica Federico Santa María, 2018.
- [18] Stainless Steel Pool and Spa Heat Exchangers. Stainless Steel Pool and Spa Heat Exchangers, 2010.
- [19] ACESOL, Ministerio de Energía, CORFO. (2017). Manual de diseño de Sistemas Solares Térmicos para la Industria Chilena. <http://appsol.cl/wp-content/uploads/2017/03/APPSOL.Manual-FINAL.pdf>
- [20] Megyesy, E. F. (1992). Manual de Recipientes a Presión (Vol. 1). Limusa. (P-184)
- [21] Huidogro Pelayo, Mónica. (2016). Diseño de una estructura soporte para un módulo integrado de placa fotovoltaica. Trabajo de Magister. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid
- [22] AstroEnergy. Datasheet Crystalline PV module ASM6612P series. Febrero 2016.
- [23] Advis Vega, Fabricio. Ángulo inclinación del Humificador PVT. Technical Report, Universidad técnica Federico Santa María, 2020.
- [24] Antumec. Intercambiadores de calor de titanio. 2020.
- [25] Notorius. Recuperado en 2020: <https://notorious.cl/545-vk>
- [26] AndinoTech. Recuperado en 2020: <https://andinotech.cl/tienda/control-de-clima/accesorios-de-ventilacion/regulador-de-potencia-dimmer-vdl/>
- [27] AndinoTech. Recuperado en 2020: <https://andinotech.cl/tienda/control-de-clima/ductos-de-ventilacion/ducto-flexible-combiconnect-102-127-152-203mm-1m/>

- [28] Koalition. Catálogo de tubos y accesorios PPR, 2020.
- [29] Diplas. Recuperado en 2020: https://www.diplas.cl/products/salida_de_estanque_hidraulica
- [30] Moldeo SHYF. Ficha técnica estanque cónico 200 LTS, 2018.
- [31] Leo. LRP Circulation Pump, Hydraulic Performance Curves. 2020
- [32] TAIFU. GRS25/6 Circulating Pump. 2020.
- [33] Starware. Recuperado en enero 2021: <https://tienda.starware.com.ar/producto/medidor-de-flujo-aichi-of05zat-12-pulgada-caudalmetro/>
- [34] Allied Electronics & automation. Recuperado en enero 2021: <https://es-cl.alliedelec.com/product/rs-pro-by-allied/8968395/71830287/>
- [35] MCI electronics. Recuperado en enero 2021: <https://www.mcielectronics.cl/shop/product/sensor-de-nivel-de-liquido-sin-contacto-gravity-23345>
- [36] MCI electronics. Recuperado en enero 2021: <https://www.mcielectronics.cl/shop/product/valvula-solenoide-25571>
- [37] Campbell Scientific. Recuperado en enero 2021: <https://www.campbellsci.es/cr310>
- [38] British Standard Institution. BS 4994:1987. Specification for design and construction of vessels and tanks in reinforced plastics.

8. Anexos

8.1. Planos cámara de humidificación

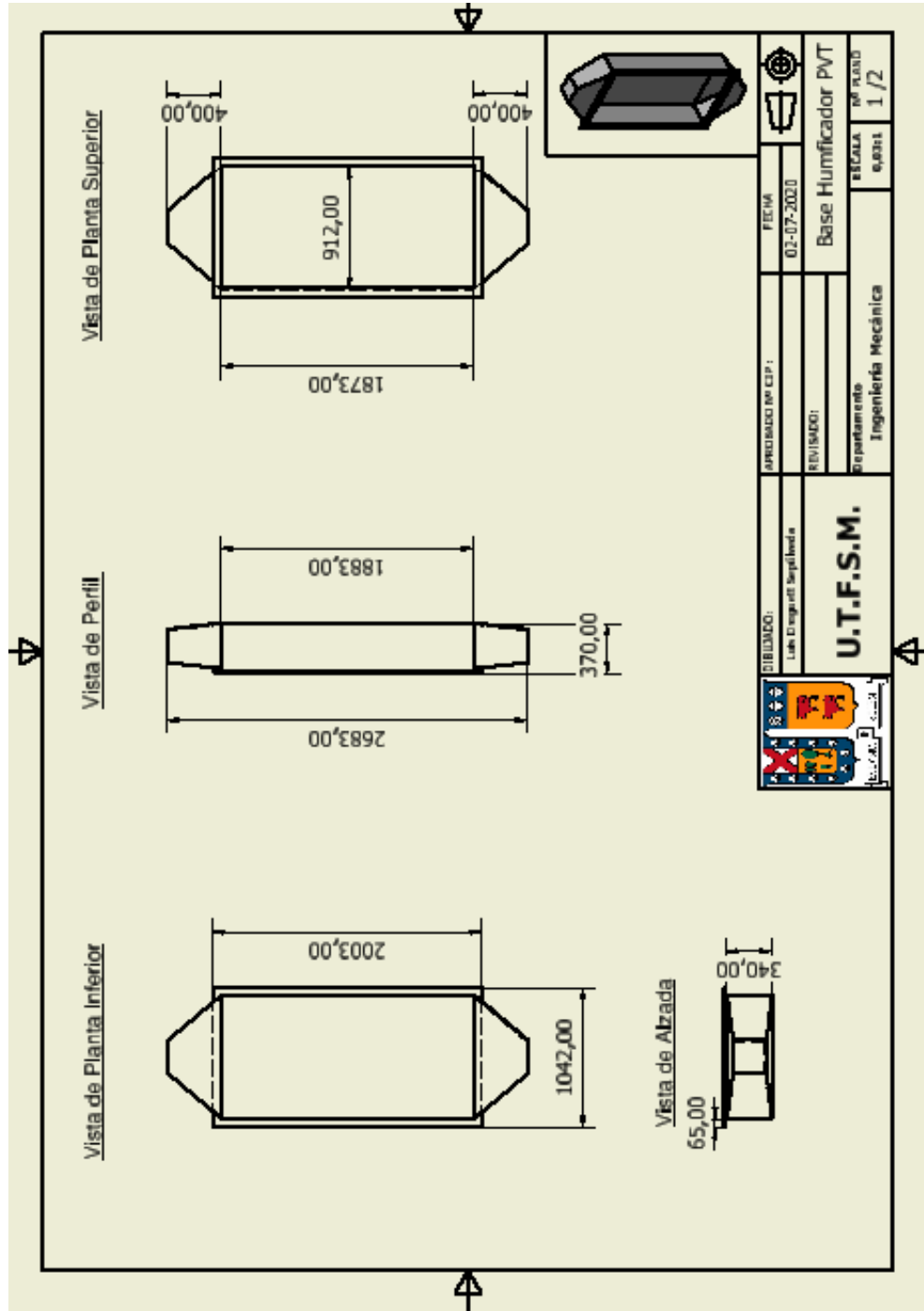


Figura 8- 1. Plano 1 de la cámara de humidificación.

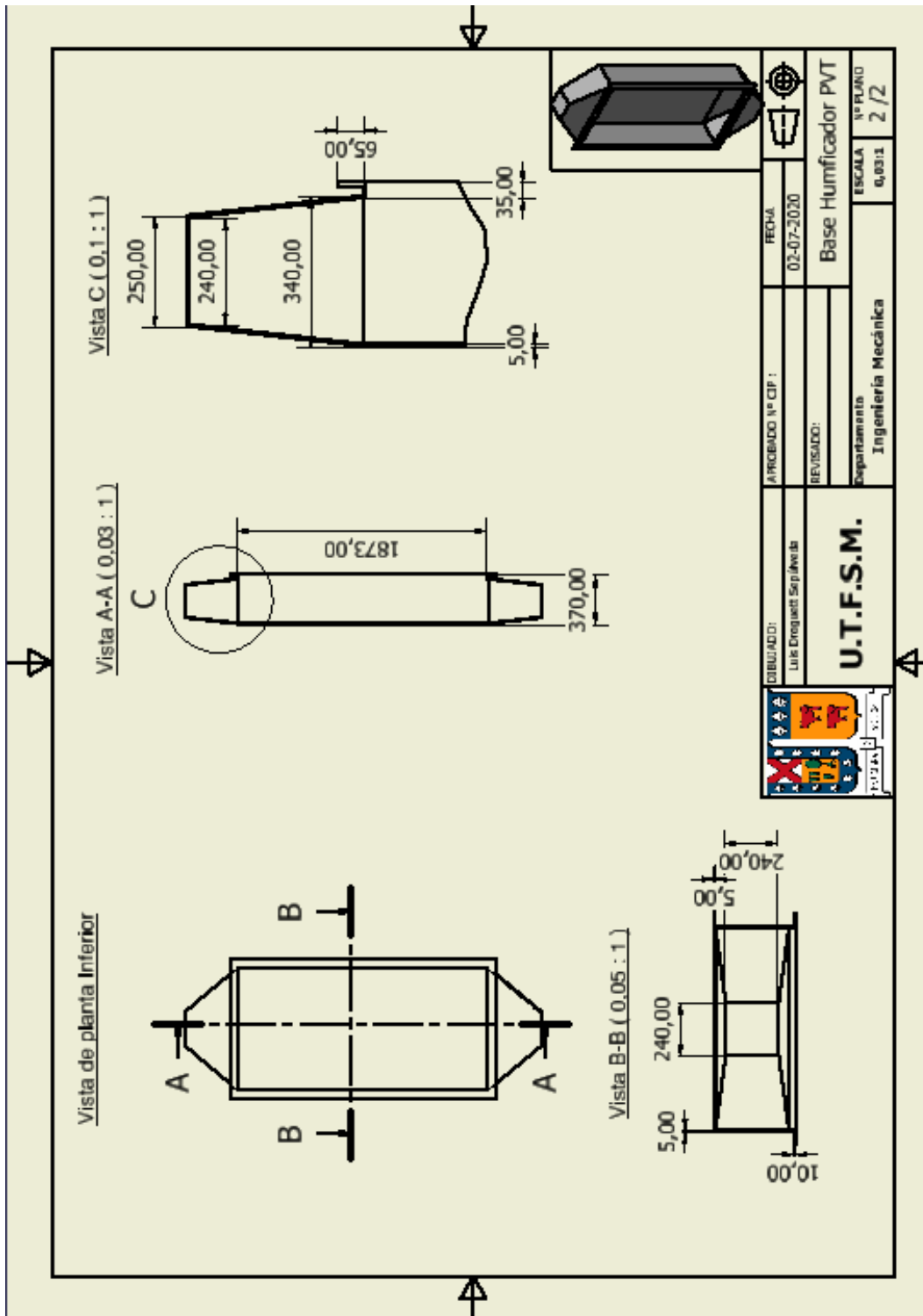


Figura 8- 2. Plano 2 de la cámara de humidificación.