UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

SANTIAGO - CHILE

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE SISTEMA DE DESALINIZACIÓN POR MÉTODO DE HUMIDIFICACIÓN-DESHUMIDIFICACIÓN (HDH) ACOPLADO CON ENERGÍA SOLAR

MAURICIO ANTONIO REYES VALENZUELA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: Ph.D RODRIGO BARRAZA V.

PROFESOR CORREFERENTE: Dipl. Ing. UDO RHEINSCHMIDT

JUNIO 2017

Agradezco a todas las personas que se involucraron e hicieron posible este proyecto… especialmente a mi abuela Ana quien fundo muy temprano en mí el interés por el conocimiento.

Resumen Ejecutivo

Hay dos retos principales para el mundo en el futuro, la escasez de la energía y la escasez de agua dulce, estos juegan un papel crucial en el desarrollo económico, social y cultural. El agua es un elemento importante para la vida, ya que sin ella no podríamos vivir, además está presente prácticamente en todo proceso industrial, como agricultura, minería, manufactura, procesos químicos, refrigeración, por nombrar algunos de ellos. La desalinización representa un sistema consolidado para resolver la escasez hídrica. Uno de los principales inconvenientes de este sistema, es que se trata de un proceso energointensiva, es decir, se requiere importantes cantidades de energía y costos muy altos.

Acoplar un sistema de desalinización con una fuente de energía renovable, como la es la energía solar, es la tarea principal de este trabajo. El método a diseñar es llamado Humidificación-Deshumidificación (HDH), la cual tiene su principio de operación basado en el ciclo natural del agua. Para llevar a cabo esto se requiere replicar las condiciones de humidificación de que se origina en los océanos de forma artificial en un equipo llamado Humidificador, la condición de condensación originada en las montañas (lluvia) en otro equipo llamado deshumidificador (o condensador) y obtener la fuente de energía para el proceso mediante colectores solares, que si se piensa bien, es la misma energía que origina el ciclo del agua.

El diseño conceptual es materializado en un prototipo desalinizador HDH de pequeña escala, que consta de una torres humidificación por pulverización y un deshumidicador (intercambiador de calor de tubo aleteado), cuatro colectores solares (con un total de 8 metros cuadrados de colección aproximadamente) y sistemas periféricos de bombeo y ventilación forzada. La alimentación de los equipos eléctrico es mediante un equipo solar fotovoltaico desconectado de la red eléctrica. El equipo está acondicionado para operar autónomamente con energía solar. Hasta el momento el registro más alto de producción de agua dulce es de 24 litros al día, obtenidos el 24 de abril del año 2017.

Abstract

There are two main challenges for the world in the future, energy shortages and fresh water shortages, these play a crucial role in economic, social and cultural development. Water is an important element for life, since without it we could not live, it is also present in virtually every industrial process, such as agriculture, mining, manufacturing, chemical processes, refrigeration, to name a few. Desalination represents a consolidated system for solving water scarcity. One of the main drawbacks of this system is that it is an energy-intensive process, that is, it requires significant amounts of energy and very high costs.

Coupled with a desalination system with a renewable energy source, such as solar energy, is the main task of this work. The method to be designed is called Humidification-Dehumidification (HDH), which has its operating principle based on the natural cycle of water. To accomplish this it is required to replicate the humidification conditions that originate in the oceans artificially in a computer called Humidifier, the condition of condensation originated in the mountains (rain) in another equipment called dehumidifier (or condenser) and obtain The energy source for the process through solar collectors, which if you think about it, is the same energy that originates the water cycle.

The conceptual design is embodied in a small scale HDH prototype, which consists of a spray humidification towers and a dehumidifier (flap tube heat exchanger), four solar collectors (with a total of approximately 8 square meters of collection) and Peripheral pumping and forced ventilation systems. The power of the electrical equipment is by means of a photovoltaic solar equipment disconnected from the electrical network. The equipment is conditioned to operate autonomously with solar energy. So far the highest record of freshwater production is 24 liters per day, obtained on April 24, 2017.

Contenido

1 Resumen Ejecutivo 3

2 Abstract 4

3 Índice de figuras 8

4 Índice de tablas 10

1 Capítulo 1 11

1.1 Introducción 11

1.2 Objetivo General 12

1.3 Objetivos específicos 12

1.4 Situación actual del recurso hídrico 13

1.4.1. Situación hídrica mundial 13

1.4.2. Situación hídrica chilena. 14

1.4.3. Producción y consumo de agua potable en Chile 19

1.4.4. Calidad del agua potable en Chile 20

1.5 Escenario actual de la industria desalinizadora 22

1.5.1. Breve reseña histórica sobre la desalinización 22

1.5.2. Situación Internacional 23

1.5.3. Situación en Chile 25

2 Capítulo 2 27

2.1 Estado del arte 27

2.1.1. Procesos de Desalinización con Energía Solar 27

2.2 Destilación por Humidificación-Deshumidificación (HDH) 28

2.3 Clasificación método HDH. 30

2.3.1. Circuito cerrado de aire y abierto de agua (CAOW) con agua calentada 31

2.3.2. Circuito cerrado de aire y abierto de agua (CAOW) con aire calentado 32

2.3.3. Circuito cerrado de agua y abierto de aire (CWOA) con agua calentada 33

2.3.4. Circuito cerrado de agua y abierto de aire (CWOA) con aire calentado 34
2.4 Discusión de las configuraciones HDH 35
3 Capítulo 3 37
3.1 Diseño Planta desalinizadora HDH 37
3.1.1. Diseño Humidificador 38
3.1.2. Diseño deshumidificador 47
3.1.3. Colectores solares 51
3.1.4. Sistema solar fotovoltaico 59
3.1.5. Puntos de medición de temperatura. 60
4 Capítulo 4 62
4.1 Construcción Desalinizador 62
4.1.1. Construcción humidificador 63
4.1.2. Construcción deshumidificador 67
4.1.3. Colectores solares 68
4.1.4. Ductos de aire 70
5 Capítulo 4 71
5.1 Puesta en marcha del desalinizador 71
6 Capítulo 6 72
6.1 Conclusión 72
7 Bibliografía 73
8 Anexos 76
8.1 Parámetros de rendimiento 76
8.2 Plano estaque humidificador 100.100.010 79
8.3 Arreglo pulverizadores 100.100.020 80
8.4 Piezas del cierre tapa estanque 100.300.030 81

8.5 Soporte colector solar 100.300.000 82

8.5.1. Pieza 100.300.010 83

8.5.2. Pieza 100.300.020 84

8.5.3. Pieza 100.300.030 85

8.5.4. Pieza 100.300.040 86

8.5.5. Pieza 100.300.050 87

Índice de figuras

Figura 1-1. Banco Mundial, recurso de agua dulce renovable per cápita 2014 [5]. 13
Figura 1-2. Disponibilidad hídrica por Región para 1987, 2010 y proyección a 2025. Extraído de Informe del Estado del Medio Ambiente, 2011 [8]. 15
Figura 1-3. Caudal Disponible, Caudal Ecológico y Caudal Otorgado de las principales cuencas hidrográficas. Extraído de Informe del Estado del Medio Ambiente, 2011 [8]. 18
Figura 1-4. Producción de agua potable según región año 2014. Valores obtenidos de la tabla 5.3.1 del informe anual 2015, medio ambiente, INE 2014[7]. 19
Figura 1-5. Ilustración de Alejandro Anfrodisia, marinos produciendo agua dulce por medio de la destilación [11]. 22
Figura 1-6. Capacidad instalada actual y proyección de plantas desalinizadoras en el mundo. Extraída de Lettemann, 2010 [12]. 24
Figura 2-1. Métodos de desalinización acoplados con energía solar. 27
Figura 2-2. Esquema básico método de desalinización por HDH CAOW. Adaptado de Perth Ida World congress 2011 [20]. 29
Figura 2-3. Diagrama demostrativo planta experimental HIMIN. Adaptado de Guofeng Yuan [2]. 30
Figura 2-4. Clasificación basada en la configuración del proceso HDH. 31
Figura 2-5. a) Configuración sistema HDH CAOW con calentamiento de agua. b) Procesos esquematizado en la carta psicométrica. Adaptado de Narayan et Al.[18]. 32
Figura 2-6. a) Configuración sistema HDH CAOW con calentamiento de aire. b) Procesos esquematizado en la carta psicométrica. Adaptado de Narayan et Al. [18]. 33
Figura 2-7.. a) Configuración sistema HDH CWOA con calentamiento de agua. b) Procesos esquematizado en la carta psicométrica. Adaptado de Narayan et Al. [18]. 34
Figura 2-8. a) Configuración sistema HDH CWOA con calentamiento de aire. b) Procesos esquematizado en la carta psicométrica. Adaptado de Narayan et Al. [18]. 35
Figura 3-1. Esquema instalación planta desalinización HDH. 38
Figura 3-2. Propiedades geométricas pulverizador PJ24. Adaptado de BETE [21]. 41
Figura 3-3. Geometría arreglo de pulverizadores en la base del cono desarrollado. 42
Figura 3-4 Característica relleno evaporativo seleccionado para el humidificador. 43

Figura 3-5. Dimensiones geométricas del estanque AQUATANK 4.0 Infraplast. 44
Figura 3-6. Dibujo técnico del humidificador. 45
Figura 3-7. Dibujo técnico de piezas para el cierre del estanque. 46
Figura 3-8. Diseño del humidificador del desalinizador. 47
Figura 3-9. Esquema del intercambiador de calor de flujo cruzado de tubo aleteado..... 48
Figura 3-10. Campanas de zinc, espesor de 0,5 mm. 49
Figura 3-11. Diseño del deshumidificador del desalinizador. 50
Figura 3-12. Componentes principales de un colector plano. Extraído del Sistemas solares térmicos II, figura 3-4 [22]. 51
Figura 3-13. Curva eficiencia colector Yazaki SC-V1020. 53
Figura 3-14. Soporte para colectores solares con ajuste de inclinación para estaciones del año. 54
Figura 3-15. Esquema del sistema de los colectores solares y sus componentes. 58
Figura 3-16. Consumo de energía solar y consumo total. 60
Figura 3-17. Esquema de la instalación del desalinizador señalizando los puntos de medición. 61
Figura 4-1. Layout equipo desalinizador. 62
Figura 4-2. Esquema de la instalación del desalinizador..... 63
Figura 4-3 . Corte del estanque en la parte superior. 64
Figura 4-4. . Instalación de los sujetadores del relleno y orificio para la instalación del ducto de 6”. 64
Figura 4-5. Instalación de la tapa del humidificador. 65
Figura 4-6. Pulverizadores. 65
Figura 4-7. Instalación de los pulverizadores en el humidificador..... 66
Figura 4-8. Relleno evaporativo en el humidificador. 66
Figura 4-9. Humidificador. 67
Figura 4-10. Deshumidificador..... 68
Figura 4-11. Instalación de los colectores solares. 69
Figura 4-12. Conexión de los colectores solares. 69
Figura 4-13. Ductos de aire. 70

Índice de tablas

Tabla 1-1.Límites máximos de algunos parámetros definidos por la Norma NCh409/1 [10]. 21
Tabla 3-1. Indicación del caudal obtenido según ficha técnica del dispositivo [21]. 41
Tabla 3-2. Características del intercambiador de calor para el deshumidificador. 49
Tabla 3-3. Especificaciones técnicas colectores solares. 52
Tabla 3-4. Materiales de construcción colector. 52
Tabla 3-5. Puntos de operación intercambiar de placas Alfa Laval Modelo T2 BFG/12H. 55
Tabla 3-6. Condiciones de operación intercambiador de calor de placa en el equipos desalinizador. 56
Tabla 3-7. Característica remarcador de agua Itron El MAIPO TM – II. 58
Tabla 3-8. Consumo de los equipos eléctricos del desalinizador. 59
Tabla 3-9. Resultados simulación de equipos solar fotovoltaico software PV*SOL Expert 6.0. 59
Tabla 4-1. Características filtro red de agua salada, marca Vigaflow. 62

Capítulo 1

1.1 Introducción

Hay dos principales retos para el mundo en el futuro, la escasez de la energía, y la escasez de agua dulce, estos juegan un papel crucial en el desarrollo económico, social y cultural. El agua es un elemento crucial para la vida. Además está presente prácticamente en todo proceso industrial, como agricultura, minería, manufactura, procesos químicos, refrigeración, por nombrar algunas de ellas. En muchas localidades existen dificultades con el abastecimiento y disponibilidad de los recursos hídricos, por lo que encontrar nuevas formas de abastecerse con agua potable es una necesidad creciente en muchas zonas del planeta.

La desalinización representa un sistema consolidado para resolver la emergencia hídrica. Uno de los principales inconvenientes de este sistema es que se trata de un proceso energointensiva, es decir, se requiere importantes cantidades de energía.

Por lo anterior, es imperativo evaluar la viabilidad de utilizar calores de bajo grado o energía térmica provistos por fuentes renovables como fuente energética para destilar el agua. Desalinizar agua de mar utilizando energías renovables posee varias ventajas, entre que se encuentran [1,2]:

- La escasez de agua y alta disponibilidad del recurso de la energía solar son factores de suelen coincidir geográfica y estacionalmente. En regiones remotas, como por ejemplo, el norte de Chile.
- Permite la auto-suficiencia y autonomía de los territorios tanto en agua como en energía. Las energías renovables permiten diversificar las fuentes de energía, lo que conduce a una matriz energética robusta y segura.
- El aumento y sensibilidad de precio de los combustibles fósiles hace inestable económicamente las fuentes tradicionales, afectando el costo de la desalación tradicional.
- Disminuye los impactos medioambientales. Las plantas desalinizadoras al poseer un alto consumo energético, generan también un impacto ambiental considerable. Las energías renovables, en general también son amigables con el medio ambiente.

1.2 Objetivo General

El objetivo general de este trabajo es diseñar y construir un equipo de desalinización por método de humidificación-deshumidificación (HDH) acoplado con energía solar, para aplicaciones a pequeña escala tales como un domicilio o una pequeña comunidad, de bajo costo, mantención sencilla y vida útil significativa.

1.3 Objetivos específicos

- Estudiar la bibliografía y seleccionar una configuración de desalinización por método de humidificación-deshumidificación (HDH) para ser construida.
- Seleccionar, dimensionar y especificar componentes adecuados para el sistema de desalinización y el suministro de energía solar para una operación autónoma.
- Realizar los planos de fabricación del equipo desalinizador
- Construir el equipo desalinizador
- Adecuar el equipo para permitir la puesta en marcha del equipo desalinizador.

1.4 Situación actual del recurso hídrico

1.4.1. Situación hídrica mundial

Aproximadamente el 70% de la superficie terrestre de nuestro planeta se encuentra cubierta por agua, sin embargo el 97,5% corresponde a agua salada, imbebible para el consumo humano. El 2,5% restante corresponde a agua dulce, que se distribuye en 0,3% para aguas en ríos, lagos y aguas superficiales de fácil acceso, un 68,90% corresponde a glaciares y casquetes de hielo, y el 29,9% restante se ubica en aguas subterráneas, permafrost y humedad del suelo [3]. En la figura 1-1 muestra la disponibilidad del recurso de agua dulce renovable per cápita mundial, es decir, las aguas que son sostenidas por caudales de rio y agua freática originadas por lluvias calculadas por el banco mundial el año 2014 [5]. En la figura se puede dilucidar la desproporción y escasez del recurso hídrico.

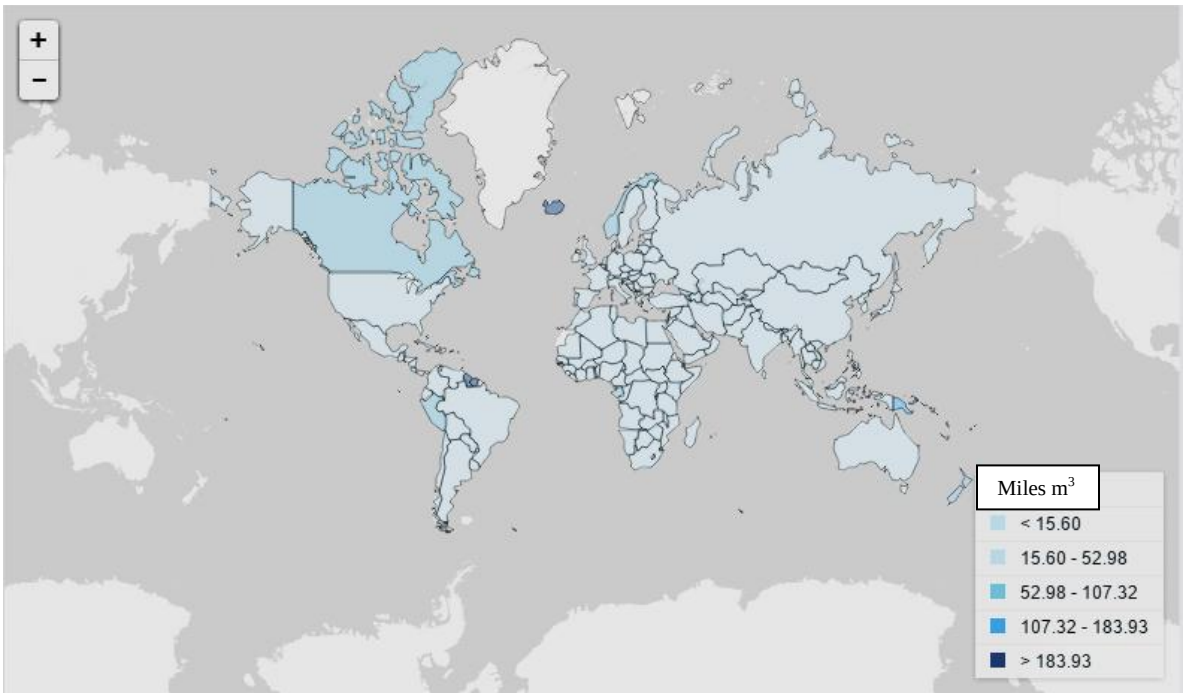


Figura 1-1-1. Banco Mundial, recurso de agua dulce renovable per cápita 2014 [5].

Debido a la revolución industrial la población mundial ha crecido exponencialmente, aumentando también la necesidad de recursos naturales para su existencia, entre los más demandados se identifica el agua. La población ha pasado de 1.000 millones de habitantes en el año 1800 a más 7.000 millones en la actualidad. Sin embargo, la disponibilidad de agua es limitada en el planeta y depende de su ciclo natural,

donde cerca de $577.000[km^3]$ de agua recircula cada año. La disponibilidad de agua dulce ha disminuido en términos per cápita desde $13.390\ m^3$ el año 1962 hasta $5.926\ m^3$ el año 2014.

El consumo de agua per cápita varía dependiendo de cada zona geográfica. Los países desarrollados consumen más agua que los en vías de desarrollo, y dentro de estos las zonas urbanas prácticamente duplica las zonas rurales. Dentro de los usos más importantes del agua son la agricultura con un 54%, uso industrial con un 19% y para uso doméstico un 27% [5,6]. Estos porcentajes corresponde a valores globales, y estos varían de país a país según sus necesidades hídricas e industriales.

1.4.2. Situación hídrica chilena.

El Instituto Nacional De Estadísticas (INE), realiza un informe estadístico medio ambiental en año 2015 [7], donde señala que la hidrografía chilena presenta distintas características según la región natural que se estudie. Las condiciones de hidrología presentes en Chile se relacionan principalmente con factores como el clima y el relieve, los que influyen en aspectos como el régimen y caudal.

Un parámetro importante para definir la disponibilidad hídrica de un territorio es el balance hídrico, que se define como la diferencia entre las recargas o aguas que entran a un sistema, y las descargas o extracciones naturales y artificiales. La Dirección General de Aguas (DGA) en 1987 realizó un balance hídrico, donde se estableció que la zona que recibió mayor aportes por precipitación es la región de Aysén, que supera en 70 veces la región de Antofagasta, la cual presenta la menor cantidad de aguas lluvia. El estudio destaca la relación existente entre la evaporización y precipitación, donde este aspecto en la zona norte del país (desde la región de Coquimbo al norte) presenta una relación de 90%, mientras en la zona austral (desde la región de Los Lagos al sur) no supera el 20%.

La DGA ha definido tres escenarios que se muestras en la figura 1-2 que permiten analizar la proyección y déficit hídrico que tendrá Chile en los próximos años. El primero de ellos que se realizó el año 1987, basado en el estudio de balance hídrico realizado ese año; el segundo corresponde al año 2010, donde se evidencia un aumento de la demanda sin avistamientos del cambio climático, que se le culpa por la disminución del recurso; el último y tercer escenario se sitúa en 2025. En la figura 1-2 se observa como ya el año

1987 desde el norte grande hasta la Región Metropolitana se presenta un balance negativo, es decir, que sus cuerpos de agua recibidos naturalmente son menores que el agua que se extrae de estos, ya sea de forma natural o por acción del hombre. Con el paso del tiempo la situación en el balance hídrico ha incrementado hacia el año 2010 y se espera que para el 2025 la situación en el norte grande sea más desfavorable.

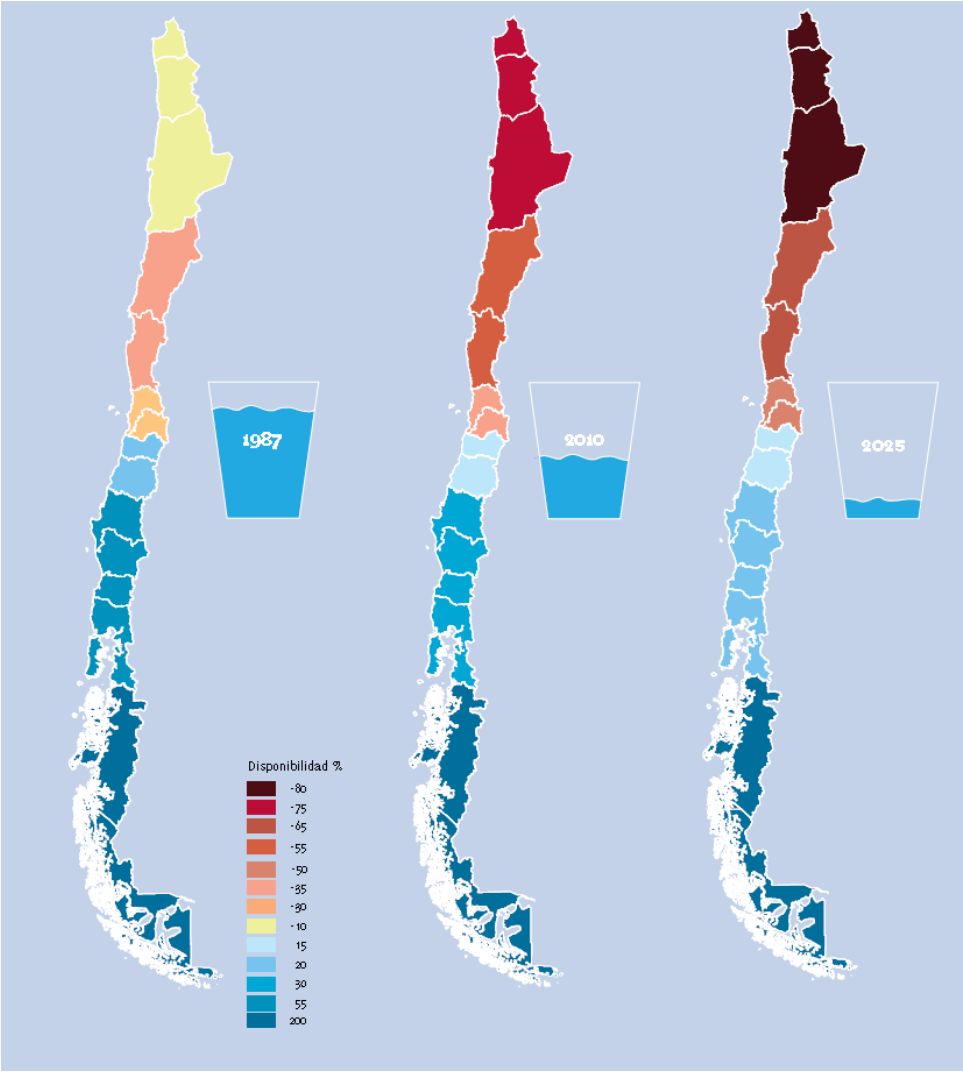


Figura 1-1-2. Disponibilidad hídrica por Región para 1987, 2010 y proyección a 2025. Extraído de Informe del Estado del Medio Ambiente, 2011 [8].

Los ojos del mundo, un lugar privilegiado en materia de recursos hídricos pose una disponibilidad de agua superficial mayor a $53.000\ m^3$ por persona al año. Dicho valor es bastante alto considerando la media mundial de $6.000\ m^3$ por persona al año y el umbral mínimo de $2.000\ m^3$ por persona, aludiendo a un desarrollo sostenible en la sociedad [5].

Al norte de la Región Metropolitana prevalecen condiciones áridas y semiáridas, por lo que la media de disponibilidad de agua está por debajo de los $800\,m^3$ por persona al año, mientras al sur del país la disponibilidad supera los $10.000\,m^3$ por persona al año [5]. En cuanto a la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo, el banco mundial señala que Chile tiene un importante volumen de recursos subterráneos, donde la cantidad de agua media que ingresa al acuífero alcanza aproximadamente $55\,m^3/s$ desde la región metropolitana al norte. En la zona sur de nuestro país no se tiene una estimación fiable del recurso subterráneo debido a que su abastecimiento es principalmente por aguas superficiales.

La calidad del agua es otro parámetro importante que está definida por características químicas, físicas y biológicas que tiene un cuerpo de agua, lo cual permite deducir el estado en que se encuentra el recurso. Las características químicas a lo largo de nuestro país varían según la zona geográfica; las aguas del Norte Grande se caracterizan por su alto contenido salino, debido a la disolución de sales contenidas en sus formaciones geológicas y poseen altos contenidos de arsénico, vinculados a la actividad volcánica del cuaternario altiplánico; las agua del Norte Chico, el contenido salino es menor que en el Norte Grande, aunque en los cursos inferiores de los ríos la salinidad suele aumentar, generando restricciones el consumo de las aguas; en la zona central la salinidad mejora, sin embargo a lo que refiere a metales pesados se sigue detectando cobre en los ríos Aconcagua, Maipo y rapel; en la zona sur la calidad muestra valores adecuados, debido que no muestra un balance negativo; en la zona austral, la calidad de las aguas es catalogada como muy buena [8].

Por último, es relevante resaltar la situación de las principales cuencas hidrográficas y fuentes de agua subterráneas del país, las cuales se ven amenazadas por sobrexplotaciones debido a diferentes presiones sobre el recurso agua. Refiérase como presión sobre el recurso de agua a las acciones que disminuyen su disponibilidad. Se identifican tres:

- Extracción: la extracción del flujo de agua de un cuerpo de agua sin la devolución completa de esta o no en la misma ubicación geográfica.
- Descarga de efluentes: contaminación de los cuerpos de agua, ya sea de forma química, física o biológica.

- Alteraciones morfológicas: Cuando se modifica su geografía y cursos de agua. La principal alteración morfológica son las represas de electricidad y/o regadío.

La realidad de la demanda chilena sobre recursos hídricos se presenta de manera desigual a lo largo de nuestro país, presentándose en algunas regiones de nuestros país mayor demanda que la disponibilidad real de agua. Desde la Región de Arica y Parinacota hasta la región Metropolitana hay una alta demanda por agua, superando la disponibilidad del recurso. Entre la Región O'Higgins y Magallanes el escenario es completamente distinto donde se observa que la disponibilidad de agua es superior a la demanda, destacando las regiones australes de nuestro país que presentan un oferta favorable producto de la alta pluviosidad que hace posible una mayor recarga de las aguas superficiales [8].

En la figura 1-3 es posible observar el caudal disponible de las principales cuencas hidrográficas de Chile, el caudal ecológico y el caudal otorgado por la DGA en derechos de aprovechamientos de aguas. Es notorio identificar en la figura que existen cuencas hidrográficas en la zona norte que se encuentran sobre explotadas observandose derechos de aguas superiores al caudal existente.

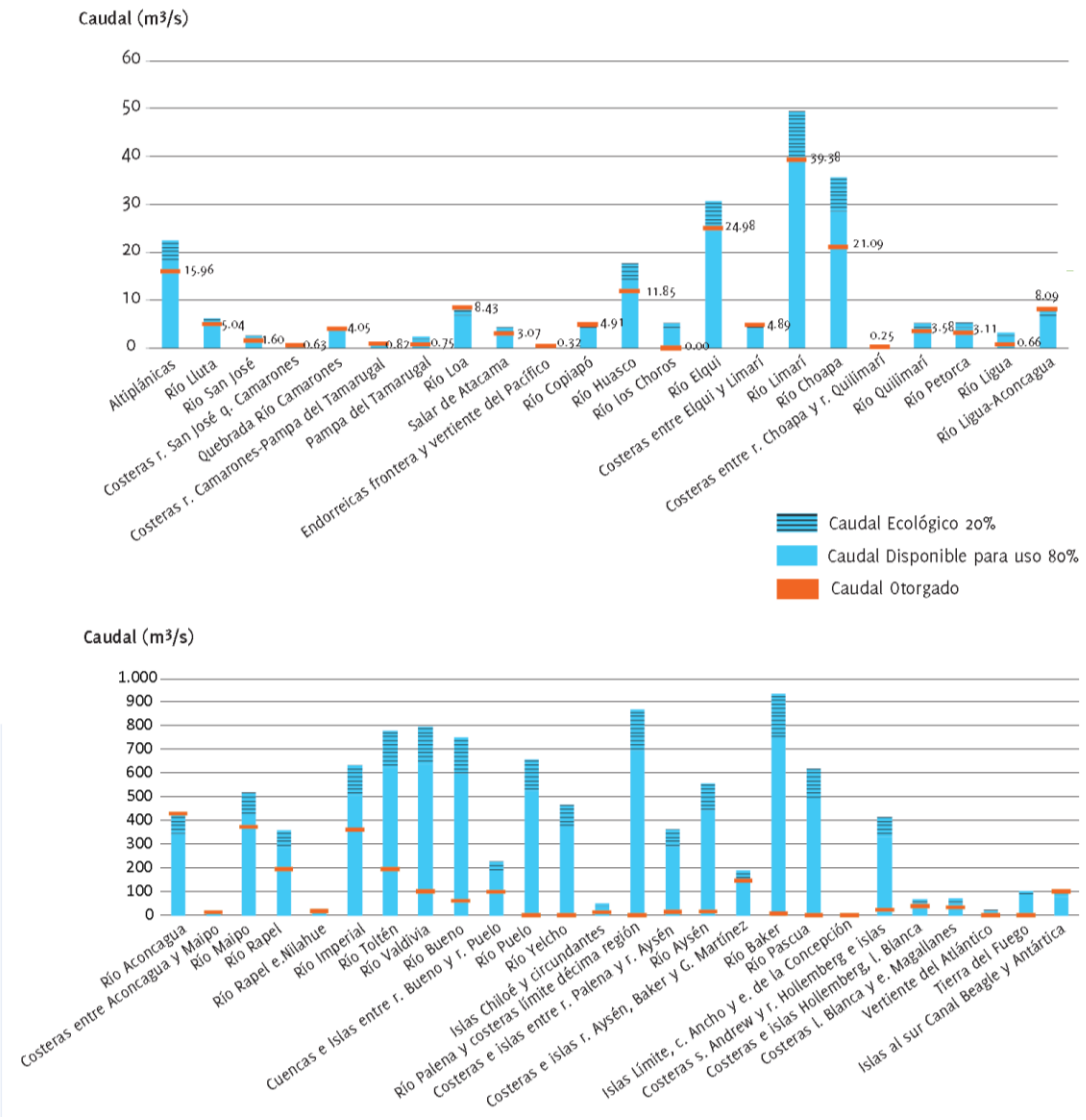


Figura 1-3. Caudal Disponible, Caudal Ecológico y Caudal Otorgado de las principales cuencas hidrográficas. Extraído de Informe del Estado del Medio Ambiente, 2011 [8].

La sobre explotación de cuencas ha provocado diversos conflictos sociales por los aprovechamientos de los suministros hídricos, especialmente en la Zona Norte. En el último tiempo han existido conflictos entre industria y comunidades por otorgamiento y extracciones que de agua que han secado pozos y acequias utilizadas históricamente para agricultura y consumo humano.

1.4.3. Producción y consumo de agua potable en Chile

En el informe medio ambiental publicada por el INE en el año 2014, en su tabla 5.3.1 señala la producción anual de agua potable por región del país desde el año 2010 al año 2014. De acuerdo a este informe la producción de agua potable en 4 años se ha incrementado en un 9,2%, observando un producción total de 1.682.058 miles de m^3 al año 2014. En las regiones de la zona norte del país el suministro de agua proviene principalmente de fuentes subterráneas, en el centro sur de abastecimiento mixto y la zona austral exclusivamente superficial. En la figura 1-4 se puede observar la enorme producción de agua potable en la Región Metropolitana, debido en gran medida por la densidad poblacional de la región. Según el informe realizado por la Superintendencia del Servicios Sanitarios (SISS) de los clientes total de agua potable del sector, un 94% corresponde a clientes residenciales, 4.8% a comerciantes y 1.2% a industriales y otros [9].

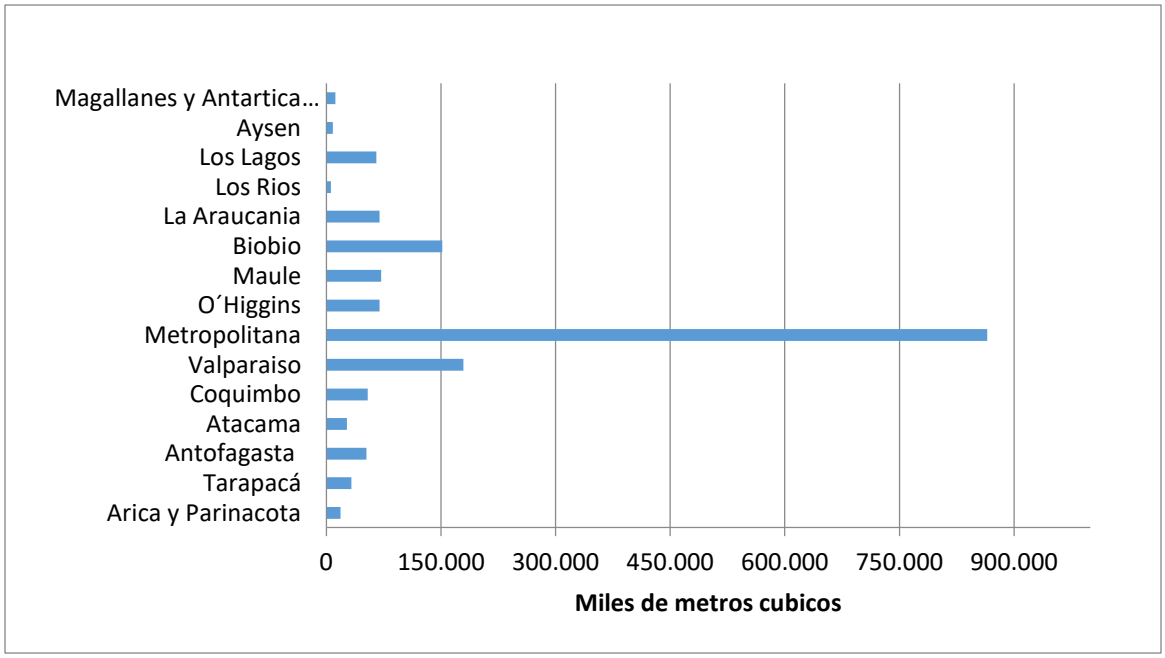


Figura 1-4. Producción de agua potable según región año 2014. Valores obtenidos de la tabla 5.3.1 del informe anual 2015, medio ambiente, INE 2014[7].

A nivel nacional, la capacidad máxima de producción de agua potable es de 91.029 litros por segundo, de los cuales el 51.8% corresponde a la capacidad de agua subterránea y un 48,2% corresponde a aguas superficiales, donde está incluido el agua desalinizada que representa un 0,7%.

1.4.4. Calidad del agua potable en Chile

En los procesos de desalinización es importante considerar la calidad del agua producida y si cumple con las normas y estándares mínimos exigidos, ya sea para agua de consumo humano, industrial o regadío. Universalmente, se utiliza solo la calidad exigida para el consumo doméstico, ya que sus requerimientos son más estrictos. El Instituto Nacional de Normalización, INN, con el objetivo de garantizar la calidad del agua creo a norma NCh409/1, norma aplicable al agua potable en sistemas de distribución y muestreo proveniente de cualquier servicio de abastecimiento. Esta norma establece los requisitos de calidad que debe cumplir el agua potable en todo el territorio Chileno. Estos parámetros que se han definido para los requisitos de agua potable se han agrupado:

- Parámetros microbiológicos y turbiedad.
- Elementos o sustancias químicas de importancia para la salud
- Elementos reactivos
- Parámetros relativos a las características organolépticas
- Parámetros de desinfección

En la tabla 1-1 se puede observar los límites máximos algunos parámetros y sustancias que hacer referencia la norma NCh 409/1. El parámetro importante de mayor interés incluido en la norma referida son los Solidos Disueltos Totales, limitado en $1.500[mg/L]$. La entidad encargada de entregar los indicadores sobre el nivel de cumplimientos de la calidad de agua y del muestreo realizado es la Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS) [10].

Además de la norma NCh409/1, que está relacionada con la calidad del agua, existen otras normas de ligadas al tratamiento, calidad de agua y/o emisiones de riles de descarga, entre las más recientes proclamadas NCh 2313 (Aguas residuales, año 2015), NCh409/2 (Muestreo, año 2005), NCh 777/1 y 777/2 (Fuentes de abastecimiento para agua potable, año 2008), por mencionar algunos de ellas.

Tabla 1-1.Límites máximos de algunos parámetros definidos por la Norma NCh409/1 [10].

Elementos esenciales		
Elemento	unidad	Límite Máx.
Cobre	mg/L	2
Fluoruro	mg/L	0,05
Manganeso	mg/L	0,1
Selenio	mg/L	0,01
Cromo	mg/L	0,05
Hierro	mg/L	0,3
Magnesio	mg/L	125
Zinc	mg/L	3
Elementos no esenciales		
Elemento	unidad	Límite Máx.
Arsénico	mg/L	0,01
Nitrato	mg/L	50
Nitrito	mg/L	3
Plomo	mg/L	0,05
Cadmio	mg/L	0,01
Mercurio	mg/L	0,001
Cianuro	mg/L	0,05
Parámetros relativos a características organolépticas		
Físico		
Olor	Inodoro	
Sabor	Insípida	
Inorgánicas		
Cloruro	mg/L	400
Amoniaco	mg/L	1,5
pH	-	6,5-8,5
Solutos disueltos totales	mg/L	1500
Orgánicos		
Compuestos fenólicos	mg/L	2

1.5 Escenario actual de la industria desalinizadora

1.5.1. Breve reseña histórica sobre la desalinización

Probablemente una de las primeras aplicaciones de desalinización de agua de mar por destilación se muestra en la ilustración de Alejandro de Afrodisias (figura 1-5) del año 200 d.C. donde se logra ver a marinos extrayendo agua del mar, para posteriormente calentar al fuego cubriendo de estropajos para adsorber el agua evaporada.

Figura 1-5. Ilustración de Alejandro Anfrodisia, marinos produciendo agua dulce por medio de la destilación [11].

Existen registros de la desalinización solar desde el siglo XV. Kalogirou señala que un alquimista árabe del siglo XV, utilizaba espejos cóncavos para direccionar la radiación solar hacia recipientes de vidrio con agua salada para evaporar [11]. Más tarde durante el Renacimiento, Giovani Batista Della Porta (1535-1615), uno de los científicos más importantes de su tiempo, en uno de sus libros, menciona siete métodos de desalinización. Uno de los más importantes fue un aparato de destilación solar construido con recipientes de barro, además describió un método para obtener agua por medio de aire (metodología que hoy se conoce como Humidificación-Deshumidicación).

La primera patente de desalinización solar se concedió a un trabajo experimental estadounidense de Wheeler y Evans en 1870. Los inventores descubrieron el efecto invernadero, analizando en detalle la condensación en la cubierta (lo que hoy se conoce como alambiques). Dos años más tarde el ingeniero de Suecia, Carlos Wilson, diseño y construyo la primera gran planta de desalinización solar, en las Salinas, Antofagasta, Chile. La planta fue construida para abastecer a trabajadores y sus familias en las minas salitreras, donde utilizaban el efluente de la mina, con muy alta salinidad (140.000 ppm), como agua de alimentación para los alambiques. La planta constaba de un superficie total de $7.896\,m^2$, donde $4.450\,m^2$ estaban considerados para alambiques que producían $22{,}7\,m^3$de agua dulce al día (aproximadamente $4{,}9 litro/m^2$) [11].

Durante el siglo XX las tecnologías térmicas o con cambio de fase, fueron desarrollándose y experimentando mejoras en su funcionamiento, como múltiples etapas y/o efectos (MED), utilizando evaporadores con tubos verticales, horizontales y sumergidos. En los años sesenta hicieron su aparición masivamente la tecnología Multi-Stage Flash (MSF) y de Osmósis Inversa (RO). Estas dos últimas tecnologías mencionadas demostraron ser más confiable y simples en su funcionamiento que las ya existentes, por lo que han denominado la industria en los siguientes años.

1.5.2. Situación Internacional

Actualmente existen más de 17.000 plantas desalinizadoras en operación en el mundo y una capacidad instalada para el año 2013 de alrededor de $66.4\ [Mm^3/día]$ [2]. El crecimiento de la industria de la desalinización ha sido exponencial. En el año 2000 la capacidad era de $22\ [Mm^3/día]$, en el año 2010 de $60\ [Mm^3/día]$ y se proyectaba que para el 2015 se alcanzaran los $98\ [Mm^3/día]$ [12]. En la figura 1-6 muestra este significativo crecimiento. El 65% del total de la capacidad se encuentra en el Medio Oriente, seguido por un 12% en Europa, $8\,\%$ para África, 5% para Norteamérica y finalmente 2% para Latinoamérica y el Caribe [12].

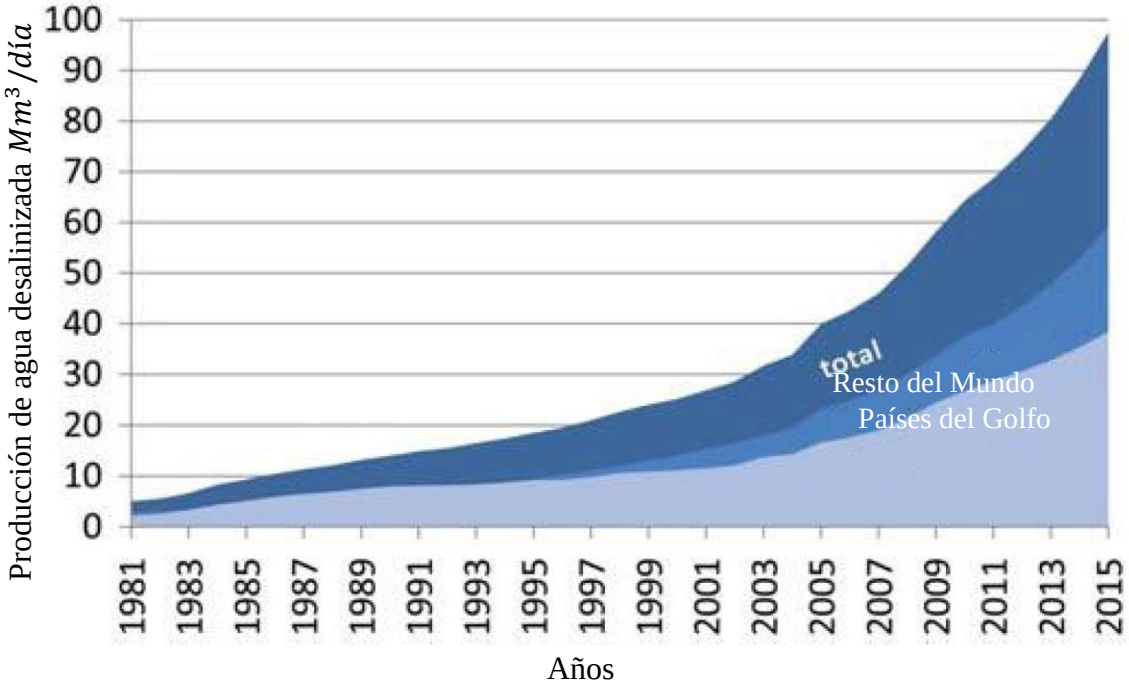


Figura 1-6. Capacidad instalada actual y proyección de plantas desalinizadoras en el mundo. Extraída de Lettemann, 2010 [12].

A lo que refiere a tecnologías empleadas con respecto a la capacidad instalada a nivel mundial, Osmosis Inversa (*Reverse Osmosis*, RO) posee un 60%, Evaporación Flash Multi Etapas (*MultiStage Flash*, MSF) un 26%, Destilación Multi Efecto (*Multi Effect Distilation*, MED) un 8%, mientras que el porcentaje restante, 6% se reparte en otras tecnologías [12].

Un parámetro relevante es el tipo de agua a desalinizar, pudiendo se agua de mar, aguas salobres, aguas contaminadas con algún soluto en particular, etc. Esta diferencia importante para seleccionar el tipo de tecnología adecuada. El agua salina es clasificada como agua salobre ($1.000 - 5.000[mg/Litro]$) y agua fuertemente salobre ($35.000\ [mg/Litro]$), en donde cae típicamente el agua de mar [2].

En lo que respecta al tipo de fuente de energía para la industria desalinizadora, la mayor parte de la industria está instalada en lugares donde la energía convencional (fósil) es abundante y barata, como ocurre en el oriente medio. Sin embargo, esta situación no se repite en el resto del mundo con escasez, por lo que las fuentes de energía renovables son una alternativa válida.

1.5.3. Situación en Chile

La desalinización en Chile data desde la segunda mitad del siglo XX con plantas evaporativas, en la actual Región de Antofagasta, siendo la ya mencionada Planta de Las Salinas una de ellas.

Desde los años cincuenta el profesor de la Universidad Técnica Federico Santa María, Julio Hirschmann, probo diferentes destiladores solares, en dependencias de la Universidad y en la planta experimental de Quillagua. Se estudiaron distintos parámetros geométricos y de funcionamiento al modelo original de Las Salinas, como resultado de las variaciones de los distintos parámetros los distintos prototipos alcanzaron una producción media de 4 $[litros/m^2/día]$ [2]. La investigación no tuve la concurrencia ni la continuidad para despertar el interés empresarial y/o estatal para continuar con plantas comerciales durante las siguientes décadas.

En el año 1998 se inaugura las primeras plantas de desalinización no experimental en Chile, que utiliza como principio de funcionamiento tecnología de Osmosis Inversa y electricidad como fuentes de energía. Estas plantas se instalaron en San Pedro de Atacama para tratar agua con arsénico y otra planta de desalinización para agua salobres en Arica (actualmente Aguas de Antofagasta). Actualmente en Chile, para el abastecimiento domestico existen dos principales productores de agua potable a partir de fuentes salobres utilizando sistemas de desalinización: Aguas del Altiplano y Aguas de Antofagasta.

Aguas del Altiplano cuenta con plantas de osmosis inversa en cisco puntos para desalinización de las aguas captadas en las cuencas del Lluta y de Azapa, para el abastecimiento en la Región de Arica y Parinacota, y en la Pampa del Tamarugal para el abastecimiento de la Región de Tarapacá, con una clientela 140.000 clientes en total. La Planta de Arica provee de 150 $[L/s]$, de agua potable en total. Aguas de Antofagasta cuenta con la planta de La Chimba, que es la mayor planta desalinizadora de agua de mar de Sudamérica, con una producción nominal de 51.840 $[m^3/día]$, la inicio sus operaciones el año 2003. Esta planta permite suministrar el 70% del agua potable en la ciudad de Antofagasta. Adicionalmente existen en Chile 18 plantas de osmosis inversa instaladas en sistemas de agua potable rural, ubicadas en las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta, Atacama, Coquimbo y Aysén, cuyas fuentes corresponden principalmente a

pozos. En el sector industrial la mayor planta de desalinización pertenece a Minera Escondida, llamada Coloso, con una producción de $525\ [L/s]$ de agua industrial para uso en el proceso de lixiviación, cubre el 15% de su demanda interna e inicio sus operaciones en el año 2006. Minera Escondida es solo un ejemplo de como la creciente necesidad de la actividad minera de obtener recursos hídricos recurre a nuevas fuentes por efectos de la escasez hídrica que presenta el norte del país y agotamientos de fuentes naturales. La mayoría de los proyectos se encuentran en las cuatro primeras regiones de nuestro país y en resumen la capacidad instalada actualmente en Chile alcanza $1.275[L/s]$, y con la suma de más proyectos podría alcanzar un total de $7.435\ [L/s]$[2].

Capítulo 2

2.1 Estado del arte

2.1.1. Procesos de Desalinización con Energía Solar

En la figura 2-1 se puede observar ocho tecnologías de desalinización, todas utilizando energía solar como fuente de energía, ya sea térmica o fotovoltaica. La primordial característica de los sistemas de desalinización solar térmica dice relación con el nivel integración de los subprocesos involucrados. Cuando ambos procesos ocurren en simultaneo se habla de procesos directos, por otro lado si la captación y la desalinización ocurre en sistemas o equipos separados se denominan sistemas indirectos. En resumen, cualquier método de desalinización térmico puede acoplarse con energía solar de forma indirecta.

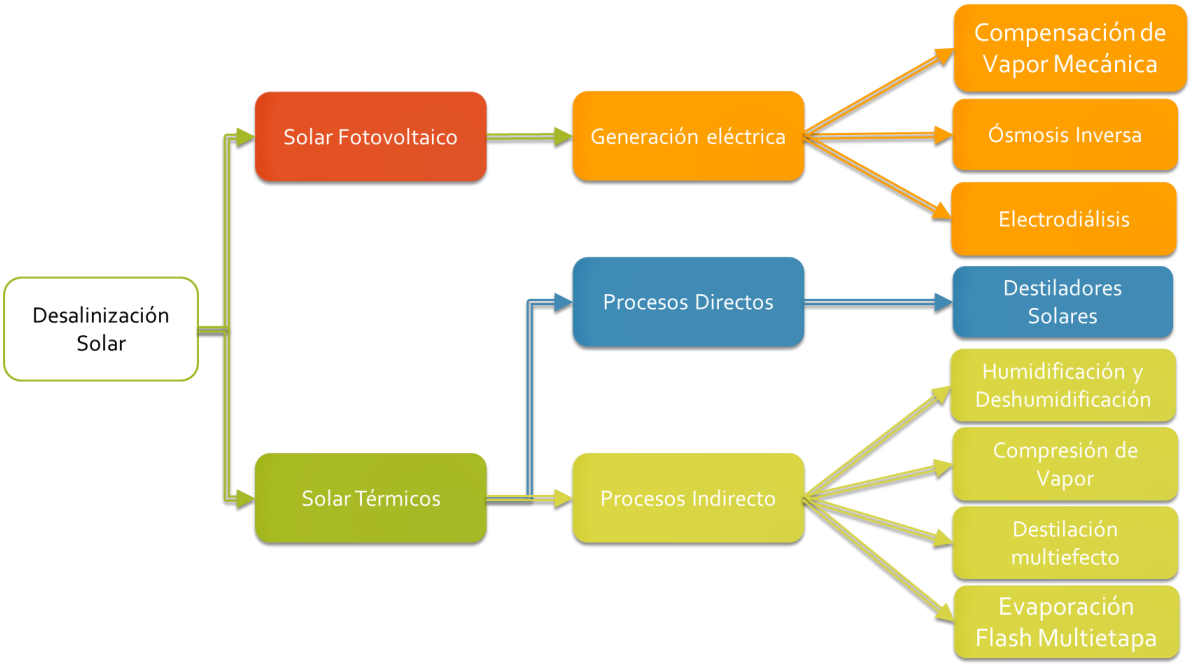


Figura 2-1. Métodos de desalinización acoplados con energía solar.

2.2 Destilación por Humidificación-Deshumidificación (HDH)

La naturaleza utiliza energía solar para desalinizar agua del mar, conocido por el medio del ciclo del agua. En el ciclo del agua, el agua de mar se caliente (por radiación solar) y humidifica el aire que actúa como transportador. Este aire humedecido se levanta y forma nubes. Las nubes son transportadas a los valles y montañas, para finalmente "deshumidificar" como lluvia. La versión del ciclo del agua hecha por el hombre es denominada como método Desalinización por Humidificación-Deshumidificación (HDH).

La tecnología HDH busca reutilizar el calor latente de condensación y utilizado como precalentador del agua de alimentación. El proceso ha recibido mucha atención de investigadores que plantean que es el mejor método para desalinizar con energía solar, sobre todo a pequeña escala [18]. Su principal atractivo son la baja temperatura de operación, que facilita el acople con energía solar térmica, simplicidad de diseño y capacidad de ser construido sin sistemas complejos.

Como ya se mencionó, su filosofía de funcionamiento se basa en el ciclo del agua y consta de tres equipos principales: Humidificador, deshumidificador y colectores solares. El sistema inicia con el agua de alimentación que entra al deshumidificador (condensador), donde el agua es precalentada por el aire caliente húmedo, luego es calentada por los colectores solares (puede ser de forma directa o indirecta, es decir, ingreso en los colectores solares o por medio de un intercambiador de calor). Luego el agua (de alimentación) caliente ingresada al humidificador donde se pone en contacto con aire, aquí el flujo de aire aumenta su humedad y temperatura evaporando parte del agua y quitándole parte de la energía mediante calor latente de evaporación. Luego, ese flujo de aire saturado en humedad es transportado al deshumidificador donde es enfriado por lo que parte del agua contenida en el aire se condensa, obteniéndose así el destilado final del proceso y precalentado el agua de alimentación. El aire a mayor temperatura puede transportar más agua en forma de humedad, por lo que el proceso se incrementa si se le añade energía externa a este, ya sea para calentar agua, el aire o ambas. Esta energía puede provenir de colectores solares de agua y/o aire. En la figura 2-2 muestra los componentes principales de un equipo desalinizador HDH, donde destacan el humidificador, deshumidificador y colectores solares.

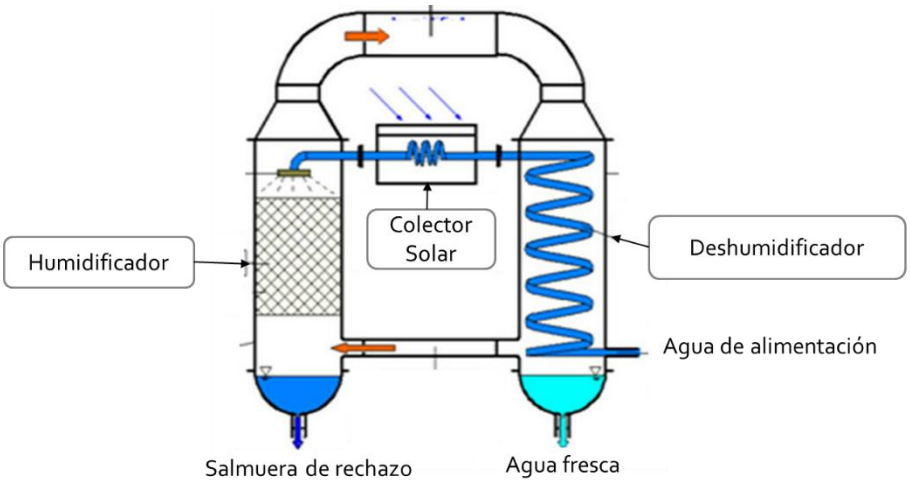


Figura 2-2. Esquema básico método de desalinización por HDH CAOW. Adaptado de Perth Ida World congress 2011 [20].

Los criterios de clasificación para el sistema HDH se clasifican en relación a la configuración de los circuitos para el agua y el aire, pudiendo existir circuitos cerrados y abiertos para cada uno de ellos. En la literatura principalmente mencionan dos configuraciones [18]: Circuito cerrado de agua y abierto de aire (Closed Water and Open Aire, CWOA), es aquel en el que el aire es calentado, humedecido y parcialmente deshumidificado y expulsado al ambiente, mientras el agua de alimentación es recirculado e un circuito cerrado, esta configuración está limitado por la concentración de salmuera, y circuito abierto de agua y cerrado de aire (Closed Aire and Open Water, CAOW), en este sistema el aire circula en un circuito cerrado, por convección natural o forzado y el agua circula por un circuito abierto. Otra clasificación dice la relación al tipo de calentamiento utilizado. Se puede utilizar la fuente de energía para calentar el agua, aire o ambos. Gihan Yildirim [19], realizo un estudio teórico para investigar los efectos de varios parámetros de operación y de diseño, en donde observo que calentar el agua tiene una mayor importancia al momento de desalinizar debido al hecho de que la capacidad calorífica del agua es mayor que la del aire. La adición de calentadores de aire no conduce a ninguna mejora significativa sobre la producción de agua fresca, pero el calentamiento de ambas flujos mejora el rendimiento del sistema.

Guofeng Yuan [1], estudio experimentalmente un planta instalada en la academia China de ciencias y HIMIN Solar. El sistema fue diseñado y construido por la academia en base a una serie de investigaciones desde el año 2007. El sistema se compone de $12\ m^2$ de

colectores solares de agua, $100\,m^2$ de calentadores solares de aire, una unidad de humidificador-deshumidificador, un pretratamiento, el sistema post-tratamiento, entre otros subsistemas de bombeo y ventilación. El rendimiento se investigó mediante ensayos y análisis experimentales. En la figura 2-3 muestra el esquema de la planta instalada en China.

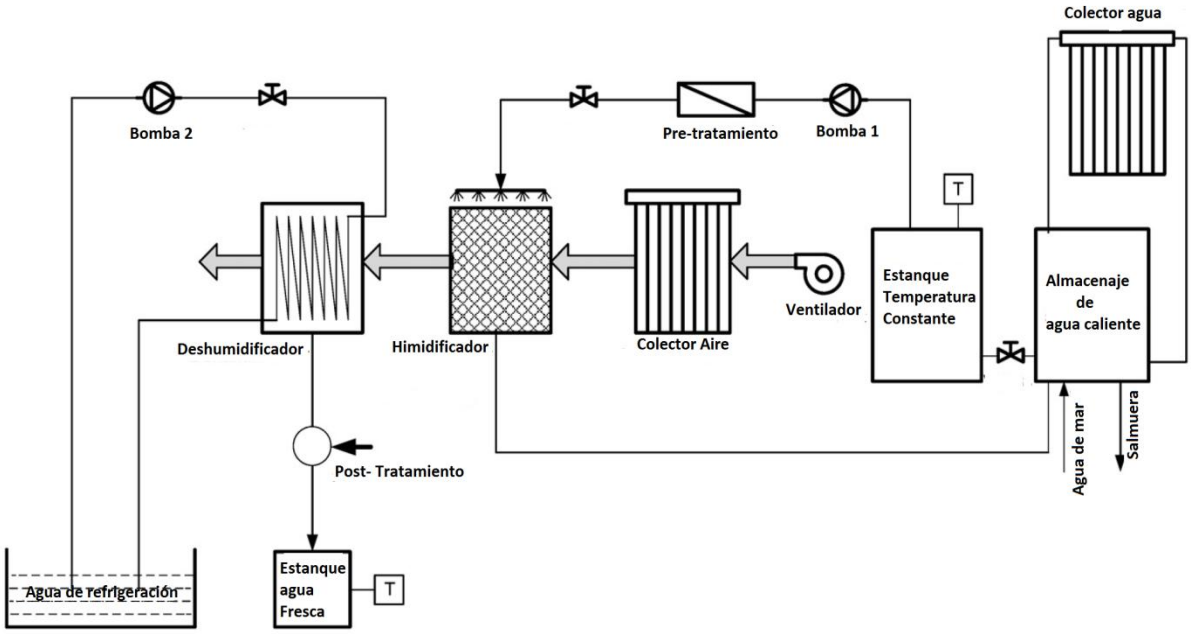


Figura 2-3. Diagrama demostrativo planta experimental HIMIN. Adaptado de Guofeng Yuan [2].

Las pruebas de producción de agua se llevó a cabo en días típicos de Beijing y sus resultados mostraron una capacidad de desalinización de 700 litros diarios con una radiación solar media de $500\ [kWh/m^2]$, con un $GOR \approx 3$ [2].

2.3 Clasificación método HDH.

Los sistemas HDH se clasifican en tres categorías. Uno se basa en la fuente energética usada, tales como sistemas solares térmicos, geotérmicos, calores residuales, o híbridos. Esta clasificación enfatiza la promesa de producir agua mediante el uso de energía de bajo grado, especialmente con recurso solar.

El segundo criterio de clasificación de los procesos HDH se basa en el ciclo de operación de los fluidos de trabajo. La literatura destaca dos tipos: CWOA, Circuito

cerrado de agua y abierto de aire y CAOW, circuito abierto de agua y cerrado de aire. En ambas configuraciones el aire es calentado, humidificado y parcialmente deshumidificado. El aire en estos sistemas puede circular por convección natural o circulación forzada.

El tercer criterio de clasificación de los sistemas HDH se basa en el fluido que es calentado: sistemas de calefacción de agua o aire. El rendimiento del sistema depende en gran medida de si el aire o el agua es el fluido calefaccionado. Puede darse el caso que el sistema combine ambos sistemas de calefacción. En la figura 2-4 muestra un resumen de los criterios de clasificación y la combinación de las configuraciones descritas.

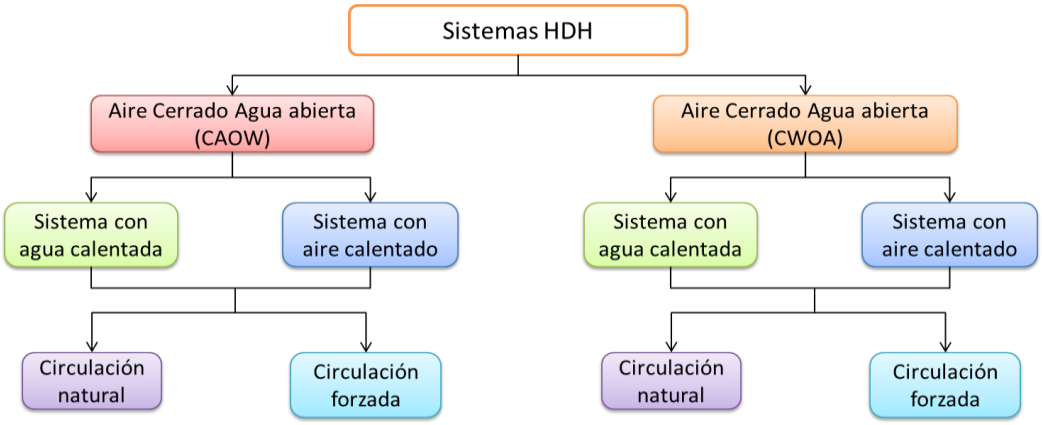


Figura 2-4. Clasificación basada en la configuración del proceso HDH.

2.3.1. Circuito cerrado de aire y abierto de agua (CAOW) con agua calentada

Un sistema CAOW típico se muestra en la figura 2-5 a) el humidificador se riega con agua caliente y la corriente de aire se calienta y humidifica utilizando la energía de la corriente de agua caliente. Este proceso en la carta psicométrica está representado por la línea 1-2, en la figura 2-5 b). El aire humidificado se alimenta luego al deshumidificador y se enfría en un intercambiador de calor compacto que utiliza la entrada de agua de mar como refrigerante. El agua de mar se precalienta en el proceso y se calienta adicionalmente en un colector solar antes que irrigue al humidificador. La corriente de aire deshumidificado procedente del deshumidificador se hace circular de nuevo al humidificador. Este proceso en la gráfica psicométrica está representado en la línea 2-1.

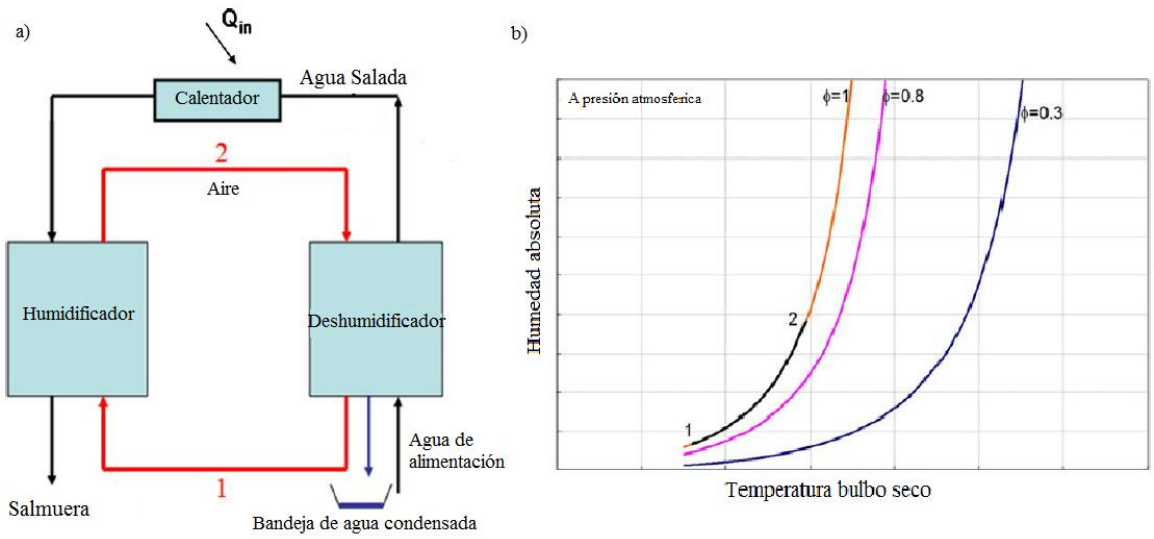


Figura 2-5. a) Configuración sistema HDH CAOW con calentamiento de agua. b) Procesos esquematizado en la carta psicométrica. Adaptado de Narayan et Al.[18].

Narayan et Al. [18] realizo un estudio de las principales observaciones de los estudios del sistema CAOW, concluyendo que los rendimientos se maximizan a un valor particular del caudal de agua. En sus conclusiones menciona que la circulación natural del aire produce una mejor eficiencia, en comparación con circulación forzada para una configuración con agua calentada. Por otra parte, la simulación del estudio de Yildinm [19], concluye que existe un punto óptimo para el caudal másico de aire, posterior a este punto un aumento del caudal másico de aire disminuye la producción de agua destilada.

2.3.2. Circuito cerrado de aire y abierto de agua (CAOW) con aire calentado

Otra configuración de sistemas HDH que ha sido estudiado es el sistema CAOW con calefacción por aire. Estos sistemas son de dos tipos: sistemas de una y varias etapas. En la figura 2-4 a) se la muestra de un sistema de una sola etapa. El aire se calienta en un colector solar hasta una temperatura de $80 - 90°C$ y se envía al humidificador.

Este proceso de calentamientos esta presentado por la línea de humedad constante 1-2 de la gráfica psicométrica de la figura 2-6 b) En el humidificador, el aire se enfría y se satura. Este proceso está representado por la línea 2-3. Luego el enfriamiento continúa en el deshumidificador donde el aire disminuye su humedad en el proceso 3-1 representado en la línea de saturación.

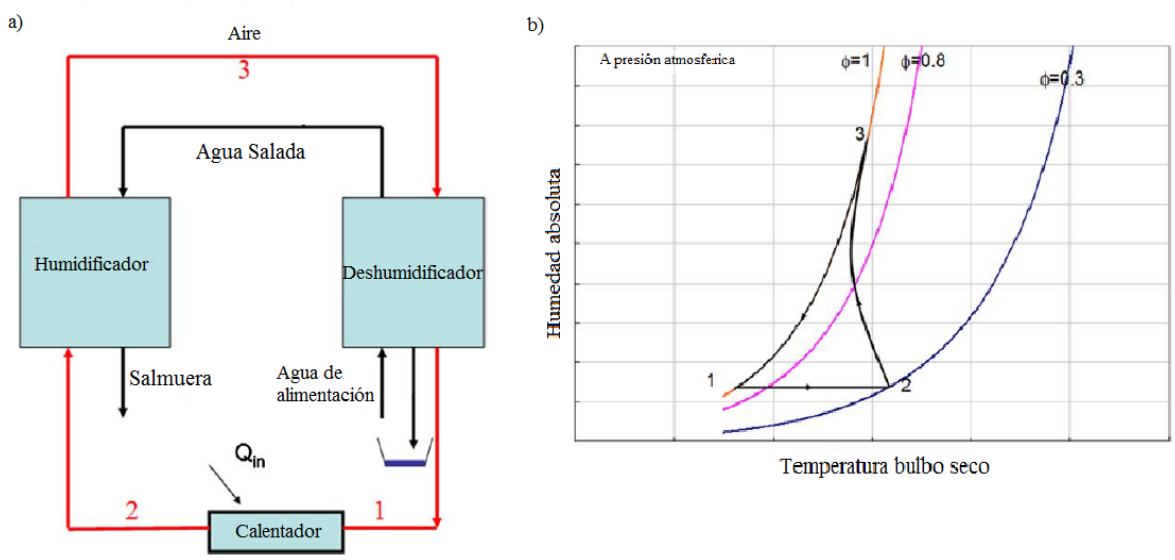


Figura 2-6. a) Configuración sistema HDH CAOW con calentamiento de aire. b) Procesos esquematizado en la carta psicométrica. Adaptado de Narayan et Al. [18].

En el estudio de Narayan et Al. [18] se observó que los sistemas de calentamiento por aire tienen un mayor consumo de energía que los sistemas calentados con agua. Esto se debe a que el aire calienta el agua del humidificador y esta energía no se recupera posteriormente en el proceso.

2.3.3. Circuito cerrado de agua y abierto de aire (CWOA) con agua calentada

El sistema CWOA con calentamiento de agua se muestra en la figura 2-7 a). En este sistema el aire se caliente y humidifica en el humidificador utilizando el agua caliente proveniente del colector solar. Luego se deshumidifica utilizando agua recirculada del humidificador. El agua recirculada, después de ser precalentada en el deshumidificador, entra en el colector solar, trabajando así como un circuito cerrado. El aire deshumidificado sale del sistema.

El proceso de humidificación del aire se muestra en el grafico psicrométrico de la figura 2-7 b) por la línea 1-2. El aire que entra en condiciones ambientales se satura hasta un punto 2 dentro del humidificador y posteriormente el aire sigue la línea 2-3 en el deshumidificador. El aire es deshumidificado a lo largo de la línea de saturación.

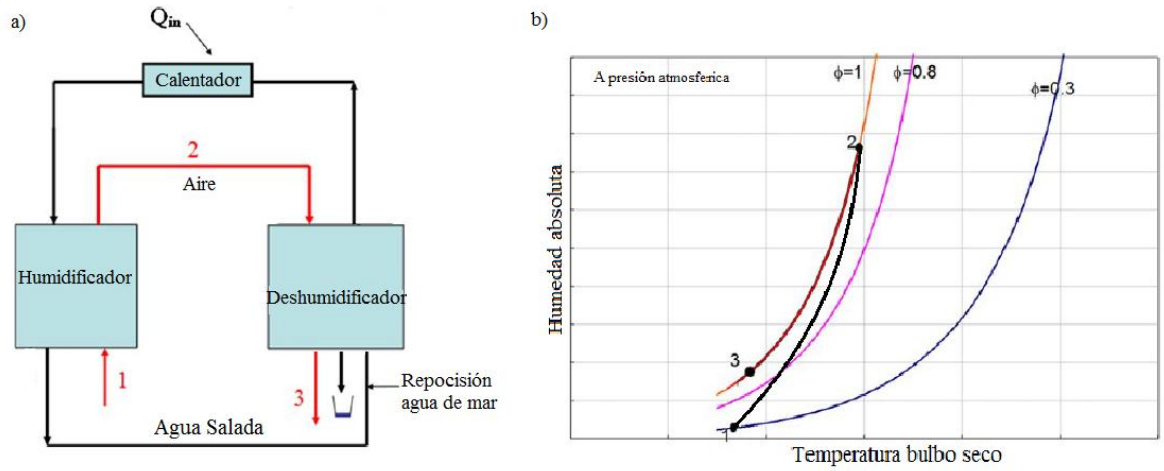


Figura 2-7.. a) Configuración sistema HDH CWOA con calentamiento de agua. b) Procesos esquematizado en la carta psicométrica. Adaptado de Narayan et Al. [18].

Una desventaja del sistema CWOA es que cuando el proceso de humidificación no enfría suficientemente el agua, puesto que la temperatura del agua refrigerante a la entrada del deshumidificador sube. Esto limita la deshumidificación del aire húmedo, lo que resulta en una reducción de la producción de agua en comparación con el ciclo de aguas abiertas.

2.3.4. Circuito cerrado de agua y abierto de aire (CWOA) con aire calentado

En el sistema CWOA alternativamente puede ser calefaccionado el aire (en vez de agua). En forma similar al sistema CAOW puede tener una o varias etapas. En la figura 2-8 se muestra un sistema de una sola etapa. El aire se calienta en un colector solar hasta una temperatura de $80 - 90°C$ y se envía al humidificador. Este proceso de calentamientos esta presentado por la línea de humedad constante 1-2 de la gráfica psicrométrica (figura 2-8 b). En el humidificador, el aire se enfría y se humedece hasta alcanzar la saturación. Este proceso está representado por la línea 2-3. Luego se continua el enfriamiento (proceso 3-4), representado en la línea de saturación. El aire es liberado al ambiente luego del humidificador.

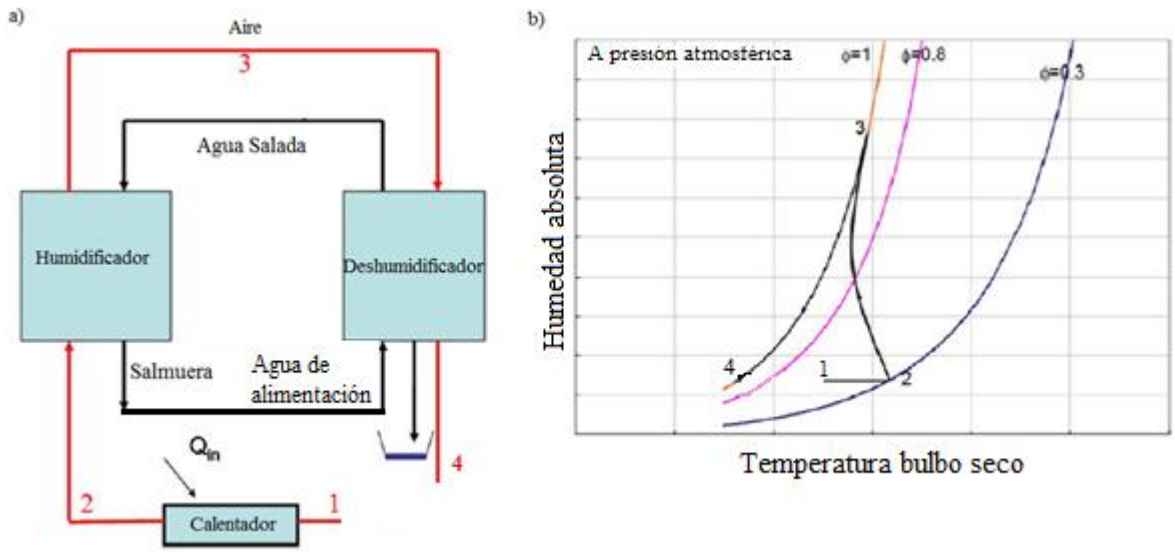


Figura 2-8. a) Configuración sistema HDH CWOA con calentamiento de aire. b) Procesos esquematizado en la carta psicométrica. Adaptado de Narayan et Al. [18].

2.4 Discusión de las configuraciones HDH

De la clasificación de los sistemas HDH se destaca una menor complejidad constructiva al calentar agua en lugar del aire. Esta diferencia radica en dos puntos: el primero debido que en sistemas de calentamiento de agua está más desarrollo que los sistemas de calentamiento de aire. El segundo punto que marca una diferencia en la temperatura de operación, los calentadores de aire eleva hasta temperaturas de $100\ °C$ el sistema, lo que significa que los materiales destinados para la construcción deben están adecuados para trabajar en dichos rangos de temperatura. Por otra parte el agua tiene una mayor capacidad calorífica comparada con el aire, esto significa que el mucho más eficiente calentar aire con agua calentada, que calentar agua con aire calentado.

La ventaja que conlleva calentar aire en el sistema es elevar la capacidad de transportar humedad, debido que la temperatura de saturación incrementa con la temperatura y en efecto la humedad absoluta. Un buen sistema debería combinar ambos sistemas, siempre que el diseño y construcción permita el funcionamiento correcto de las partes. Sin embargo esto hace que el diseño sea más complejo.

Una configuración cerrado de agua y abierto de aire permite tener al sistema siempre operando en la línea de saturación, por lo que garantiza que en el deshumidificador entre aire saturado en humedad y lleve a cabo la condensación (que se logra operando en la línea de saturación). Este es el motivo por el cual la mayoría de las plantas construidas (incluida demostrativo planta experimental HIMIN en China) se encuentren en operación con esta configuración.

Capítulo 3

3.1 Diseño Planta desalinizadora HDH

En esta sección se discutirán los parámetros de diseño y se mostrarán esquemas de instalación y subsistemas de equipos para la construcción de un equipo desalinizador solar por método de Humidificación-Deshumidificacion (HDH). Esta tecnología promete ser la más adecuada entre todos las tecnologías de desalinización con energía solar.

En el capítulo N°2 se describieron las distintas alternativas de configuración para funcionar del método HDH. Se adoptará para el diseño un modelo CAOW (circuito cerrado de aire y abierto de agua), debido que obtiene mejor rendimiento y condiciones operacionales que un circuito CWOA (circuito cerrado de agua y abierto de aire), sin embargo la disposición de los elementos de los equipos permitirá adaptar el una configuración CWOA con solamente la incorporación de un estanque que permita hacer un circuito cerrado de agua y la desconexión de la línea de aire que conecta el humificador y deshumidificador dejando la entrada y salida del aire al ambiente. Otro detalle de diseño que definirá su clasificación es calentar solo el circuito de agua alimentación. El aire, por lo menos en este trabajo no se calentará pero queda abierta la posibilidad de incluirlo en estudios futuros se pueda incorporar calentadores de aire. La configuración propuesta se muestra en la figura 3-1, el equipo debe contar con una unidad de humidificación, una unidad de deshumidificación, colectores solares y subsistemas de bombeo y ventilación. Los equipos eléctricos serán alimentados por sistema fotovoltaico. Además los flujos de operación y temperaturas más importantes están en la figura 3-1.

Para evitar un deterioro de los colectores solares al entrar en contacto con agua de mar se considerará un intercambiador de calor de placas que comunique térmicamente los colectores solares con el agua de alimentación. Esta configuración requeriré una unidad de bombeo en circuito de colectores solares. En la literatura sea registrado que la mejor construcción de un humidificador es mediante unidades de pulverización [18].

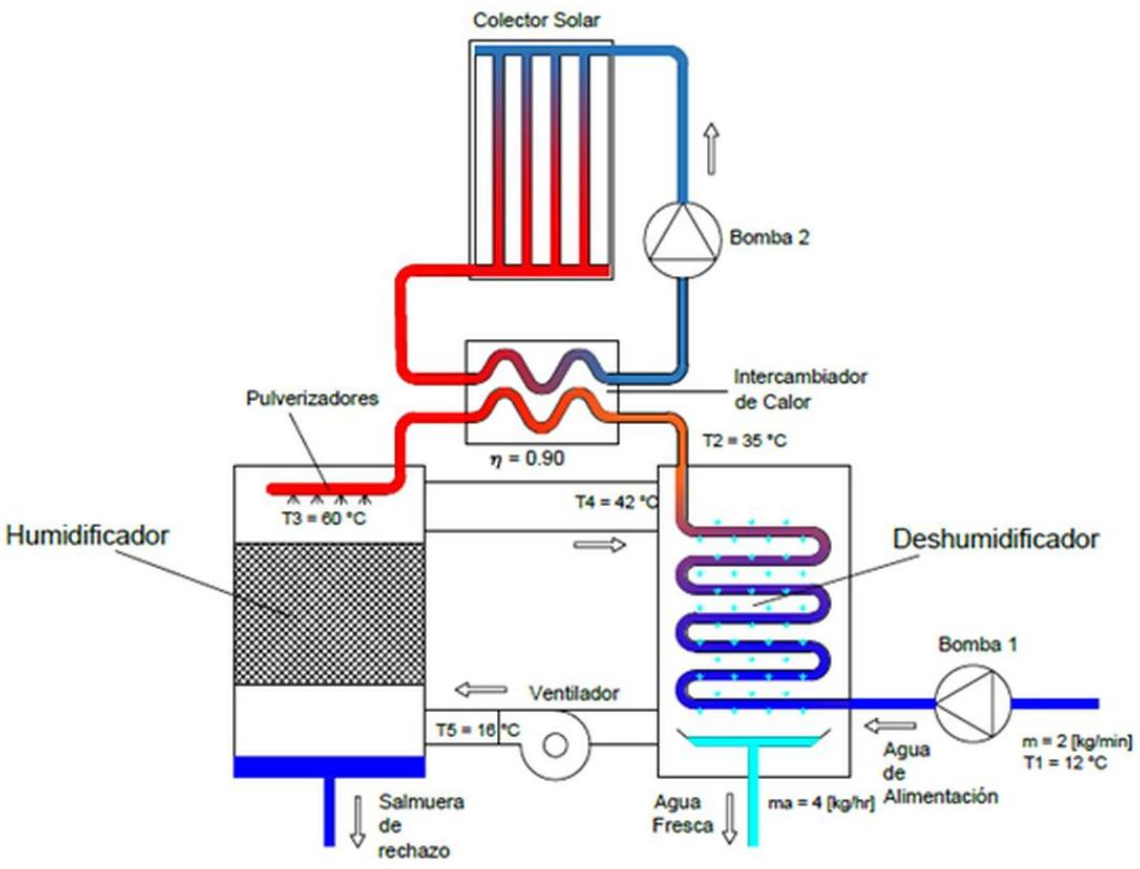


Figura 3-1. Esquema instalación planta desalinización HDH.

3.1.1. Diseño Humidificador

El humidificador a diseñar es mediante una torre de pulverización, pero existen diversos equipos para la humidificación de aire, columnas de burbujas y torres de pared húmedas. El principio de funcionamiento de todos estos equipos es el mismo. Cuando el agua se pone en contacto con el aire (que no está saturado con vapor de agua), el agua se difunde en el aire y eleva la humedad del aire. La fuerza motriz de este proceso es la diferencia de concentración entre la interfase agua-aire y el vapor de agua en el aire. Esta diferencia de concentración depende de la presión de vapor en la interfase gas-líquido y de la presión parcial de vapor de agua en el aire.

Los equipos mencionados anteriormente pueden ser utilizados como un humidificador en el sistema HDH. Una torre de pulverización, por ejemplo, consiste esencialmente en un recipiente cilíndrico en el que se pulveriza agua en la parte superior

del recipiente y cae por gravedad, las gotitas se dispersan dentro de una corriente continua de aire hacia arriba. Este tipo de humidificador es de diseño sencillo y tiene una caída de presión pequeña en el lado del aire. Sin embargo, hay una caída de presión considerable en el lado del agua debido a las boquillas de pulverización.

La relación diámetro estanque y diámetro del chorro de pulverización es un parámetro importante en el diseño de la torre de pulverización. Si el diámetro del estanque es menor al diámetro del chorro el aire se mezclará completamente con el agua. En el caso contrario si el diámetro del estanque es menor al diámetro de pulverización, esto permitirá que el rocío llegue rápidamente a las paredes de la torre, formando una película que se vuelve ineficaz. Es importante saber la configuración del chorro del pulverizador para encontrar la geometría adecuada para aprovechar al máximo el sistema, y sin sobredimensionar el equipo que podrá conllevar un alza en el costo de diseño.

Los humidificadores de columnas de burbujas consisten en un recipiente lleno de agua y se expulsan burbujas de aire desde varios orificios situados en el fondo del recipiente. El agua se difunde en las burbujas de aire y hace humidificar el aire de salida. Estas columnas son de diseño sencillo, sin embargo, la difusión de agua en las burbujas de aire depende de varios parámetros tales como el diámetro de la burbuja, la velocidad de la burbuja, la retención de gas (La relación entre el volumen de burbujas de aire y el volumen de agua), las temperaturas del agua y del aire, así como los coeficientes de transferencia de calor y masa. En los sistemas de desalinización por HDH, no se ha reportado en la literatura el uso de columnas de burbujas.

Las torres de paredes húmedas se han utilizado como humidificador en sistemas HDH [18]. En una torre de pared húmeda, se forma una delgada capa de agua que corre hacia abajo dentro de una tubería vertical, con aire fluyendo ya sea a favor o contracorriente. El agua se carga en la parte superior de la torre y es distribuida por placas verticales manteniendo mojada su superficie a lo largo de su longitud.

Para aumentar la eficacia de la humidificación, típicamente se usa un relleno evaporativo. Esto es aplicable en las torres de pulverización, por lo que los hace más eficientes (90-100%). Esto ayuda a aumentar la dispersión de gotitas de agua, el área de contacto y el tiempo de contacto. Los equipos que usan este relleno para enfriar agua se

conocen como torres de enfriamiento. Se trata de columnas verticales llenas de materiales de embalaje con agua pulverizada en la parte superior y los flujos de aire en la disposición de contador o flujo cruzado. Las torres con relleno evaporativo han sido utilizadas por investigadores como un dispositivo humidificador en sistemas de desalinización HDH debido a la mayor eficacia (consultar más en detalle en [18]). Los factores que influyen en la elección de un relleno son su calor, desempeño de transferencia de masa, la calidad del agua, la caída de presión, el coste y la durabilidad.

Para evaluar el rendimiento de un humidificador, según Nayaran et Al. [18] se utiliza la eficacia o efectividad, la cuál es definida como:

$$\eta = \frac{\omega_{sal} - \omega_{ent}}{\omega_{sal,sat} - \omega_{ent}} \tag{3.1}$$

Donde la diferencia ω_{ent} y ω_{sal} es la humedad absoluta a la entrada y salida del humidificador respectivamente y $\omega_{sal,sat}$ es la humedad absoluta en condiciones de saturación a la salida. La eficiencia máxima en esta definición supone que el aire debe salir saturado a la temperatura de la salida. La definición 3.1 es utilizada para enfriadores evaporativos donde el aire no saturado pasa a través de un material de embalaje humedecido con agua que se rocía en la parte superior del embalaje. El agua pulverizada cae y en estado estacionario su temperatura alcanza la temperatura del bulbo húmedo del aire de entrada. En este caso la temperatura del aire aumenta y se aproxima a la temperatura de bulbo húmedo. Esta eficiencia del humidificador pierde sentido si el aire de entrada está saturado porque no habrá aumento de humedad en el aire. Sin embargo, si la temperatura del agua de entrada es superior a la temperatura del aire o se inyecta vapor en la corriente de aire, el aire en este caso se calentará y se humidificará. En este caso también, el aire aumenta su humedad por efecto de aumentar su temperatura, pero siempre mantiene condición de saturación.

La configuración del chorro del pulverizador será esencial para definir la dimensión de la torre. Para este caso se definió utilizar el modelo del pulverizador PJ24 marca BETE, en la figura 3-2 se muestra más en detalle el dispositivo. El dispositivo realiza la pulverización más fina de todas las toberas con presión propia, tiene un elevado porcentaje de las gotitas en el margen por debajo de las $50\ \mu m$ y la pulverización es realizada en

forma de cono [21]. Para obtener una mejor pulverización se constara con cuatro pulverizadores.

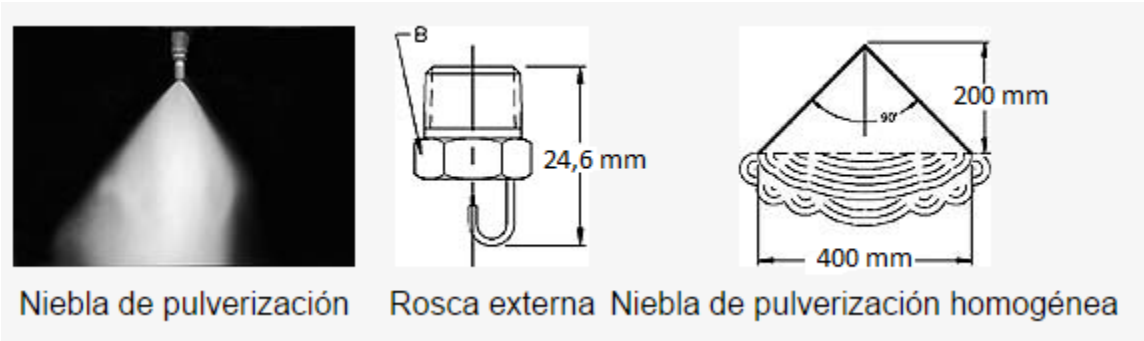


Figura 3-2. Propiedades geométricas pulverizador PJ24. Adaptado del catálogo BETE [21].

Los pulverizadores entregan un flujo de acuerdo a la presión del sistema, las condiciones geométricas se mantiene constantes. En la tabla 3-1 se muestra la relación del caudal con presión para un arreglo de 4 pulverizadores.

Tabla 3-1. Indicación del caudal obtenido según ficha técnica del dispositivo [21].

Presión [Bar]	2	3	5	10	30	50
Caudal total [litros/min.]	1,29	1,58	2,04	2,88	5,00	6,45
$Flujo\ [litro/min] = 0{,}228 * N°\ pulverizadores * \sqrt{Bar}$						

La figura 3-3 muestra el diámetro mínimo para el humidificador con cuatro pulverizadores en su interior suponiendo que al final de los conos desarrollados coinciden en dos vértices, el valor de los diámetros para que el chorro no choque con las paredes, ni los conos se crucen debe ser mayor a $966\ mm$.

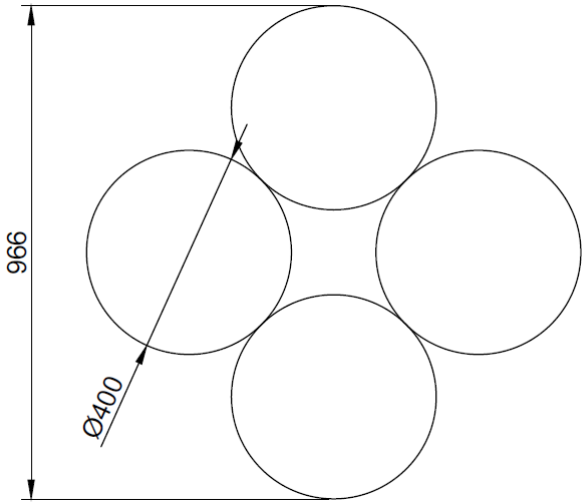


Figura 3-3. Geometría arreglo de pulverizadores en la base del cono desarrollado.

Para construir una torre de enfriamientos se adaptara un estanque de polietileno reforzado, es decir, con mayor inyección de plástico para tener paredes más gruesas y resistentes. El polietileno tiene su punto de fusión a los 120 °C, por lo que no será problema la temperatura de operación, ya que el punto de ablandamientos comienza a los 90 °C. La temperatura dentro del humidificador se mantendrá por debajo de 70 °C. Otro parámetro a considera en la selección del estanque además de su diámetro es su altura. En el estanque hay que respetar el espacio del chorro del pulverizador, acumulación del agua sin evaporar, entrada de aire y altura del relleno evaporativo (packing). En el mercado industrial ofrece rellenos evaporativos para torres de enfriamientos dependiendo de su aplicación, ya sea para facilitar el cambio de estado o evitar la pérdida de agua por arrastre del ventilador, llamados cortagotas. La superficie de intercambio es más alta en los rellenos evaporativos (sobre los $200\ m^2/m^3$) que en los corta gotas (bajo los $150\ m^2/m^3$), debido al ancho del canal. Los materiales utilizados para estos rellenos son poli cloruro de vinilo (PVC) y polipropileno, ambos materiales autoextinguibles. Su diferencia entre los materiales radica en la temperatura de operación siendo el polipropileno con mayor temperatura de operación que el PVC (80°C y 50°C respectivamente).

No se tiene certeza de cuanto altura de relleno es el óptimo para facilitar el cambio de estado, por lo que se tendrá en cuenta la capacidad de introducir rellenos dentro del humidificador. Los rellenos se comercializan por láminas de 300 mm de ancho, por lo que

se considerará introducir un máximo de 4 capas, con un total de altura de 1200 mm. El relleno seleccionado es el panel de relleno PVC C-12 cuya característica se muestran en la figura 3-4.

Ancho de canal	:	**12 mm**
Superficie de intercambio	:	226 m^2/m^3de surcos diagonles cruzados
Material	:	PVC
Dimension máxima	:	300x300x1200 hasta 3000 mm
Temperatura de operación	:	máxima 50°C

Figura 3-4 Característica relleno evaporativo seleccionado para el humidificador. Proveedor Pfinniger.

Las necesidades requeridas mínimas del estanque son 1000 mm de diámetro y 1900 mm de altura, considerando 1200 mm de relleno, 300 mm para la instalación y disposición del chorro desarrollado del pulverizador, entrada de aire por un costado de 200 mm y 200 mm de agua de deshecho en el fondo. El estanque seleccionado está construido para propósitos de almacenamientos de agua, modelos AQUATANK 4.0 del proveedor Infraplast, en la figura 3-5 se muestra las dimensiones. El estanque es completamente cilíndrico con una capacidad de almacenamientos de 4.000 litros de agua. Sus condiciones geométricas son propicias para acondicionar la construcción de una "torre de evaporización". Sus dimensiones de 1660 mm de diámetro y 2100 mm de alto facilitan la disposición de los pulverizadores, relleno evaporativo (packing bed) e instalaciones de los ductos de aire. Su material de polietileno permite un fácil mecanizado y un peso que facilita el transporte y movilidad. Sin embargo, el material limita la temperatura de funcionamiento en su interior (70 grados Celsius) por lo que no es recomendable hacer circular aire caliente dentro de él, ni calentar el agua (sobre 70 grados Celsius) para pulverizar.

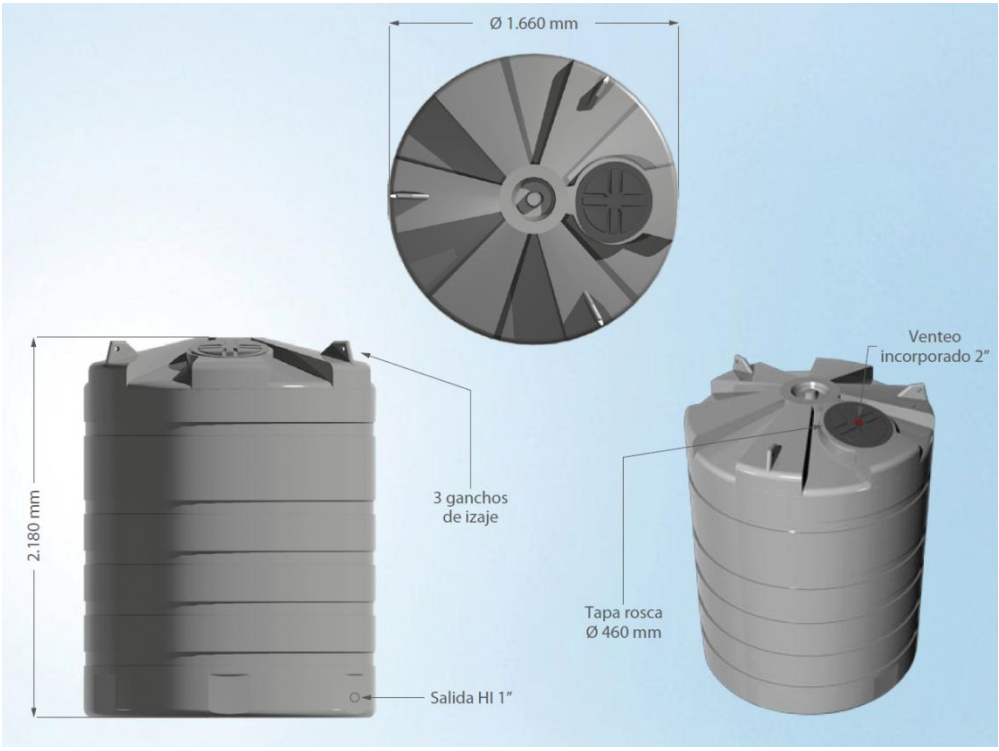


Figura 3-5. Dimensiones geométricas del estanque AQUATANK 4.0. Proveedor Infraplast.

El desafío siguiente luego de la selección del estanque es el mecanizado, instalación de los pulverizadores y ductos de ventilación. Los ductos a instalar son de 6 pulgadas en la entrada de aire, y 12 pulgadas en la salida, para facilitar la evacuación del aire húmedo. El estanque no tiene una tapa del tamaño del diámetro, por lo que se corta la parte superior con la intención de generar una tapa para poder introducir las capas de rellenos evaporativos. En la figura 3-6 se muestra la distancia de la base al corte de la parte superior, generándose dos piezas. El cuerpos más grande tiene en su parte inferior un agujero para instalar un ductos de 6 pulgadas y tres agujeros pasantes de $20\ mm$ de diámetros para instalar tubos para sostener los rellenos en su interior. En la pieza superior se realiza un agujero de 12 pulgadas para instalar el ducto de evacuación del aire húmedo. El sector del corte del estanque se aprovechar el pliegue que trae por diseño el estanque para posteriormente sujetar y sellar la parte superior, es por eso que en ambas partes existen 6 perforaciones en la periferia del borde.

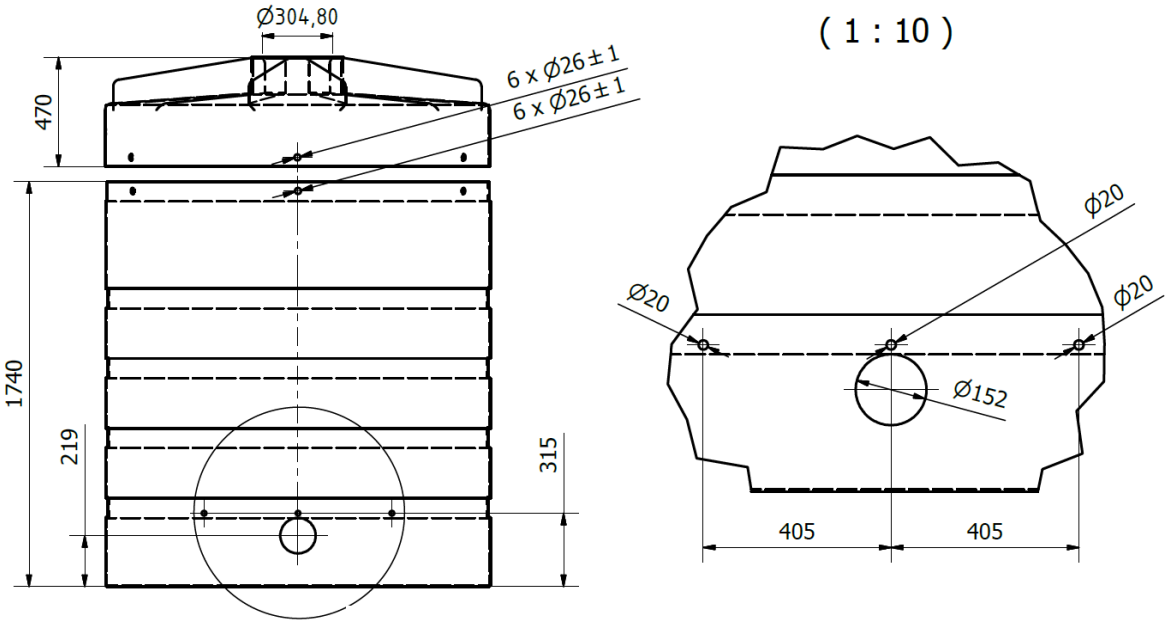


Figura 3-6. Dibujo técnico del humidificador.

El siguiente desafío es sellar la parte superior luego de instalar el relleno evaporativo y pulverizadores. La solución surge mediante la construcción de piezas en impresoras 3D, diseñadas a medida de la geometría del estanque. El objetivo es poder realizar el cierre del estanque de manera sencilla con la colaboración de dos personas y sin herramientas. El material usado en impresoras 3D es el plástico ABS, ya que tiene propiedades de resistencia, durabilidad y acabo perfecto para aplicaciones industriales. En la figura 3-7 se muestra las dimensiones de las piezas para fijar el estanque, que consta de una placa pensada para instalarse de forma fija en la parte interior del estanque y un perno accionado por la parte exterior de forma manual.

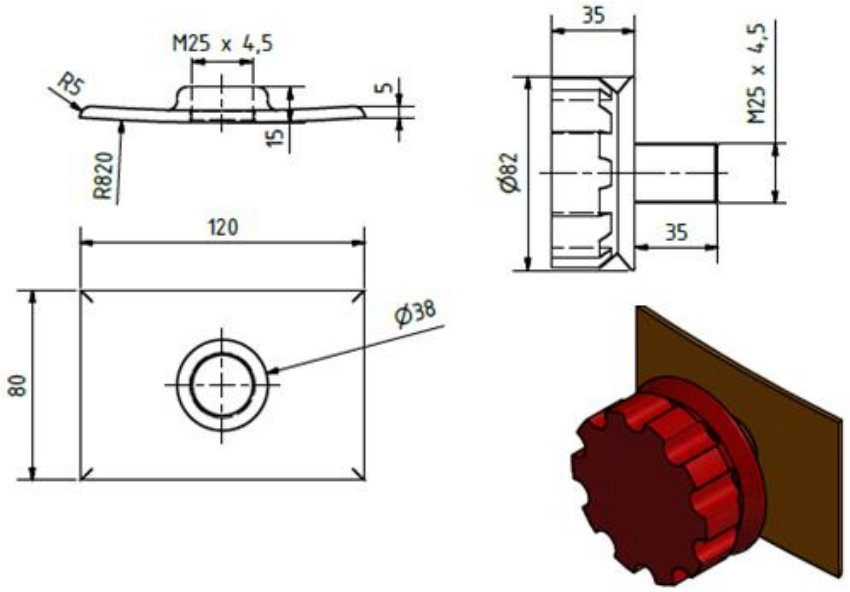


Figura 3-7. Dibujo técnico de piezas para el cierre del estanque.

Diseño conceptual del humidificador se muestra en la figura 3-8. La estructura del humidificador está conformada únicamente por el estanque Aquatank 4.0, en su interior sujetada a 315 mm de su base están los rellenos evaporativos con una capacidad máxima de 4 capas de 300 mm cada una. Por debajo del relleno evaporativo se ubica la entrada de aire al humificador por un ducto de acero galvanizado de 6 pulgadas de diámetro. El cierre del estanque es realizado por 6 conjuntos de las piezas de la figura 3-7 en la periferia de la unión del corte realizado al estanque. Los pulverizadores son colocados en la parte superior con la precaución de dejar el espacio de 200 mm desde la boquilla del pulverizador hasta el último relleno evaporativo, las uniones y cañerías son de acero inoxidable 3/4" grado 316L schedule 40 (diámetro exterior de 26,67 mm y espesor de 2,87 mm según Norma ASTM A312). En la parte superior del humificador se encuentra posicionado un codo de acero galvanizado de 12 pulgadas, para evacuar aire humidificado y trasladarlo al deshumidificador. Cabe mencionar que el estanque por diseño del fabricante cuenta con una salida de agua en su parte inferior a 50 mm de su base, donde se ocupará para evacuar el agua que no se evapora en el humidificador.

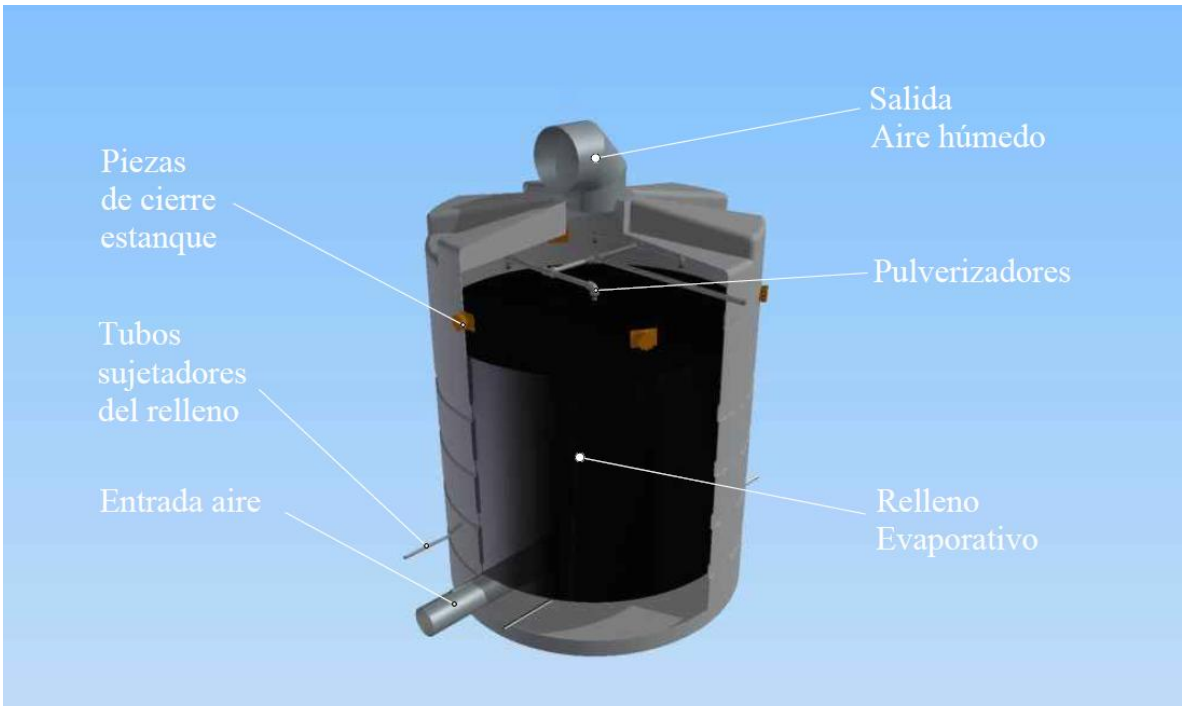


Figura 3-8. Diseño del humidificador del desalinizador.

3.1.2. Diseño deshumidificador

Los equipos utilizados como deshumidificadores para aplicaciones HDH son intercambiadores de calor de placa plana e intercambiadores de tubo aleteado [18]. Los deshumidificadores son refrigeradores de aire, es decir, bajan la temperatura del aire húmedo proveniente del humidificador. Producto de la refrigeración el vapor del aire es condensado y evacuado del equipo, las placas o aletas son dispuesta de forma vertical para que las gotas sean desplazadas hacia una bandeja que recolecta las gotas y son llevadas al despiche. El refrigerante es la misma línea de alimentación de agua de mar, que aprovecha el calor latente de condensación para elevar su temperatura, funcionando como precalentador del agua de mar.

Debido a la naturaleza corrosiva y de incrustación del agua de mar el material recomendado para los intercambiadores es de tubos de acero inoxidable y aletas de aluminio, adicionalmente hay que prestar especial atención para evitar fugas de agua destilada que se generen fuera del área de recolección

El costo de estos equipos es elevando, por lo que se han registrado prototipos de acero galvanizado de cobre, tubos de cobre e inclusive de polipropileno (consultar más en

detalle en [18]). Otro de los intercambiadores de calor evaluado para utilizar es de tubo y carcasa, pero su efectividad es bajo en comparación con intercambiadores de placa plana o aleteados, debido a su menor área de transferencia. Cabe recordar que la literatura recomienda cuando se trata de transferencia de calor de gas a líquido o viceversa, el área del lado del gas tiene que ser mayor que la que se tiene del lado del líquido. Esta conclusión es justificada según la relación de resistencias térmica total de la expresión 3.2

$$\frac{1}{UA_s} = R = \frac{1}{h_i A_i} + R_{pared} + \frac{1}{h_o A_o} \tag{3.2}$$

Donde U es el coeficiente de trasferencia de calor total, A el área de superficie, h el coeficiente de trasferencia por convección y los sub índices i y o hacen referencia a la condición interior y exterior de la pared que separa ambos fluidos. Cuando la pared del tubo es pequeña y la conductividad térmica del material del mismo es alta, como suele ser el caso, la resistencia térmica del tubo es despreciable ($R_{pared} \approx 0$). Cuando se trata de áreas iguales, U pasa a ser dominada por el coeficiente de convección más pequeño. Supongamos que $h_i \ll h_o$, entonces $1/h_i \gg 1/h_o$, y en efecto $U \approx h_i$. Esto provoca que le coeficiente de de trasferencia de calor más pequeño crea un cuello de botella sobre la trayectoria de la trasferencia de calor. Esta situación se presenta cuando uno de los fluidos es un gas y el otro un líquido, cuyo caso se utiliza aletas del lado del gas para mejorar el producto UA_s, y en consecuencia, la trasferencia de calor en ese lado.

El deshumidificador a utilizar en el diseño del desalinizador es un intercambiador de calor de tubo aleteado que había sido utilizado para calentar aire en otro proyecto en el laboratorio de energías renovables por la década de 1970. En la figura 3-9 se muestra el esquema del intercambiador de calor.

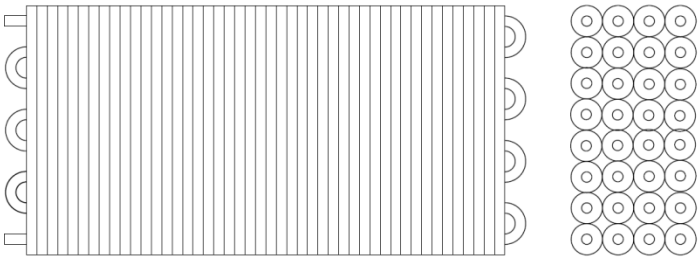


Figura 3-9. Esquema del intercambiador de calor de flujo cruzado de tubo aleteado.

El equipo no estaba siendo utilizado por lo que fue adoptado para el proyecto. Las características están señaladas en la tabla 3-2.

Tabla 3-2. Características del intercambiador de calor para el deshumidificador.

Número de filas	12
Número de columnas	4
Largo del intercambiador (mm)	330
Ancho del intercambiador (mm)	1100
Alto del intercambiador (mm)	470
Diámetro exterior del tubo (mm)	12
Espesor del tubo (mm)	1,25
Paso de las aletas (mm)	3
Número de placas	330
Espesor de las aletas (mm)	0,33
Rugosidad del tubo (mm)	0,0015
Material aletas	Aluminio
Material tubos	Cobre

Para acondicionar el intercambiador de calor se acoplaran en la parte posterior y frontal campanas de cocina, hechas en material de zinc fabricadas a medidas en hojalaterías. Las dimensiones de las campanas están representadas en la figura 3-10.

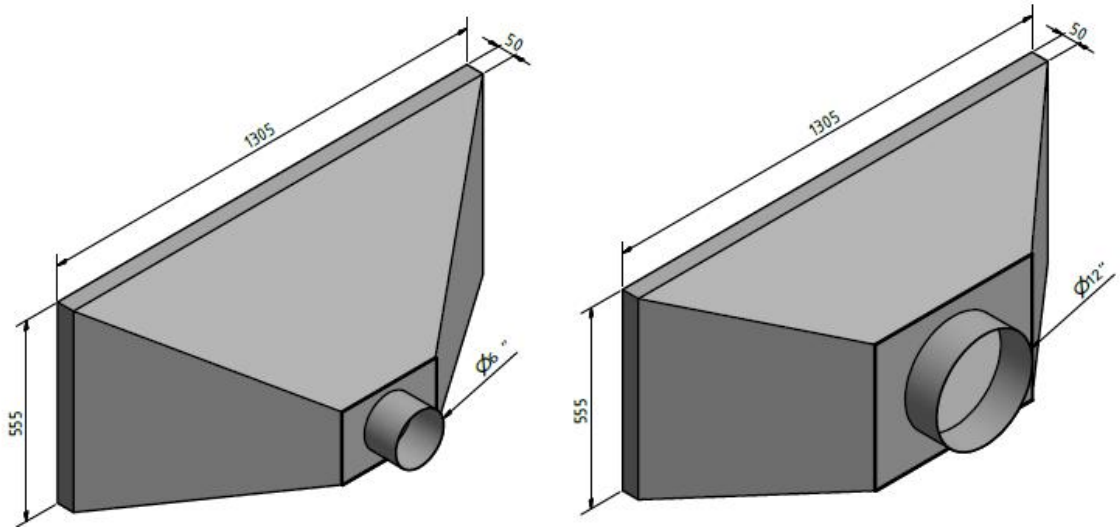


Figura 3-10. Campanas de zinc, espesor de 0,5 mm.

La campana con la salida del diámetro más pequeño es por donde se evacuará el aire del deshumidificador, donde posteriormente se instalara la unidad de circulación de aire forzado. Por otra parte, la otra campana será instalada en la parte posterior por donde entrará el aire proveniente del humidificador.

En la figura 3-11 se muestra el diseño del deshumidificador del desalinizador, en la figura se señalan las entradas de alimentación de agua de mar por un costado en la parte inferior, y la salida en la parte superior por el mismo costado. Estas conexiones estaban previamente instaladas en el intercambiador, al igual que la línea de evacuación del destilado. El intercambiador de calor en su base cuenta con una bandeja con canaletas en sus bordes para dirigir el destilado generado en el intercambiador de calor, para posteriormente ser evacuado por un costado. Las campanas se acomodan en la estructura que alberga el intercambiador, donde sus aletas rectas de 5 mm permiten solaparse y ajustarse a estructura para minimizar las fugas de aire.

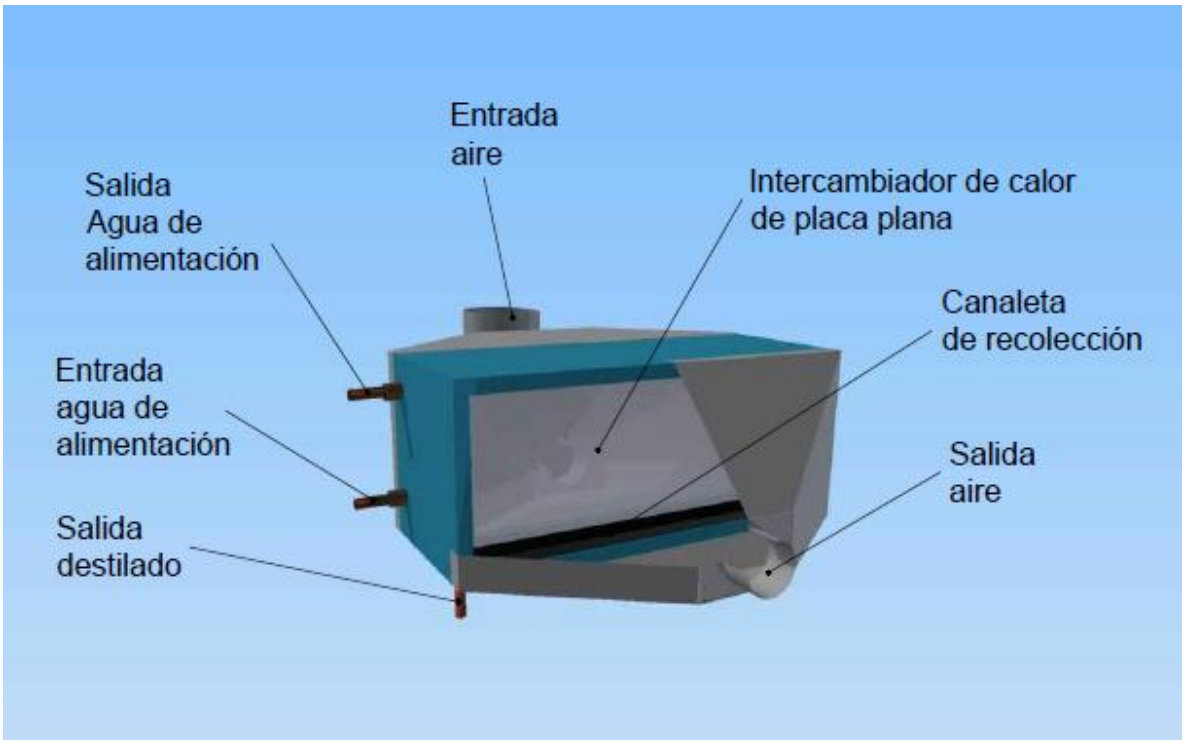


Figura 3-11. Diseño del deshumidificador del desalinizador.

3.1.3. Colectores solares

Es un dispositivo que absorbe la radiación solar, la convierte en calor y transfiere el calor a un fluido que fluye a través de colector. Existen básicamente dos tipos colectores: colectores concentradores y no concentradores. Un colector no concentrador tiene la misma área para captar y absorber la radiación solar, mientras que un colector solar concentrador de rastreo tiene usualmente superficies reflectantes cóncavas para interceptar y enfocar la radiación del haz solar a un área receptora más pequeña, aumentando así el flujo de radiación. Los colectores concentradores son adecuados para aplicaciones a alta temperatura.

Para aplicaciones HDH los colectores recomendados son los no concentradores, ya que su rango de trabaja van desde los $30 - 90\ °C$, que mientras los concentradores pueden llegar a temperaturas sobre los 100 °C, lo que es demasiado elevado pensando que el método HDH requiere a $60 - 70\ °C$. Los colectores no concentradores se encuentran diversos diseños: el colector de placa plana es el más simple, menos costoso y de menor eficiencia. Su construcción consiste en una placa plana metalica generalmente oscura que actúa como absorvedor, donde la atraviesa una serie de tubos por donde circula el fluido a calentar, como se muestra en la figura 3-12.

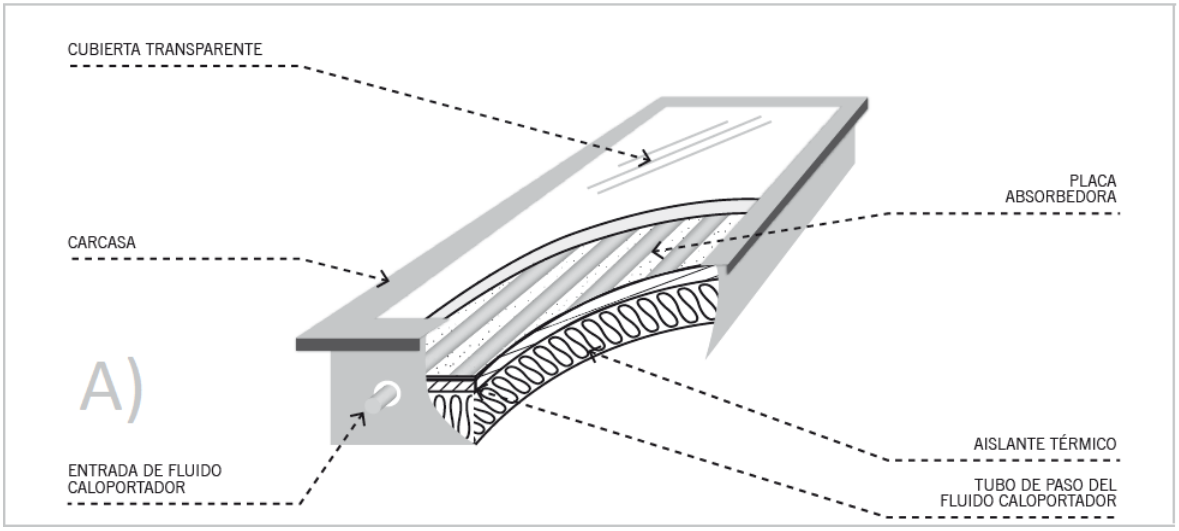


Figura 3-12. Componentes principales de un colector plano. Extraído del Sistemas solares térmicos II, figura 3-4 [22].

En la mayoría de sus diseños se cubre con una cubierta de vidrio, con el objetivo de reducir las pérdidas por convección y aprovechar el efecto invernadero producido por estas cubiertas, con el propósito de mejorar la eficiencia. Los colectores solares a utilizar en el proyecto son unidades que se encuentran disponibles en el Laboratorio de Energía Renovable de la Universidad de 1x2 metros, cuya área efectiva es de $1{,}91\ m^2$. Los colectores son del tipo placa plana, de marca Yazaki modelo SC-V1020 con doble cubierta de vidrio y con una envoltura en su interior para aumentar la eficiencia. Mayores antecedentes técnicos se encuentran en la tabla 3-3.

Tabla 3-3. Especificaciones técnicas colectores solares.

Tipo de colector	Placa plana
Construcción de la placa absorbente	Tubo en lámina
Materiales transparentes	Vidrio templado & Aislante transparente ondulado en V
Área efectiva (m^2)	1,91
Características de la superficie selectiva en la placa absorbente	Superficie selectiva inoxidable negra (la radiación solar absorbe $\alpha = 0{,}91{\sim}0{,}94$, emisividad $\varepsilon = 0{,}09{\sim}0{,}12$
Dimensiones externas (mm)	1002 x 2002 x 77
Máximo flujo de operación en el colector (L/hr)	1000
Máxima presión de operación (bar)	3 – 5,8
Volumen de agua (L)	2,5
Peso (kg)	45

Los colectores están hace varias décadas en el laboratorio, ocupados para diversas necesidades, sin embargo se encuentran operativos. Los materiales del colector están señalizados en la tabla 3-4.

Tabla 3-4. Materiales de construcción colector.

Placa absorbente	Acero inoxidable ferrítico ultra bajo en carbono (18Cr + 2 Mo & Nb)
Placa de cubierta	Vidrio templado (3 mm de espesor, transmisividad = 0,90)
Aislante ondulado	Teflón transparente (FEP)
Alojamiento	Electrodeposición y pintura electrostática acrílica sobre chapa de acero galvanizado
Aislante	Espalda: 10 kg/m^3 de fibra de vidrio de 50 mm de espesor Lados: 24 kg/m^3 de fibra de vidrio de 15 mm de espesor

Para dimensionar la cantidad de colectores solares a utilizar en el prototipo se definirá la cantidad de calor necesario para calentar el agua de alimentación. Dicha relación se muestra en la ecuación 3.3

$$\dot{Q}_u = \dot{m} c_p \Delta T_w \tag{3.3}$$

Según las condiciones de la figura 3-1 el calor necesario para las condiciones de operación es de $\dot{Q}_u = 3.488\ [W]$ para el agua salada. La curva del colector fue rescatada de documentos en el laboratorio. La eficiencia del colector se muestra en la figura 3-13. Para obtener la eficiencia de colector debemos definir un $\Delta T = T_m - T_a$, donde T_m es la temperatura media del colector y T_a la temperatura ambiente. La temperatura media del colector se asume como el promedio de la entrada y salida del colector

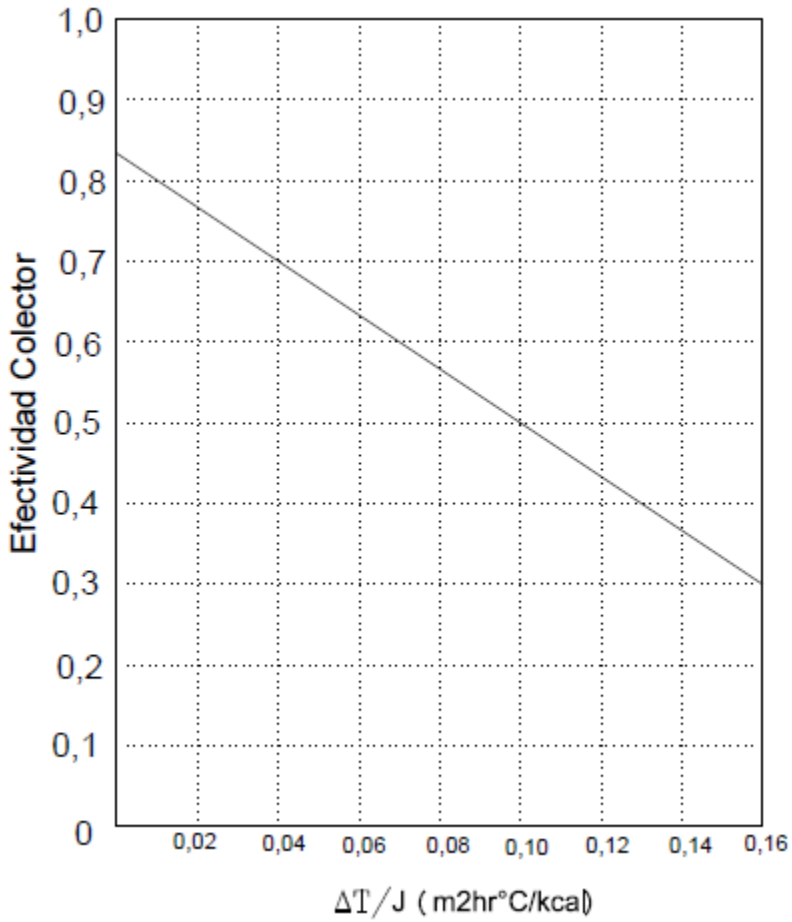


Figura 3-13. Curva eficiencia colector Yazaki SC-V1020.

Asumiendo una temperatura media de $T_m = 50°C$ y un temperatura ambiente de $T_a = 20°C$ y además $J = 429{,}92\ kcal/hrm^2$ (equivalente a $700\ W/m^2$) se obtiene una eficiencia del colector de 70% según la figura 3-13. Luego para obtener la expresión de la cantidad de colectores necesarios queda expresada según la expresión 3.4.

$$n = \frac{\dot{Q}_u}{A_c \cdot I \cdot \varepsilon} \tag{3.4}$$

Donde I es la radiación por metro cuadro igual a $700\ W/m^2$, A_c el área efectiva del colector, ϵ efectividad del colector. La relación 3.2 se cumple para similares flujos másicos que pasan por el intercambiador. Considerando un valor 0.70 para la efectividad del colector solar, el número n de colectores necesarios es de 4 unidades.

Para instalar las celdas solares en la figura 3-14 se muestra el diseño de la estructura que soportara en grupo de dos unidades a los colectores solares. La estructura es construida con perfiles de acero al carbono y completamente desarmable.

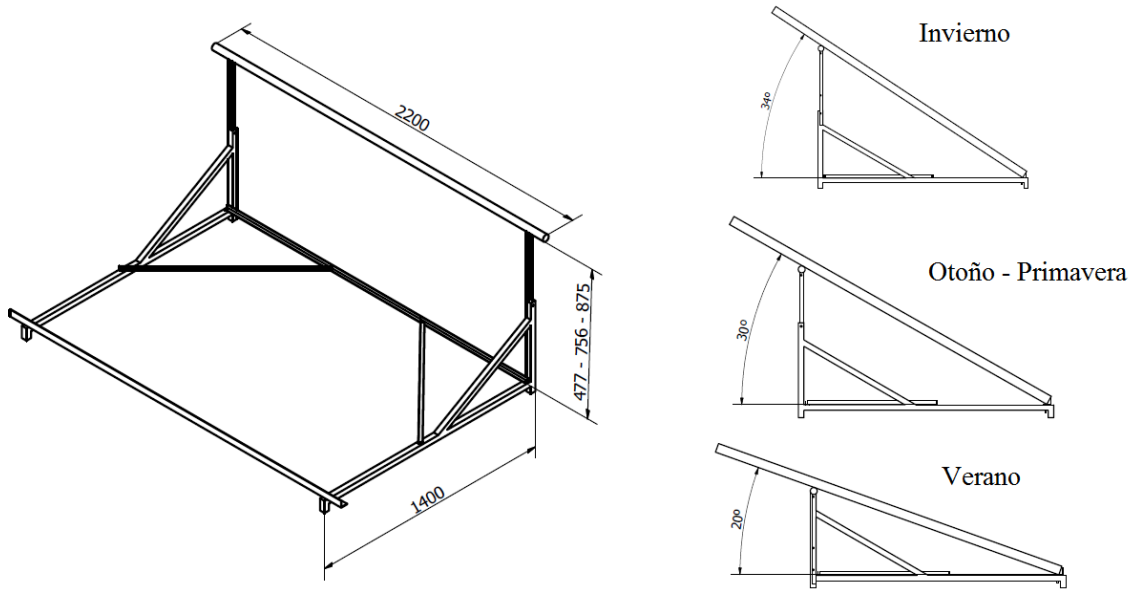


Figura 3-14. Soporte para colectores solares con ajuste de inclinación para estaciones del año.

Para maximizar la captación de energía solar el soporte puede configurarse para tres inclinaciones, dentro de sus alcances constructivos. Una inclinación de 20 grados para los meses de verano (meses de diciembre a febrero), 30 grados en estaciones de otoño y

primavera (para meses de marzo a mayo y de septiembre a noviembre) y de 34 grados para invierno (meses de junio a agosto).

Para no exponer a los colectores solares al agua de mar, ya que el material constructivo reacciona desfavorablemente con el agua salina, se conectan térmicamente los colectores solares con la línea de agua de mar por medio de un intercambiador de calor. El intercambiador de calor normalmente utilizado son los de placa, dada su alta potencia específica de transmisión de calor, pequeño tamaño en relación a su área de transferencia y bajo precio. El intercambiador de calor de placas más pequeño encontrado en el mercado tiene los puntos de diseño señalizado en la tabla 3-5 según la aplicación comercializada.

Tabla 3-5. Puntos de operación intercambiar de placas Alfa Laval Modelo T2 BFG/12H.

Temperatura entrada lado caliente [°C]	80
Temperatura salida lado caliente [°C]	60
Caudal lado caliente [m^3/hr]	2,7
Temperatura entrada lado frío [°C]	15
Temperatura salida lado frío [°C]	32
Caudal lado frío [m^3/hr]	3

Para el análisis del intercambiador de calor se utiliza el procedimiento *de efectividad – NTU*. El método se basa en determinar la efectividad de la transferencia de calor ε definido como en la expresión 3.4

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{Q_{max}} = \frac{Razón\ de\ transferencia\ de\ calor\ real}{Razón\ máxima\ posible\ de\ la\ tranferencia\ de\ calor} \tag{3.4}$$

La razón de transferencia de calor real de un intercambiador de calor se puede determinar con base en un balance de energía en los líquidos caliente y frío y se puede expresar como en la expresión 3.5

$$\dot{Q} = C_c \cdot \left(T_{c,sal} - T_{c,ent}\right) = C_h \cdot \left(T_{h,ent} - T_{h,sal}\right) \tag{3.5}$$

En donde $C_c = \dot{m}_c c_{pc}$ y $C_h = \dot{m}_h c_{ph}$son la razones de capacidad calorífica de los fluidos fríos y caliente, respectivamente. Para determinar la razón máxima de transferencia de calor, se identifica la diferencia de temperatura máxima que se produce entre las

temperaturas de entrada y salida del flujo caliente y frío, es decir $T_{h,ent} - T_{c,ent}$, además del fluido con la capacidad calorífica menor. La razón máxima de transferencia de calor es mostrada en la expresión 3.6 donde C_{min} es el menor valor entre C_h y C_c.

$$\dot{Q}_{max} = C_{min} \cdot (T_{h,ent} - T_{c,ent}) \tag{3.6}$$

La efectividad del intercambiador, es $\varepsilon = 0{,}3$. El método relaciona de la efectividad con el proceso de intercambio de calor utilizando el número de unidades de transferencia de calor, NTU, según la expresión 3.7

$$NTU = \frac{U \cdot A_s}{C_{min}} \tag{3.7}$$

Donde U es el coeficiente total de transferencia de calor y A_s es el área de trasferencia de calor del intercambiador y la relación de las capacidades C_R, según la expresión 3.8

$$C_R = \frac{C_{min}}{C_{max}} \tag{3.8}$$

El área de intercambiado A_s y el coeficiente U del intercambiador de calor utilizando la función desarrollada por Hernandez [23], en el software EES. Los resultados obtenido son A_s de $0{,}2525\ m^2$ y un valor del coeficiente total de trasferencia de calor $U = 850\ W/m^2K$.

La condición de operación del intercambiador en el desalinizador son mostradas en la tabla 3-6. Esta condición difiere de la condición de diseño del intercambiador de calor (tabla 3-5).

Tabla 3-6. Condiciones de operación intercambiador de calor de placa en el equipos desalinizador.

Temperatura entrada lado caliente [°C]	70
Caudal lado caliente [m^3/hr]	0,6
Temperatura entrada lado frío [°C]	35
Caudal lado frío [m^3/hr]	0,12

El valor de A_s será el mismo valor y ahora la incógnita será la efectividad. Utilizando las ecuaciones 3.2, 3.3 y 3.4 obtenemos la efectividad como la expresión 3.7

$$\varepsilon = \frac{T_{c,ent} - T_{c,ent}}{T_{h,ent} - T_{c,sal}} \tag{3.9}$$

La efectividad requerida por el intercambiador de calor según las condiciones de diseño mostradas en la figura 3.1, de $\varepsilon_{min} = 0{,}71$. El intercambio de calor para esta condición posee $NTU = 1{,}5$ y la razón de las capacidades igual a 0,2. La efectividad para el intercambiador de calor es:

$$\varepsilon = \frac{1 - e^{-NTU\left(1 - \frac{C_{min}}{C_{max}}\right)}}{1 - \frac{C_{min}}{C_{max}} e^{-NTU\left(1 - \frac{C_{min}}{C_{max}}\right)}} \tag{3.10}$$

Obteniendo como como resultado una efectividad $\varepsilon = 0{,}74$, por lo que el intercambiador de calor cumple las condiciones de operación especificadas.

Puede darse el caso que el agua de los colectores solares forme vapor en sus tuberías, esto puede ocasionarse cuando el colector no esté en funcionamiento y tenga radiación incidiendo en su superficie. En este caso es conveniente expulsar el fluido al exterior del circuito para así evitar presiones elevadas que podrían dañar a los colectores solares. El dispositivo que hace este trabajo es la válvula de seguridad, que se instala en el circuito cerrado. Para no sobrepasar a la presión admisible de los colectores se instala una válvula de seguridad con apertura a los 6 bar de presión, además de un manómetro instalado en un lugar próximo al sistema de expansión correspondiente. En la figura 3-15 se muestra los componentes del sistema de colectores solares.

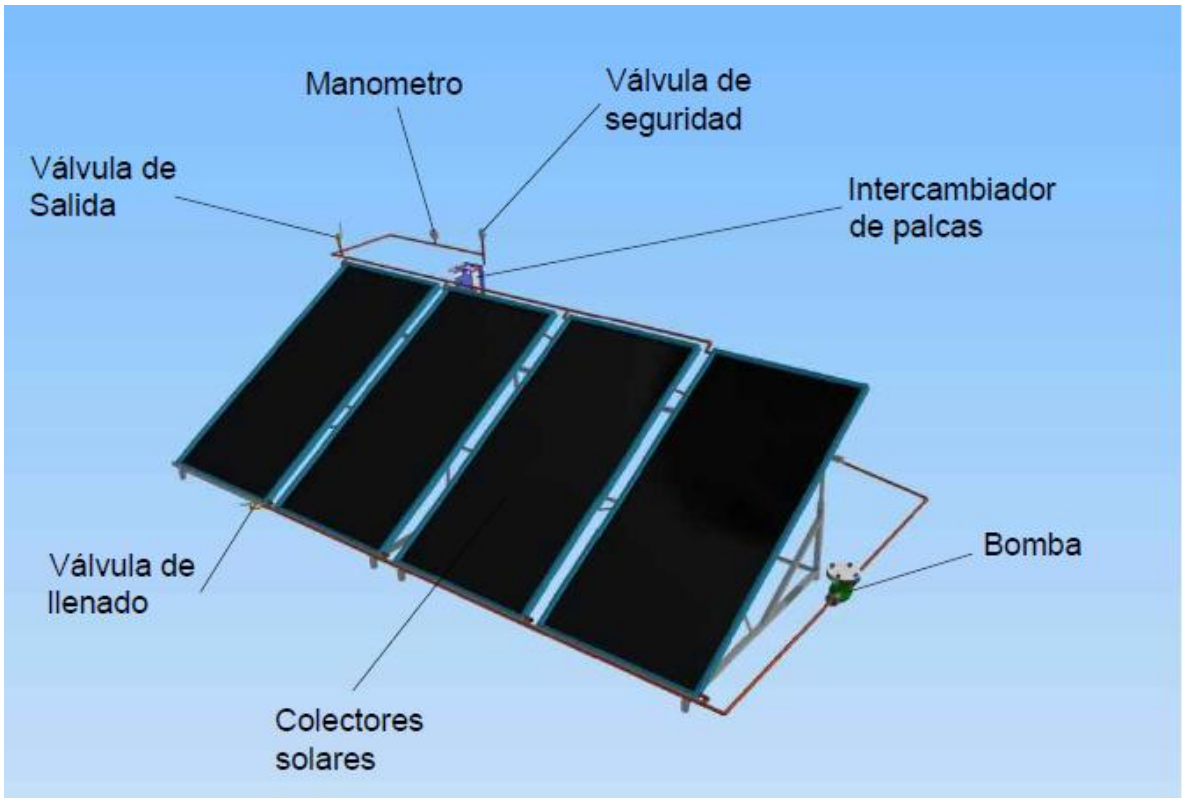


Figura 3-15. Esquema del sistema de los colectores solares y sus componentes.

El equipo de bombeo será una bomba recirculatoria Taifu modelo GRS25/6, de acero inoxidable. En el circuito segundario se instalara la misma bomba recirculatoria, debido a sus características de bajo caudal de operación. En la línea de alimentación de agua salada se instalará un remarcador de agua Itron de calibre ¾ de pulgada. Sus características se encuentran en la tabla 3-7.

Tabla 3-7. Característica remarcador de agua Itron El MAIPO TM – II.

Caudal de arranque	$litro/hora$	14
Caudal mínimo – Qmin	$litro/hora$	50
Caudal de transición – Qt	$litro/hora$	200
Caudal normal – Qn	$litro/hora$	2.500
Caudal máximo – Qmax	$litro/hora$	5.000
Pérdida de carga a Qmax	bar	0,9
Máximo registro	m^3	9.999
Lectura mínima	$litros$	0,05

3.1.4. Sistema solar fotovoltaico

El sistema fotovoltaico es el encargado de se suministrar energía eléctrica a los equipos periféricos del desalinizador (equipos de bombeo y ventilación). La simulación de los equipos fue desarrollado en conjunto con la empresa Solar Trash con el software PV*SOL Expert 6.0. La localización simulada es en Viña del Mar, con dos módulos fotovoltaicos policristalinos de de 310 Watt y superficie activo PV de $1{,}94\ m^2$ cada uno. El software tiene registros de radiación de la zona desde el año 1999 al 2014 para realizar la simulación. El consumo de los equipos está detallado en la tabla 3-8.

Tabla 3-8. Consumo de los equipos eléctricos del desalinizador.

Equipo	Consumo [kWh]
Bomba Recirculatoria GRS25/6	263
Bomba Recirculatoria GRS25/6	263
Controlador de Carga	9
Ventilador TD-500/150-160	146
Total	680

El equipo fotovoltaico consta de dos baterías de 200 Ah de ciclo profundo, modelo Kaise AGM 12V/200Ah, de ciclo profundo, dos módulos fotovoltaicos modelo JA Solar 310 W policristalino de 72 celdas MC4, con eficiencia de 16%, cuyas dimensiones son 1956x991x50 mm, un inversor modelo Victron – Phoenix 24/375 VE. Direct Schuko, con una eficiencia nominal de salida de 92% y un controlador de carga de las baterías BlueSolar PWM-PRO 12/24 – 20A.

Los resultados de la simulación para el sistema están evaluados para el consumo de un año calendario, los resultados son mostrados en la tabla 3-9.

Tabla 3-9. Resultados simulación de equipos solar fotovoltaico software PV*SOL Expert 6.0.

Radiación Horizontal [kWh]	7.052
Radiación en el plano del módulo PV [kWh]	7.587
Radiación menos reflexión [kWh]	7.271
Energía producida por el arreglo fotovoltaico [kWh]	840
Consumo requerido [kWh]	680

Consumo directa del módulo PV [kWh]	574
Perdidas de las baterías [kWh]	39
Fracción solar [%]	88,1
Rendimiento anual especifico [kWh/kWp]	967
Eficiencia del sistema [%]	7,9

La eficiencia del sistema resulta ser de 7,9%, esta representa el cociente de la energía solar del sistema FV utilizable y la energía total irradiada sobre la superficie del plano del generador y se compone de la eficiencia del generador, de la eficiencia del inversor y de las pérdidas en los cables. En la figura 3-16 muestra los comportamientos anuales del consumo y el aporte energético del módulo solar. Se observa que en los meses de octubre a marzo el consumo puede ser suplido en un 100% con energía fotovoltaica, el resto del año entre los meses de abril a septiembre el consumo requerirá consumo de las baterías de respaldo para poder suplir las demanda energéticas de los equipos.

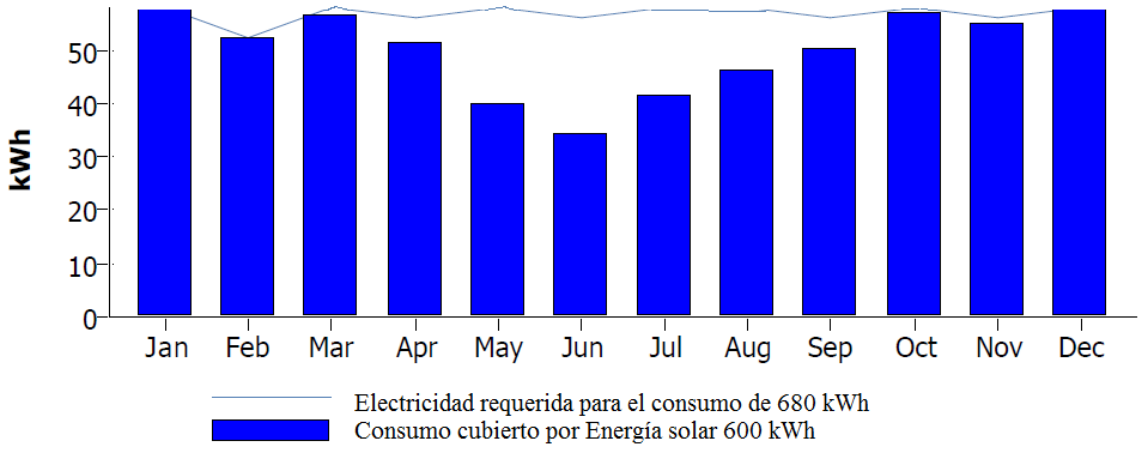


Figura 3-16. Consumo de energía solar y consumo total.

3.1.5. Puntos de medición de temperatura.

Para medir temperatura en el circuito de agua se instalan vainas para sensores PT100 de 140 mm conectado a un data logger individual modelo Tiny Tag para registrar la temperatura en el periodo de funcionamiento. Para el circuito de aire se dispone de Tiny Tag data logger para medir humedad absoluta y temperatura de aire. Los puntos de medición están indicados en la figura 3-17.

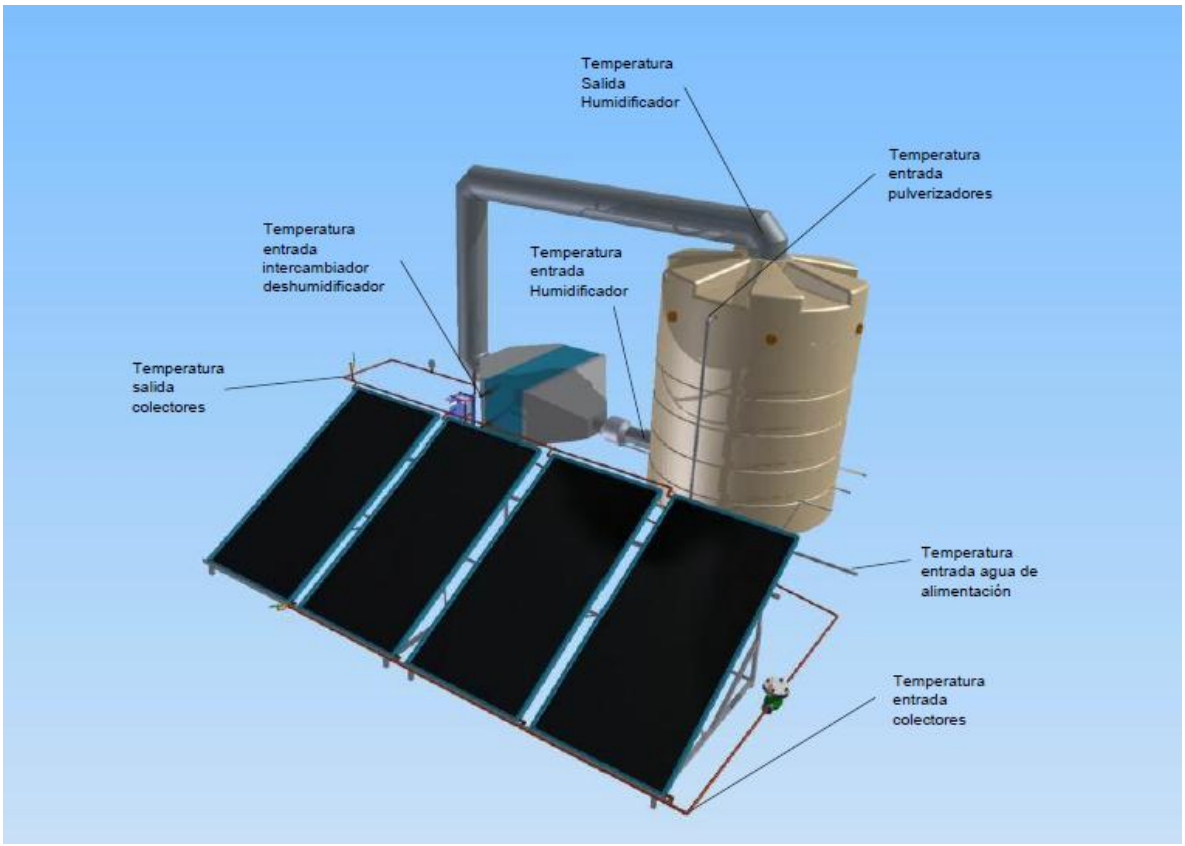


Figura 3-17. Esquema de la instalación del desalinizador señalizando los puntos de medición.

Capítulo 4

4.1 Construcción Desalinizador

La construcción del desalinizador se lleva a cabo en el Laboratorio de Energías Renovables (LER) de la sede de Viña del Mar José Miguel Carrera. El layout de la planta esta mostrada en la figura4 -1, en ella se señala las dimensiones de espacios requeridas para la instalación, estas corresponde aproximadamente a un espacio de 4 por 5 metros.

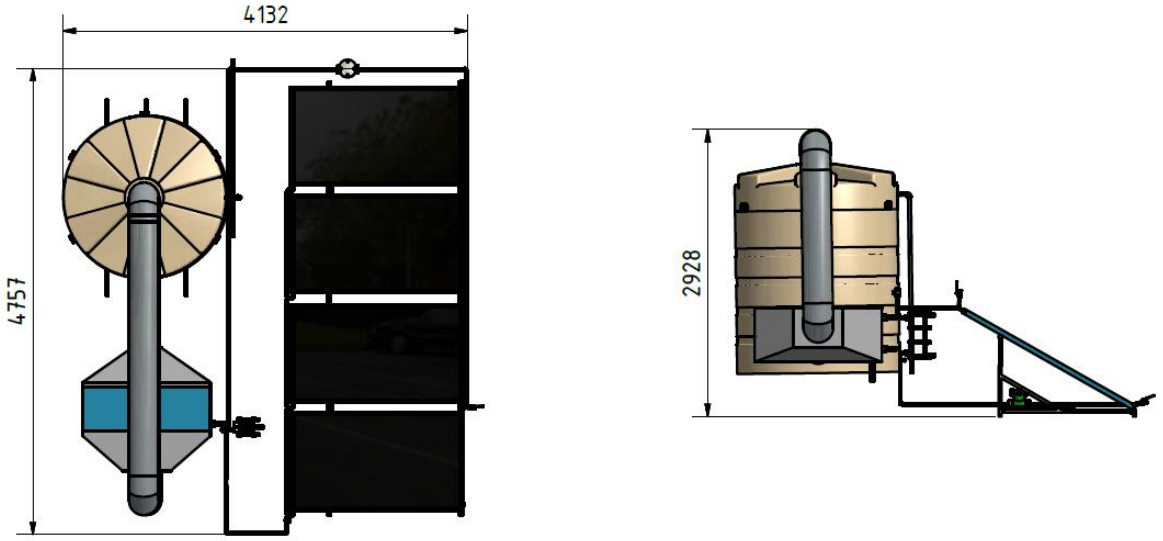


Figura 4-1. Layout equipo desalinizador.

En la instalación de la red de agua de alimentación se consideró la implementación de un filtro para sedimentos livianos, como lodo, arena y oxido. Esto logra evitar el ensuciamiento se de los pulverizadores por particulas que pueda transportar el fluido. Las características del filtro se señalan en la tabla 4-1.

Tabla 4-1. Características filtro red de agua salada, marca Vigaflow.

Tipo	Filtro hilado 20 micras
Rango de temperatura [°C]	4-50
Flujo máximo [L/min]	36
Duración aproximada	6 meses
Porta filtro	10”x2,75”

En la figura 4-2 se muestra el esquema de la instalación del desalinizador señalando todos sus equipos principales y elementos periféricos como bombas, válvulas de llenado, manómetro, filtro, remarcador y válvula de seguridad.

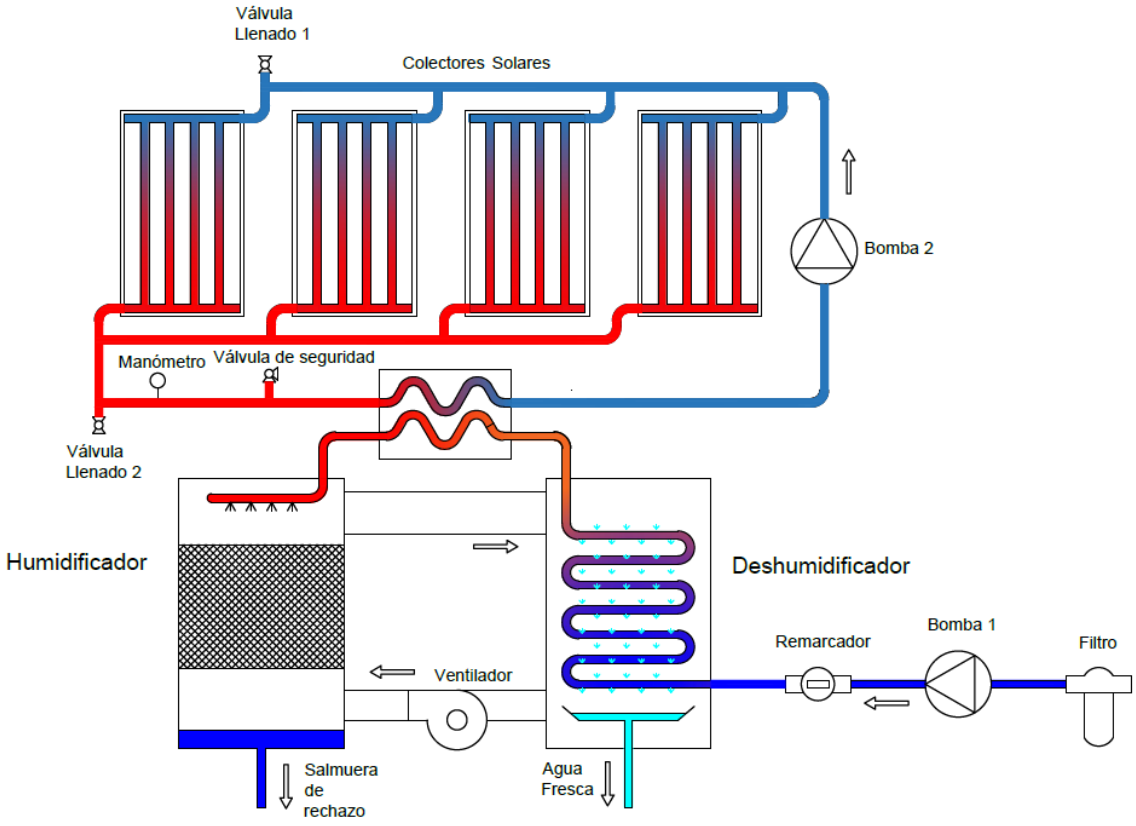


Figura 4-2. Esquema de la instalación del desalinizador.

Figura 4- 1

4.1.1. Construcción humidificador

El estanque de polietileno de alta densidad es retirado en la comuna de Til Til. El material es apropiado de mecanizar mediante herramientas de corte de madera. El mecanizado del estanque se realiza en las dependencias del taller metalmecánico del campus San Joaquín, con la supervisión del encargado docente del taller. El corte de la parte superior con el propósito de fabricar una tapa según la el plano del anexo 8.2 se realiza mediante un cierra circular de 8 pulgadas. El trabajo se muestra en la figura 4-3.

Figura 4-3 . Corte del estanque en la parte superior.

Las perforaciones de los ductos de aire son realizadas una sierra caladora, también herramienta utilizada para fines de carpintería. El acabado y ajuste final se realiza mediante limas escofina y de media caña, el ajuste se hace forma manual. Para perforaciones más pequeñas se utiliza un taladro convencional. Las barras para sujetar el relleno son tres tubos de acero inoxidable 304L de 1/2 pulgada de diámetro y dos metros de largo cada una. El trabajo se muestra en la figura 4-4.

Figura 4-4. . Instalación de los sujetadores del relleno y orificio para la instalación del ducto de 6”.

Se adquirieron capas de relleno evaporativo de 300 mm de espesor y 1640 mm de diámetro. Los rellenos están conformados por semicircunferencias. El estanque y los rellenos son trasladados al laboratorio para realizar el montaje de las partes que conforman el humidificador. En el lugar son realizadas las perforaciones para instalar las piezas para generar el cierre de la tapa superior. La placa de la pieza fabricada en la impresora 3D,

según el plano de fabricación en el anexo 8.3, esta es pegada en el interior del estanque utilizando acero líquido. En la figura 4-5 muestra cómo queda fijado en la parte interior y exterior.

Figura 4-5. Instalación de la tapa del humidificador.

El arreglo de los pulverizadores se realiza mediante pipping y fitting en acero inoxidable grado 316L Clase 150. El motivo de utilizar las cañerías de acero inoxidable es por su mejor respuesta a la salinidad del agua con temperatura superior a los 50 °C. El plano técnico para realizar la pieza se encuentra en el anexo 8.2. Para el arreglo de pulverizadores ser requirieron tres tee y cuatro codos de 90° con rosca hembra NPT 3/4“, cuatro bushing reducción de 3/4"- 1/4" y seis niples con finales roscados macho de 250 mm. El armado se muestra en la figura 4-6

Figura 4-6. Pulverizadores.

El arreglo de los pulverizadores es fijado en la tapa superior, por medio de abrazaderas y espárragos, como se muestra en la figura 4-7, esta fijación permite dejar de forma estacionario los pulverizadores en la tapa.

Figura 4-7. Instalación de los pulverizadores en el humidificador.

Los rellenos evaporativos son atados uno por uno para facilitar la posición en el humidificador y poder retirarlos del estanque. En total se tiene cuatros semicircunferencias. Finalmente el relleno quedo con una altura final de 600 mm, dejando disponible el espacio para dos capas de relleno más. En la figura 4-8 se muestra la disposición final de los rellenos evaporativos en el humidificador.

Figura 4-8. Relleno evaporativo en el humidificador.

Finalmente la parte superior es posicionada para cerrar el estanque, la posición de los 6 agujeros para apernar la tapa con el cuerpo del estanque funciona correctamente como se predijo en el diseño. Inmediatamente se procede a colocar el ducto de 6 pulgadas en la parte inferior y el codo en la parte superior de 12 pulgadas. En la figura 4-9 se muestra la construcción del humidificador.

Figura 4-9. Humidificador.

4.1.2. Construcción deshumidificador

El intercambiador de tubo aleteado fue reacondicionado para la aplicación de condensadores. Las conexiones interiores fueron apretadas para evitar fugas de agua en el interior. Las campanas diseñadas fueron fabricadas en planchas zinc de 0,5 mm de espesor. Estas fueron instaladas en el intercambiador como se muestra en la figura 4-10.

Figura 4-10. Deshumidificador.

Para medir el condensado generado en el despiche del intercambiador se posiciona un recipiente graduado en centímetros cúbicos y con capacidad de un litro, al costado se ubica un estanque donde se podrá vaciar el contenido del frasco una vez que se llene en el caso que se cuente con la vigilancia manual de verificar la capacidad de condensado a lo largo de las horas de funcionamientos. La utilización del recipiente graduado puede evitarse colocando directamente el estanque por debajo del despiche.

4.1.3. Colectores solares

Para instalar los colectores solares se empezó con la fabricación de los soportes. El soporte consta de 7 piezas apernadas (planos de construcción en la sección 8.5), de fácil montaje y con la capacidad de ser transportado sin mucha complejidad. Se fabricaron dos unidades y fueron pintadas con anticorrosivo en dos capas de pintura. El largero superior donde reposan los colectores solares es regulable a tres medidas dependiendo de la estación en que se encuentre en operación. La fijación es mediante pernos pasantes en ambos costados del largero. En la figura 4-11 se muestra los soportes construidos.

Figura 4-11. Instalación de los colectores solares.

La cañería utilizada en los colectores es de cobre y el fitting de bronce, se conectan los colectores de forma externa. Se instalan válvulas de bola para el llenado y alivio en la parte inferior y superior respectivamente. El manómetro de fabricante Kröne con rango de 0-10 bar y resolución de 0,2 bar, es instalado en la zona de salida del agua de cola colectores cercano la válvula de seguridad.

Figura 4-12. Conexión de los colectores solares.

La instalación del intercambiador de calor se hace por la parte posterior de los colectores, cercano al humidificador. Lo que respecta a la línea de agua salada, en la línea de entrada antes del deshumidificador la cañería es de PVC, debido a que no hay presencia de temperatura sobre 40°C que deforme el material. Una pequeña conexión del deshumificador hacia el intercambiador (separados 30 centímetros), es de cobre, a la salida del intercambiador la cañería es de acero inoxidable hasta los pulverizadores. La tubería caliente consta de 3300 mm de cañerías de inoxidable desde la salida del intercambiador de calor de placas hasta la entrada del humidificador.

4.1.4. Ductos de aire

Los ductos de aire conectan el humidificador con el deshumidificador por la parte inferior y superior. En la parte inferior la campana del dehumidificador es conectado el ventilador, enseguida de un ducto de 6 pulgadas que entra al humidificador 600 mm. Por la parte superior el ductor de 12 pulgadas horizontal consta de tres partes, y la parte vertical de dos. En la parte posterior al deshumidicador se conecta a la campana por medio de un codo.

Figura 4-13. Ductos de aire.

Capítulo 4

5.1 Puesta en marcha del desalinizador

El equipo ya con sus componentes instalados, se conecta los equipos eléctricos a la red para una marcha blanca, donde se inspeccionó el funcionamiento de los equipos. Los pulverizadores trabajan con una presión mínima de 2 bar. El primer inconveniente fue el caudal entregado por la bomba recirculatoria en el agua de alimentación. La carga de la bomba alcanzó según el manómetro instalado en la línea de lo pulverizadores 0,4 bar, por lo que no realizaba una pulverización exitosa. Para remediar esta situación se conectó el sistema con el agua de la red, donde se pudo lograr el funcionamiento a 6 bar de presión, este valor se veía inestabilizado a medida que se ocupaba el agua del lugar, ya que baja la presión de suministro. Bajo estas condiciones se pudo hacer funcionar la bomba, que mantenía estable la presión de 6 bar. Por otra parte el ventilador, marca S&P modelo TD-500 funciona correctamente, con un regulador de velocidad (de 0 a 100% de carga), proporciona un caudal máximo de descarga libre de $570\, m^3/hr$. Se procede a aislar las cañerías de agua de los colectores para evitar pérdidas por conducción y convección con el ambiente,

En los primeros días de funcionamiento se destilaron los primeros litro del destilados, que llegaron a un máximo 14 litro al día. Los inconvenientes encontrados posterior a la puesta en funcionamiento fue la filtración de condensado fuera de la bandeja de recolección. Esto se ocasiono en la junta de los ductos de aire y campanas del deshumidificador.

A pesar de que aún faltan ajustes para mejorar la operación, como la corrección de las fugas y variación del caudal de alimentación, se pudo corroborar el principio de funcionamientos mencionado en la literatura, considerando que aún no se han alcanzado la estabilidad de operación de caudal y temperatura del equipo.

Capítulo 6

6.1 Conclusión

El método de desalinización por humidificación-deshumidificación es una alternativa potencial para desalinizar a pequeña escala con bajo gasto energético, sumando la fácil incorporación de energía solar en su proceso. El objetivo de diseñar y posteriormente construir el equipo desalinizador acoplado con energía solar fue logrado, los planos de fabricación se pueden consultar en los anexos 8.2, 8.3, 8.4 y 8.5.

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. Con los recursos provistos en el taller metalmecánica y Laboratorio de Energías Renovables fue suficiente para realizar la puesta en marcha del equipo.

La puesta en marcha del equipo fue reacondicionado por estudios otra estudiante donde se obtuvieron mediciones de funcionamiento (temperatura, caudales y destilado). A pesar que la configuración del equipos es por CAOW, esta puede modificarse y obtener una configuración CWOA con la disposición de un estanque en el sistema con capacidad mínima de 300 litro, para evitar el calentamiento del agua por la recirculación. Un problema de concentración de solutos no es considerablemente problemático debido a la baja razón de recuperación del método (menor a un 10%). Un circuito abierto de agua y aire también puede acondicionarse, solamente desconectando la comunicación de ductos entre el humidificador y el deshumidificador en la parte inferior, es decir, dejando la toma de aire del ventilador y la salida del humidifcador al ambiente.

La producción de agua destilada registrada al 25 de abril del año 2017 fue de 14 litros, por debajo de lo propuesto en el diseño donde se esperaría 4 litro por hora. Para llegar al valor esperado aún se quiere tener mayor control de los parámetros operacionales para mejorar la operación.

Bibliografía

[1]. Guofeng Yuan, Zhifeng Wang, Hongyong Li, Xing Li. (2011). Experimental study of a solar desalination system base on humidification-deshumidication process. En: Desalination 277 2011. 92-98. Recuperado en: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916411003183

[2]. Saldivia Salazar, D.J. (2015). Simulación computacional de sistema térmicode desalinización acoplado con energía solar. (Memoria de Magíster inédita). Universidad Técnica Federico Santa María.

[3]. Stephen R. Carpenter, Emily H. Stanley, and M. Jake Vander Zander (2011). State of the worlds freshwater ecosystems physical chemical and biological changes. Annual Review of Environment and Resources, 36:75–99.

[4]. Igor A. Shiklomanov (1998). World water resources: A new appraisal and assessment for the 21st century. Technical report, International Hydrological Programme, UNESCO.

[5]. Banco Mundial (2014). En: Datos. Recursos de agua dulce internos renovables per cápita (metros cúbicos). Recuperado de: http://datos.bancomundial.org/indicador/ER.H2O.INTR.PC

[6]. Guy Howard (2003). Water Engineering and Development Centre, Universidad de Loughborough, RU, y Jamie Bartram, Organización Mundial de la Salud, Ginebra, Suiza.

[7]. Instituto nacional de estadísticas (INE). Medio ambiente, Informe Anual 2015. Santiago de Chile, Febrero 2016.

[8]. Ministerio de Medio Ambiente. Informe del Estado del Medio Ambiente,. Santiago de Chile, 2nd edición, Nov. 2012.

[9]. Superintendencia de Servicios Sanitarios. Informe de Gestión Sanitario 2015. Santiago, Chile, Septiembre 2016

[10]. Instituto Nacional de Normalización (INN). Norma Chilena de Calidad de Aguas NCh409/1 Of.2005. 1ra edición, 2005.

[11]. Soteris A. Kalogirou (2009). Solar energy engineering: processes and systems. 1ra edición, 2009.

[12]. Sabine Lattemann, Maria D. Kennedy, Jan C (2010). Schippers, and Gary Amy. Chapter 2. global desalination situation. Sustainability science and engineering, 2:7–39, 2010.

[13]. Emad Ali (2002). Understanding the operation of industrial MSF plant Part I: Stability and steady-state analysis. Desalination, 143:53-72, 2002. Recuperado en: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916402002217

[14]. Hisham El-Dessouky and Hisham Ettouney (2002). Fundamentals of Saltwater Desalination. Elsevier Science B.V., Primera edición, 2002. Recuperado en: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444508102500075

[15]. Neil M. Wade (2001). Distillation plant development and cost update. Desalination, 136:3–12. Recuperado en: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001191640100159X

[16]. Ali M. El-Nashar and M. Samad (1998). The solar desalination plant in Abu Dhabi: 13 years of performance and operation history. Renewable Energy, 14:263–274. Recuperado en: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148198000767

[17]. Ahmad Al-Ansari, Hisham Ettouney, and Hisham El-Dessouky. Water–zeolite adsorption heat pump combined with single effect evaporation desalination process. Renewable energy, 24(1):91–111. Recuperado en: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148100001920

[18]. G. Prakash Narayan , Mostafa H. Sharqawy, Edward K. Summers, M.A. Antar (2009). The potential of solar-driven humidification–dehumidification desalination for small-scale decentralized water production En: Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 1187–1201 Recuperado en: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032109002767

[19]. Cihan Yıldırım,Ismail Solmus (2012). A parametric study on a humidification–dehumidification (HDH) desalination unit powered by solar air and water heaters En: Energy Conversion and Management 86 (2014) 568–575 Recuperado en: http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689041400541X

[20]. Prakash Narayan Govindan (2011). Status of Humidification Dehumidification Desalination, IDA World Congress on Desalination and Water Reuse. Septiembre 2011.

[21]. BETE Fog Nozzle, Inc. Nozzles for industry, pollution control, and fire protection. Página 71.

[22]. Ministerio de energía (MINERGIA) (2010). Sistema solares térmicos II, guía de diseño para grandes sistemas de agua caliente sanitaria. 1ra edición diciembre.

[23]. Hernandez (2017). Modelamientos computacional de sistema de desalinización por método de humidificación-deshumidificación. (Memoria de pregrado inédita). Universidad Técnica Federico Santa María.

Anexos

8.1 Parámetros de rendimiento

Antes de empezar a explicar las tecnologías se explicaran los parámetros mencionados en la literatura que permiten evaluar el rendimiento de los diferentes sistemas de desalinización [2,18].

- **Ganancia de la relación de salida (Gained Output Ratio, GOR) [-]:** Es el parámetro de rendimiento más relevante utilizados en sistemas térmicos de desalinización. Corresponde a la razón entre la energía requerida para cambiar de estado el agua producida (en otra palabras, el flujo de destilado por su calor latente de vaporización) y la energía requerida del sistema. En resumen, es mayor que 1 y mientras mayor sea es mejor, ya que indica que se produjo más agua con un menor uso de la energía. El rango típico de calor latente de vaporización de las plantas desalinizadoras es $2.300\ [kJ/kg]$ y se mantiene aproximadamente constante y concurrentemente la fuente de energía es vapor saturado, luego para los efectos de cálculo el GOR puede ser aproximado como la razón de los flujos másicos de destilados y de vapor motriz externo.

$$GOR = \frac{M_d \lambda_d}{M_\delta \lambda_\delta} \approx \frac{M_d}{M_\delta} \tag{2.1}$$

  Donde M representa el flujo másico, λ representa el calor latente de vaporización y los subíndices δ y d representa la fuente de vapor externo y el destilado producido respectivamente.

- **Relación de desempeño (Performance Ratio, RT) [kg/MJ]:** Cuando la fuente de energía no es vapor saturado, no es posible definir al *GOR* como la relación aproximada 2.1. Por este motivo se define la Relación o Razón de desempeño como la masa de destilado producido por unidad de energía.

$$PR = \frac{M_d}{Q_{input}} \tag{2.2}$$

  Bajo esta definición, el *PR* no es un parámetro adimensional, y por tanto depende del sistema de unidades utilizado. Saldivia menciona que hay autores que define n el

PR como el destilado producido por cada $2.300\,[kj/kg]$ de energía utilizada (aludiendo a la aproximación del calor de vaporización), expresándolo así de forma adimensional. Este parámetro es muy similar al *GOR*, por ello algunos autores lo utilizan como sinónimo. Es importante destacar que ninguno de los dos parámetros considera el consumo eléctrico de la planta desalinizadora.

- **Razón de Recuperación (Recovery Ratio, RR) [-]:** Es el nivel de recuperación de agua, el donde se define como la razón entre el flujo másico de destilado producido y el agua salobre de alimentación. También puede explicarse como la cantidad de agua obtenida por cada unidad de agua salada que ingresa al sistema, como se indica en la siguiente ecuación:

$$RR = \frac{M_d}{M_f} \tag{2.3}$$

Se considera que mientras más grande es este parámetro más alto es el rendimiento del sistema, sin embargo este valor está limitado por la salinidad de la salmuera de rechazo, debido que una concentración muy alta podría provocar problemas operacionales como incrustaciones en los equipos. En algunos casos se espera una RR bajo para evitar problemas en su disposición final de la salmuera.

- **Área específica (sA)** $\left[\frac{m^2}{kg/hr}\right]$**:** corresponde al área de transferencia de calor requerida para la producción de una unidad de destilado. Indica el nivel de aprovechamiento de los equipos de la plana, representada en la siguiente ecuación:

$$sA = \frac{\Sigma A_i}{M_d} \tag{2.4}$$

El área de trasferencia de calor considerada incluye las áreas de evaporadores, condensadores e intercambiadores de calor.

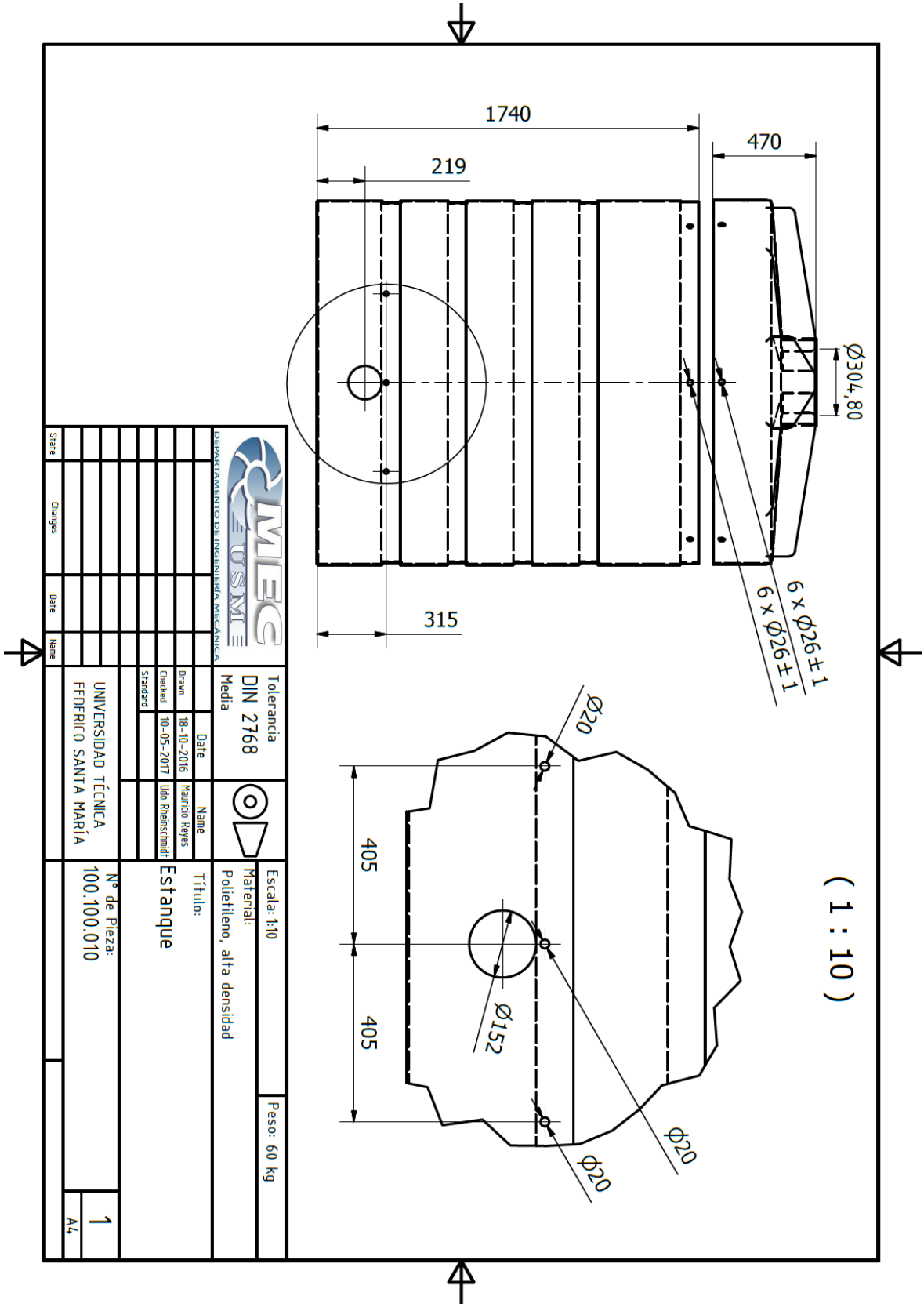
- **Consumo Energético Específico (SEC)** $\left[\frac{kWh}{kg}\right]$**:** Este parámetro corresponde al consumo total de energía, esto involucra la energía térmica y eléctrica utilizada para producir la unidad de desalinizada. Su expresión le muestra a continuación:

$$SEC = \frac{Q_t + Q_e}{M_d} \tag{2.5}$$

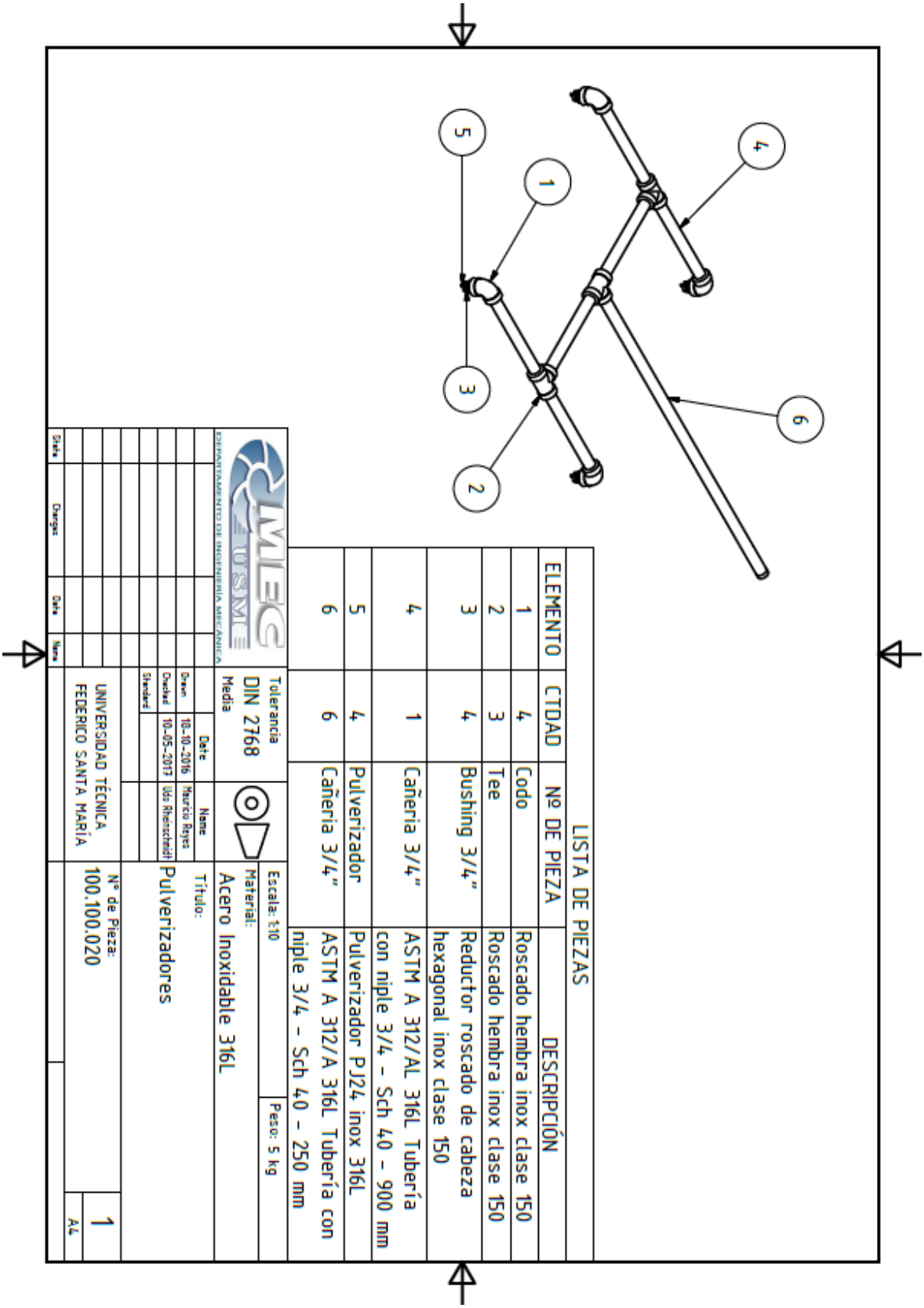
- **Producción Específica por Área de Colección (PE) $\left[\frac{m^2}{kg}\right]$:** Para los sistemas solares es importante conocer el nivel de aprovechamiento del área de colección solar. Entonces el PE corresponderá a la producción de destilado por m^2 de área de colección por unidad de tiempo, que generalmente en un día.

$$PE = \frac{M_d}{A_C} \tag{2.6}$$

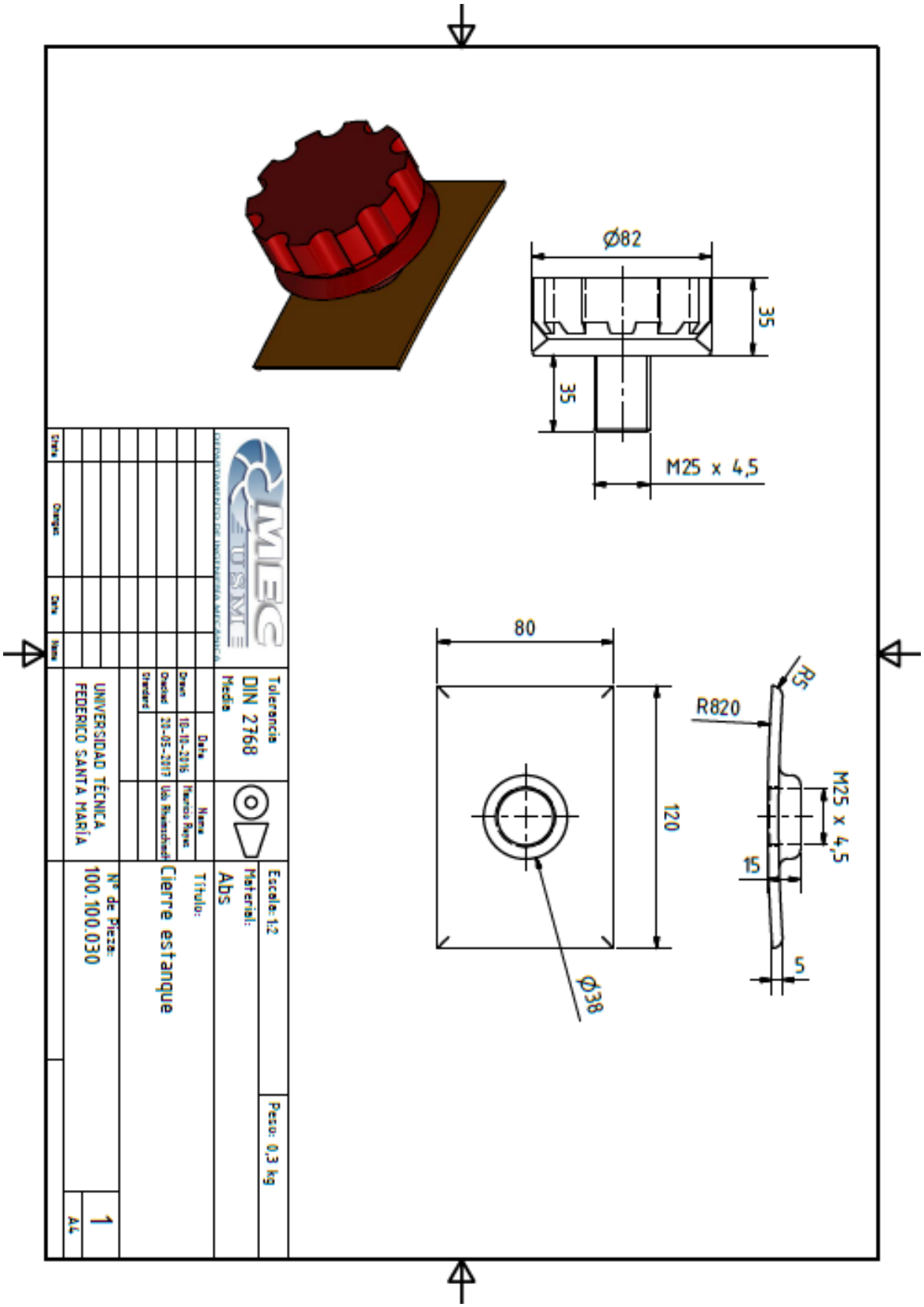
8.2 Plano estaque humidificador 100.100.010



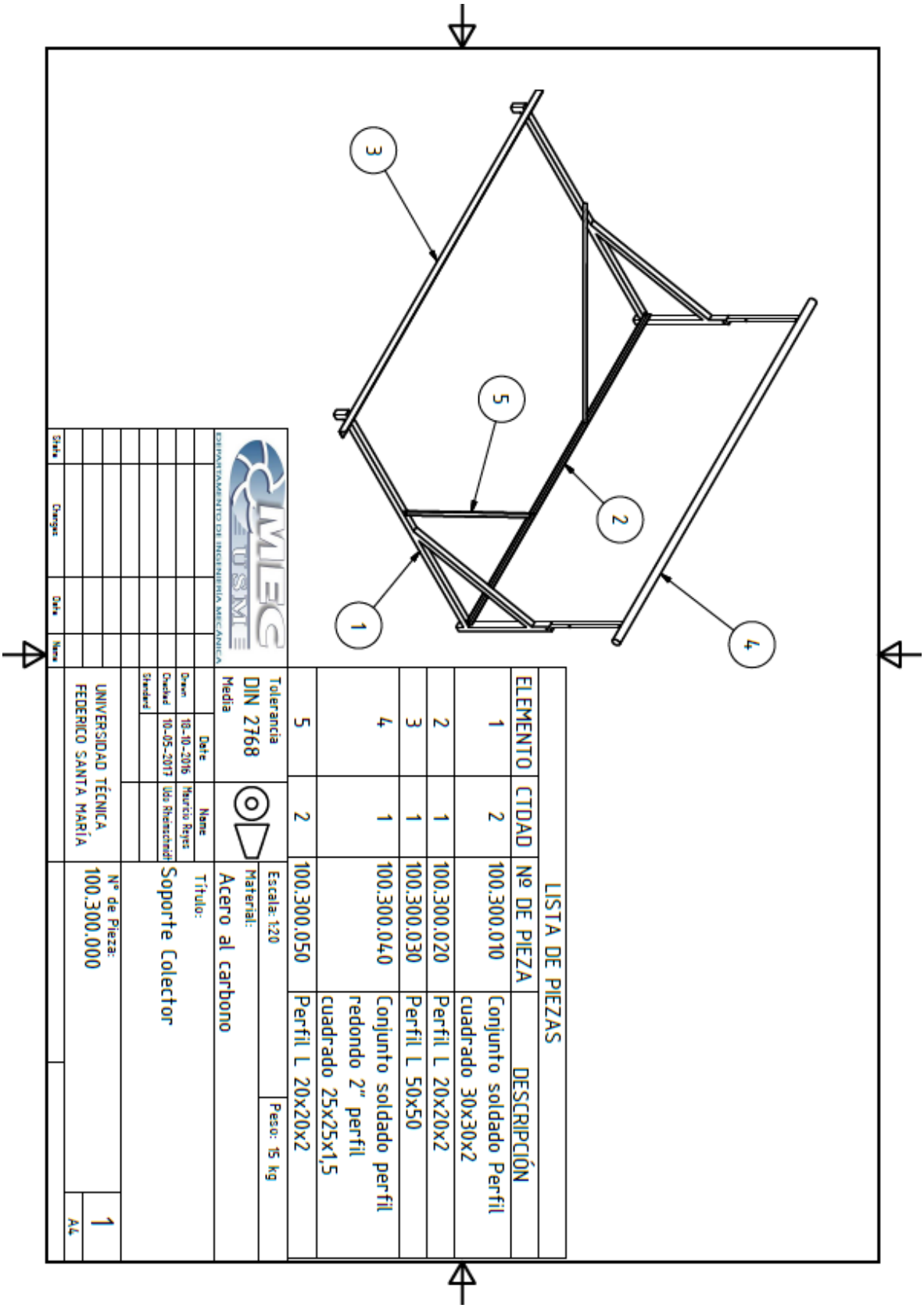
8.3 Arreglo pulverizadores 100.100.020



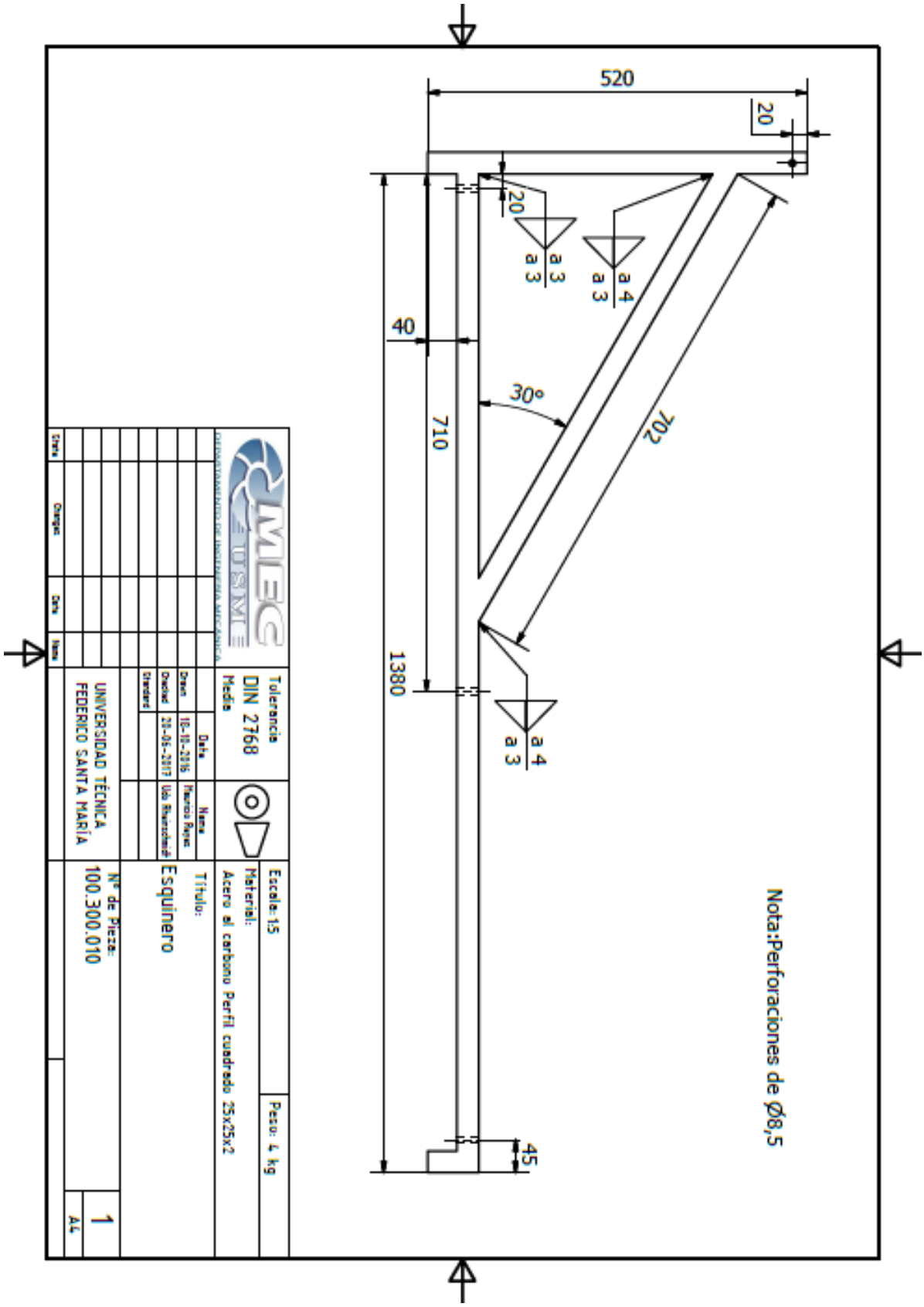
8.4 Piezas del cierre tapa estanque 100.300.030



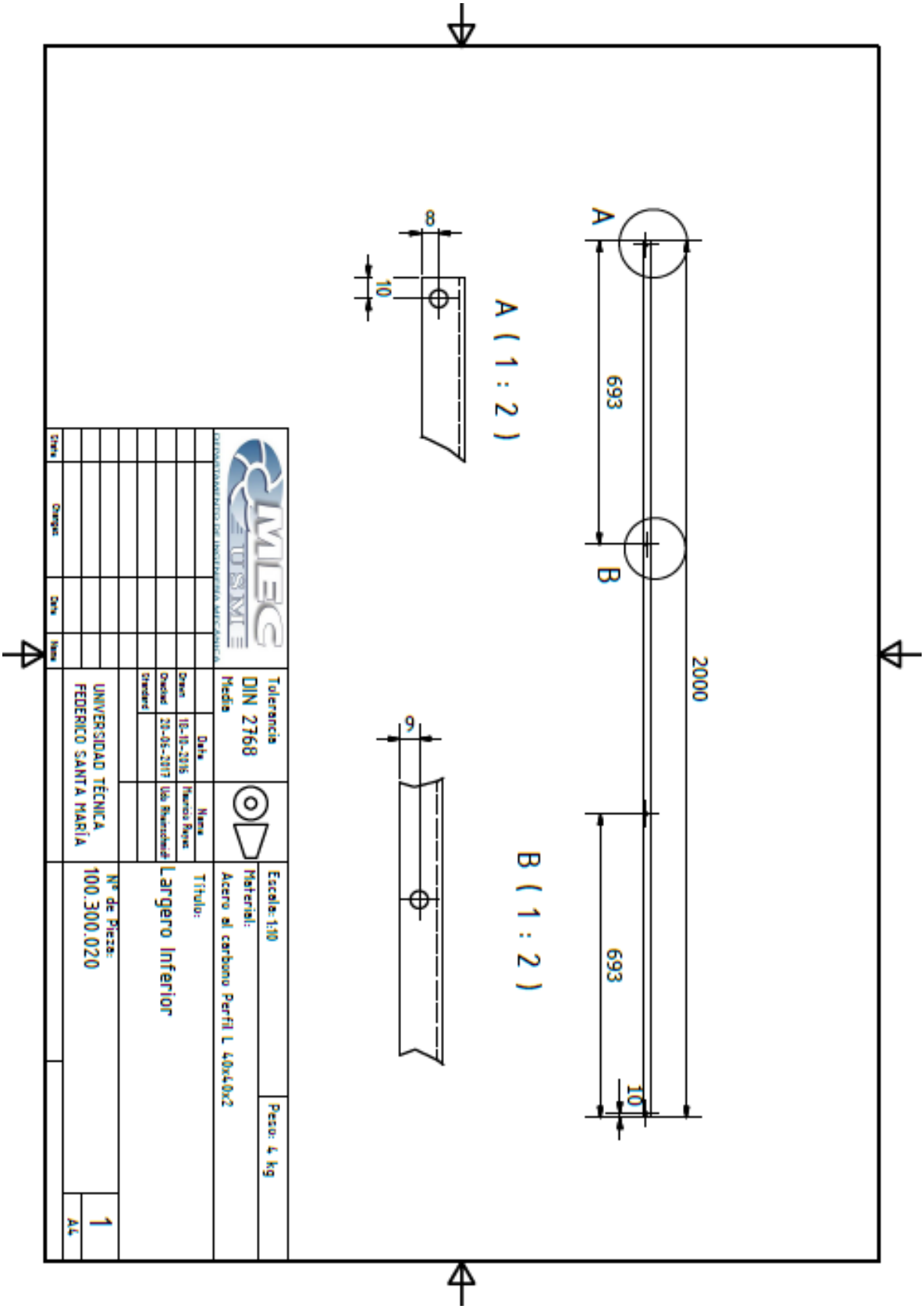
8.5 Soporte colector solar 100.300.000



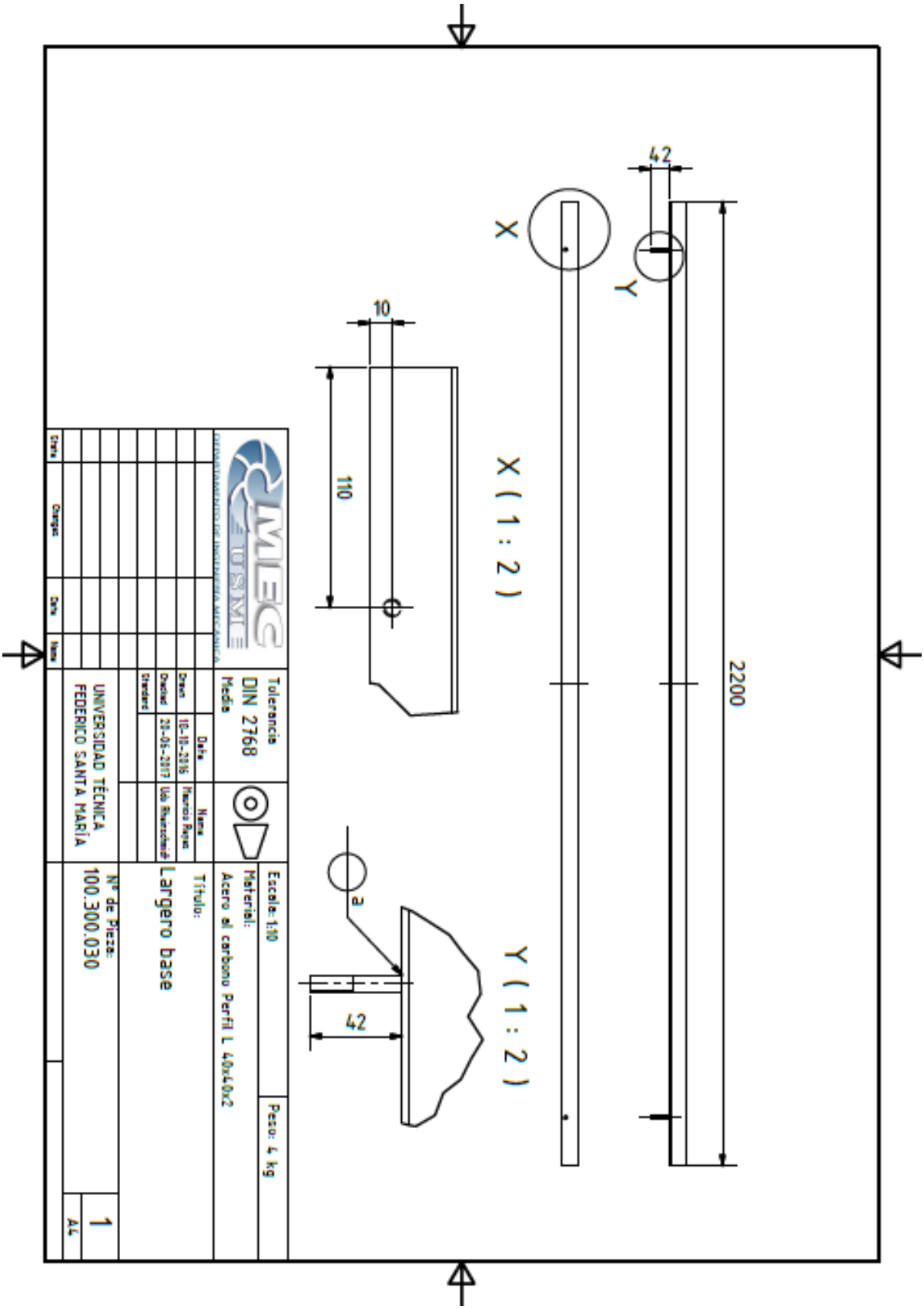
8.5.1. Pieza 100.300.010



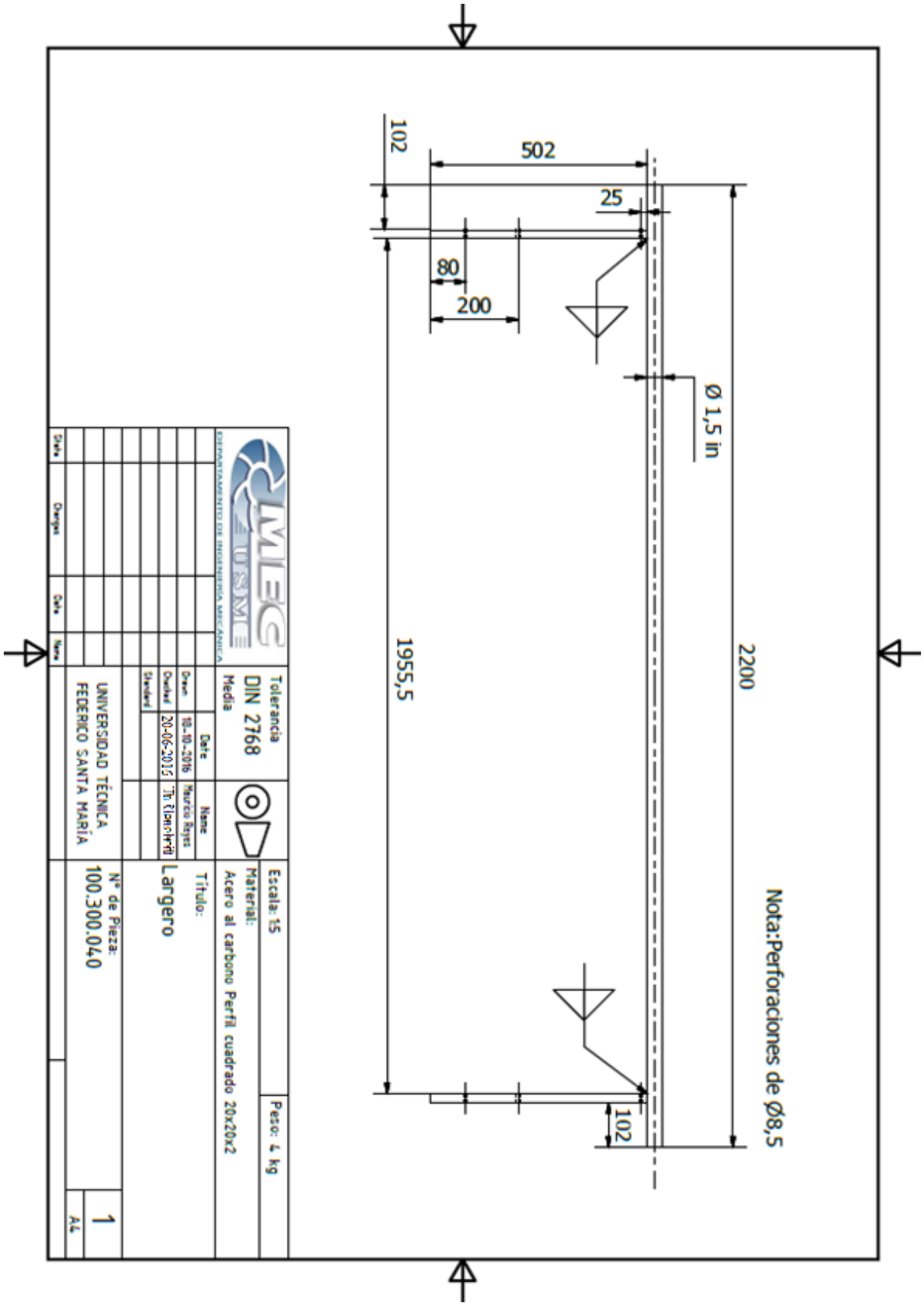
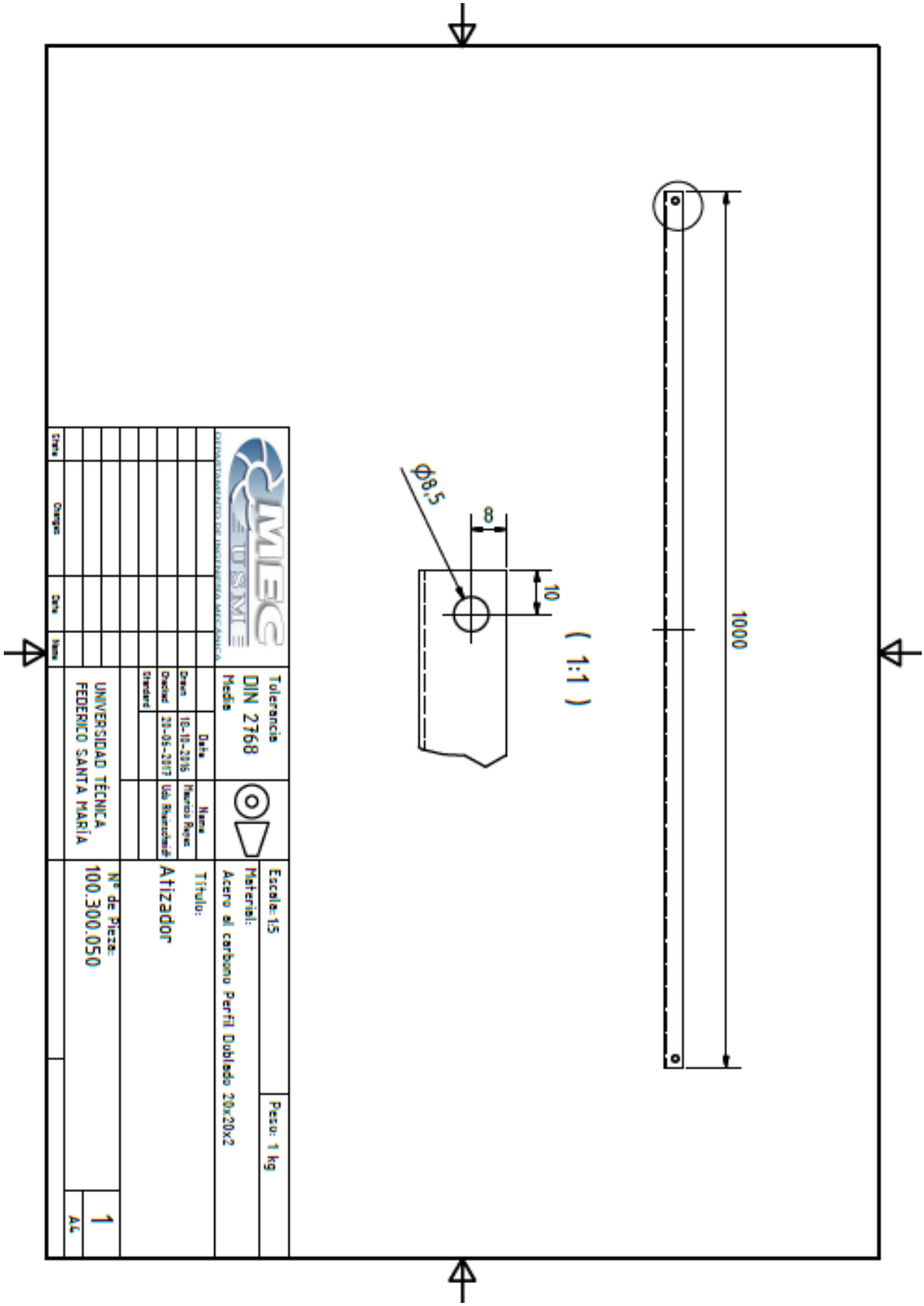
8.5.2. Pieza 100.300.020



8.5.3. Pieza 100.300.030



8.5.4. Pieza 100.300.040



8.5.5. Pieza 100.300.050