

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



CONSTRUCCIÓN, INSTRUMENTACIÓN Y
PUESTA EN MARCHA DE DESTILADOR HDH
CON COLECCIÓN DE ENERGÍA RESIDUAL DE
CELDA PV

Fabricio Antonio Advis Vega

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR A TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
MECÁNICO

Profesor Guía: PhD. Rodrigo Barraza Vicencio

Profesor Correferente: Mag. Ing. Mauricio Reyes Valenzuela

Julio 2021

*Agradezco a todas las personas que a través de su esfuerzo
hicieron posible este sueño a veces tan lejano.
En especial a mis padres y su apoyo incondicional
y a mi esposa y su perfección.*

Resumen

No es ningún secreto que el clima está cambiando, y con él el acceso seguro a agua potable. En este sentido existen dos desafíos; ser capaces de producir energía con el menor impacto posible en el medio ambiente y ser capaces de recurrir a nuevas fuentes de agua de manera sustentable. Ahora cabe preguntarse: ¿Y si la solución a estos dos desafíos viniera de la misma fuente energética?

Durante los últimos años el Laboratorio de Energías Renovables de la Universidad Técnica Federico Santa María ha desarrollado un estudio integral del modelamiento y construcción de plantas de desalinización de agua que utilicen energía solar. Estos esfuerzos comenzaron el año 2017 con el trabajo de modelamiento computacional de un sistema de desalinización HDH, (Hernandez, 2017), y siguieron con la memoria de título de Reyes, la cual consistió en la construcción de una planta desalinizadora por método HDH en Viña del mar (Reyes, 2017). A ellos le siguieron muchos más. Algunos se abocaron en la simulación de diferentes condiciones de funcionamiento (Rodríguez, 2019), otros se concentraron en el mejoramiento de las condiciones operacionales de la planta existente (Aburto, 2018). En el año 2019 se comenzó una nueva arista en el estudio de la destilación de agua, cuando se decidió patentar un prototipo de desalinizador HDH que utilizara energía solar residual de celdas fotovoltaicas en lugar de un colector termosolar. Jahn, comenzó a trabajar en la simulación de tal sistema (Jahn, 2020), seguida de Droguett, quien diseñó y construyó este nuevo prototipo en Santiago, llegando a obtener 400 mililitros de agua destilada en un día (Droguett, 2021).

El presente trabajo sigue la línea de investigación creada por ellos y tiene en la mira la solución de la misma problemática: los escasos hídrica y su solución sustentable. Para lograrlo se estudiará el estado del arte de la desalinización HDH y su funcionamiento. A continuación se expondrá el proceso de construcción de una planta nueva, basada en el modelo diseñado por Droguett y se comentarán los desafíos de la puesta en marcha y todas las decisiones tomadas durante la implementación. Luego se describirán los equipos adquiridos para instrumentar el prototipo, incluyendo protocolos de calibración y la programación del registrador de datos. Por último se aplicarán mejoras al diseño original, se propondrá una matriz de datos y se analizará brevemente.

Palabras clave: Cambio climático, Escases hídrica, Desalinización solar, HDH, Prototipo, Construcción, Instrumentación.

Abstract

It is not a secret that the climate is changing, and with it the safe access to drinking water. Because of that we face two challenges: to be able to produce energy with the least possible climate impact and to be able to use new sources of water in a sustainable way. Now it is worth to ask: What if the solution to these two challenges came from the same energy source?

In recent years, the Renewable Energy Laboratory of the Universidad Técnica Federico Santa María has developed a full work in the study, modeling and construction of water desalination plants that use solar energy. Everything started in 2017, with the computational modeling of an HDH desalination system, (Hernandez, 2017), followed by the Reyes grade thesis, which consisted in the construction of a desalination plant by the HDH method in Viña del Mar (Reyes, 2017). Many more followed. Some of them focused on the simulation of different operating conditions (Rodríguez, 2019), others focused on improving the operating conditions of the existing plant (Aburto, 2018). In 2019, a new edge began in the study of water distillation, when it was decided to patent a HDH desalinator prototype that uses residual solar energy from photovoltaic cells instead of a thermosolar collector. Jahn began to work on the simulation of such a system (Jahn, 2020), followed by Droguett, who designed and built this new prototype in Santiago, obtaining 400 milliliters of distilled water in one day (Droguett, 2021).

The present work is based on their research and pursuits to solve the same problem: lack of water and their sustainable solution. To achieve this, the state of the art of HDH desalination and its operation will be studied. Next, the construction process of a new plant will be detailed based on the model designed by Droguett. All the challenges and decisions taken during the implementation will be stated. Then the acquired equipment to build the prototype will be described, including the calibration protocols and the datalogger programming. Finally, improvements will be applied to the original design, a data matrix will be proposed, and it will be briefly analyzed.

Keywords: Climate change, lake of water, Solar desalination, HDH, Prototype, Construction, Instrumentation.

Abreviaturas

DGA: Dirección General de Aguas

GEI: Gases efecto invernadero

MNA: Mesa Nacional de Agua

FCH: Fundación Chile

WRI: World Resources Institute

RO: Reverse Osmosis

MSF: Multi Stage Flash

MED: Multiple effect distillation

HDH: Humidificación-dehumidification

CSP: Concentrated Solar Power

PV: Photovoltaic

PVT: Photovoltaic-termal

LER: Laboratorio de Energías Renovables

PPR: Polipropileno random

HE: Rosca exterior

HI: Rosca interior

IP: Índice de protección

PRT: Platinum resistance thermometer

RTD: Resistance thermometers

EMF: Electromagnetic fiel

EES: Engineering Equation Solver

CAOW: Close air, open water

CACW: Close aire, close water

Contenido

1.	Introducción	1
1.1.	Introducción	1
1.2.	Objetivos	2
2.	Escases hídrica: ¿A qué nos enfrentamos?.....	3
2.1.	Situación hídrica en el mundo	3
2.2.	Situación hídrica en Chile	5
2.3.	Desalinización en el Mundo	7
2.4.	Desalinización en Chile.....	9
3.	Antecedentes de la desalinización HDH	10
3.1.	Equipamientos y funcionamiento de la desalinización HDH.....	11
3.2.	Estado del arte	14
4.	Construcción	17
4.1.	Layout de la planta HDH	17
4.2.	Estructuras de soporte	19
4.2.1.	Ángulo de inclinación de la estructura del Humidificador.....	20
4.3.	Humidificador	22
4.4.	Deshumidificador	24
4.5.	Tuberías.....	24
4.6.	Tuberías de agua.....	25
4.7.	Tuberías de aire	28
4.8.	Bombas.....	30
4.9.	Ventilador.....	30
4.10.	Calentador de agua	31
4.11.	Conexión eléctrica.....	32
4.12.	Detalles finales de instalación	33
5.	Instrumentación.....	36
5.1.	Registrador de datos.....	37
5.1.1.	CR1000X.....	37
5.1.2.	Programación	39
5.1.3.	Funciones	40
5.1.4.	Instalación del registrador de datos	41

5.2.	Termómetros	42
5.2.1.	Base teórica termómetros	42
5.2.1.1.	¿RTD o Termocupla?	42
5.2.1.2.	Conexión	43
5.2.1.3.	Inmersión de sonda.....	44
5.2.1.4.	Autocalentamiento.....	44
5.2.2.	Configuración de termómetros	45
5.2.3.	Calibración de termómetros	46
5.2.4.	Instalación de termómetros	48
5.3.	Caudalímetro	50
5.3.1.	Base teórica caudalímetro	50
5.3.1.1.	Efecto Hall.....	50
5.3.1.2.	Caudalímetro de efecto Hall.....	51
5.3.1.3.	Pulso de flujo k.....	51
5.3.2.	Configuración del caudalímetro	52
5.3.3.	Calibración del caudalímetro.....	53
5.3.4.	Instalación del caudalímetro.....	54
5.4.	Piranómetro	54
5.4.1.	Base teórica del piranómetro.....	54
5.4.2.	Configuración del piranómetro	55
5.4.3.	Instalación del piranómetro	55
5.5.	Medidor de destilado.....	56
5.5.1.	Programación del medidor de destilado	57
5.5.2.	Calibración del medidor de destilado	58
5.5.3.	Instalación del medidor de destilado	58
5.6.	Anemómetro.....	59
5.6.1.	Base teórica del anemómetro	59
5.6.2.	Protocolo de medición.....	60
5.7.	Detalles finales de la instrumentación.....	61
6.	Implementación de mejoras	62
6.1.	Reproducción de condiciones de ciclo de agua abierto (OW)	62
6.1.1.	Enfriador de salmuera de rechazo	63
6.1.2.	Aislación de tuberías y componentes	65

6.2.	Ampliación de opciones de funcionamiento	67
6.2.1.	Modificación de ramal de rociadores	67
6.2.2.	Ventanilla de inspección	68
6.3.	Modificaciones prácticas.....	68
7.	Propuesta de datos.....	70
7.1.	Desempeño de mejoras.....	¡Error! Marcador no definido.
7.2.	Comentarios finales.....	74
8.	Puesta en marcha.....	76
8.1.	Manual de puesta en marcha	76
8.2.	Mantenimiento	77
8.3.	Manual de fallas	77
9.	Conclusiones	79
10.	Bibliografía	81
11.	Anexo	84
A.	Ecuaciones.....	84
B.	Radiación mensual para una superficie inclinada en Maipú.	86
C.	Código de programa de registro de datos en CRBasic	90
D.	Datos técnicos de instrumentos utilizados.....	92
E.	Diagramas de conexión	95
F.	Código de programación en Arduino IDE del lector secundario de caudal	97
G.	Registro de calibración de sensores.....	98
H.	Resultados de simulaciones en ESS	99
I.	Códigos de programación en EES.....	100
J.	Planos de construcción	102

Índice de Figuras

Figura 2.1. Mapa de riesgo global de agua. Fuente (WRI, 2021)	4
Figura 2.2. Distribución global de grandes plantas desaladoras por capacidad, tipo de agua de alimentación y tecnología de desalación. Fuente (Jones, 2019).....	7
Figura 2.3. Distribución global de las instalaciones y capacidades de desalación operativas mayores a 1000 m ³ día, por sector usuario. Fuente (Jones, 2019).....	8
Figura 2.4. Distribución geográfica de las principales plantas de desalinización en Chile. Fuente MOP.....	9
Figura 3.1. Técnicas de desalinización. Adaptado de (Ghalavand, Y. Hatamipour, M. Rahimi, A, 2014)	10
Figura 3.2. Esquema funcional simplificado de un desalinizador HDH de ciclo CAOW con calentamiento de agua y aire, circulación forzada. Elaboración propia.....	12
Figura 3.3. Clasificación de procesos HDH típicos. Adaptado de (G. Prakash Narayan, 2009)	13
Figura 3.4. Esquema general del equipo de desalinización diseñado por el LER. Fuente (Santiago, Chile. Patente n° 201901906, 2019).....	16
Figura 4.1. Plano del espacio disponible para instalación de deshumidificador HDH. Elaboración propia.....	17
Figura 4.2. Vista superior del diseño planteado por Droguett. Fuente (Droguett, 2021)	18
Figura 4.3. Vista superior del diseño reconfigurado. Adaptado de (Droguett, 2021)	18
Figura 4.4. Vista isométrica de la planta HDH modificada. Elaboración propia.....	19
Figura 4.5. Izquierda, construcción de estructuras. Derecha arriba, esmeril de banco utilizado para los cortes. Derecha abajo, estructura del ventilador terminada.....	20
Figura 4.6. Radiación anual en el plano inclinado versus ángulo de inclinación.....	22
Figura 4.7. Humidificador. Izquierda, despiece del humidificador. Derecha, construcción de base metálica.	23
Figura 4.8. Construcción del humidificador. Izquierda, perforación para grapas con broca M8. Centro, adhesión de sello de goma. Derecha, instalación de PV.	23
Figura 4.9. Construcción Humidificador. Izquierda, estructura de soporte con perfil de fijación. Derecha, instalación conectada al piping de agua y aire.	24
Figura 4.10. Vista isométrica del piping de agua. Adaptado de (Droguett, 2021).....	26

Figura 4.11. Construcción de piping de agua. Izquierda, proceso de fusionado. Derecha arriba, ubicación de fittings para bypass de filtros. Derecha abajo, sistema de filtros casi terminado.....	27
Figura 4.12. Construcción piping agua. Arriba izquierda, estación de trabajo para termofusión. Abajo, bypass calentador auxiliar y ramal de aspersores mejorado.....	27
Figura 4.13. Vista isométrica del piping de aire. Adaptado de (Droguett, 2021).....	28
Figura 4.14. Construcción de tuberías de aire. Izquierda arriba, segmento entre ventilador y entrada humidificador. Derecha arriba, sifones de recuperación de salmuera de rechazo y destilado. Abajo, subconjuntos.....	29
Figura 4.15. Instalación de Bombas. Izquierda, bomba de alimentación. Centro y derecha, disposición con protector.....	30
Figura 4.16. Instalación del ventilador paso a paso.	30
Figura 4.17. Reparación de calentador de agua. Izquierda, sensor de flujo antes de ser reparado. Centro, fisura en el conducto. Derecha, conducto luego de la reparación.	31
Figura 4.18. Calentador de agua en su posición final.	31
Figura 4.19. Esquema de conexión eléctrica utilizado en la planta. Elaboración propia.	32
Figura 4.20. Conceptos barajados durante la instalación de la planta HDH en su posición final. Elaboración propia.	33
Figura 4.21. Vista Suroeste de planta HDH.	34
Figura 4.22. Vista Sureste de planta HDH.	35
Figura 4.23. Vista Este de planta HDH.	35
Figura 5.1. Esquema de instrumentación general. Elaboración propia.	36
Figura 5.2. Fotografía del registrador de datos CR1000X. Fuente (Campbell Scientific, CR1000X Product Manual, 2021).....	37
Figura 5.3. Tipos de señales de entrada admitidas por el CR1000X. Izquierda, high-frequency square-wave. Centro, low-level ac sine-wave. Derecha, switch-closure series. Fuente (Campbell Scientific, CR1000X Product Manual, 2021)	38
Figura 5.4. Esquema de ubicación de los sensores utilizados para la instrumentación. Fuente adaptado de (Campbell Scientific, CR1000X Product Manual, 2021).....	40
Figura 5.5. Izquierda, placas de instalación de datalogger y arreglo eléctrico. Derecha, registrador con todos los sensores instalados.	41
Figura 5.6. Tipos de conexiones para sensores PRT. Fuente (RS Pro, 2021)	44

Figura 5.7. Dispositivo de puenteo de corriente de excitación. Izquierda, diagrama de conexión. Derecha, arreglo fabricado. Fuente (Campbell Scientific, CR1000X Product Manual, 2021)	45
Figura 5.8. Extensión de cables de termómetros Pt-100.	46
Figura 5.9. Baño termostático utilizado para la calibración.	47
Figura 5.10. Instalación de termómetros en desalinizador HDH.	48
Figura 5.11. Ajuste de termómetro de panel. Izquierda, instrucciones de instalación. Derecha, instalación. Fuente (Campbell Scientific, CS240 and CS240DM. Product Manual, 2018)	49
Figura 5.12. Efecto Hall. Fuente Melexis.	50
Figura 5.13. Esquema de funcionamiento de un caudalímetro por efecto Hall. Fuente (Hobbyist, 2021)	51
Figura 5.14. Caudalímetro. Izquierda, flujómetro de rodete y efecto Hall. Derecha, dispositivo de lectura complementaria.	52
Figura 5.15. Arreglo de trabajo. Izquierda, computador utilizado para adquirir las señales del sensor. Derecha, conexionado de tuberías flexibles al sensor.	53
Figura 5.16. Caudalímetro en su ubicación final.....	54
Figura 5.17. Piranómetro en su posición final.....	55
Figura 5.18. Sensor de nivel y electroválvula adquiridas para el medidor de destilado.	56
Figura 5.19. Esquema explicativo del medidor de destilado. Elaboración propia.	57
Figura 5.20. Arreglo utilizado para la calibración del medidor de destilado.	58
Figura 5.21. Anemómetro. Izquierda, modelo PCE-423 en su caja. Derecha, toma de mediciones en la planta.	60
Figura 5.22. Fotografía de los instrumentos utilizados.	61
Figura 6.1. Enfriador de agua. Arriba, equipo antes de instalar y estación de trabajo. Abajo, intercambiador instalado visto desde el frente y atrás.....	64
Figura 6.2. Analogía eléctrica utilizada para la simulación simple del efecto del espesor en UA. Elaboración propia.	65
Figura 6.3. Aislación de tuberías de 20-32 mm, cobertura de estanque y cobertura de condensador.	66
Figura 6.4. Esquema de modificación de ramal de aspersion. Izquierda diseño propuesto por Droguett. Derecha, diseño nuevo. Elaboración propia.....	67
Figura 6.5. Construcción de ventanilla de inspección.....	68

Figura 6.6. Mejoras. Arriba, temporizador marca Nashone, trampa de agua para destilado mejorada y válvula para recambio de agua. Abajo, estado final del equipo.	69
Figura 7.1. Gráfico del desempeño del equipo desalinizador el Sábado 22 de Mayo del 2021. Enfriador de agua encendido a las 13:45 horas y apagado a las 17:00 horas.....	72
Figura 7.2. Gráfico del desempeño del equipo desalinizador el Viernes 28 de Mayo del 2021. Calentador de agua encendido a las 10:00 horas y apagado a las 11:15 horas.	72
Figura 7.3. Gráfico del desempeño del equipo desalinizador el Viernes 21 de Mayo del 2021. Enfriador de agua encendido a las 14:00 horas y apagado a las 17:00 horas.....	74
Figura 8.1. Esquema de ubicación de puntos clave durante puesta en marcha.	77
Figura 11.1. Diagrama de conexión termómetros Pt-100 (1-5). Sacado de PC400.	95
Figura 11.2. Diagrama de conexión termómetro CS240 (6). Sacado de PC400.	95
Figura 11.3. Diagrama de conexión caudalímetro (7). Sacado de PC400.....	96
Figura 11.4. Diagrama de conexión medidor de destilado (8). Sacado de PC400.	96
Figura 11.5. Diagrama de conexión piranómetro (9). Sacado de PC400.	96
Figura 11.6. Diagrama de conexión lector secundario de caudal. Fuente (Hobbyist, 2021).....	96

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Escorrentía y escorrentía per cápita a nivel nacional distribuidos por regiones. Fuente (DGA, 2016)	6
Tabla 2.2. Escorrentía per cápita entre las regiones de Arica y Parinacota y Metropolitana. Fuente (DGA, 2016)	6
Tabla 3.1. Principales desarrollos, prototipos y mejoras técnicas de la tecnología HDH a través del tiempo. Adaptado de (Rodríguez, 2019, págs. 5-12).....	14
Tabla 3.2. Listado de elementos desalinizador HDH. Fuente (Santiago, Chile. Patente n° 201901906, 2019)	16
Tabla 4.1. Tabla de cálculo de radiación mensual en el plano inclinado, primera iteración, 21° de inclinación.	21
Tabla 4.2. Parámetros de termofusión normalizados para ciertos diámetros. Adaptado de (Polifusión S.A., 2020)	25
Tabla 4.3. Conjuntos y subconjuntos de división del piping de agua.	25
Tabla 4.4. Conjuntos y subconjuntos de división del piping de aire.	28
Tabla 4.5. Listado de equipos eléctricos y variables técnicas.	32
Tabla 5.1. Compensaciones de precisión de mediciones analógicas de voltaje. Fuente (Campbell Scientific, CR1000X Product Manual, 2021)	38
Tabla 5.2. Rango de tensión en canales de excitación. Fuente (Campbell Scientific, CR1000X Product Manual, 2021)	38
Tabla 5.3. Funciones del terminal de conteo de pulsos. Fuente (Campbell Scientific, CR1000X Product Manual, 2021).....	38
Tabla 5.4. Funciones, magnitudes físicas y canales relacionados en la instrumentación.....	40
Tabla 5.5. Comparación de tecnología PRT y termocupla. Adaptado de (RS Pro, 2021)	43
Tabla 5.6. Resistencia a 0°C medida mediante baño termostático.....	48
Tabla 5.7. Comparación entre tecnologías de anemómetros. Elaboración propia.	59
Tabla 6.1. Resumen de resultados obtenidos mediante la simulación en ESS del intercambiador de calor.....	63
Tabla 6.2. Resumen de los resultados obtenidos de la simulación simple en ESS de aislación de tuberías.	66
Tabla 7.1. Matriz de datos recopilados durante 16 días.	70

Tabla 8.1. Acciones a realizar para la correcta puesta en marcha del desalinizador HDH.	76
Tabla 8.2. Listado de fallas posibles durante la operación del desalinizador HDH.	78
Tabla 11.1. Ecuaciones solares utilizadas para determinación de ángulo de inclinación óptimo.	84
Tabla 11.2. Ecuaciones termodinámicas utilizadas para simular en EES el intercambiador de calor y la aislación de tuberías de agua.	85
Tabla 11.3. Radiación mensual para ángulos de inclinación entre 21° y 24°. Valores obtenidos mediante tablas dinámicas en Excel.	86
Tabla 11.4. Radiación mensual para ángulos de inclinación entre 25° y 28°. Valores obtenidos mediante tablas dinámicas en Excel.	87
Tabla 11.5. Radiación mensual para ángulos de inclinación entre 29° y 32°. Valores obtenidos mediante tablas dinámicas en Excel.	88
Tabla 11.6. Radiación mensual para ángulos de inclinación entre 33° y 36°. Valores obtenidos mediante tablas dinámicas en Excel.	89
Tabla 11.7. Datos técnicos termómetros Pt-100 marca RS Pro.	92
Tabla 11.8. Datos técnicos termómetro CS240 marca Campbell Scientific.	92
Tabla 11.9. Datos técnicos caudalímetro de efecto Hall marca AICHI.	93
Tabla 11.10. Datos técnicos piranómetro marca EKO.	93
Tabla 11.11. Datos técnicos sensor de nivel sin contacto marca MCI.	93
Tabla 11.12. Datos técnicos mini bomba sumergible marca MCI.	94
Tabla 11.13. Datos técnicos anemómetro de hilo caliente marca Improtek.	94
Tabla 11.14. Valores registrados durante calibración de caudalímetro.	98
Tabla 11.15. Valores registrados durante calibración de medidor de destilado.	98
Tabla 11.16. Resultados obtenidos a partir de la simulación en EES de intercambiador de calor.	99
Tabla 11.17. Resultados obtenidos a partir de la simulación en EES de aislación para tuberías de 32mm.	99
Tabla 11.18. Resultados obtenidos a partir de la simulación en EES de aislación para tuberías de 20mm.	100

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

El agua cubre el 70% de la superficie del planeta, pero sólo el 2,5% corresponde a agua fresca (ríos, lagos, acuíferos), de ella únicamente el 0,62% es apta para el consumo humano, agrícola e industrial. Además de los bajos porcentajes de agua potable, no nos podemos permitir olvidar el calentamiento global y los efectos adversos de stress hídrico que trae aparejado. Sus impactos ya son reconocibles en todos los continentes, estimándose las pérdidas por causa de sequías solo en el año 2014, en US\$8.000M. Así mismo las empresas habrían gastado ese año US\$84.000M para mejorar la forma como se conserva y se obtiene el agua (FCH, 2018). En resumen en el mundo cerca de 1.200 millones de personas viven en áreas donde existe escasez hídrica y se prevé que al año 2030, el mundo tendrá que enfrentarse a un déficit mundial del 40% de agua (UNESCO, 2020).

Chile no se mantiene al margen del problema. La conocida heterogeneidad hídrica del país es un desafío actual que ha impulsado diversas campañas a lo largo de las últimas décadas, sin embargo, a pesar de los esfuerzos se espera una disminución sostenida de la disponibilidad de agua en las regiones Norte y Centro por los próximos treinta años (DGA, 2017). Un punto rescatable, y tal vez el primer paso para superar la crisis, es haber reconocido en qué dirección se encuentra la solución. En su primer reporte del agua, la Mesa Nacional de Agua, estipuló que “Una política hídrica para el Chile de hoy debe dar lineamientos que estimulen la inversión pública y privada para el desarrollo equilibrado y sustentable de nuevas fuentes de aguas, tales como la desalinización” (MNA, 2020, pág. 6).

Bajo este panorama es que nace este trabajo. En él se estudiará una alternativa sustentable para la obtención de agua para consumo humano, a pequeña escala, de costo de implementación reducido y fácil mantenimiento, pensando especialmente en zonas remotas. Uno de los métodos que cumple tales características es el llamado Humidification-Dehumidification, o HDH, el cual replica de manera compacta y controlada el ciclo natural del agua. En palabras simples, una planta HDH calienta y humidifica aire por medio de energía externa y luego enfría este aire húmedo para obtener agua condensada. Se trata de una tecnología probada en el Laboratorio de Energías Renovables, sin

embargo, la principal diferencia que tendrá su aplicación en el presente trabajo es que se utilizará energía residual de un panel fotovoltaico para aportar el calor necesario para la humidificación, conjugando de tal manera la obtención de energía eléctrica y agua desalinizada.

1.2. Objetivos

- **Objetivo Principal**
 - El objetivo principal de este trabajo de título es construir una estación pequeña de desalinización de agua que trabaje por ciclo humidificación-deshumidificación, con colección de energía residual de una celda fotovoltaica.

- **Objetivos Específicos**
 - Estudiar el estado del arte correspondiente a la construcción de sistemas de desalinización HDH.
 - Construir una estación pequeña de desalinización HDH, en base al diseño conceptual de la patente No 201901906.
 - Poner en marcha la estación, instrumentar y calibrar instrumentos de medición.
 - Implementar mejoras al modelo original.
 - Adquirir datos de desempeño del equipo en distintas condiciones operacionales.

Capítulo 2

Escases hídrica: ¿A qué nos enfrentamos?

Cuando se habla de escases hídrica es muy común ver ilustraciones en las cuales se contrasta la cantidad de agua potable con la salada, lo cual nos lleva a considerar que el principal problema de la crisis está relacionado a los niveles porcentuales bajos de agua potable a nivel global, que alcanzan a lo más el 0.00015%. Sin embargo la cifra porcentual poco habla sobre el volumen real, el cual es enorme y ha sido suficiente por mucho tiempo. Este gran valor nos hace preguntarnos, ¿si durante tantos años la vida ha logrado desarrollarse con porcentajes de agua dulce tan exigüos, qué ha cambiado ahora? ¿Cuál es la barrera contemporánea que se ha gestado bajo nuestras narices? Y lo más importante, ¿tiene solución?

2.1. Situación hídrica en el mundo

En su Informe Mundial Sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020, la UNESCO indica ciertas respuestas para lograr entender, más allá de los porcentajes, la raíz de la crisis hídrica. Estas son:

- Calentamiento global
- Sobre población
- Distribución heterogénea de fuentes de agua
- Subdesarrollo económico
- Limitaciones tecnológicas

El calentamiento global lidera la lista, pues sus efectos ejercen influencia directa sobre la disponibilidad de agua y su calidad al contribuir al desarrollo de fenómenos meteorológicos extremos. La tasa de emisiones de GEI está en un máximo histórico, y aún en el caso de que dichas emisiones se logren alinear con los compromisos políticos imperantes, como lo son el acuerdo de París, se cree que es inevitable el aumento de la temperatura promedio mundial en por lo menos 1,5°C (UNESCO, 2020)

La sobrepoblación incide no solo en los requerimientos de agua para consumo humano, también en los procesos industriales, agrícolas y energéticos. A mayor población, mayor consumo y producción. En números, el uso global de agua se ha multiplicado por seis en los últimos 100 años y sigue aumentando a un ritmo constante de 1% anual debido al crecimiento demográfico, al desarrollo económico y al cambio en los patrones de consumo (UNESCO, 2020)

La distribución heterogénea es un factor geográfico inalterable y concerniente a las condiciones ambientales de ciertas zonas del planeta. El contraste de macrorregiones desérticas con macrorregiones australes, como se puede ver en la Figura 2.1, es un factor a tener en cuenta, especialmente considerando que transportar el agua desde zonas extremas es costoso.

El subdesarrollo económico por su parte, es el único factor junto al calentamiento global del cual la sociedad es responsable. Afecta a zonas en donde el acceso a agua subterránea se ve imposibilitado solo por la falta de inversión, y no por el efecto adverso del cambio climático o ubicación geográfica. África y algunas zonas de América Latina son ejemplos de esta problemática (ver Figura 2.1).

Por último las limitaciones tecnológicas, y en particular la falta de inversión en fuentes alternativas de agua, es una limitante independiente de los factores anteriores y por lo tanto de suma importancia para la solución del problema.

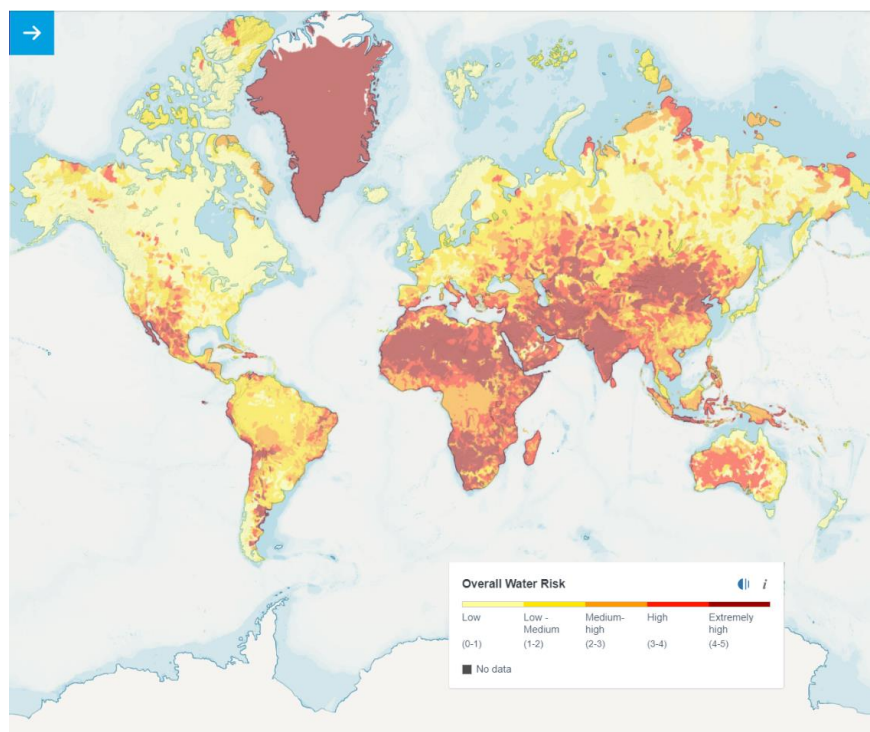


Figura 2.1. Mapa de riesgo global de agua. Fuente (WRI, 2021)

Varios de los factores presentados por la UNESCO guardan su solución en la aplicación de correctas políticas de distribución de agua y en el dialogo entre países para suscribir tratados que decrezcan, o al menos estabilicen, el nivel de emisiones de GEI. Otro factor, como lo es la sobrepoblación, carece de una solución en el mediano plazo y por lo tanto nos obliga a aceptarlo como una característica insorteable del desarrollo. El único factor que no debe su existencia a los errores del pasado, las condiciones geográficas o el crecimiento demográfico, es el desarrollo de fuentes alternativas de agua, y así lo entienden varios países, incluido el nuestro.

2.2. Situación hídrica en Chile

Chile posee 101 cuencas hidrográficas entre las que se incluyen 1.251 ríos y 12.784 cuerpos de agua correspondientes a lagos y lagunas. A ellas se suman 24.114 glaciares, los que aportan caudal de escorrentía en el estiaje (MNA, 2020). Sin embargo los niveles de los ríos se han visto notablemente reducidos durante la última década, afectando principalmente a la macrozona Norte.

Si se toman en cuenta los niveles de agua globales, Chile se puede considerar un país muy privilegiado en materia de seguridad hídrica. Tal como la DGA declara: “la escorrentía, o volumen de agua procedente de las precipitaciones que escurren por los cauces superficiales y subterráneos, equivale a un promedio nacional per cápita de $51.218 m^3/persona/año$, valor bastante más alto que la media mundial de $6.600 m^3/persona/año$ y muy superior al valor de $2.000 m^3/persona/año$, considerado internacionalmente como el umbral para el desarrollo sostenible” (DGA, 2016, pág. 8). Sin embargo, se puede descubrir que este valor es extremadamente engañoso si se realiza un análisis regional de la realidad hídrica del país. Así lo deja claro la DGA. “Desde la Región Metropolitana hacia el norte, prevalecen condiciones de escasez, donde la escorrentía per cápita promedio está por debajo de los $500 m^3/persona/año$, mientras que las regiones de O’Higgins hacia el sur superan los $7.000 m^3/persona/año$, llegando a un valor de $2.950.168 m^3/persona/año$ en la Región de Aysén” (DGA, 2016, pág. 8)

En otras palabras, la heterogeneidad hídrica es tan elevada en Chile que el promedio nacional es un dato absolutamente falso si se desea evaluar las necesidades regionales. Como se puede ver en la Tabla 2.1, más del 65% del agua nacional se encuentra concentrada en la macrozona austral, dejando a todas las regiones de la macrozona norte y centro muy por debajo del nivel básico necesario para el desarrollo sustentable de $2.000 m^3/persona/año$. Un análisis detallado de la situación se observa en la Tabla 2.2, donde la situación crítica de la segunda región queda mejor evidenciada.

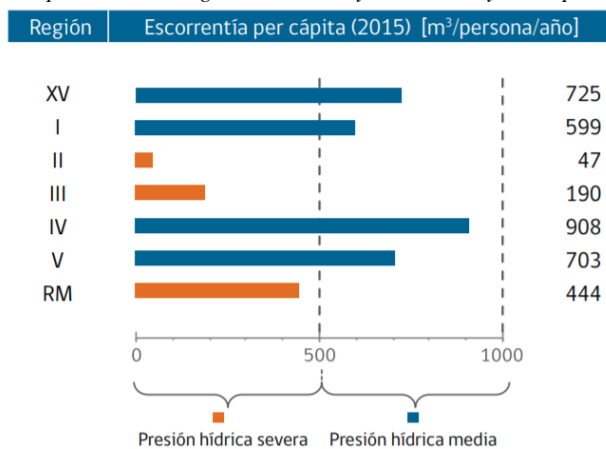
Tabla 2.1. Escorrentía y escorrentía per cápita a nivel nacional distribuidos por regiones. Fuente (DGA, 2016)

Macrozona	Región	Escorrentía [m³/s]	[%]	Escorrentía per cápita (2015) [m³/persona/año] ⁽¹⁾
Norte	XV	5,5	0,019	725
	I	6,4	0,022	599
	II	0,9	0,003	47
	III	1,9	0,006	190
	IV	22,2	0,08	908
Centro	V	41	0,14	703
	RM	103	0,35	444
	VI	205	0,70	7.037
	VII	767	2,62	23.191
Sur	VIII	1.638	5,60	24.432
	IX	1.041	3,56	33.167
	XIV	1.046	3,58	81.563
	X	4.109	14,05	154.058
Austral	XI	10.134	34,65	2.950.168
	XII	10.124	34,62	1.938.956
Total		29.245		Chile ⁽²⁾ 51.218

(1): Corresponde a la escorrentía total en la región dividida por la población de la región

(2): Corresponde a la escorrentía total nacional dividida por la población total de Chile

Tabla 2.2. Escorrentía per cápita entre las regiones de Arica y Parinacota y Metropolitana. Fuente (DGA, 2016)



Las políticas medioambientales siempre han sido parte de la agenda de los gobiernos chilenos. El último estudio destacado en esta materia surgió a raíz de la gran sequía que afectó al país el año 2019. El entonces presidente, Sebastián Piñera, convocó una Mesa Nacional de Agua el 9 de diciembre de ese año, al conformarla se identificaron tres desafíos clave:

- Seguridad Hídrica
- Calidad de aguas y ecosistema
- Marco legal

El panorama preocupante que se avistaba entonces quedó patente cuando el 4 de febrero del 2020 se presentó el Primer Informe de la Mesa Nacional de Agua. Tal como se menciona en él, el segundo desafío a superar para certificar la seguridad hídrica es la “falta de obras que permitan acceder a nuevas fuentes de aguas tales como agua desalinizada” (MNA, 2020, pág. 6), luego el informe insiste en que “una política hídrica para el Chile de hoy debe dar lineamientos que estimulen la inversión pública y privada para el desarrollo equilibrado y sustentable de nuevas fuentes de aguas, tales como la desalinización” (MNA, 2020, pág. 6).

2.3. Desalinización en el Mundo

Según estimaciones hay cerca de 16 mil plantas desalinizadoras operativas en todo el mundo, produciendo alrededor de 95 millones de $m^3/día$ de agua desalinizada. De ella más del 50% se produce en la región de Oriente Medio y Norte de África (UNESCO, 2020).

Como es natural, la desalinización tiene mayor auge en zonas desérticas o áridas, de alta radiación solar, donde los niveles de agua subterránea o escorrentía son muy bajos. Los asentamientos humanos también son un factor importante al analizar la distribución de las instalaciones, y por último, y no menor, el nivel adquisitivo de la zona. En la Figura 2.2 se puede observar la distribución de plantas de desalinización a nivel global, en donde es posible constatar las tres características mencionadas anteriormente.

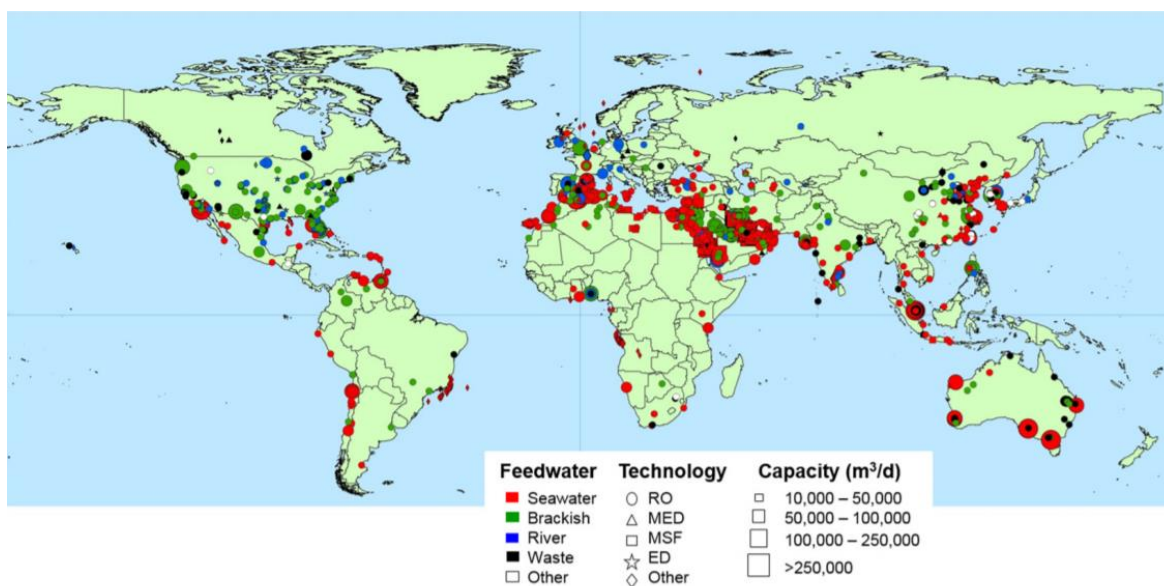


Figura 2.2. Distribución global de grandes plantas desaladoras por capacidad, tipo de agua de alimentación y tecnología de desalación. Fuente (Jones, 2019)

Algo rescatable a simple vista es el predominio de las plantas de osmosis inversa (RO), sin embargo, esto no siempre fue así. Las primeras plantas de desalinización instalada a nivel industrial utilizaban predominantemente tecnologías térmicas tales como destilación flash multi-efecto (MSF) o destilación multi-efecto (MED), y dado que estas requieren cantidades ingentes de energía se ubicaban en regiones ricas en petróleo y escasas en fuentes de agua potable. Solo después de 1980, al avanzar la tecnología de membranas, se desplazó gradualmente el dominio de las plantas de tecnología térmica. Al día de hoy la capacidad de las plantas de osmosis inversa ha aumentado exponencialmente y en cambio las mejoras sustanciales a la tecnología térmica se han mantenido casi invariantes, haciendo que hoy el 69% de la producción mundial de agua potable, o lo que corresponde a 65,5 millones de $m^3/día$, se obtengan a través de RO (Jones, 2019).

Respecto al uso, si bien la mayoría de las plantas de desalinización se ocupan de satisfacer necesidades para el sector industrial, energético y agropecuario, el 62.3% del volumen de agua producida va destinada al uso municipal y por lo tanto humano (Jones, 2019). La diferencia entre número de plantas y volumen de producción radica en la capacidad de desalinización de las centrales para fines industriales, cuyo caudal de producción promedio ronda los 4000 $m^3/día$, número tres veces inferior al promedio de las instalaciones destinadas a producir agua municipal. En la Figura 2.3 es posible ver la distribución de plantas de desalinización diferenciadas por tipo de usuario.

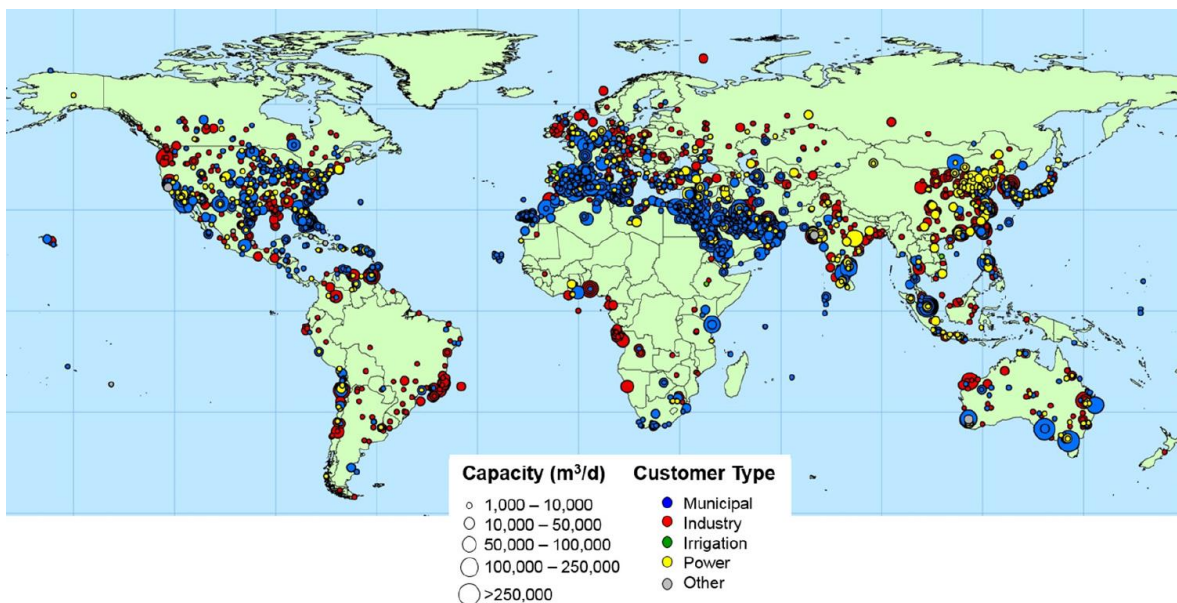


Figura 2.3. Distribución global de las instalaciones y capacidades de desalación operativas mayores a 1000 m^3 día, por sector usuario. Fuente (Jones, 2019)

2.4. Desalinización en Chile

En Chile la situación no es muy diferente respecto al resto del mundo, siendo la desalinización por RO la tecnología predominante. A finales del año 2019 se producían 5.570 litros de agua por segundo estimando un crecimiento de producción del 160% al 2024. Así mismo 24 plantas de RO se encontraban operando y 22 nuevos proyectos se encontraban en diferentes puntos de avance (Marticorena, 2019). Cabe destacar que la mayoría de los proyectos instalados, y en vías de implementación, son de carácter privado, enfocados casi plenamente en alimentar la industria del cobre. Estos corresponden al 62.5% de las plantas totales del país y desalinizan el 82.4% del caudal total de agua. El resto son para uso humano, destacándose en especial el caso de la primera desaladora estatal construida en el sector de Punta Zorro y la planta de Tocopilla que pretende alimentar la comuna con agua de mar en su 100%. En la Figura 2.4 se puede observar la distribución de las principales centrales a lo largo de Chile, la mayoría ubicadas en el norte.



Figura 2.4. Distribución geográfica de las principales plantas de desalinización en Chile. Fuente MOP.

Capítulo 3

Antecedentes de la desalinización HDH

A grandes rasgos la desalinización de agua, sin discriminar su método, es una alternativa para aumentar el suministro de agua dulce mediante la eliminación de sales disueltas en agua salobre o salada. Sin embargo existen una alta variedad de métodos o tecnologías para conseguirlo, clasificados en cuatro categorías principales (ver Figura 3.1). Estos difieren en naturaleza, siendo el de *evaporación-condensación* y *cristalización* tecnologías basadas en cambios de estado a diferencia de las técnicas de *filtración o membrana*.

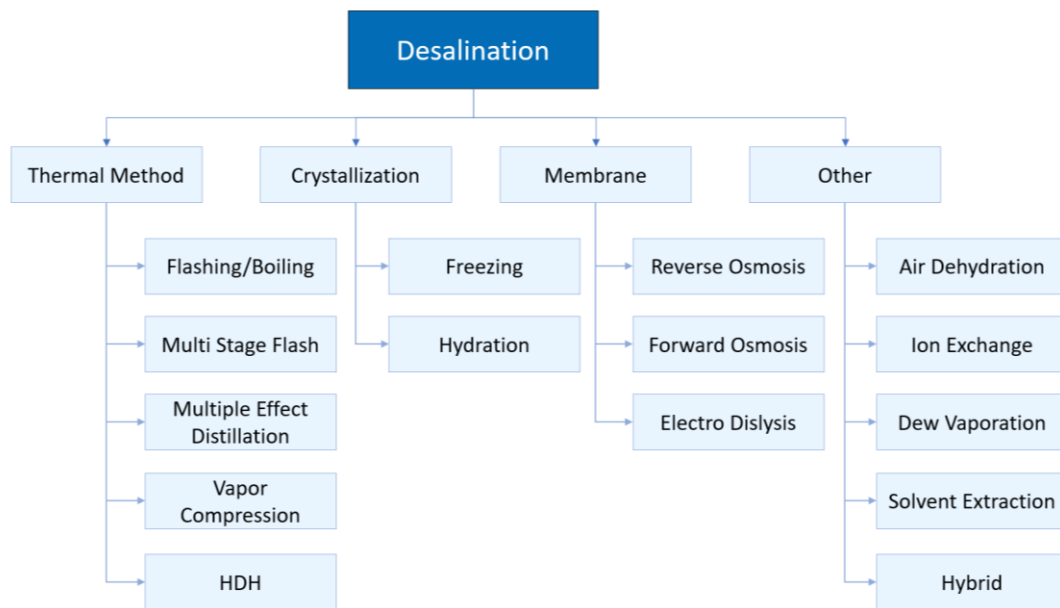


Figura 3.1. Técnicas de desalinización. Adaptado de (Ghalavand, Y. Hatamipour, M. Rahimi, A, 2014)

Tal como se observó en el capítulo anterior, la supremacía de la tecnología RO es innegable, el potencial de estudio y mejora de las membranas de filtración supera al de las tecnologías de evaporación-condensación y cristalización por mucho, sin embargo su aplicación requiere el uso de grandes cantidades de energía eléctrica y caudales de agua relativamente grandes para mantener un nivel de eficiencia óptimo. En otras palabras, no es una tecnología de fácil acceso ni estrictamente sustentable.

Esta probado que las tecnologías MED y MSF pueden ser aplicadas bajo el uso exclusivo de energía termosolar, usando geometrías CSP o colectores solares parabólicos. En España entre 1988 y 1994 se desarrolló un proyecto llamado “Plataforma solar de Almería” que mediante el uso exclusivo de un desalinizador MED de 14 etapas alcanzó un caudal de producción de $72 \text{ m}^3/\text{día}$ (Bernhard Milow, Eduardo Zarza, 1997). Sin embargo el costo de aplicación de este tipo de plantas es elevado dada la necesidad de canalizar grandes números de etapas, altas temperaturas de operación e incluir sistemas de vacío.

Por lo anteriormente mencionado es que la línea investigativa del presente trabajo, y del Laboratorio de Energías Renovables, va en dirección de una tecnología que permita conjugar la utilización de fuentes de energía renovables con bajos costos de implementación, simple mantenimiento y espacio reducido, siendo la tecnología HDH la que mejor se adapta a estas necesidades. Por ello a continuación se estudiarán los antecedentes teóricos ligados a su funcionamiento y su estado del arte.

3.1. Equipamientos y funcionamiento de la desalinización HDH

Un desalinizador HDH es un equipo de pequeñas dimensiones que simula de forma controlada el ciclo del agua, separando el líquido destilado del salobre al forzar la condensación. Un equipo HDH requiere como mínimo para su funcionamiento los elementos que se presentan a continuación:

- Colector solar: es el encargado de suministrar la energía necesaria para propiciar la humidificación del flujo de aire dentro del sistema.
- Humificador: es el compartimento donde se produce la humidificación de aire mediante la aspersión del agua calentada mediante el colector solar.
- Deshumificador: es el elemento donde se enfría el aire húmedo hasta llegar a su punto de rocío, para ello se utiliza el agua salada en su estado previo al calentamiento.

El funcionamiento básico consta de dos fluidos en circulación permanente a contra flujo o flujo paralelo; agua salobre y aire. El agua puede provenir de su fuente natural o un estanque de almacenamiento, en un ciclo abierto o cerrado respectivamente. Así mismo la circulación del aire puede ser abierta o cerrada. El agua, a baja temperatura, se hace pasar por el deshumificador donde absorbe calor del aire húmedo proveniente del humidificador y propicia la condensación. Luego el agua continúa el circuito hacia el colector solar, donde una gran cantidad de energía calórica se le suministra, elevando su temperatura. A continuación esta agua salada calentada se atomiza en el

humidificador para asegurar la máxima superficie de contacto posible que permita la humidificación del aire circulante. En el humidificador cierta cantidad de agua se evapora, disminuyendo su caudal respecto al inicial, y generando lo que comúnmente se conoce como salmuera de rechazo (ver Figura 3.2)

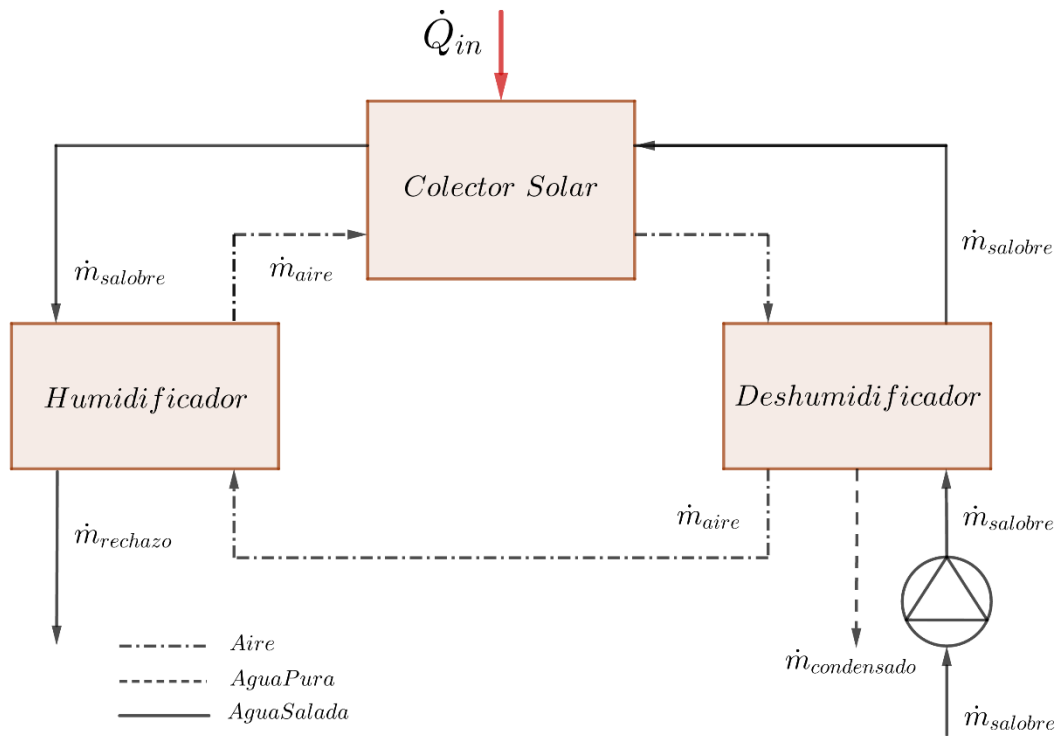


Figura 3.2. Esquema funcional simplificado de un desalinizador HDH de ciclo CAOW con calentamiento de agua y aire, circulación forzada. Elaboración propia.

Si bien la base funcional de un equipo HDH siempre será igual, existen diferentes configuraciones que modifican tanto la naturaleza abierta (open) o cerrada (close) de los flujos, la selección del fluido a calentar (agua, aire o ambos) o el tipo de circulación (natural o forzada). La Figura 3.3 recopila todas las configuraciones posibles. Es importante destacar que cuando se habla de ciclo abierto se interpreta que las condiciones de entrada de tal fluido son constantes en el tiempo. Por el contrario los ciclos cerrados mantienen las condiciones de salida del fluido.

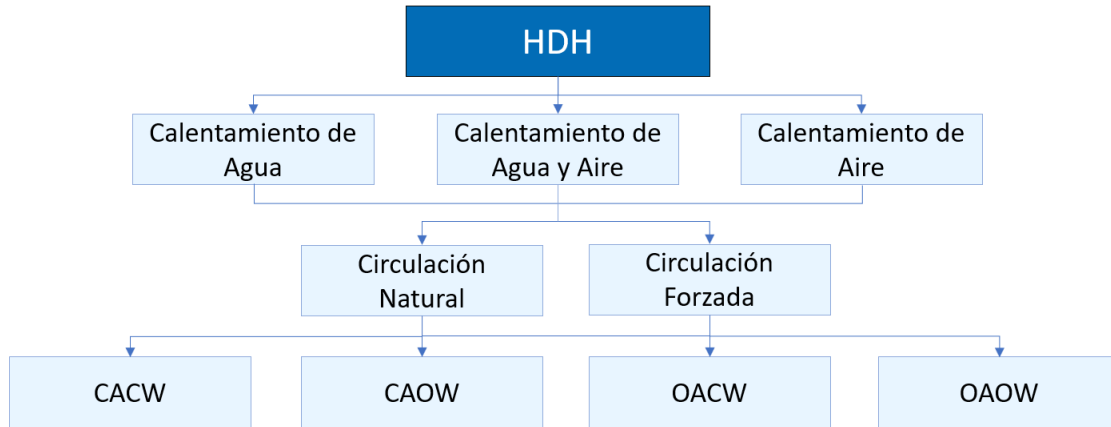


Figura 3.3. Clasificación de procesos HDH típicos. Adaptado de (G. Prakash Narayan, 2009)

Es posible construir equipos que trabajen con ambos flujos de trabajo en régimen abierto (OAOW), sin embargo estos no son recomendables ni objeto de estudio recurrente. El tipo de configuración más usado es el de ciclo de aire cerrado y ciclo de agua abierto (CAOW), con calentamiento de agua, debido a varias razones.

En primer lugar el calentamiento del aire por sobre el agua trae aparejados varios inconvenientes como lo son los rangos de temperatura de trabajo, del orden de los 100°C, y la capacidad calorífica notablemente inferior del aire. Calentar agua utilizando aire es mucho más complicado que calentar aire utilizando agua. Aunque el calentamiento del aire elevaría la capacidad de transporte de humedad, las dificultades técnicas que conlleva hacerlo restringen su utilización (Reyes, 2017). En segundo lugar la configuración de aire cerrado asegura una operación en la línea de saturación, garantizando la saturación del aire que ingresa al deshumidificador. En caso de tratarse de un flujo de aire abierto, el humidificador debería ser capaz de humidificar aire desde su condición ambiental hasta el punto de saturación constantemente. En tercer lugar el flujo abierto de agua impide que la temperatura del agua pre calentada se acerque a la temperatura post calentamiento y por lo tanto del aire húmedo en el deshumidificador. Si la temperatura del agua salada antes y después del colector solar fuese muy parecida, la condensación se vería completamente perjudicada al no haber transferencia de calor entre fluidos. En sistemas de agua cerrado esto puede solucionarse utilizando radiadores o enfriadores de agua (chillers), o contando con depósitos de gran tamaño que absorban las variaciones de temperatura, sin embargo esto incrementa el costo de la operación y el tamaño del dispositivo.

3.2. Estado del arte

En estricto rigor existen vestigios antiguos, muy anteriores a la era industrial, sobre utilización de sistemas HDH rudimentarios. Sin embargo el primer registro oficial de patente no se realizó hasta el año 1870, bajo la autoría de Wheeler y Evans, quienes estudiaron el efecto invernadero y desarrollaron lo que se conoce hoy como alambiques (Reyes, 2017). El desarrollo de diferentes prototipos no se detendría desde ahí en adelante. A continuación se muestra una tabla resumen con las principales mejoras en el desarrollo de los sistemas desaladores HDH.

Tabla 3.1. Principales desarrollos, prototipos y mejoras técnicas de la tecnología HDH a través del tiempo. Adaptado de (Rodríguez, 2019, págs. 5-12)

Autor	Año	Descripción
H.J. Gerber	1966	Se propone una máquina pensada para trabajar en ambientes costeros. Trabaja con calentamiento de aire por energía solar y humedecimiento por aspersión de agua de mar. El enfriamiento del aire húmedo se realiza sumergiendo directamente la cañería conductora única.
K.D. Beard	1967	Este modelo propone dos etapas separadas, una de evaporación y otra de condensación. El aire, a diferencia del prototipo anterior, trabaja en circuito cerrado. La aspersión y enfriamiento es realizada por el agua marina.
C. Dobell.	1967	Este modelo incluye la utilización de un timón para efficientar el uso del ventilador de circulación forzada. El aire en circuito cerrado sigue siendo el fluido calentado, sin embargo el fluido utilizado para enfriarlo es aceite.
ElDifrawi et al.	1982	Este autor propone un modelo capaz de interconectarse a gran escala, de forma que sea posible la implementación de plantas de desalinización. Además el sistema cuenta con una zona de recuperación de calor en el condensador.
David E. Longer	2003	Se introduce por primera vez el concepto de calentamiento indirecto de agua, incorporando un colector solar plano para la absorción de energía solar. De esta forma se incrementa el tiempo de vida útil del equipo al reducir las incrustaciones en elementos críticos del sistema.
Hartman et al.	2004	Este trabajo plantea utilizar calor residual a través de la integración de un sistema de condensación con un equipo termodinámico. El aire funciona como fluido calentado y circula en ciclo cerrado.
James R. Beckman	2005	Se propone por primera vez un sistema con ambos ciclos abiertos (OAOW), en donde la transferencia de calor entre flujos se consigue a través de una pared semipermeable que separa el condensador del evaporador. El agua es el fluido calentado.

Frolov et al.	2010	Se propone un sistema modular e independiente energéticamente. Para conseguirlo se acoplan paneles solares fotovoltaicos, los cuales alimentan los equipos de circulación necesarios.
Govindan et al.	2011	Este modelo CAOW propone calentamiento mixto, tanto del agua como del aire. Cuenta con recuperación de calor en el deshumidificador y extracción múltiple de aire húmedo. Por último propone el uso de compresores y difusores entre equipos para tomar ventaja de los cambios de presión y el efecto en la temperatura que estos tienen.
	2012	A su modelo anterior, se añaden flujos de vapor externos, extracción de calor en el compresor e incluso desalinizadores de osmosis inversa a la salida de la salmuera de rechazo.
Nicholas C. Roch	2013	Plantea un sistema modular de cuatro etapas de humidificación y deshumidificación, el cual tiene la opción de trabajar bajo régimen de aire cerrado o abierto.
Al-Sulaiman et al.	2017	Prueba distintas configuraciones integradas con paneles fotovoltaicos. Es un primer acercamiento a los sistemas PVT.
Peter Armstrong	2018	En este trabajo se presenta un nuevo modelo donde el humidificador se encuentra acoplado a la cara posterior de un panel solar PV. Tanto el aire como el agua se calientan. El aire es extraído caliente para la condensación.

El año 2019 el Laboratorio de Energías Renovables presentó una patente para un nuevo modelo de desalinizador solar HDH (ver Figura 3.4). Este modelo del tipo CAOW presenta variaciones importantes respecto a los usuales prototipos, acercándose más al uso de un colector PVT que a un colector tradicional, pero sin pasar a utilizar en equipo PVT propiamente tal (dado que el calentamiento del fluido no se realiza indirectamente). En él se adiciona un colector fotovoltaico que en conjunto al humidificador y el colector termosolar se unifican en una estructura única capaz de producir energía eléctrica y calentar simultáneamente el flujo de aire y agua. El aire húmedo se enfría mediante el agua salada antes de que esta ingrese al humidificador y sea calentada. Por último la circulación es forzada por un ventilador y una bomba, para el aire y agua respectivamente.

Un boceto de este nuevo diseño se observa en la Figura 3.4. Complementando la imagen con la Tabla 3.2 es posible descubrir todas las partes que conforman este prototipo.

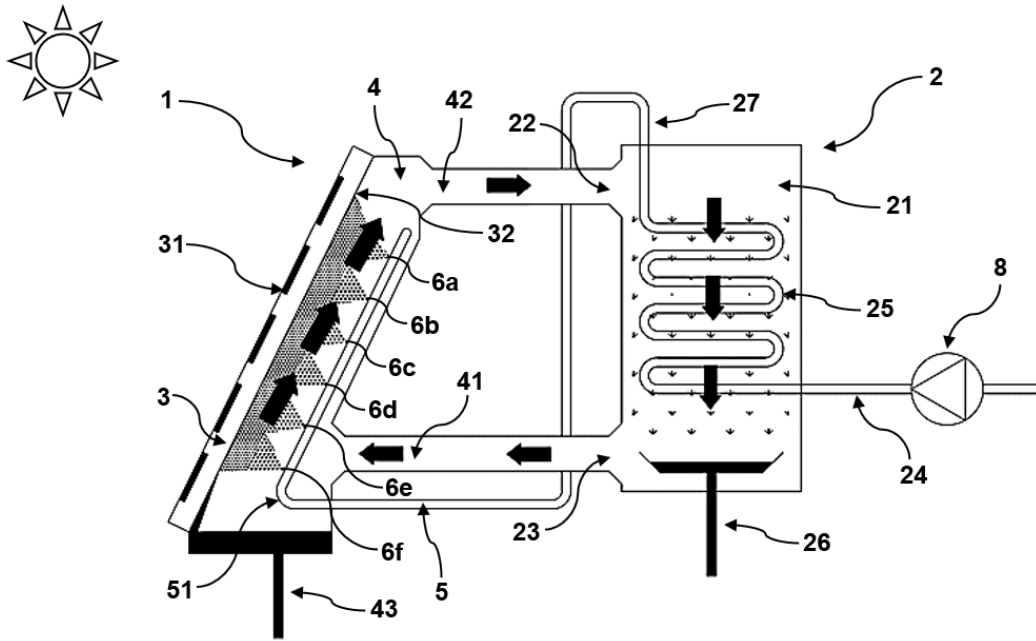


Figura 3.4. Esquema general del equipo de desalinización diseñado por el LER. Fuente (Santiago, Chile. Patente n° 201901906, 2019)

Tabla 3.2. Listado de elementos desalinizador HDH. Fuente (Santiago, Chile. Patente n° 201901906, 2019)

Número	Elemento	Número	Elemento
1	Radiación incidente	25	Serpentín del intercambiador
2	Deshumidificador	26	Salida agua destilada
3	Superficie de aspersión PV	27	Conductor agua precalentada
4	Humidificador	31	Panel PV
6	Aspersores	32	Superficie de aspersión Hum
8	Bomba de alimentación	41	Entrada aire seco
21	Zona de destilación	42	Salida aire húmedo
22	Entrada aire húmedo	43	Salida salmuera de rechazo
23	Salida aire seco	51	Conducto de entrada agua salada
24	Conducción agua salada fría		

Capítulo 4

Construcción

El año 2020, Luis Droguett diseñó y construyó una planta de desalinización pequeña basada en la patente del Laboratorio de Energías Renovables en trámite de inscripción. A partir de su trabajo es que se construyó una planta nueva, de similares características, que albergara los puntos fuertes del diseño original y a la vez tuviera mejoras relacionadas a la construcción, instrumentación y performance. A continuación se expondrán los aspectos destacados de la construcción.

4.1. Layout de la planta HDH

La nueva planta HDH se construyó en Maipú, exactamente en las coordenadas 33.52° Latitud Sur, 70.78° Longitud Oeste. El espacio utilizado se encuentra seis metros sobre el nivel de la calle, tiene una inclinación de 5° dirección Norte-Sur y una extensión de $54m^2$. Una de las virtudes del espacio es la disponibilidad solar, ninguna sombra externa le afecta. Una de las desventajas es su estabilidad estructural que no permite la instalación de equipos de peso elevado.

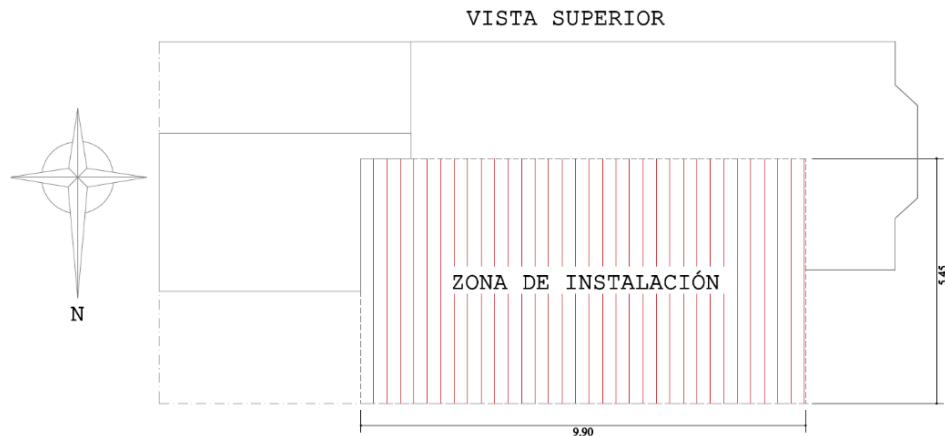


Figura 4.1. Plano del espacio disponible para instalación de desalinizador HDH. Elaboración propia

El diseño original de Droguett define la distancia, conexiones y equipos necesarios para la planta de forma específica, sin embargo debido a la orientación del espacio disponible y su geometría (Figura

4.1), es que se decidió reubicar tres elementos del diseño original: el bypass de filtrado, la bomba de alimentación y el estanque. Es posible ver la ubicación original en la Figura 4.2 y su reubicación en la Figura 4.3. Para clarificar aún más la disposición de los equipos la Figura 4.4 presenta una vista isométrica de la planta modificada. Se utilizó el software Inventor para bosquejar la modificación.

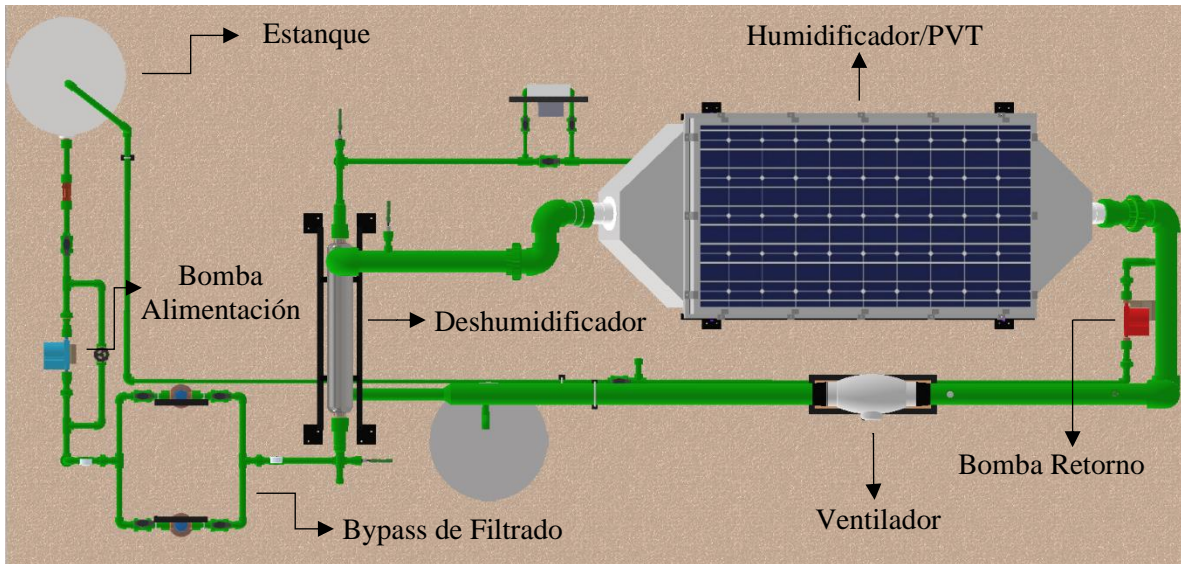


Figura 4.2. Vista superior del diseño planteado por Droguett. Fuente (Droguett, 2021)

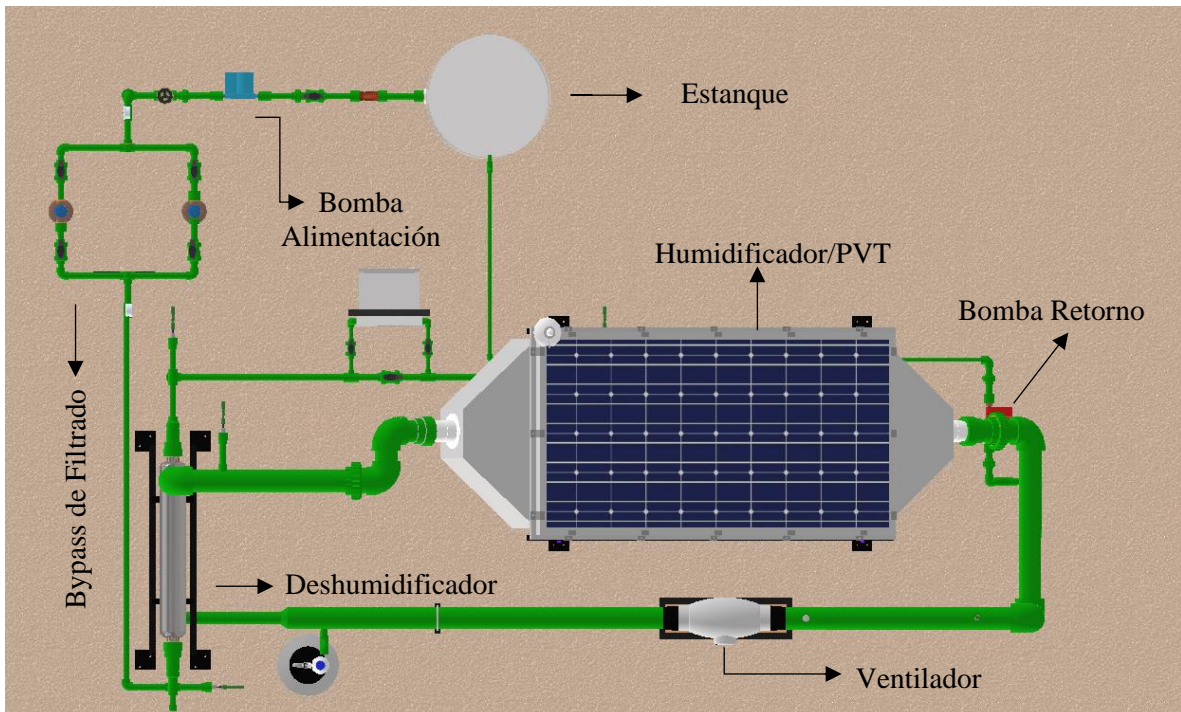


Figura 4.3. Vista superior del diseño reconfigurado. Adaptado de (Droguett, 2021)

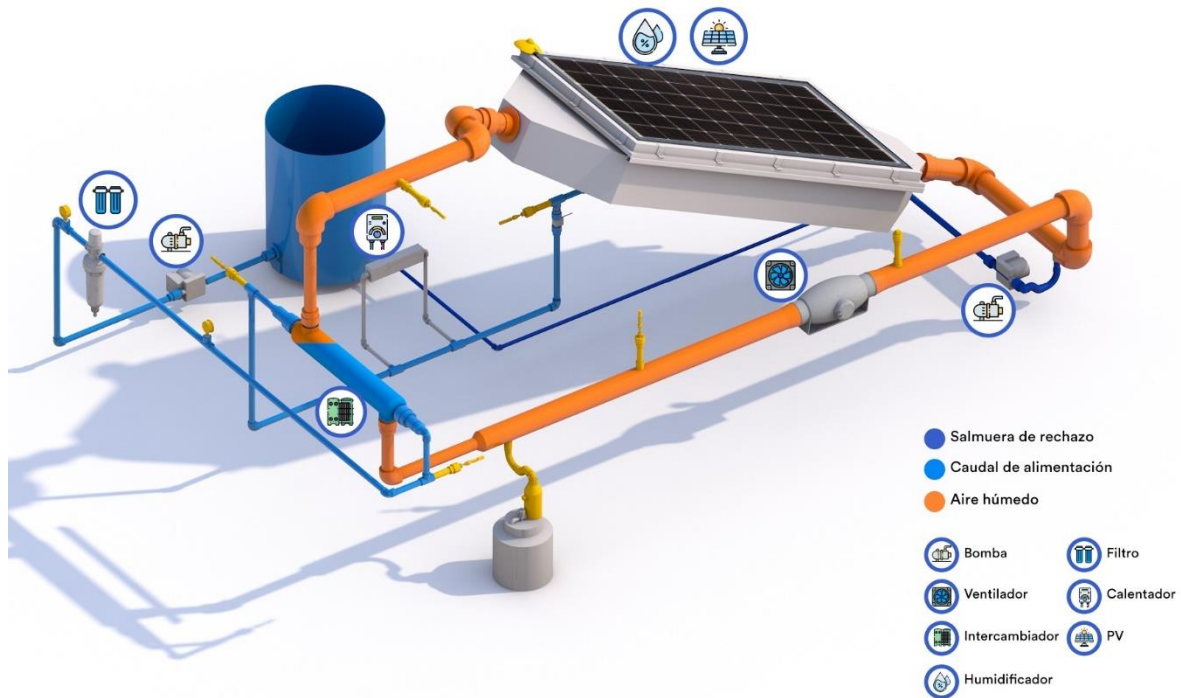


Figura 4.4. Vista isométrica de la planta HDH modificada. Elaboración propia.

4.2. Estructuras de soporte

Para la fijación de los diferentes elementos de la planta se construyeron siete estructuras metálicas diferentes. Se utilizaron 36 metros de perfil “L” de acero galvanizado ranurado, el cual tiene buena estabilidad mecánica, es resistente al óxido y de fácil ensamblaje. Para fijar los perfiles se usaron pernos hexagonales de 8,8 x 20 mm, tuercas hexagonales de 8 mm y golillas planas de 5/16. Además se utilizaron ángulos de dos ranuras para unión en 90° y escuadras de tres ranuras para uniones planas. Las estructuras construidas fueron las siguientes:

- Estructura del humidificador
- Estructura del deshumidificador
- Estructura para filtros
- Estructura para ventilador
- Estructura para gabinete eléctrico
- Estructura de soporte auxiliar de tuberías de agua
- Estructura de soporte auxiliar de tubería de aire

Cabe mencionar que se utilizó pintura spray galvanizadora para repasar los cortes hechos a los perfiles y así evitar la generación de oxido localizado en esas zonas. Por último las estructuras se fijaron al suelo con tornillos autorroscantes de cabeza hexagonal. A continuación se presentan algunas imágenes de la construcción de las estructuras metálicas.



Figura 4.5. Izquierda, construcción de estructuras. Derecha arriba, esmeril de banco utilizado para los cortes. Derecha abajo, estructura del ventilador terminada.

4.2.1. Ángulo de inclinación de la estructura del Humidificador

Antes de la construcción de la estructura del humidificador/colector fue necesario determinar el ángulo óptimo de inclinación respecto a la horizontal. La norma general establece que una buena disposición de paneles solares se consigue alineando el panel al eje Norte-Sur, apuntando el panel hacia el Norte con una elevación igual a la latitud de la zona -15° en verano o $+15^\circ$ en invierno. Sin embargo la serie de tuberías involucradas en la circulación del aire y agua imposibilita la opción de modificar arbitrariamente el ángulo de inclinación una vez instalado. Por ello se hizo necesario determinar un único ángulo que considerara el desempeño del equipo en verano e invierno.

Para determinar el ángulo se confeccionó una planilla Excel que reuniera todas las variables solares involucradas, tuviera como datos de entrada la ubicación geográfica y la radiación promedio mensual incidente en la zona y entregara la radiación acumulada mensual en un plano inclinado definido. Todas las ecuaciones utilizadas se encuentran en el Anexo A y los cálculos se realizaron tomando las siguientes suposiciones:

- Para el cálculo de la radiación promedio mensual no se consideró la radiación reflejada.
- Para el cálculo de la radiación directa se asumió un ambiente sin atmósfera.
- El termino directo de la radiación global promedio mensual en plano inclinado se calculó en base a ecuación de Liu y Jordán

Los valores de entrada se obtuvieron recurriendo a la “Norma Técnica de verificación de contribución solar mínima de los Sistemas Solares Térmicos adscritos a franquicia tributaria de la Ley N° 20.365” (SEC, 2010), donde se especifica para todas las comunas de Chile la radiación promedio mensual y anual, tanto directa como global. La tabla en Excel se confeccionó de forma que hiciera un cálculo mensual de la radiación incidente sobre una placa plana para dieciséis ángulos de inclinación diferentes, entre 21° y 36° (ver Anexo B). A partir de los valores obtenidos se comparó la radiación acumulada anual en función de los ángulos estudiados, para determinar el punto de máxima incidencia.

La Tabla 4.1 es una de las dieciséis iteraciones realizadas. Se puede observar que en cada fila se determina la radiación de un mes del año a inclinación constante. Las columnas naranjas corresponden a variables ingresadas desde la norma técnica, la columna verde es el resultado mensual. Sumando los resultados mensuales y graficándolos con su correspondiente ángulo se obtiene cada punto del gráfico de la Figura 4.6.

Mes	Ángulo	Hh / Mensual		Hdh / Mensual		hss´	Rb Num.	Rb Den.	Rb	Ht / Mensual en plano inclinado	
		kwh/m^2	J/m^2	kwh/m^2	J/m^2					J/m^2	MJ/m^2
-	°					-	-	-	-	J/m^2	MJ/m^2
Enero	21	245	8,82,E+08	76	2,74,E+08	1,652	0,916	0,766	1,196	9,92,E+08	992
Febrero		195	7,02,E+08	65	2,34,E+08	1,620	0,954	0,809	1,179	7,78,E+08	778
Marzo		170	6,12,E+08	58	2,09,E+08	1,580	0,976	0,833	1,171	6,74,E+08	674
Abril		110	3,96,E+08	49	1,76,E+08	1,466	0,958	0,817	1,173	4,28,E+08	428
Mayo		75	2,70,E+08	42	1,51,E+08	1,354	0,905	0,770	1,175	2,86,E+08	286
Junio		57	2,05,E+08	35	1,26,E+08	1,298	0,869	0,739	1,176	2,15,E+08	215
Julio		69	2,48,E+08	37	1,33,E+08	1,324	0,886	0,754	1,176	2,64,E+08	264
Agosto		92	3,31,E+08	47	1,69,E+08	1,419	0,939	0,800	1,174	3,54,E+08	354
Septiembre		126	4,54,E+08	55	1,98,E+08	1,546	0,975	0,832	1,171	4,91,E+08	491
Octubre		180	6,48,E+08	74	2,66,E+08	1,607	0,964	0,821	1,174	7,06,E+08	706
Noviembre		221	7,96,E+08	79	2,84,E+08	1,643	0,927	0,779	1,191	8,84,E+08	884
Diciembre		248	8,93,E+08	81	2,92,E+08	1,661	0,903	0,751	1,203	1,01,E+09	1005

Tabla 4.1. Tabla de cálculo de irradiación mensual en el plano inclinado, primera iteración, 21° de inclinación.

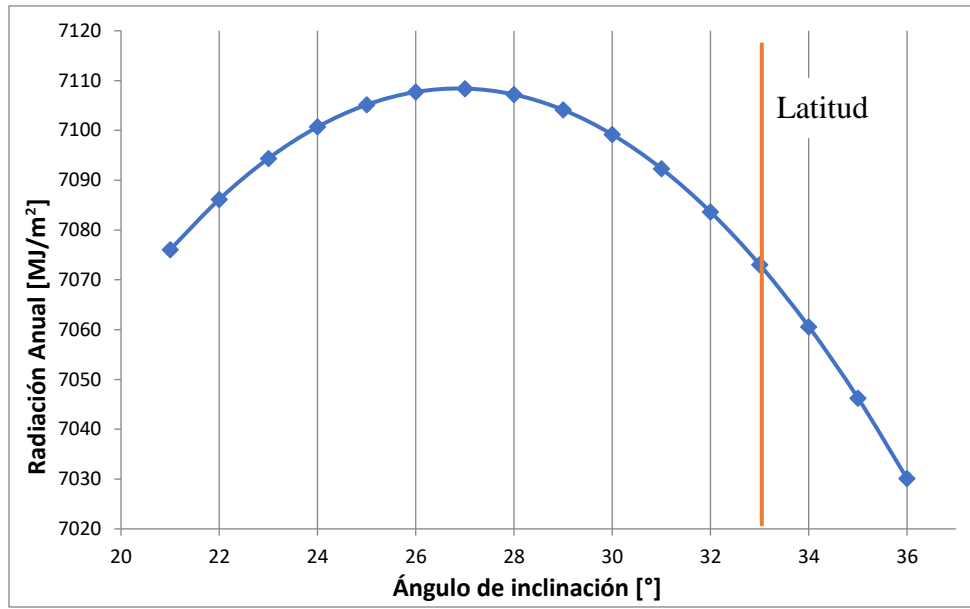


Figura 4.6. Radiación anual en el plano inclinado versus ángulo de inclinación.

La inclinación para la cual la cantidad de energía absorbida es máxima a lo largo de año es de 27° respecto de la horizontal. El ángulo se encuentra desviado desde los 33° , correspondiente a la latitud (línea naranja), hacia la recomendación veraniega (-15°). Esto era un resultado esperable considerando que la radiación acumulada de los meses de verano es superior a la de los meses de invierno.

4.3. Humidificador

El humidificador se compone principalmente de un receptáculo rectangular construido de fibra de vidrio por la empresa Global Fibra. Una de sus caras se comunica directamente al panel solar y por lo tanto la estructura tiene dimensiones específicas para asegurar que este calce a la perfección, como una tapa (Figura 4.7). Además las caras superior e inferior son cónicas para facilitar el flujo del aire. La carcasa del humidificador cuenta a todo lo largo con dos aletas robustas, donde es posible hacer descansar la estructura. Su espesor es suficiente para soportar su propio peso y perforaciones.

La Primera labor consistió en asegurar la estructura metálica al humidificador. Para ello se realizaron dieciséis perforaciones con broca M8 a todo el rededor de la aleta del receptáculo de fibra de vidrio. Fue especialmente importante definir bien las posiciones de los agujeros, dado que además de servir para los pernos estructurales algunos serían necesarios para fijar las grapas del panel solar.

Los subsiguientes trabajos consistieron en la perforación de entrada de agua para aspersión. Se definió el punto medio en la cara posterior y luego se perforó con un taladro y sierra copa de 2" de diámetro. Luego se hicieron las entradas de aire inferior y superior. Para ello se utilizó una sierra copa de 4" de diámetro y luego se instalaron las salidas de estanque de 4" correspondientes para el flujo de aire. Se adquirió una banda de goma de 3 mm de espesor y 50 mm de ancho, la cual se pegó con un adhesivo de contacto al contorno del humidificador.



Figura 4.7. Humidificador. Izquierda, despiece del humidificador. Derecha, construcción de base metálica.

Para la instalación del panel PV fue necesario utilizar cinco grapas en la zona inferior, cinco en la zona superior y tres a cada uno de los costados. Esto debido a que la estructura de fibra de vidrio se encontraba pandeada en la zona central, lo que impedía un correcto cierre del sello. Las dos grapas extra por lado corrigieron el pandeo (Figura 4.8). Además fue necesario adquirir pernos de 20 mm de largo, dado que los originales no eran suficientemente largos para traspasar la fibra y el clamp.



Figura 4.8. Construcción del humidificador. Izquierda, perforación para grapas con broca M8. Centro, adhesión de sello de goma. Derecha, instalación de PV.

4.4. Deshumidificador

Lo principal a la hora de instalar este equipo tuvo que ver con la correcta identificación de entradas y salidas de agua y aire, para establecer correctamente la configuración a contraflujo. Una vez que la posición fue identificada correctamente, solo restó asegurar el equipo a su base metálica con pernos en U y procurar una leve pendiente que asegure que no haya acumulación de líquido condensado en su interior. Para contar con una superficie de contacto considerable, que no abolle el intercambiador, este se hizo descansar sobre dos piezas de madera circunscritas el contorno del tubo (Figura 4.9). Luego de la construcción completa del piping se hizo la instalación del intercambiador de calor. Las cuatro conexiones roscadas con que cuenta, dos de agua y dos de aire, se unieron al piping con cuatro terminales PPR HE de 63 mm x 2", los cuales fueron sellados con teflón.



Figura 4.9. Construcción Humidificador. Izquierda, estructura de soporte con perfil de fijación. Derecha, instalación conectada al piping de agua y aire.

4.5. Tuberías

Todas las tuberías conductoras de este prototipo fueron construidas de PPR. Se utilizaron diferentes dimensiones para las variables solicitaciones y una diversidad de fittings, todos debidamente señalados en el diseño original de Droguett. La mayor dificultad durante la construcción del piping consistió en el trabajo con termofusionadora. Además de requerir un ambiente limpio y ordenado, dado que las fusiones son permanentes, es necesario seguir estrictamente la norma indicada por el fabricante para asegurar integridad y que las uniones no generen pérdidas de carga. Las cinco variables al termofusionar son: diámetro, penetración, tiempo de calentamiento, tiempo de fusión y tiempo de enfriamiento. En la Tabla 4.2 se observa un resumen con las condiciones normalizadas para los diámetros de tuberías utilizados en este proyecto.

Tabla 4.2. Parámetros de termofusión normalizados para ciertos diámetros. Adaptado de (Polifusión S.A., 2020)

Diámetro [mm]	Tiempo Calentamiento [s]	Tiempo inserción [s]	Tiempo enfriamiento [min]	Penetración [mm]
20	5	4	2	14
32	8	6	4	18
63	40	8	6	26
110	90	10	8	34

Para la construcción se utilizaron dos termofusoras diferentes, una para las tuberías del agua, con un rango de fusión para diámetros entre 20 y 63 mm, otra para las tuberías de aire, con un rango de fusión de 75 a 110 mm de diámetro. La potencia de ambas maquinas es de 1200 W. También se utilizaron unas tijeras para PPR de 20 – 40 mm y un cortador de tubo de 50 – 110 mm. Como medidas de seguridad se utilizaron guantes de protección y prensas de carpintería para sujetar las maquinas termofusoras.

4.6. Tuberías de agua

La conducción del agua dentro de equipo se divide en dos conjuntos principales, y así mismo su construcción se realizó en orden. Estos grupos se describen en la Tabla 4.3, donde además es posible identificar sus subconjuntos y el diámetro de las tuberías de PPR utilizadas.

Tabla 4.3. Conjuntos y subconjuntos de división del piping de agua.

Fluido	Conjunto	Subconjunto	Diámetro [mm]
Agua	Alimentación	Succión estanque	32
		Entrada/Salida Bomba alimentación (azul)	32
		Sistema de filtros	32
		Entrada/Salida deshumidificador	32 - 63
		Bypass calentamiento de agua secundario	20 - 32
		Ramal de aspersión	20 - 32
	Rechazo	Sifón de salida del humidificador	32
		Entrada/Salida Bomba de rechazo (rojo)	32
		Conducción hasta estanque	20

La construcción de todos los subconjuntos se realizó siguiendo los planos diseñados por Droguett (Figura 4.10), utilizando los fittings elegidos por él y con el mayor cuidado posible. Algunos cambios leves en el diseño fueron improvisados en el camino, principalmente debido a la necesidad de ahorrar espacio en virtud de la zona disponible para la planta y reducir las pérdidas de carga.

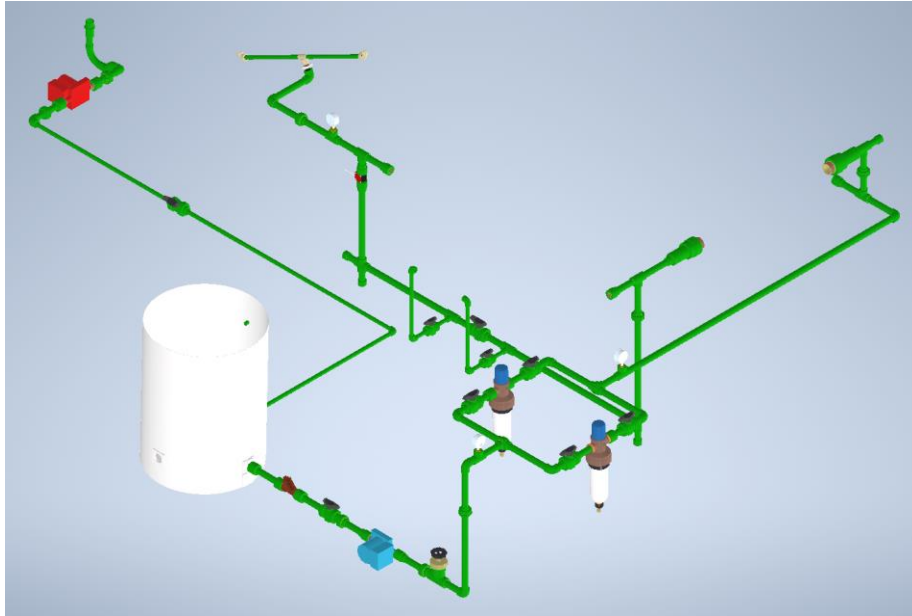


Figura 4.10. Vista isométrica del piping de agua. Adaptado de (Droguett, 2021)

La construcción del conjunto de alimentación partió en el estanque, y siguió en orden hasta los aspersores. El conjunto de rechazo se comenzó a construir desde la salida del humidificador hasta el estanque, cerrando el ciclo. Gracias a las uniones americanas dispuestas a lo largo de todo el sistema fue posible construir el piping en bloques, y luego unir todo en la zona de trabajo. Las uniones americanas también cumplieron una labor fundamental a la hora de adaptarse angularmente, dando grados de libertad a la hora de construir. En lugares específicos fueron instaladas Tee's con salida roscada HI de $\frac{1}{2}$ "", estas fueron esenciales para la posterior instrumentación del equipo y la colocación de manómetros. Para fijar las tuberías tanto al piso como a las diferentes estructuras metálicas se utilizaron abrazaderas plásticas. La posición de estas no viene especificada en los planos así que fueron completamente improvisadas en el lugar de instalación.

En caso de replicarse la construcción es altamente recomendable comenzar por la sección de agua, esto debido a que entronizarse en la técnica de termofusión es más fácil al trabajar con diámetros más pequeños, sin mencionar el hecho de que los fittings de tales dimensiones son más baratos y fáciles de reemplazar en caso de equivocación. El uso de pie de metro, marcadores y alcohol también es vital si se desea obtener fusiones correctas, tanto para definir exactamente la penetración de las tuberías como para evitar la contaminación. Por fortuna no se cometieron errores graves durante la construcción, no obstante, en caso de cometerse, existen variados elementos disponibles en el mercado para realizar reparaciones. A continuación se pueden observar algunas imágenes del proceso de construcción.



Figura 4.11. Construcción de piping de agua. Izquierda, proceso de fusión. Derecha arriba, ubicación de fittings para bypass de filtros. Derecha abajo, sistema de filtros casi terminado.



Figura 4.12. Construcción piping agua. Arriba izquierda, estación de trabajo para termofusión. Abajo, bypass calentador auxiliar y ramal de aspersores mejorado.

4.7. Tuberías de aire

La conducción de aire, al igual que la de agua, sigue un ordenamiento modular separado por uniones americanas y diferentes elementos, y se divide en tres subconjuntos (Tabla 4.4). Al igual que para el agua, el diseño de Droguett deja claramente especificada la arquitectura del piping de aire (Figura 4.13). Algunas modificaciones se añadieron en la ubicación de las uniones americanas de 110 mm, estas se trasladaron para que la libertad rotacional que brindan coincidiera con el movimiento del ángulo de inclinación del panel PV. De esa forma no fue necesario definir precisamente el ángulo de inclinación de 27° durante la fusión, gracias a la unión americana este se ajustó al momento de ensamblar, sin que hubiera peligro de fusión errónea de por medio.

Tabla 4.4. Conjuntos y subconjuntos de división del piping de aire.

Fluido	Conjunto	Subconjunto	Diámetro [mm]
Aire	Alimentación	Sección entre ventilador y humidificador	110
	Rechazo	Sección entre humidificador y deshumidificador	110 - 63
		Sección entre deshumidificador y ventilador	110 - 63

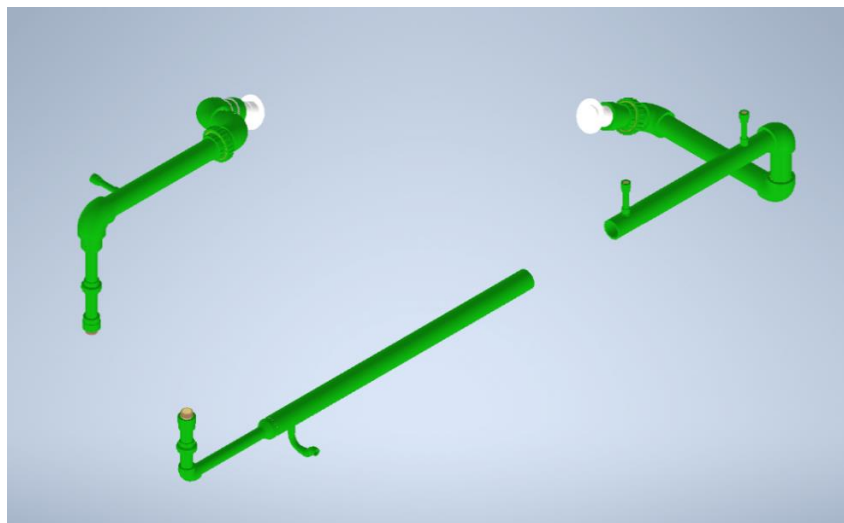


Figura 4.13. Vista isométrica del piping de aire. Adaptado de (Droguett, 2021)

La construcción comenzó desde la salida del humidificador. Si bien la geometría de la tubería de circulación del aire es más simple que la de agua, su construcción es más complicada, o requiere mayor esfuerzo físico, debido al diámetro de las tuberías involucradas. Fusionar la tubería de 110 mm requiere de dos personas como mínimo, dado que los tiempos de calentamiento y fusión son elevados y es necesario ejercer presión constante para fundir el PPR. Una vez que el circuito completo fue

construido se añadieron las monturas para sensores de temperatura, anemómetro y sifones de recuperación de agua. En particular se tuvo especial cuidado con la fusión del sifón de recuperación de condensado, dado que una mala instalación podría contribuir al desperdicio de agua destilada. Ambos sifones se ven en la Figura 4.14, justo antes de ser termofusionados a la tubería de aire. También se puede ver la instalación de los tres subconjuntos del piping.

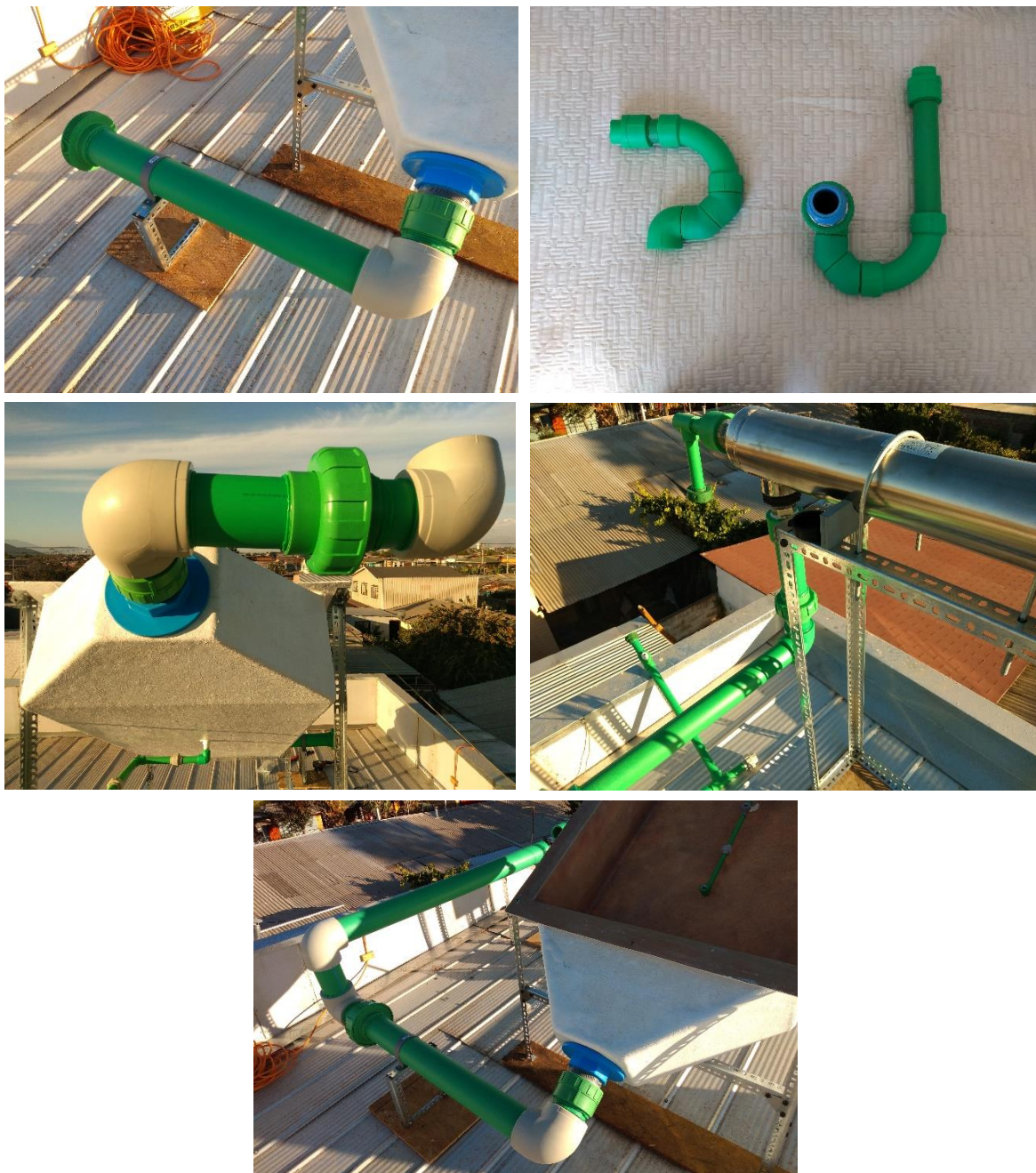


Figura 4.14. Construcción de tuberías de aire. Izquierda arriba, segmento entre ventilador y entrada humidificador. Derecha arriba, sifones de recuperación de salmuera de rechazo y destilado. Abajo, subconjuntos.

4.8. Bombas

La planta cuenta con dos bombas para conducción forzada de agua. Una de ellas para la alimentación principal y la otra para la recuperación de la salmuera de rechazo. En la Figura 4.10 se pueden observar estas dos bombas en azul y rojo respectivamente. Para su instalación se utilizaron las uniones americanas y sellos originales. Su orientación se definió en base a la recomendación del manual técnico adjunto. Luego de la instalación de cada bomba se construyeron dos protecciones de madera impermeabilizada, para brindar cobijo del sol y lluvia (Figura 4.15)



Figura 4.15. Instalación de Bombas. Izquierda, bomba de alimentación. Centro y derecha, disposición con protector.

4.9. Ventilador

El ventilador es el equipo que unifica las tuberías de aire entre la salida de deshumidificador y la entrada al humidificador. Su función es forzar la circulación del aire dentro de la planta. Antes de su instalación definitiva fue necesario preparar la conexión eléctrica. Para ello se utilizó un cordón eléctrico de tres cables de tensión máxima de servicio de 500 V y se siguieron las instrucciones de conexionado descritas por el fabricante.

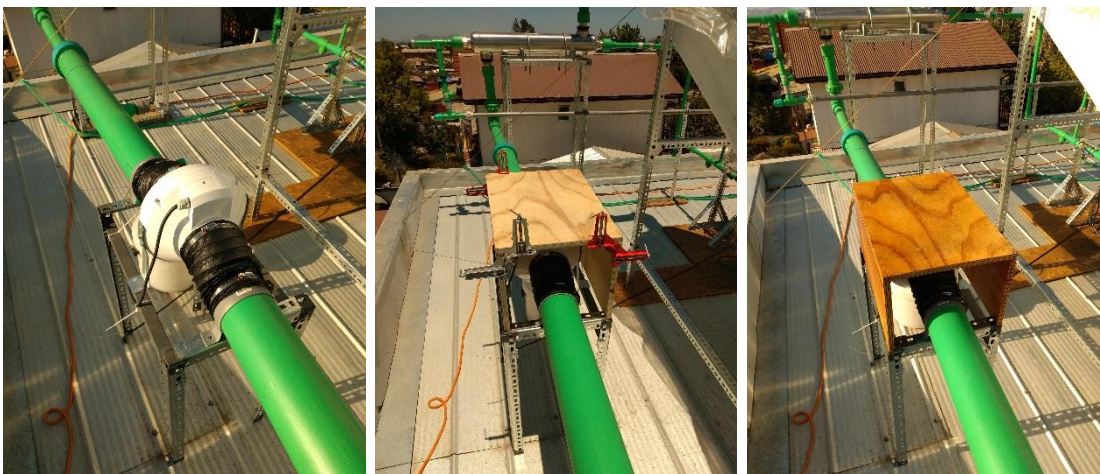


Figura 4.16. Instalación del ventilador paso a paso.

Para fijar el equipo a su estructura metálica se utilizaron remaches pop de ¼”, teniendo la precaución de que la dirección del flujo de aire fuese correcta. Las tuberías de PPR se fijaron utilizando omegas de 110 mm, pernos de 4x16 mm, tuercas M4 y golillas planas 5/32. Para la conexión entre el ventilador y las tuberías de PPR se utilizaron mangas corrugadas de aluminio recubiertas de goma, estas se fijaron con cuatro abrazaderas de cremallera ajustables de 120 mm de diámetro máximo. Por último se construyó una estructura de madera impermeabilizada para proteger el ventilador de la intemperie (Figura 4.16)

4.10. Calentador de agua

Se adquirió un equipo de calentamiento de agua, de conexiones de ½” y 3000 W de potencia. Su objetivo es ser utilizado en caso de que el calentamiento en el humidificador no sea suficiente debido a condiciones climáticas adversas. Lamentablemente al momento de conectarlo al ramal de bypass correspondiente se descubrió que el equipo filtraba una gran cantidad de agua. Al desarmarlo se constató que el canal del sensor de flujo, justo antes del serpentín de calentamiento, estaba fracturado, tal como se puede ver en la Figura 4.17.



Figura 4.17. Reparación de calentador de agua. Izquierda, sensor de flujo antes de ser reparado. Centro, fisura en el conducto. Derecha, conducto luego de la reparación.

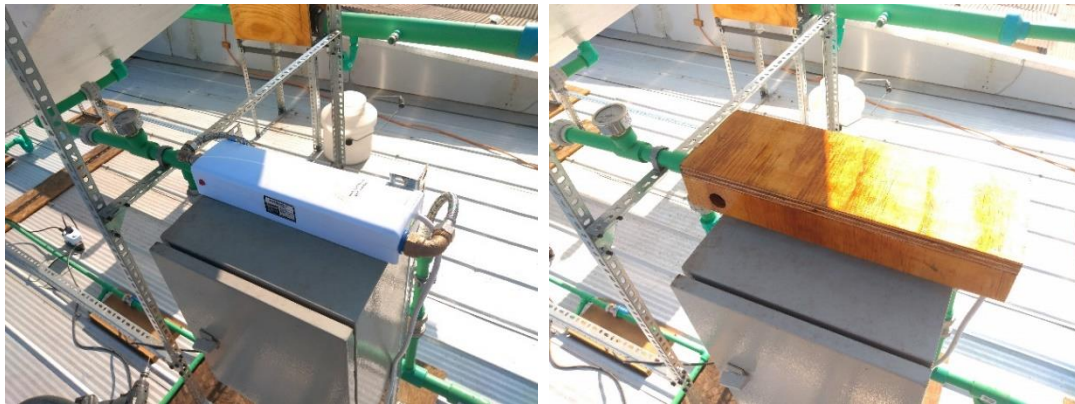


Figura 4.18. Calentador de agua en su posición final.

Para repararlo se adquirió un pegamento epóxico llamado PegaTanque, el cual se aplicó generosamente en el área afectada. Luego de la reparación se verificó que el equipo funcionaba correctamente, integrándolo a la línea de agua mediante dos flexibles de ½". Por último, y para proteger el calentador de la intemperie, se construyó un protector impermeabilizado (Figura 4.18).

4.11. Conexión eléctrica

Cinco elementos de la planta requieren una conexión a la red eléctrica de 220 V y 50 Hz. La Tabla 4.5 describe estos implementos, sus variables técnicas y tiempo de utilización. Además se instaló un potenciómetro entre la conexión de la red y el ventilador, esto para poder regular su potencia y con ello el caudal. El diagrama de conexionado se puede observar en la Figura 4.19.

Tabla 4.5. Listado de equipos eléctricos y variables técnicas.

Equipo	Nivel	Potencia [W]	Corriente [A]	Utilización
Calentador de agua	1/1	3000	13,5	Auxiliar
Bomba alimentación	1/3	45	0,20	Permanente
	2/3	69	0,31	
	3/3	96	0,43	
Bomba rechazo	1/3	40	0,17	Permanente
	2/3	68	0,30	
	3/3	93	0,41	
Ventilador	1/1	79	0,34	Permanente
Fuente de poder (CC)	1/1	12 (máx.)	1	Permanente

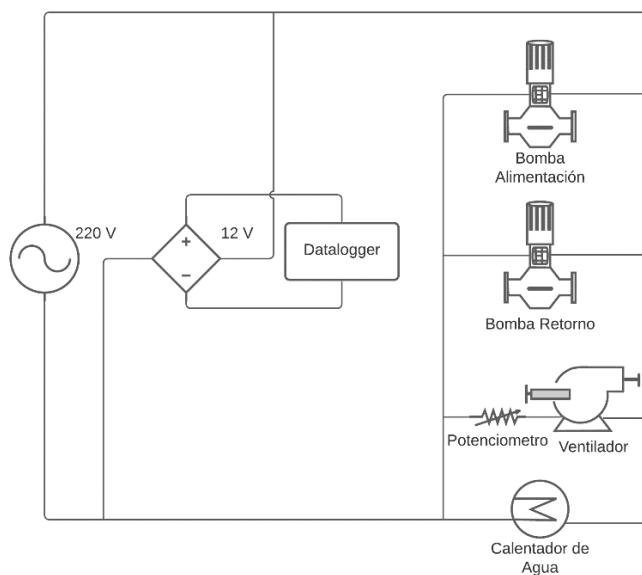


Figura 4.19. Esquema de conexión eléctrica utilizado en la planta. Elaboración propia.

4.12. Detalles finales de instalación

Uno de los contratiempos más relevantes a la hora de instalar el equipo en su ubicación final fue la naturaleza del suelo. La zona disponible se trata de un tejado de Metalcom recubierto de zinc “cinco en V”, con una pendiente para el agua lluvia de 5° . Para homogeneizar la zona se utilizaron planchas de OSB sobre el techo corrugado que sirvieran de “superficie auxiliar”. El ángulo de 5° del techo, aunque suena leve, significó un esfuerzo extra durante la instalación en general, y generó una disyuntiva: Construir una tarima que rectifique el techo a un costo elevado (Figura 4.20 a) o adaptar el diseño de la planta a la pendiente del techo de forma permanente (Figura 4.20 b).

Finalmente se optó por una solución más práctica y barata: considerar que el techo es una superficie perfectamente horizontal en virtud de la futura instalación de la planta en dependencias de la universidad, independiente de los perjuicios que esto trajera a la performance en la actualidad (Figura 4.20c). Por lo tanto la planta se construyó sin modificar los planos originales, tal como se previó en el diseño, pero quedó dispuesta con una pendiente debido a la naturaleza del techo. El mayor contratiempo que esto generó fue la pérdida del punto óptimo de incidencia solar de 27° , el cual quedó desviado a una inclinación de 32° ($27^\circ+5^\circ$), valor muy cercano al de la latitud. Otro contratiempo relacionado al ángulo de inclinación tuvo que ver con la obtención del destilado. El tramo de tubería que conduce el aire desde el intercambiador de calor hasta el ventilador a su vez conduce el destilado, para evitar que las gotas que sobrepasen la abertura de captura pasen de largo hacia el ventilador fue necesario procurar que el ángulo de la tubería estuviese levemente inclinado. Sin embargo la pendiente del tejado tiene inclinación contraria, por lo que debió solucionarse utilizando niveladores.

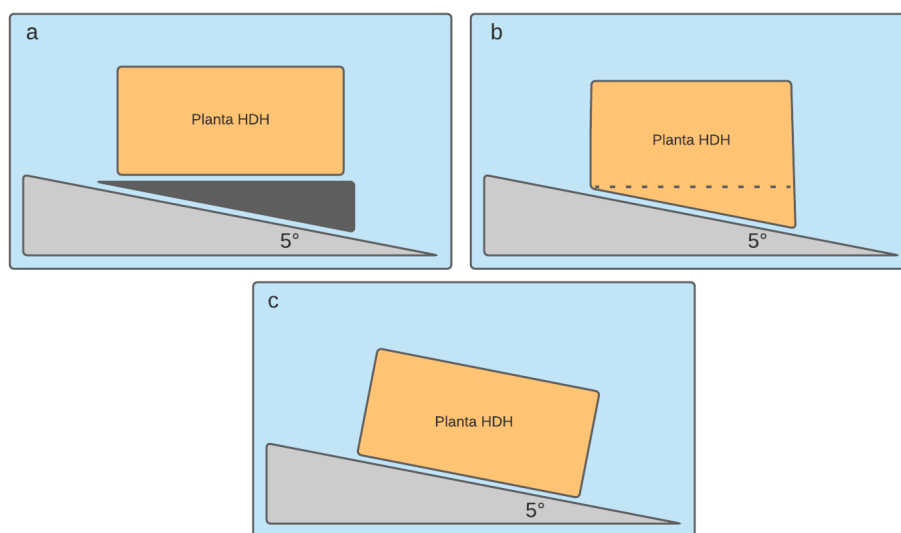


Figura 4.20. Conceptos barajados durante la instalación de la planta HDH en su posición final. Elaboración propia.

Otro de los eventos imprevistos fue el efecto del viento. Seis metros sobre el piso el viento no tiene gran oposición y en las zonas más ponientes de Maipú adquiere una gran velocidad, lo cual obligó a colocar tensores en el humidificador, estanque, deshumidificador y modificar el diseño del gabinete eléctrico. Todos los elementos de la planta debieron ser apernados al techo y por lo tanto su ubicación debió ser definida con suma precisión, puesto que no podían ser reubicados.

La altura también jugó un papel fundamental en la instalación del estanque de agua. Colocarlo a nivel de piso se encareció, debido a la necesidad de invertir en más líneas de tubería PPR y comprar una bomba de mayor capacidad. Esto trajo como resultado decidir ponerlo a nivel de planta, lo cual estableció un límite de 120 litros de agua como máximo debido al peso excesivo que significaría su llenado completo (200 L).

Por último, la altura y el complicado acceso al techo, trajo dificultades extras en el transporte de elementos grandes, como lo son el humidificador, el panel solar y el estanque. Afortunadamente estas dificultades se debían solamente al volumen de estos componentes y no a su peso. Con ayuda fue posible llevarlos hasta su ubicación, sin la necesidad de usar maquinas especiales. A continuación se presentan imágenes del estado final de la planta HDH, antes de la instrumentación y la aplicación de mejoras.



Figura 4.21. Vista Suroeste de planta HDH.



Figura 4.22. Vista Sureste de planta HDH.



Figura 4.23. Vista Este de planta HDH.

Capítulo 5

Instrumentación

A fin de describir íntegramente el funcionamiento de la planta desalinizadora HDH es que se enfocó una gran parte de este trabajo a la correcta instrumentación del equipo. Se resolvió utilizar un registrador de datos (datalogger), para conseguir que las variables medidas queden registradas de forma automatizada y continua. Las variables clave que se decidió registrar fueron: **temperaturas, caudales, volumen de destilado y radiación solar**, usándose en total diez sensores. La Figura 5.1 numera los sensores que se instalaron, la cantidad y ubicación.

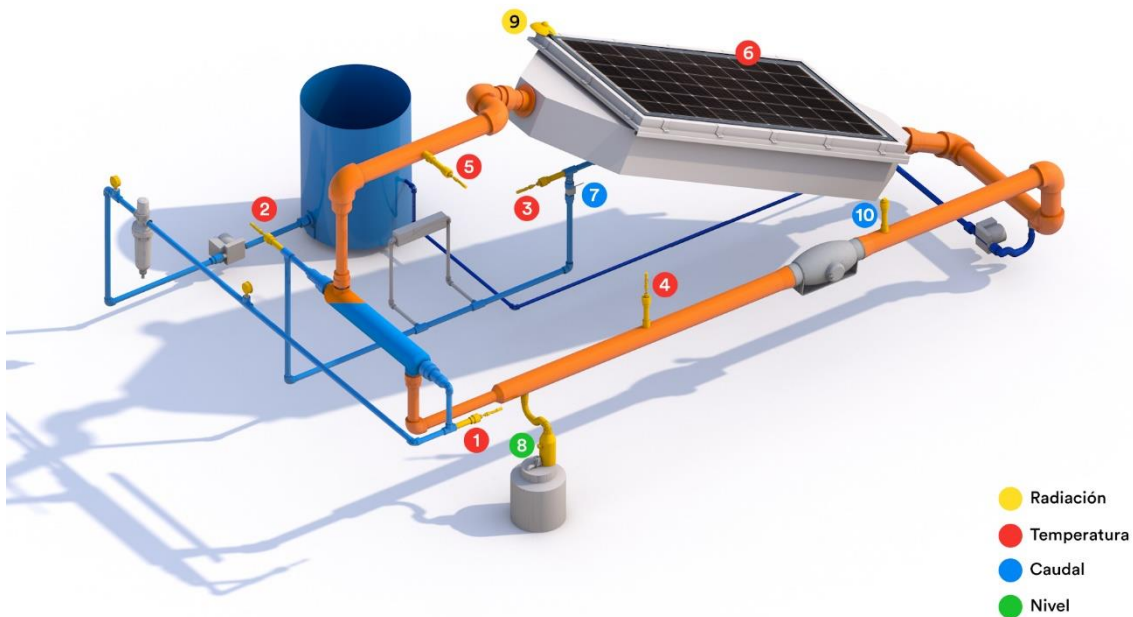


Figura 5.1. Esquema de instrumentación general. Elaboración propia.

En este capítulo se describirán en detalle todos los instrumentos seleccionados y cuál fue su criterio de selección. Además se expondrá el principio físico de su funcionamiento, se describirá su instalación, se expondrá su diagrama de cableado y protocolo de calibración.

5.1. Registrador de datos

El registrador de datos, o datalogger, es un dispositivo electrónico, generalmente compuesto de un microprocesador, capaz de registrar datos en el tiempo por medio de instrumentos y sensores propios o conectados externamente. Estos datos son comúnmente diferencias de tensión o de corriente, y son medidos con un grado de resolución muy alto. El datalogger es capaz de manipular los datos e incluso energizar dispositivos periféricos al cumplirse condiciones previamente definidas. Su tamaño es reducido y cuenta con memoria interna. La información almacenada se puede extraer mediante software especializados o pueden comunicarse directamente con ordenadores personales. Uno de los principales beneficios del uso de registradores de datos es la capacidad para recopilar automáticamente información las 24 horas del día. Tras la activación, los registradores normalmente se dejan sin vigilancia para capturar la información durante toda la duración del período de seguimiento. Esto permite una visión global y precisa de las condiciones objeto de seguimiento, tales como la temperatura, radiación, humedad, etc.

5.1.1. CR1000X

En este trabajo se decidió trabajar con un registrador de datos marca Campbell Scientific, modelo CR1000X. Este datalogger de uso general con una resolución de 1 ms, requiere una fuente de alimentación externa de corriente continua de 12 V y su consumo es de 1 mA en reposo, 13 mA procesando y 46 mA en medida. Puede trabajar en ambientes con rangos de temperatura de -40° a 70°C . Tiene una memoria interna de 4 MB SRAM y 72 MB flash, expandible con tarjeta microSD. Posee comunicación externa mediante micro USB (usado durante este trabajo), Ethernet, CSI/O y RS-232.



Figura 5.2. Fotografía del registrador de datos CR1000X. Fuente (Campbell Scientific, CR1000X Product Manual, 2021)

El CR1000X posee dieciséis canales analógicos (16 singled-ended o 8 diferenciales), diez canales de conteo de pulsos, dieciséis terminales de excitación externa, ocho puertos digitales y nueve terminales de comunicación. En la Tabla 5.1 se puede observar el rango de medición y la respectiva precisión de los canales analógicos. A su vez los canales de excitación se diferencian en 2 grupos: de tensión ajustable (VX1-VX4 y C1-C8) y constante (5V, 12V, SW12-1, SW12-2). En la Tabla 5.2 se puede ver el rango de tensión que estos canales pueden alimentar. Los canales de conteo de pulsaciones tienen la capacidad de leer tres tipos de señales: cuadrada de alta frecuencia, alterna de bajo nivel y de apertura-cierre. La Tabla 5.3 muestra el tipo de señal que cada puerto es capaz de leer. La Figura 5.3 muestra la forma típica de cada una de estas señales.

Tabla 5.1. Compensaciones de precisión de mediciones analógicas de voltaje. Fuente (Campbell Scientific, CR1000X Product Manual, 2021)

Range (mV)	Typical Offset (μ V RMS)	
	Differential with Input Reversal	Single-Ended or Differential without Input Reversal
± 5000	± 0.5	± 2
± 1000	± 0.25	± 1
± 200	± 0.15	± 0.5

Tabla 5.2. Rango de tensión en canales de excitación. Fuente (Campbell Scientific, CR1000X Product Manual, 2021)

	C1-C8 ¹	VX1-VX4	5V	12V	SW12-1	SW12-2
5 VDC	✓	✓	✓			
3.3 VDC	✓	✓				
12 VDC				✓	✓	✓

¹ C terminals have limited drive capacity. Voltage levels are configured in pairs.

Tabla 5.3. Funciones del terminal de conteo de pulsos. Fuente (Campbell Scientific, CR1000X Product Manual, 2021)

	P1	P2	C1-C8
Switch-Closure	✓	✓	✓
High Frequency	✓	✓	✓
Low-level Ac	✓	✓	

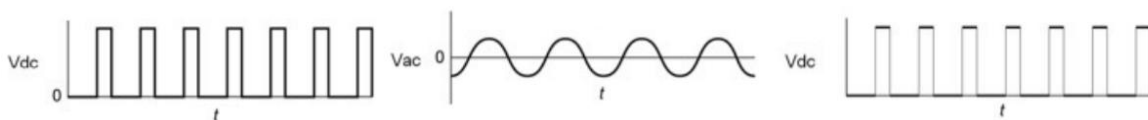


Figura 5.3. Tipos de señales de entrada admitidas por el CR1000X. Izquierda, high-frequency square-wave. Centro, low-level ac sine-wave. Derecha, switch-closure series. Fuente (Campbell Scientific, CR1000X Product Manual, 2021)

5.1.2.Programación

Existen varios softwares compatibles con el CR1000X. El software seleccionado para esta tesis fue el PC400W, el cual se distribuye gratuitamente. Este funciona de mediador entre el datalogger y el computador personal, para ejecutar la adquisición de datos, leer en tiempo real las mediciones o compilar el programa. Además incluye las aplicaciones ShortCut, CRBasic Editor y View Pro entre otras. La ventaja de este software es por sobre todo la posibilidad de editar el programa principal del datalogger mediante CRBasic Editor, lo cual permite incluir de manera manual funciones y sensores para los cuales ShortCut no tiene compatibilidad. La programación no es intuitiva ni simple, sin embargo la aplicación cuenta con un asistente muy completo. La estructura de un programa de registro creado a través de ShortCut o CRBasic se compone de 5 secciones:

- a. **Declaración de modo de procesamiento:** esta primera orden define de qué forma se ejecutará el programa principal (punto e), puede ser *sequential mode* o *pipeline mode*.
- b. **Declaración de variables:** En esta sección se declaran todas las variables que se utilizaran durante el programa, ya sean auxiliares o medibles. Estas pueden ser del tipo *public* en caso de que sea necesario imprimirlas en la tabla de resultados.
- c. **Declaración de unidades:** En esta sección es posible asignar unidades físicas a las diferentes variables publicas definidas anteriormente
- d. **Definición de tablas:** En esta sección se definen las tablas de datos obtenidas del registro de datos. Se selecciona el intervalo de tabulación, es decir el intervalo de tiempo entre iteraciones de la tabla. Este valor temporal puede ir entre 1 ms y 1 día. Además se define qué clase de ajuste se realiza a cada variable pública (Average, sample, maximum, etc.)
- e. **Programa principal:** en esta sección se ejecuta el procesamiento principal, desde las funciones encargadas de la lectura diferencial de terminales hasta las encargadas de ejecutar secuencias lógicas para energizaciones perimetrales. Todas las funciones incluidas en esta sección se ejecutan en intervalos definidos por la variable *Interval*, de modo que el programa no compilará si el intervalo del escaneo no es múltiplo del intervalo de tabulación de la tabla.

El programa diseñado para esta tesis cuenta con un intervalo de escaneo de 15 s y un intervalo de tabulación de 60 s, esto implica que cada iteración de la tabla es el promedio (o máximo), de cuatro valores almacenados, cada uno tomado cada 15 segundos. El código programado en CRBasic Editor se encuentra disponible en el Anexo C.

5.1.3. Funciones

Es posible incluir diferentes funciones en el programa principal del CR1000X, estas se clasifican en nueve categorías: Analog input, Pulse counting, Analog output, Communications, Digital I/O, Power input, Power output, Power ground y Signal ground. La base de las funciones encargadas de registrar datos es la medición de diferencias de voltaje, sin embargo las condiciones de adquisición de estas mediciones pueden diferenciarse, lo que permite la aplicación de variados sensores para distintas magnitudes físicas. La Tabla 5.4 presenta un listado de las funciones de medición utilizadas durante este trabajo, los tipos de sensores que hicieron uso de tales funciones y sus correspondientes puertos de lectura. La Figura 5.4 muestra la ubicación real: en rojo los canales de temperatura de fluido, en naranja el de temperatura superficial, en azul los de caudal, en amarillo el de radiación y en morado el de volumen de destilado.

Tabla 5.4. Funciones, magnitudes físicas y canales relacionados en la instrumentación.

		Canales en datalogger CR1000X				
Magnitud física	Función	Análogo	Pulso	Voltaje de salida		Voltaje de excitación
		Diff 1-8	P1-P2	5V-12V	SW12-1 – SW12-2	VX1-VX4
Temperatura de un fluido	Puente resistivo	Canales 1-5	-	-	-	VX1-VX3
Temperatura superficial	Termistor	Canal 6	-	-	-	VX4
Caudal	Switch-closure	-	P1	5V	-	-
Radiación	Voltaje diferencial	Canal 7	-	-	-	-
Volumen	Voltaje diferencial	Canal 8	-	5V	SW12-1	-

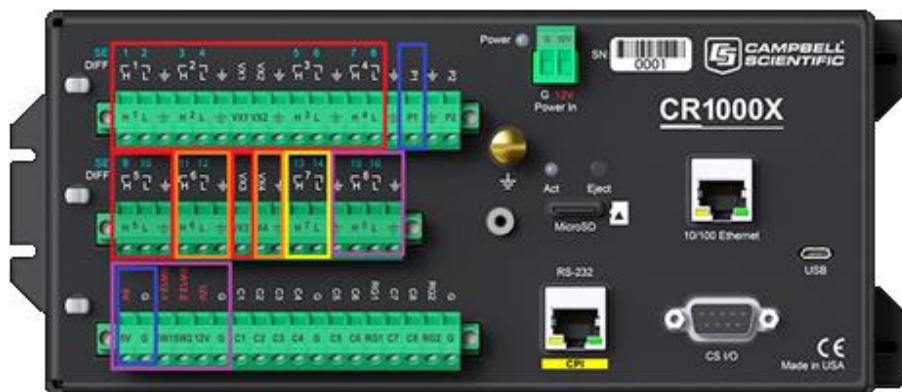


Figura 5.4. Esquema de ubicación de los sensores utilizados para la instrumentación. Fuente adaptado de (Campbell Scientific, CR1000X Product Manual, 2021)

5.1.4. Instalación del registrador de datos

El datalogger debe ser instalado en una ubicación seca que no supere las temperaturas de funcionamiento (-40 a 70°C), para conseguir esto se adquirió un gabinete eléctrico de índice de protección IP65, el cual pudiera instalarse a la intemperie. Para asegurar el sello absoluto se utilizaron prensas estopas para introducir los cables dentro del gabinete. Estas se seleccionaron de diferentes tamaños en función del espesor de los cables (PG13.5, PG9, PG7) y todas las prensas cuentan con un IP65 o superior. Además de la conexión de alimentación de 12V es necesario hacer una conexión a tierra, la cual se hizo al gabinete mismo. Para evitar que hubiera interferencia de ningún tipo se atornilló el registrador a una placa de madera y la placa de madera al gabinete.

La Figura 5.5 muestra el registrador y el conexionado eléctrico de la planta antes y después de ser instalados en sus respectivos gabinetes.

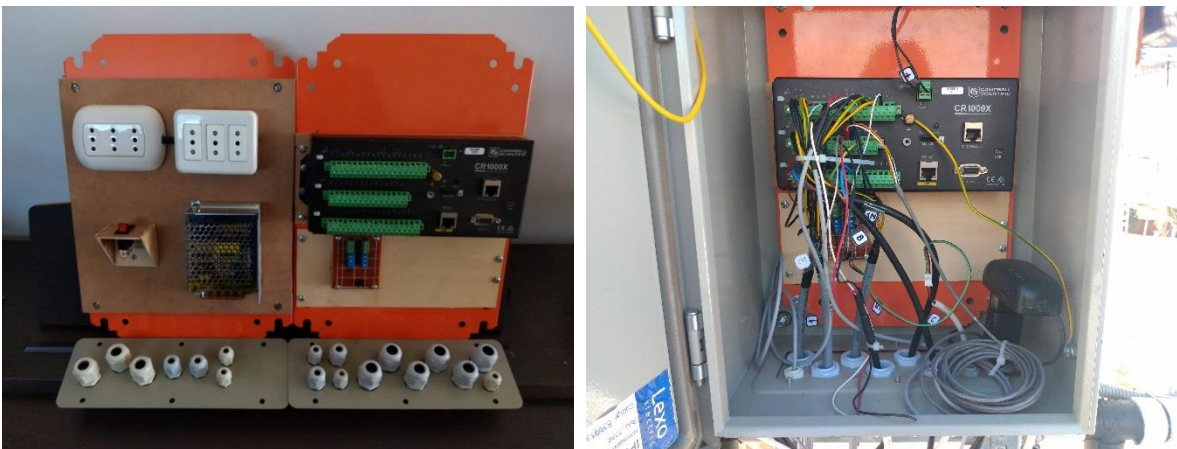


Figura 5.5. Izquierda, placas de instalación de datalogger y arreglo eléctrico. Derecha, registrador con todos los sensores instalados.

5.2. Termómetros

Se definieron seis ubicaciones claves dentro del equipo desalinizador donde sería vital conocer la temperatura. Las más evidentes de ellas fueron la temperatura del agua antes y después del intercambiador de calor, estas mediciones se asignaron con los números 1 y 2 respectivamente. Así mismo las temperaturas del aire antes y después del humidificador se asignaron bajo los números 4 y 5 respectivamente. Se decidió incluir un quinto sensor (bajo el número 3), que registrara las variaciones de temperatura del agua como producto del calentador auxiliar. Por último se decidió incluir un termómetro de superficie (número 6), que constatará las temperaturas en la cara posterior del PV. Debido a sus características es que se utilizaron termómetros de resistencia de platino o PRT.

5.2.1. Base teórica termómetros

5.2.1.1. ¿RTD o Termocupla?

En la industria se manejan a grandes rasgos dos tecnologías para la medición de temperaturas, estas son RTD y termopares. Los termómetros RTD utilizan una resistencia de detección de alta precisión, generalmente de platino, cuyo valor de resistencia aumenta con la temperatura. El estándar dominante adoptado internacionalmente es el Pt-100 que tiene un valor de resistencia de 100.0 Ohms a 0 ° C y un cambio de 38.50 Ohms entre 0 y 100 ° C (el intervalo fundamental). La resistencia de detección de platino es muy estable y permite una detección de temperatura de alta precisión. Este tipo de sensores admite configuraciones de 2, 3 o 4 hilos según la aplicación, la instrumentación asociada y los requisitos de precisión (RS Pro, 2021).

Los termómetros termopares por su parte comprenden un termoelemento que es una unión de dos aleaciones de diferente campo específico. La unión es solo un cortocircuito que da como resultado la generación de un EMF dependiente del gradiente de temperatura entre la unión caliente y la unión "fría" o de referencia. Esta característica es razonablemente estable y repetible y permite utilizar una familia de tipos de termopares alternativos (por ejemplo, J, K, T, N). Los tipos alternativos se definen por la naturaleza de las aleaciones utilizadas en los termoelementos y cada tipo muestra una característica de EMF térmica diferente (RS Pro, 2021).

La Tabla 5.5 presenta una comparativa entre las características de estas dos tecnologías. En particular considerando sensores RTD de platino.

Tabla 5.5. Comparación de tecnología PRT y termocupla. Adaptado de (RS Pro, 2021)

	Platinum resistance thermometer	Thermocouple
Sensor	Resistencia de película plana o enrollada de alambre de platino	Termoelemento, diferentes metales/aleaciones
Precisión	0.1 a 1.0°C	0.5 a 5.0°C
Estabilidad a largo plazo	Excelente	Variable, propensa al envejecimiento
Rango de temperatura	-200 a 650°C	-200 a 1750°C
Respuesta térmica	Bobinado – típicamente de 1 a 50 segundos	Envainado – típicamente de 0,1 a 10 segundos
Excitación	Se requiere corriente constante	Ninguna
Linealidad	Bastante lineal	La mayoría de los tipos son no lineales
Costo	Elevado	Bajo
Susceptibilidad eléctrica	Raramente susceptible	Susceptible
Interface	Puente de 2, 3 o 4 cables	Entrada potenciométrica. Se requiere compensación de unión fría

5.2.1.2. Conexión

El cableado introduce una resistencia eléctrica en serie al termómetro de resistencia. Por lo tanto, las dos resistencias (una por cada cable), son acumulativas y podrían interpretarse como un aumento de temperatura si no se controla. Cuanto más largo y/o más pequeño sea el diámetro del cable, mayor será la resistencia del cable y los errores de medición podrían ser apreciables.

En el caso de una conexión de 2 cables, poco se puede hacer sobre este problema y se producirá algún error de medición de acuerdo con el cableado y la disposición del circuito de entrada. Por esta razón, una disposición de 2 hilos solo es adecuada para longitudes de cable cortas. El uso de 3 cables, cuando lo exija la construcción de la sonda o la terminación de entrada del instrumento de medición, permite un buen nivel de compensación de la resistencia del cable. Sin embargo, esta técnica de compensación se basa en el supuesto de que la resistencia de los tres cables es idéntica y que todos residen a la misma temperatura ambiente; este no es siempre el caso. Por lo tanto, se logra una precisión óptima con una configuración de 4 cables (RS Pro, 2021). La Figura 5.6 muestra esquemáticamente los tres tipos de conexiones.

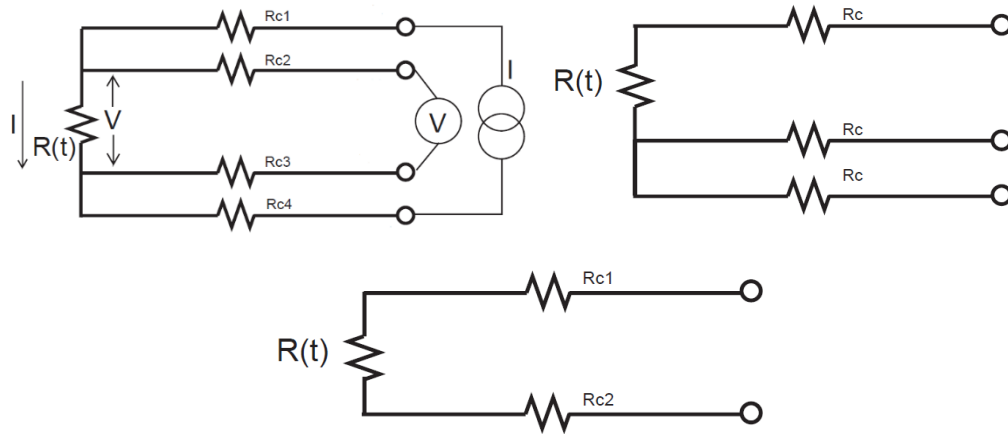


Figura 5.6. Tipos de conexiones para sensores PRT. Fuente (RS Pro, 2021)

5.2.1.3. Inmersión de sonda

Debido a la materialidad de la propia sonda de medición existe una transferencia de calor desde o hacia el fluido medido, lo cual puede producir una aparente reducción o aumento en los resultados de la temperatura medida. La profundidad de inmersión (la longitud de la parte de la sonda que está directamente en contacto con el medio a medir), debe ser tal que asegure que se exceda la longitud de detección (se recomienda el doble de la longitud de detección). Las profundidades de inmersión pequeñas dan como resultado un gran gradiente de temperatura entre el sensor y el entorno, lo que genera un gran flujo de calor. Para fines generales se recomienda una inmersión de 150 a 300 mm dependiendo de la construcción de la sonda (RS Pro, 2021).

5.2.1.4. Autocalentamiento

Para medir la caída de voltaje a través de la resistencia de detección de platino, se debe pasar una corriente a través de ella. La corriente de medición produce disipación de calor en el sensor, lo que puede dar como resultado una indicación de temperatura aumentada. Es necesario minimizar el flujo de corriente tanto como sea posible. Por lo general, es aceptable 1 mA o menos (RS Pro, 2021). El problema es menos recurrente cuando se realizan mediciones a medios líquidos, dado que la remoción de calor de autocalentamiento es más rápida.

5.2.2. Configuración de termómetros

Debido principalmente a la precisión, la linealidad y baja susceptibilidad eléctrica es que se decidió utilizar sensores del tipo PRT (específicamente Pt-100), para las mediciones temperatura de agua y aire, y Pt-1000 para la temperatura superficial del panel PV. Los Pt-100 fueron comprados al fabricante RS Pro y el sensor de panel es marca Campbell Scientific, modelo CS240, las fichas técnicas de ambos sensores se encuentran disponibles en el Anexo D.

Para la lectura de los sensores Pt-100 se utilizó un esquema de puente-medio de tres cables, con excitación mediante los canales VX1-VX3. El fabricante del datalogger vende un dispositivo llamado *3WHB10K* que permite el puenteo correcto de la corriente de excitación. Ya que no se contaba con este dispositivo se fabricó un arreglo electrónico que lo supliera (ver Figura 5.7). Este arreglo introduce una resistencia de 1 Kohm con variabilidad del 1%, en serie entre los conectores VX y H.

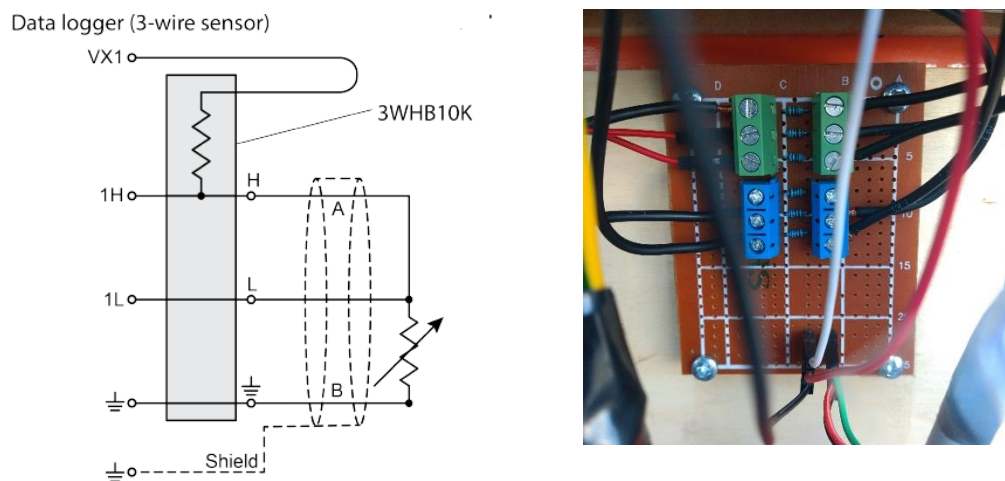


Figura 5.7. Dispositivo de puenteo de corriente de excitación. Izquierda, diagrama de conexión. Derecha, arreglo fabricado. Fuente (Campbell Scientific, CR1000X Product Manual, 2021)

La tensión de excitación se calculó teniendo en cuenta evitar el autocalentamiento de la sonda. Para esto se estableció una corriente máxima de excitación de 1 mA. Junto a la resistencia conocida del PTR y del arreglo se usó la siguiente ecuación:

$$V_{exc} = I_{exc} \cdot R_{exc} = 1mA \cdot 1100 \text{ ohm} \quad (5.1)$$

$$V_{exc} = 1100 \text{ mV} \approx 1000 \text{ mV} \quad (5.2)$$

Para asegurar una corriente menor a 1 mA se estableció la tensión de excitación en 1000 mV, valor que se ingresó directamente en el programa del registrador, en la función *BrHalf3W*. El rango de medición de los cinco Pt-100 se estableció en ± 5000 mV. Finalmente mediante la función *PRTCalc* se realizó la conversión entre resistencia eléctrica y °C, estableciendo para ello el valor resistivo a 0°C de cada vaina (100 ohm) y el tipo de sensor (IEC 751, $\alpha = 0.00385$)

La configuración del termómetro CS240 fue sustancialmente más simple debido a que se trata de un dispositivo marca Campbell Scientific compatible con el subprograma ShortCut. Para anexarlo en el programa principal del registrador se configuró en ShortCut, añadiendo la resistencia de los cables precalibrada por el fabricante. Luego el código generado se añadió al programa programado en CRBasic Editor, editando solamente los canales de conexión y los valores de tabla requeridos. Los diagramas de conexión se muestran en el Anexo E.

Por último, y antes de realizar la calibración, se realizó la extensión de cables de los sensores Pt-100 adquiridos. Estos contaban con una longitud original de 1,5 m. Dado el tamaño de la planta, tres de los cinco termómetros utilizados debieron extenderse. La extensión se realizó con un cable de control con pantalla de protección, soldando los cables, luego aislando y etiquetando (Figura 5.8).

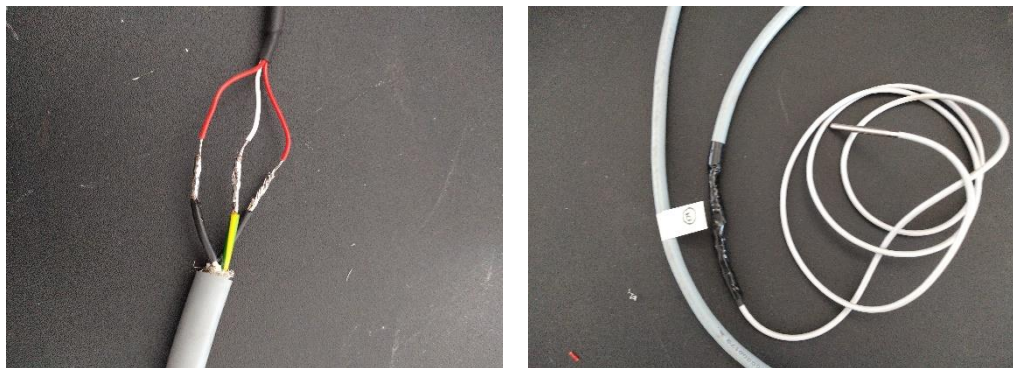


Figura 5.8. Extensión de cables de termómetros Pt-100.

5.2.3. Calibración de termómetros

La correcta calibración de sensores PRT, ya sea Pt-100 o Pt-1000, consiste en establecer de manera exacta la relación R_t/R_0 , donde R_t es la resistencia medida y R_0 es la resistencia a cero grados Celsius. Luego, si se requiere una precisión de un mayor grado, es recomendable un ajuste mediante probeta de prueba en un rango muy cercano al de trabajo. Debido principalmente a las prohibiciones de la pandemia es que en este trabajo se realizó una calibración de la resistencia a 0°C solamente.

Se creó una variante del programa del registrador de datos especialmente para la calibración. Este programa, a diferencia del original, tiene un intervalo de escaneo igual al intervalo de registro en tabla, de 1 segundo. También se eliminaron todas las funciones que no estaban dentro de la calibración y se modificó el tipo de dato de almacenamiento final del datalogger. Este se cambió de *FP2* (floating point number) a *IEEE4* (single-precision floating point number), modificando la resolución de los datos de 2 a 4 bytes.

Después de conectados todos los sensores se hizo un baño a cero grados. Para hacerlo se recurrió a un arreglo casero, pues lamentablemente no se tenía acceso a un baño termostático profesional. La Figura 5.9 muestra el dispositivo creado para la calibración. Para asegurar la obtención correcta de los 0° C (o cercana), se utilizó un termómetro marca Lutrom, modelo TM-917, el cual utiliza una termocupla tipo K, con una resolución de 0,01 grados. Se consiguió alcanzar una temperatura de 0,5° C, una vez alcanzada se realizaron 180 mediciones cuyos valores promedios se encuentran tabulados en la Tabla 5.6. Debido a su envergadura los datos de calibración completos no pueden ser incluidos en este informe, pero se encuentran disponibles para el LER.

Finalmente los valores obtenidos se ingresaron al programa principal del registrador de datos, modificando la variable R_t/R_0 correspondiente en la función de conversión *PRTCalc*. La calibración del termómetro de panel CS240 fue innecesaria dado que este ya viene calibrado. Lo único vital durante su instalación fue ingresar correctamente las constantes resistivas indicadas.

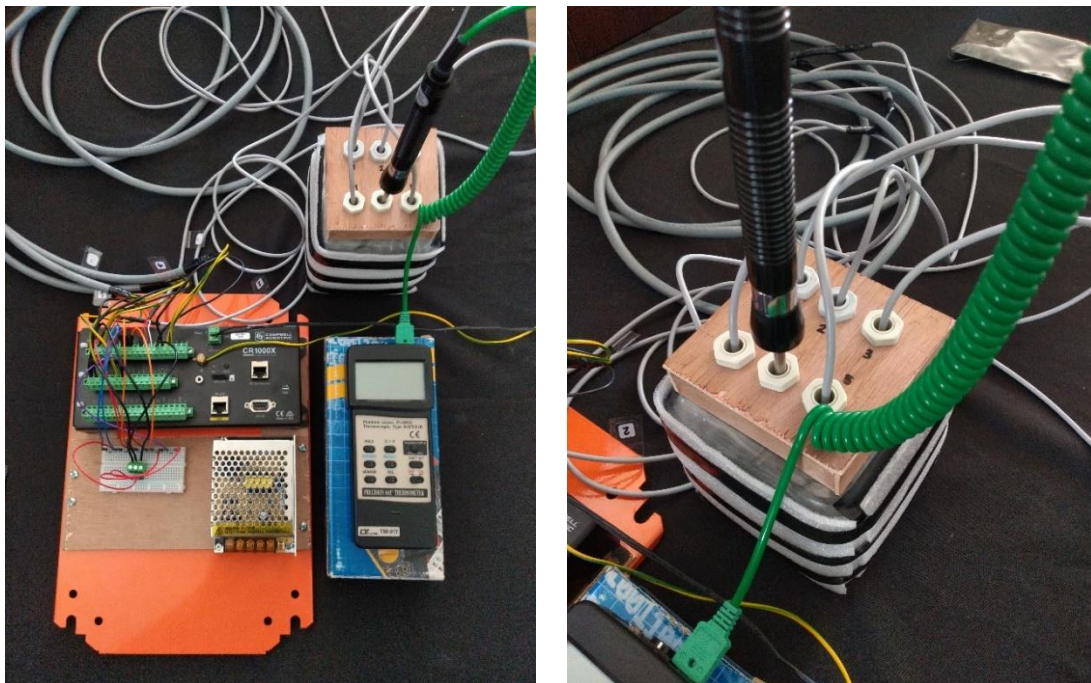


Figura 5.9. Baño termostático utilizado para la calibración.

Tabla 5.6. Resistencia a 0°C medida mediante baño termostático.

	PRT 1	PRT 2	PRT 3	PRT 4	PRT 5
Promedio [ohm]	99,9501735	99,5141941	99,4153804	99,3768091	100,15859
Desviación estándar	0,03904451	0,02309823	0,02096148	0,02094142	0,02298544
Error estándar	0,00291021	0,00172164	0,00156238	0,00156524	0,00171323

5.2.4. Instalación de termómetros

La instalación de los termómetros se realizó utilizando los terminales de ½" fusionados durante la construcción del piping de aire y agua. Para asegurar la estanqueidad se utilizaron prensaestopas Pg13,5 con IP68. El ajuste de cierre fue sellado además con teflón. La Figura 5.10 muestra la posición final de todos los sensores, incluyendo la inserción del CS240 dentro de humidificador.



Figura 5.10. Instalación de termómetros en desalinizador HDH.

La adhesión del CS240 a la cara posterior del PV se realizó siguiendo las instrucciones expresas del fabricante (Campbell Scientific, CS240 and CS240DM. Product Manual, 2018). Además de usar el pegamento incluido en la superficie del disco de aluminio se utilizó kapton tape para asegurar que el sensor se mantuviera fijo en el panel. La Figura 5.11 muestra las instrucciones y el montaje final.

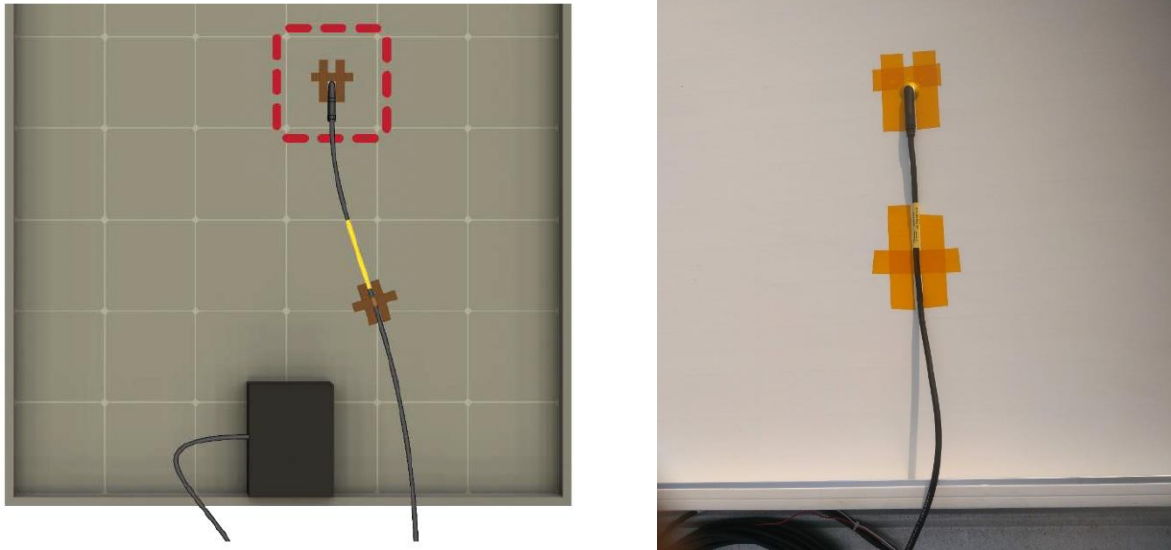


Figura 5.11. Ajuste de termómetro de panel. Izquierda, instrucciones de instalación. Derecha, instalación. Fuente (Campbell Scientific, CS240 and CS240DM. Product Manual, 2018)

Durante la fase de toma de datos se decidió incluir un último valor de temperatura en la tabla de registro del CR1000X, obtenido a partir del sensor de temperatura interno del datalogger. El objetivo fue tener una recopilación de la temperatura ambiental. Para hacerlo lo único necesario fue incluir en la sección de definición de tabla del código del programa la variable p_temp_C con una recopilación del tipo *Average*.

Como comentario final cabe rescatar que para evitar el error asociado a transferencia de calor al medio ambiente por parte de las probetas de acero inoxidable, estas fueron insertadas dentro del piping procurando una inmersión cercana al 100% del tamaño de vaina (50 mm). Esto obligó a cambiar la disposición de las vainas con respecto al flujo de agua, de forma paralela a perpendicular. Siendo conscientes de que tanto la inmersión perpendicular como el tamaño de las vainas no son óptimos fue que se decidió mantener en el piping las tres entradas originales, de disposición paralela y sin limitación de tamaño. De optimizarse el sistema de medición sería altamente recomendable adquirir 3 Pt-100 nuevas con un tamaño de vaina de al menos 150 mm.

5.3. Caudalímetro

La medición de caudal de agua recirculando en el equipo desalinizador HDH es vital para posteriores estudios de balance de masa y energía. En un principio se consideró la idea de utilizar un rotámetro para constatar manualmente el caudal de agua al momento de encender la máquina, sin embargo debido al hecho de que los valores instantáneos de caudal no serían registrados constantemente de esa forma es que se decidió comprar un sensor electrónico para realizar la medición. Los desafíos durante la selección de este instrumento fueron encontrar un equipo de bajo costo, precisión aceptable, rango dentro de los márgenes de trabajo y compatibilidad con el registrador de datos CR1000X. La primera característica que se definió fue relacionada al precio-tecnología. Los flujómetros electromagnéticos y de ultrasonido tenían costos muy elevados en comparación a los de turbina, eso sin mencionar que los caudales para los cuales suelen diseñarse están muy por encima del caudal de trabajo del desalinizador (de 4 a 8 [l/min]). Fue por estas razones que la elección de tecnología fue evidente.

5.3.1. Base teórica caudalímetro

5.3.1.1. Efecto Hall

En 1879, Edwin Hall (1855-1938), demostró que los electrones de conducción en movimiento dentro de un conductor también pueden ser desviados por un campo magnético. Este efecto, denominado Hall, ofrece un medio para determinar tanto el signo como la densidad de los portadores de carga (Resnick, Stanley, Halliday, & Krane, 2002). Cuando se conjugan un campo magnético perpendicular al movimiento de cargas al interior de un conductor se produce un campo eléctrico o campo de Hall, perpendicular al campo magnético. Es posible medir la tensión de hall generada por este campo, la cual estará estrictamente ligada a la existencia del campo magnético y sus características (ver Figura 5.12).

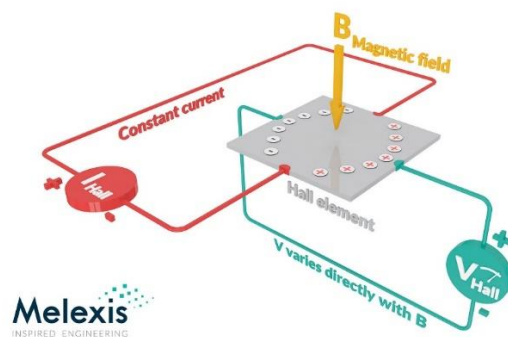


Figura 5.12. Efecto Hall. Fuente Melexis.

5.3.1.2. Caudalímetro de efecto Hall

Gracias al fenómeno físico previamente descrito es posible construir instrumentos cuyo objetivo sea medir magnitudes físicas ligadas al giro de un rotor o turbina. Ese es el caso del caudalímetro de efecto Hall, el cual cuenta con un imán permanente fijado a una de las aspas de su rodete (Figura 5.13). Este rodete no solo reacciona al caudal de agua que pasa a través de él, también modifica la tensión de Hall en el sensor cada vez que el imán pasa por la zona superior, de modo que se pueda determinar mediante una variación de tensión, o pulsación cuadrada, la velocidad de rotación o la frecuencia con la cual gira. Además, dada la naturaleza electromagnética del caudalímetro, la cámara del rodete se encuentra completamente aislada, impidiendo cualquier filtración de líquido en estudio.

Existen varios modelos en el mercado, los cuales varían en capacidad, viscosidad de fluido medido, geometría del rodete e índice de conversión k . El protocolo de calibración es idéntico para todos ellos, siempre y cuando funcionen bajo el mismo principio.

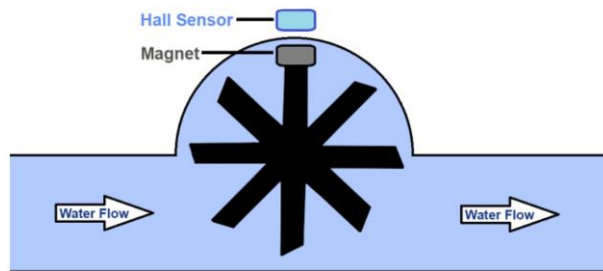


Figura 5.13. Esquema de funcionamiento de un caudalímetro por efecto Hall. Fuente (Hobbyist, 2021)

5.3.1.3. Pulso de flujo k

Como ya se explicó, el caudalímetro entrega pulsaciones cuadradas al consignar variaciones en la tensión de Hall. Estas pulsaciones se relacionan linealmente al giro del rodete o a la cantidad volumétrica de fluido que pasa por el rodete. La ecuación 5.3 representa este comportamiento, donde " f " es la frecuencia de pulsación en Hz , " Q " es el caudal de fluido en l/min y " k " es un factor de conversión denominado pulso de flujo. Las pulsaciones serán determinadas mediante el instrumento, y para un conocido factor k , será posible determinar el caudal. Los fabricantes suelen incluir en su manual el valor testado de k , sin embargo, cuando se requieren errores menores al 10% es recomendable calibrar particularmente el instrumento.

$$f[Hz] = k \cdot Q \left[\frac{L}{min} \right] \quad (5.3)$$

5.3.2. Configuración del caudalímetro

En el contexto de la fabricación del prototipo de desalinizador, considerando los caudales de trabajo, interconexión al piping, compatibilidad con el datalogger y precio se adquirió el caudalímetro de efecto Hall marca AICHI, modelo OF05ZAT (Anexo D). Este caudalímetro cuenta con tres cables de conexión: amarillo para la señal de frecuencia, negro (-) y rojo (+) para la tensión de excitación. Para la lectura de la señal se utilizó el puerto P1 y la función *PulseCount* del CR1000X. En cuanto a la excitación, dado que requiere una tensión de alimentación DC de 3,5 – 12V, es que se decidió utilizar el puerto de salida 5V y la función *CDM_SW5*.

Si bien el caudal queda registrado correctamente en el datalogger al recuperar los datos, poder observar su valor durante la puesta en marcha de la planta es importante. Por eso es que se construyó un arreglo electrónico, o dispositivo de lectura complementaria, con pantalla led capaz de tomar la frecuencia, interpretarla y mostrar su conversión a caudal. Para conseguirlo se adquirió un microcontrolador Arduino Uno junto a una serie de componentes electrónicos y carcasas plásticas. Además se agregó en la placa de punteo de los termómetros, seis pines de conexión rápida para intercambiar fácilmente entre la lectura del visor led y el registro del datalogger. La Figura 5.14 muestra una fotografía del sensor de caudal y del dispositivo de lectura complementaria en funcionamiento.

El diagrama de conexión tanto del sensor al CR1000X como del lector auxiliar se muestra el Anexo E. Por su parte el código de programación del lector auxiliar se encuentra disponible en el Anexo F.

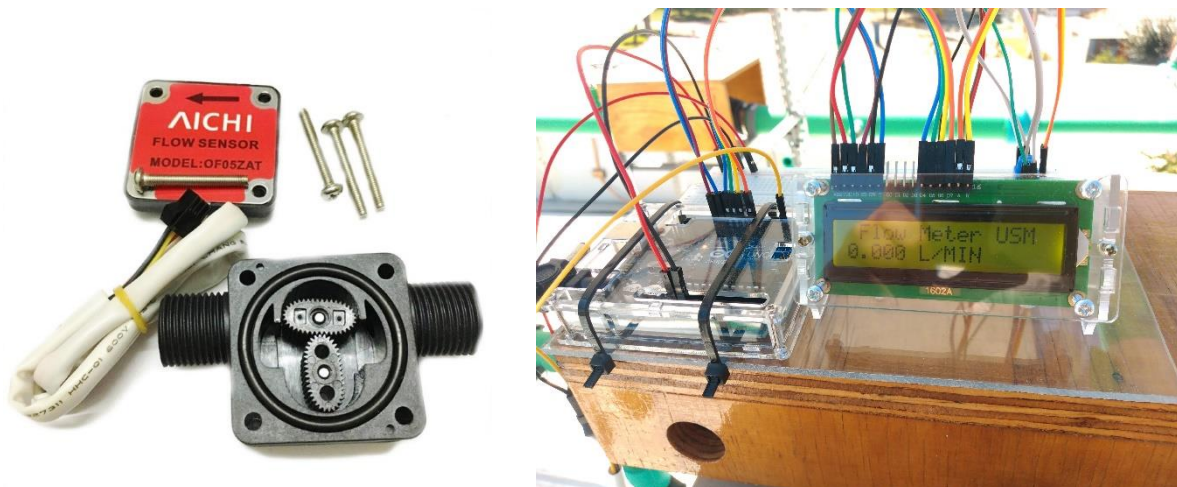


Figura 5.14. Caudalímetro. Izquierda, flujómetro de rodete y efecto Hall. Derecha, dispositivo de lectura complementaria.

5.3.3. Calibración del caudalímetro

Para determinar el factor k de manera precisa es necesario contar con un recipiente graduado o una pesa y un microcontrolador o datalogger con el cual sea posible determinar pulsaciones cuadradas con un valor máximo de 3,5 a 12 volts. El procedimiento consiste en alimentar el caudalímetro con diferentes volúmenes de agua, y en cada oportunidad constatar la cantidad de pulsaciones que el sensor Hall emitió. Es recomendable realizar a lo menos diez mediciones, con diferentes cantidades de agua entre 1 y 5 litros. Es recomendable además que el agua fluya de manera continua dentro del instrumento. A partir de los valores obtenidos se calcula para cada medición la constante de conversión k a partir de la ecuación 5.4. Una vez obtenidos los resultados, se calcula una media aritmética y se obtiene el valor k representativo.

$$k = \frac{\text{pulsaciones}}{\text{volumen desplazado} \cdot 60[\text{s}]} \quad (5.4)$$

Para la calibración particular de modelo OF05ZAT se utilizó un microcontrolador Arduino Uno para determinar el número de pulsos por unidad de volumen. El código utilizado trabaja como contador de pulsos a partir de la tensión de Hall del sensor. Para fluir agua a través de los rodets del sensor se utilizaron dos flexibles de 1/2" conectados a cada extremo, y una salida de estanque conectada a un recipiente (ver Figura 5.15). Siguiendo las normas expuestas anteriormente, se hizo fluir diferentes volúmenes de agua utilizando presión ambiental y constatando previamente la masa de agua. Se tomaron diez mediciones de la acumulación de pulsaciones (ver Anexo G), dando como promedio un pulso de flujo de $2,48773 \left[\frac{\text{Hz} \cdot \text{min}}{\text{L}} \right]$ valor muy cercano al recomendado por el fabricante.

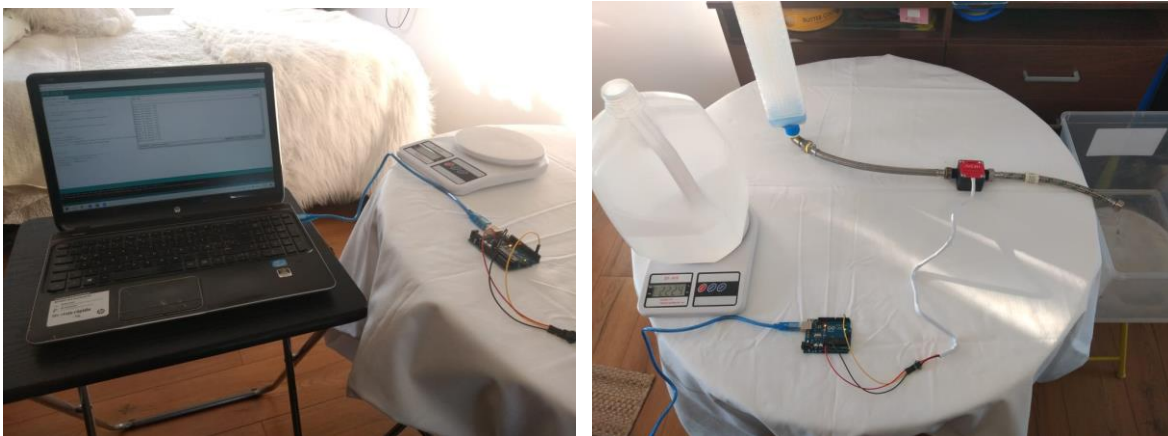


Figura 5.15. Arreglo de trabajo. Izquierda, computador utilizado para adquirir las señales del sensor. Derecha, conexionado de tuberías flexibles al sensor.

5.3.4. Instalación del caudalímetro

Respecto a la instalación del caudalímetro en su ubicación final, esta consistió únicamente en realizar una pequeña extensión de 30 cm al cable del sensor y roscar con teflón los conductos de entrada y salida a los terminales de ½” dispuestos en el piping. El cable se aisló dentro del gabinete eléctrico con una prensaestopa PG7.



Figura 5.16. Caudalímetro en su ubicación final.

5.4. Piranómetro

La única variable de funcionamiento que resulta imposible controlar es la radiación, ya sea en el plano inclinado u horizontal. Esta tiene que ver con condiciones tanto climatológicas como temporales y afectan de manera dramática la performance del equipo desalinizador. En ese sentido es muy relevante para el estudio futuro de la planta el tener claramente definidas las condiciones de radiación.

5.4.1. Base teórica del piranómetro

El piranómetro es un instrumento utilizado para medir la radiación solar incidente sobre una superficie, generalmente orientada horizontalmente. Este instrumento mide la radiación hemisférica (directa más difusa). Su método de funcionamiento se basa en una termopila, la cual capta el flujo de calor originado por la radiación y produce una diferencia de voltaje en función de ella, es por esto que no requiere una corriente de excitación para funcionar.

5.4.2. Configuración del piranómetro

Para el registro de radiación se utilizó un piranómetro disponible por el LER, marca EKO, modelo ML-01 (ver Anexo D). Es un sensor de tipo industrial especialmente diseñado para medir los ratios de rendimiento en las plantas PV. Las dimensiones compactas del cuerpo del sensor hacen que se integre fácilmente a cualquier aplicación con o sin su placa de montaje. El detector de poli-silicio con difusor resistente a UV puede dar una buena respuesta coseno de la radiación incidente incluso en ángulos de elevación solar bajos. Los efectos de suciedad y depósitos de agua en la parte alta del difusor se pueden minimizar gracias a su geometría cónica

Para registrar los valores de radiación desde el piranómetro al datalogger se agregó una función de voltaje diferencial en el código CR1000X, incluyéndose directamente como factor multiplicador la sensibilidad del instrumento según la ecuación 5.5.

$$H [W/m^2] = \frac{\text{Voltaje diferencial [mV]}}{\text{sensibilidad} \left[\frac{\mu V}{W \cdot m^{-2}} \right] \cdot 1000 \left[\frac{m}{\mu} \right]} \quad (5.5)$$

5.4.3. Instalación del piranómetro

La instalación se realizó a un costado del humidificador, con un ángulo de inclinación igual al del panel PV. El sensor se apernó a la estructura metálica y el cable conductor se condujo hasta el gabinete, protegiéndolo dentro con prensaestopa PG7. El diagrama de cableado se puede consultar en el Anexo E. Por último la Figura 5.17 muestra la ubicación final del piranómetro en el equipo.



Figura 5.17. Piranómetro en su posición final.

5.5. Medidor de destilado

Uno de los factores claves para definir el rendimiento de la planta destiladora tiene que ver con la cantidad de destilado diario que produce. Sin embargo hacer una medición manual diaria no permite un análisis detallado de los factores que puedan influir en la condensación, es por eso que ser capaces de identificar el volumen de producción de destilado en función del tiempo de funcionamiento, de manera automatizada, fue uno de los grandes desafíos referentes a la instrumentación del sistema. El problema se intentó abordar desde varias aristas:

- Medir masa de agua mediante una pesa digital.
- Medir masa de agua mediante un transductor piezoeléctrico.
- Medir altura de columna de agua mediante un sensor de nivel de ultrasonido.
- Medir nivel de agua mediante un sensor magnético móvil.
- Utilizar una cámara de video para registrar las variaciones de volumen.

Las opciones más convincentes tenían que ver con la medición del nivel de agua, sin embargo tanto el sensor ultrasónico como el magnético tenían costos asociados elevados. Fue por eso que se decidió utilizar una solución intermedia: un sensor de nivel estático. De esta forma se mediría el volumen de destilado de forma discreta en lugar de continua pero a un costo notablemente menor. Esta nueva idea conllevaba además la necesidad de evacuar una cantidad uniforme de agua cada vez que el nivel era alcanzado, para lo cual se decidió utilizar una electroválvula. De esta forma se adquirieron el sensor de nivel de líquido sin contacto, modelo XKC-Y25-T12V (ver Anexo D) y una electroválvula de 12V. En la Figura 5.18 se pueden observar estos dos instrumentos.



Figura 5.18. Sensor de nivel y electroválvula adquiridas para el medidor de destilado.

5.5.1. Programación del medidor de destilado

Para registrar de manera efectiva los volúmenes discretos de destilado a medida que se van produciendo se programó una función de voltaje diferencial en el datalogger. Esta función está encargada de medir la variable *water_level*. Esta señal es binaria: alta (5V) o baja (~0V) y depende del funcionamiento del sensor de nivel exclusivamente, que actúa como switch; esto quiere decir que emite una señal alta en caso de detectar agua o no emite señal en lugar de no detectar agua. La energización del sensor de nivel se hace desde el datalogger mismo, con una señal de salida de 5V, (la misma utilizada para el caudalímetro). Para el funcionamiento iterativo del medidor de destilado se incluyó una función condicional *if* dentro del código, la cual se activa únicamente si la señal de *water_level* es alta (mayor a 2000 mV). De cumplirse la condición, el puerto SW12-1 del datalogger se energiza durante un tiempo de 1,5 segundos (definido por el usuario). Esta energización de 12 V es utilizada para activar la electroválvula y evacuar el agua del receptáculo de medición (ver Figura 5.19).

Lamentablemente al realizar las primeras pruebas se descubrió que la electroválvula no era capaz de evacuar agua al estar a presión atmosférica. Por ello se reemplazó por una mini bomba de agua sumergible (ver Anexo D), que trajo la ventaja de poder devolver el agua medida al sistema, de forma que no haya pérdidas ni necesidad de manipulación. La resolución de 1 ms del datalogger permite virtualmente que la discretización de las mediciones sea casi continua, sin embargo se consideró que la mini bomba podría tener problemas al funcionar a intervalos de tiempo tan cortos.

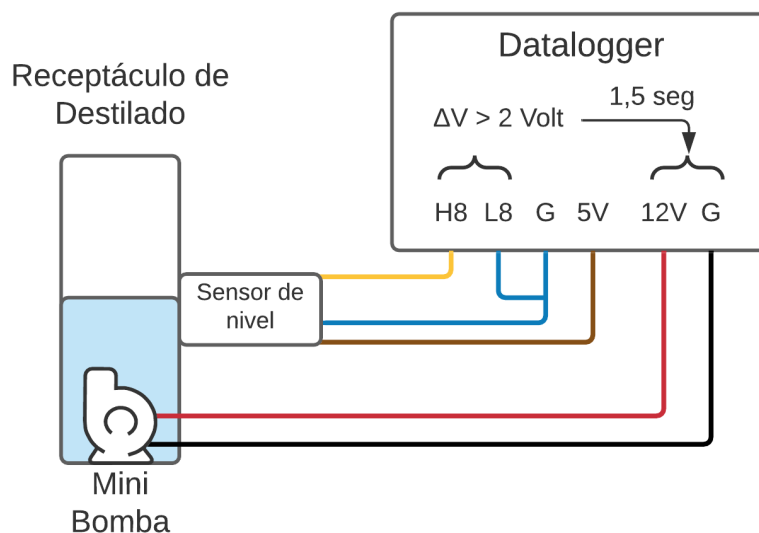


Figura 5.19. Esquema explicativo del medidor de destilado. Elaboración propia.

5.5.2. Calibración del medidor de destilado

La calibración del medidor de destilado diseñado consiste en la determinación de la cantidad de agua que es evacuada por la mini bomba en cada iteración de 1,5 segundos. Para medir tal variable se utilizó una pesa y un depósito de agua, tal como se puede observar en la Figura 5.20. El experimento consistió en medir la masa de agua desplazada por la bomba, forzando la elevación del nivel. Se midió la cantidad de agua acumulada para evitar errores relacionados a agua residual. Además se procuró que la cantidad de agua suministrada artificialmente al receptáculo de medición se hiciera lentamente, simulando las condiciones de funcionamiento postreras.

Tomando 20 mediciones se midió un volumen promedio de destilado de 39,6 [ml] por evacuación (ver Anexo G), el cual se incluyó en el código del registrador.



Figura 5.20. Arreglo utilizado para la calibración del medidor de destilado.

5.5.3. Instalación del medidor de destilado

La instalación consistió en la extensión de cables y la fijación del sensor de nivel y la mini bomba. Tras constatar que el sensor era capaz de detectar agua a través de vidrio se intercambió el receptáculo de destilado plástico por uno de vidrio. Por último se fijó la manguera de evacuación de destilado de la mini bomba, para evitar desajustes en su posición.

Dos aspectos importantes del funcionamiento tienen que ver con la ubicación del sensor; al tratarse de un dispositivo que mide diferencias de volumen, y utilizar un recipiente de diámetro constante, no afecta a la medición la altura a la cual esté dispuesto el sensor, siempre y cuando esté por encima de la bomba y no se mueva durante mediciones consecutivas. Otra condición importante tiene que ver con el conducto de aspiración de la mini bomba, cualquier obturación de este, ya sea por cercanía a las paredes de receptáculo o por basura, conlleva a errores críticos de lectura del sistema. Por esto es altamente recomendable fijar la bomba con las ventosas incluidas en la parte inferior y fijar la manguera de aspiración.

5.6. Anemómetro

Dentro de la instrumentación el anemómetro es el único equipamiento utilizado que no tiene un registro de datos en el datalogger. Se decidió utilizar un anemómetro portátil para identificar la velocidad de aire dentro del equipo, y con ello el caudal. La selección del anemómetro se basó en tecnología, calidad y precio. Siendo finalmente seleccionado uno de hilo caliente, marca Improtek, modelo PCE-423, cuyas características se pueden leer en detalle en el Anexo D.

5.6.1. Base teórica del anemómetro

Un anemómetro es un instrumento capaz de medir la velocidad o rapidez de los gases, ya sea en un flujo contenido o no confinado. Un anemómetro puede medir la magnitud de la velocidad total, la magnitud de velocidad en un plano, o el componente de velocidad en una dirección específica. Existen cuatro tecnologías básicas de medición: de hilo caliente, de copas, de álabes y de Pitot. La Tabla 5.7 muestra una comparativa entre sus características.

Tabla 5.7. Comparación entre tecnologías de anemómetros. Elaboración propia.

Característica	Álabes	Copas	Hilo caliente	Pitot
Principio de funcionamiento	Rodete que interactúa con el fluido. Relaciona movimiento rotacional y velocidad lineal		Relaciona entre la transferencia de calor y velocidad	Relaciona diferencias de presión ambiental y de impacto
Medición	Velocidad media	Velocidad media en el plano perpendicular	Velocidad de sección transversal	Velocidad de sección transversal
Uso	Meteorológico - industrial	Meteorológico	Industrial	Industrial – ambientes severos
Rango de medición	Alto	Alto	Bajo	Bajo
Precisión de medición	Baja	Baja	Alta	Alta
Precio	Bajo	Bajo	Medio	Alto

El principio físico que rige el funcionamiento del anemómetro de hilo caliente es el llamado “transferencia de calor por convección entre el hilo calentado”. El elemento sensor o hilo caliente se encuentra expuesto al flujo circulante, con la finalidad de medir el intercambio térmico producido entre los dos “dientes”. La relación existente entre circulación de flujo y tensión de salida se calcula mediante la aplicación de ecuaciones de transferencia de calor, tomando por referencia la potencia generada por la corriente eléctrica que pasa por el hilo. El sensor es calentado por una corriente eléctrica y enfriado proporcionalmente, de acuerdo a la componente de la velocidad del aire que incide perpendicular al elemento sensible.

5.6.2. Protocolo de medición

Para realizar las mediciones de caudal a partir de la velocidad transversal se seleccionó una ubicación específica del piping, de sección conocida. En este punto se instaló un terminal roscado de 1”. Este terminal, utilizado también para devolver el agua destilada medida al sistema, consta de una prensaestopa encargada de sellar la varilla de medición del anemómetro cada vez que se desea realizar una medición, tal como se puede observar en la Figura 5.21.



Figura 5.21. Anemómetro. Izquierda, modelo PCE-423 en su caja. Derecha, toma de mediciones en la planta.

Las mediciones deben realizarse utilizando la función *mean temporizador* del anemómetro, la cual mide continuamente la velocidad del fluido durante un tiempo definidor por el usuario (en el

caso del proyecto 1 min), luego la función calcula la media aritmética en base a los valores registrados durante ese tiempo. Es importante que antes de cada medición sea ajustado a cero el sensor, cubriendo la punta de la varilla con el protector y pulsando durante 2 segundos el botón *hold zero*. Es importante también que la varilla quede centrada en la tubería, para tomar una muestra representativa. Por último es vital que se introduzca de manera correcta la varilla dentro del conducto de medición, haciendo coincidir la dirección del flujo con la flecha indicadora. Respecto a la medición misma, se asumió un flujo desarrollado y por tanto que la velocidad medida es representativa en la sección de medición. Se procuró integrar directamente en el sensor el área de la sección en medición ($0,006082 \text{ m}^2$), para que entregara directamente los valores de caudal. Sin embargo el dispositivo solo aceptaba como unidad del SII el m^2 y al tratarse de una sección tan pequeña en esa unidad el dispositivo no era capaz de almacenarla.

5.7. Detalles finales de la instrumentación

Aunque en comparación a la construcción, la instrumentación parece una labor que no demanda mucho tiempo, lo cierto es que el costo temporal asociado a la planificación, cotización, compra, programación, calibración e instalación es comparable al de construcción. Existen una infinidad de pequeños detalles asociados a esta labor que por extensión no pueden incluirse dentro de este informe pero que sin lugar a dudas han generado un crecimiento y aprendizaje. Cabe señalar por último que el soporte técnico brindado por el personal de Campbell Scientific y Federico Castillo, del departamento de Mecánica, fue fundamental a la hora de conseguir interiorizarse en la programación de los sensores. A pesar del idioma, pandemia y distancia, la comunicación fue fluida y rápida.



Figura 5.22. Fotografía de los instrumentos utilizados.

Capítulo 6

Implementación de mejoras

El funcionamiento del prototipo original del desalinizador HDH, al igual que la performance de la planta presentada en este trabajo, sacaron a relucir varias falencias u opciones de mejora que no se encontraban contempladas en el diseño. La principal de ellas tiene que ver con la incapacidad que tiene la planta para reproducir fidedignamente las condiciones de flujo de agua abierto, con todo lo que aquello representa. Otras mejoras tienen que ver con ampliar la gama de opciones a la hora de establecer variables de funcionamiento. Por último existen factores relacionados a la practicidad y mantenibilidad que también se modificaron. En este capítulo se abordarán todas las mejoras implementadas, separándolas en estos tres grupos.

6.1. Reproducción de condiciones de ciclo de agua abierto (OW)

Como ya se vio en el capítulo 3, el prototipo de desalinizador que se decidió diseñar y construir funciona en base al método HDH con circulación de aire cerrada y circulación de agua abierta (CAOW), esto quiere decir que el aire circula dentro del sistema y el agua se recambia permanentemente. La circulación permanente del agua implica que sus condiciones de entrada son siempre iguales (temperatura, salinidad, turbiedad, etc.), y estas dependen de la naturaleza del afluente de agua. Para que el uso del desalinizador no genere perturbaciones notables en la fuente de agua, esta debe ser grande como un mar, río, lago o piscina, volúmenes a los cuales no se tiene acceso durante esta fase de estudio. La única fuente de agua de tales características, disponible en la ciudad, es la red de agua sanitaria, sin embargo desperdiciar un caudal de entre 4 y 8 [l/min] durante varias horas al día traería un costo elevado y permanente que se decidió evitar.

Dicho lo anterior la única solución que se encontró para simular de la mejor manera posible las condiciones de un ciclo de agua abierto fue forzar la temperatura del agua, enfriando la salmuera de rechazo antes de que vuelva al estanque de almacenamiento. Además, con tal de evitar la transferencia de calor entre el fluido y el ambiente se decidió aislar las tuberías de PPR e instalar coberturas en el estanque y destilador.

6.1.1. Enfriador de salmuera de rechazo

Se barajaron varias tecnologías de enfriamiento continuo de agua, entre ellas intercambiadores de calor, chilliers, o refrigeradores. Finalmente se decidió enfriar el agua intercambiando su calor con el ambiente mediante un ventilador que forzara la transferencia de calor por convección en un intercambiador de flujo cruzado y fluidos no mezclados.

Para seleccionar el tamaño del intercambiador preferible dentro de los disponibles en el mercado se hizo una simulación numérica sencilla en el programa EES, cuya metodología consistió en calcular los coeficientes de convección y luego aplicar el método de eficiencia NTU mediante la librería en EES para definir el calor transferido entre fluidos (caliente y frío), y la temperatura de salida del fluido caliente (agua). Estos cálculos se hicieron tomando en cuenta variables geométricas que definieran el área de contacto interno y externo del intercambiador, en base a la disponibilidad del mercado. Las ecuaciones utilizadas para la resolución del problema se encuentran disponibles en el Anexo A. El código en EES se encuentra en el Anexo I. Las suposiciones que se tomaron para la resolución del problema fueron las siguientes:

- Transferencia de calor en estado estacionario.
- Intercambiador de flujo cruzado y fluidos no mezclados.
- Tubos de pared delgada y alta conductividad. No se considera conducción.
- c_p , ρ , k , ν , y α fijos para una temperatura de 25°C.
- Se conocen las temperaturas de entrada.
- La velocidad del aire es conocida.

Los resultados para una gama amplia de configuraciones geométricas se muestran en el Anexo H, sin embargo el análisis se centró en cuatro geometrías particulares, con el objeto de seleccionar la mejor combinación de transferencia de calor y costo. Estas cuatro geometrías se presentan en la Tabla 6.1, con sus respectivos resultados y precios.

Tabla 6.1. Resumen de resultados obtenidos mediante la simulación en EES del intercambiador de calor.

No	Precio [CLP]	Largo tubos [m]	No. Tubos	Diámetro Tubos [m]	Calor [W]	$T_{hot,out}$ [K]
1	42.000	0,53	30	0,0095	248,4	302,1
2	80.000	0,63	36	0,0095	271,7	302
3	62.990	0,24	18	0,0050	86,28	302,7
4	49.990	0,36	18	0,0050	107,3	302,6

Las dos primeras opciones corresponden a “radiadores” de diferentes modelos de automóviles, las dos últimas son “radiadores” para computadores de la misma gama pero distinto largo. En base a los resultados la segunda opción es la que provee una mayor remoción de calor, sin embargo la diferencia con la primera opción es muy pequeña y en cambio la diferencia de precios es de casi el 50%. Es por eso que se decidió adquirir el segundo intercambiador el cual corresponde al modelo Corsa 1.6, con electro ventilador de 12V y 300W de potencia.

Para su instalación se debió modificar la estructura metálica del humidificador y el piping de retorno de agua. Se apernó una barra de perfil cuadrado de acero galvanizado perforada para poder enganchar el intercambiador nuevo de forma fija pero no permanente. En paralelo se termofusionó la tubería de 20 [mm] añadiéndose una conexión en bypass hacia el intercambiador, con válvulas de bola (ver planos en Anexo J). La conexión entre el PPR y la entrada y salida del panel se hizo con una manguera para agua de 32 mm, fijada con abrazaderas de cremallera. Respecto a la conexión eléctrica se adquirió una fuente de poder de 12V y 25 A, la cual se conectó a la red eléctrica dentro del gabinete eléctrico. Finalmente se instaló un interruptor on/off para encender y apagar el electroventilador fácilmente. La Figura 6.1 muestra el equipo antes de instalarlo y el proceso de instalación.



Figura 6.1. Enfriador de agua. Arriba, equipo antes de instalar y estación de trabajo. Abajo, intercambiador instalado visto desde el frente y atrás.

6.1.2. Aislación de tuberías y componentes

Con tal de reducir la injerencia del medio en la temperatura del flujo de agua dentro del sistema es que se decidió aislar térmicamente todas las tuberías de PPR de 32 y 20 mm. Para hacerlo se eligieron coquillas de polietileno con papel de aluminio, sin embargo estas venían en dos grosores diferentes, 10 y 19 [mm]. Para seleccionar el grosor se programó en ESS una simulación sencilla. Dado que el único propósito de la simulación era evaluar el grosor más rentable para la aplicación es que se consideró que el efecto de la radiación y la convección sería aproximadamente igual al aplicar aislante de 10 o 19 mm, a pesar del cambio en el diámetro externo.

La metodología usada fue aplicar un modelo de analogía eléctrica para determinar la UA del sistema para tuberías PPR de 32 y 20 mm con aislación de espesor variable (ver Figura 6.2). Las ecuaciones utilizadas pueden encontrarse en el Anexo A y el código programado en el Anexo I. Para ambas tuberías se creó una tabla paramétrica que considerara como variable el espesor del polietileno entre 0,001 y 20 mm, cuyos valores tabulados pueden hallarse en el Anexo H.

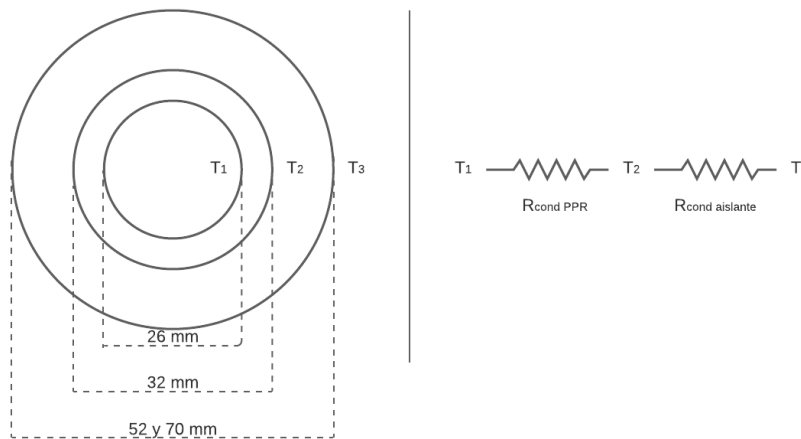


Figura 6.2. Analogía eléctrica utilizada para la simulación simple del efecto del espesor en UA. Elaboración propia.

El resumen de los resultados, expuesto en la Tabla 6.2, muestra que la capacidad de aislación del polietileno aumenta con el espesor. Sin embargo también es posible notar que el aumento marginal del coeficiente de transferencia de calor total disminuye notablemente más allá de los 10 mm de espesor y en cambio el precio aumenta considerablemente, casi el triple en el caso de \varnothing 20 mm y el quíntuple en el caso de \varnothing 32 mm. Por ejemplo, para las coquillas de 32 mm el valor del UA sin aislación es de $43,57 \left[\frac{W}{K} \right]$, lo que quiere decir que disminuir la transferencia un 1,95% extra desde el espesor 10 a 19 mm implica quintuplicar el costo. Por esto se decidió utilizar un espesor de 10 mm.

Tabla 6.2. Resumen de los resultados obtenidos de la simulación simple en ESS de aislación de tuberías.

Diámetro[mm]	Espesor [mm]	Precio [CLP/m]	UA [W/K]
20	0	0	40,55
20	10	1.125	1,818
20	19	3.211	1,203
32	0	0	43,57
32	10	1.310	2,558
32	19	6.703	1,623

La instalación se realizó utilizando silicona en los intervalos cortos y amarras plásticas en los intervalos largos de aislante. Para los fittings de geometrías intrincadas se utilizó cinta adhesiva elastomérica de 50x3 mm. Siguiendo la misma ideología se fabricaron dos estructuras de madera encargadas de cubrir el estanque y el condensador de la radiación solar directa y el viento. La Figura 6.3 muestra el estado final de aislación en diferentes lugares de la planta.



Figura 6.3. Aislación de tuberías de 20-32 mm, cobertura de estanque y cobertura de condensador.

6.2. Ampliación de opciones de funcionamiento

Al tratarse de un modelo experimental basado en una patente nueva, ser capaces de probar diferentes condiciones de funcionamiento es vital para lograr confirmar o descartar la eficacia de la planta y en caso afirmativo encontrar un punto óptimo de funcionamiento. Es por ello que la capacidad de variar el flujo del aire y agua dentro del sistema fue algo que se buscó y consiguió durante el diseño del piping y el conexionado eléctrico, añadiendo una válvula de asiento y un potenciómetro respectivamente. En esta misma tónica es que se decidió mejorar el ramal de rociadores.

6.2.1. Modificación de ramal de rociadores

Esta mejora consistió en agregar un tercer conector para aspersor, de forma que se pudiera ampliar las opciones geométricas de atomización y probar el funcionamiento de la planta con distintos caudales de alimentación. Tal como se puede observar en la Figura 6.4, la idea fue cubrir los espacios que la forma cónica del jet de agua no alcanza en el modelo de dos aspersores, aunque esto implique superponer la superficie mojada en ciertos puntos. Para conseguirlo se modificó el diseño original del ramal de aspersores en PPR (Droguett, 2021), añadiendo una tee con terminal de ½" HI en la parte central. Los planos detallados de esta variación se encuentran en el Anexo J.

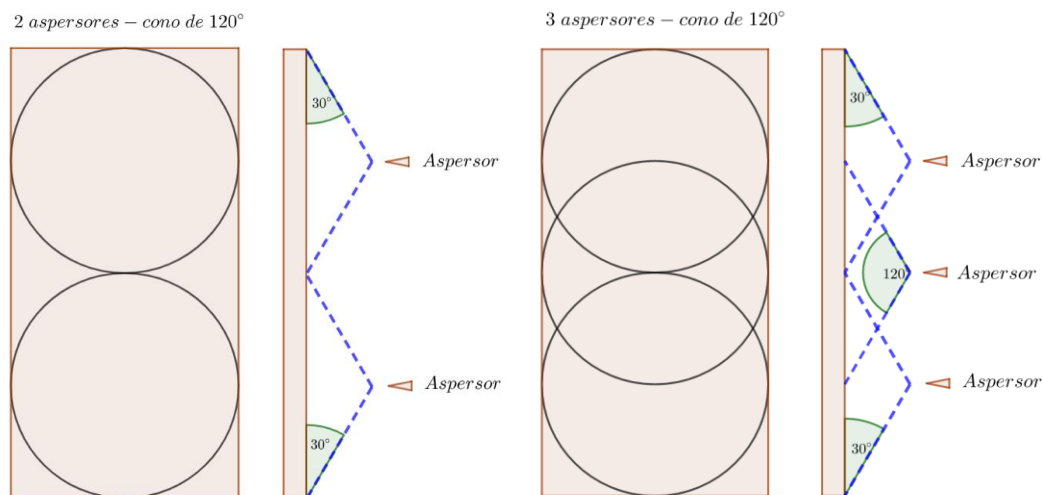


Figura 6.4. Esquema de modificación de ramal de aspersión. Izquierda diseño propuesto por Droguett. Derecha, diseño nuevo. Elaboración propia.

6.2.2. Ventanilla de inspección

Para poder estudiar el impacto del jet de agua, ya sea con dos o tres aspersores, sobre la cara trasera del panel PV, se decidió instalar una ventanilla de acrílico sobre una de las caras del humidificador. La construcción consistió en realizar un agujero de 4" con copa sierra y taladro, luego aplicar sellador para ventanas y unir el acrílico, presionando bien para asegurar un sello perfecto. Se decidió instalar en el centro del humidificador para tener visión completa del funcionamiento interior. La Figura 6.5 muestra la fabricación de la ventanilla.

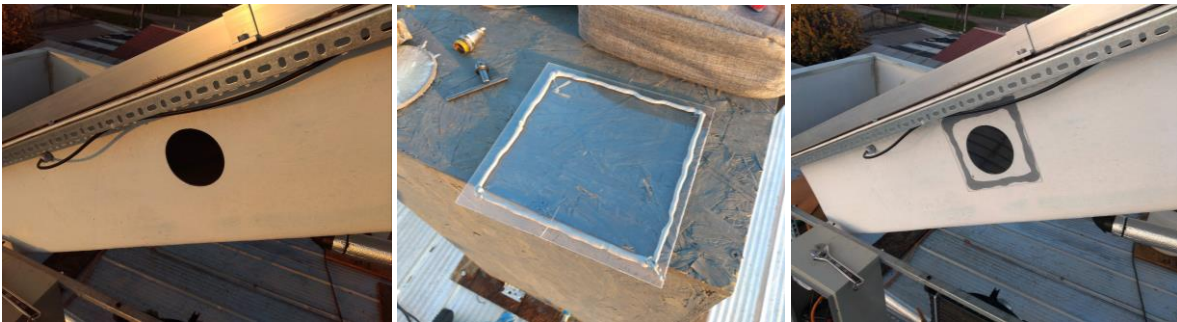


Figura 6.5. Construcción de ventanilla de inspección.

6.3. Modificaciones prácticas

Tal como se dijo en principio también se modificaron algunos aspectos pequeños de la planta, con tal de asegurar una confiabilidad prolongada de los equipos o arreglar detalles pequeños. Algunas modificaciones fueron introducidas durante la fabricación, otras durante la puesta en marcha y las restantes luego de la instrumentación. Todas ellas se comentan brevemente a continuación:

- a. **Cambio en la posición de uniones americanas de 110 mm:** Mejora encargada de otorgar libertad en la definición del ángulo de inclinación del humidificador/panel PV.
- b. **Fabricación de estructuras de protección para bombas, ventilador y calentador:** Mejora pensada para asegurar la protección de elementos críticos de los efectos de la intemperie.
- c. **Utilización de segundo gabinete eléctrico para conexiones de 220 V:** Mejora pensada para proteger las conexiones eléctricas de la lluvia y el polvo. Se utilizó un gabinete IP-65, idéntico al usado por el datalogger.
- d. **Mejoramiento de calentador de agua:** Se manipuló internamente el calentador de agua para eliminar la brusca reducción de sección en el switch de accionamiento, que producía un descenso severo de caudal. Ahora el calentamiento se inicia haya o no flujo de agua dentro.

- e. **Temporizador digital:** La conexión a un temporizador digital permitió el encendido y apagado automático de la planta, de forma que los datos fuesen recolectados de forma automática.
- f. **Mejoramiento de trampa de agua para destilación:** La forma original del conducto de goteo de destilado producía constantemente pérdidas de un alto porcentaje de destilado durante el funcionamiento de la planta. Modificando la dirección de la tubería se aseguró que la caída de las gotas de destilado sea controlada. Además la unión americana da acceso fácil para el rellenado de la trampa de agua.
- g. **Instalación de llave de bola para evacuación de estanque principal:** El objeto de esta mejora es poder evacuar y rellenar con facilidad el estanque de almacenamiento de agua, de forma que realizar recambios de agua y mantenimiento general sea fácil.
- h. **Mejoras estéticas:** Se eliminaron las marcas de fábrica del humidificador y se pintó el acrónimo de la universidad.



Figura 6.6. Mejoras. Arriba, temporizador marca Nashone, trampa de agua para destilado mejorada y válvula para recambio de agua. Abajo, estado final del equipo.

Capítulo 7

Propuesta de datos

Con tal de estudiar las mejoras, dejar patente el funcionamiento de los sensores y la automatización de la recolección de datos es que se definió y adquirió una matriz de datos de una extensión de 14 días de duración. Se seleccionaron las condiciones de funcionamiento para que fuese posible categorizar la performance antes y después de la aplicación de las mejoras, en distintas condiciones de caudal y geometría de aspersión variada. La Tabla 7.1 deja patente las condiciones de los distintos experimentos realizados, los días en que se realizaron, condición climática y desempeño. Además se realizaron dos pruebas extras que se dejaron registradas al final de la tabla. Dado su extensión, los datos completos de funcionamiento no pueden ser anexados a este trabajo y quedarán a disposición del LER. Cabe destacar que los valores de caudal de agua expuestos son aproximados, durante el funcionamiento varían levemente quedando registrada esta variación. Además el caudal de aire se midió con anemómetro diariamente, por lo que el valor de potencia es de referencia.

Tabla 7.1. Matriz de datos recopilados durante 16 días.

Test	Fecha	Aislación	Calentador	Enfriador	Asp.	Caudal agua [l/min]	Potencia aire [%]	Tiempo	Destilado [ml]
1	07-05	✗	✗	✗	2	4,0	100	☀	303,00
	09-05	✗	✗	✗	2	4,0	100	☀	320,00
2	10-05	✗	✗	✗	2	4,0	50	☀	396,00
	11-05	✗	✗	✗	2	4,0	50	☀	475,40
3	12-05	✗	✗	✗	3	4,0	100	☀	358,36
4	14-05	✗	✗	✗	3	4,0	50	☀	317,00
5	17-05	✓	✗	✓	3	5,0	100	☀	435,60
6	21-05	✓	✗	✓	3	5,0	50	☁	356,40
7	22-05	✓	✗	✓	2	4,0	100	☀	396,00
	23-05	✓	✗	✓	2	4,0	100	☀	396,00
8	24-05	✓	✗	✓	2	4,0	50	☀	435,60
	25-05	✓	✗	✓	2	4,0	50	☀	396,00
9	28-05	✓	✓	✗	2	4,0	50	☀	712,80
10	30-05	✓	✓	✗	2	4,0	100	☀	435,60
11*	13-05	✗	✗	✗	3	4,0	100	☁	0
12*	26-05	✓	✗	✗	2	4,5	25	☀	118,8

7.1. Análisis cualitativo de datos

A partir de los datos recopilados fue posible sacar algunas deducciones. En la Figura 7.1 se puede ver el desarrollo diario del condensado obtenido, tabulado en el eje derecho. Por su parte en el izquierdo se pueden apreciar las temperaturas durante el día, en distintos puntos estratégicos de la planta designados por números:

1. Temperatura del agua antes del condensador
2. Temperatura del agua después del condensador/antes del calentador
3. Temperatura del agua después del calentador/antes de humidificador
4. Temperatura del aire después del condensador/antes del humidificador
5. Temperatura del aire después del humidificador/antes del condensador

El primer punto notable que resalta de un análisis de desempeño tiene que ver con la importancia de la temperatura para la obtención de destilado. Al realizar una comparativa de temperaturas entre días en los cuales no se hizo uso del calentador, se comprobó que el día en que se alcanzaron temperaturas de agua y aire más altas se obtuvo un mayor volumen de agua fresca (Martes 11 de Mayo).

Respecto al enfriador, se puede ver que tiene la capacidad suficiente para generar un impacto en la temperatura del flujo de agua. Entre el 17 de Mayo y el 24 de Mayo se hizo funcionar a distintas horas del día y se constató una reducción de la tendencia de la temperatura del flujo al encenderlo (ver Figura 7.1). Por su parte el 25 de Mayo se hizo funcionar el enfriador durante todo el día, esto trajo como resultado que la curva de aumento de temperatura fuese muy estable durante todo el día, dado que la temperatura del agua se adaptó a las variaciones de temperatura ambiental, la cual no alcanza valores tan altos como la placa del PV, pero aumenta de forma proporcional a la irradiancia durante el día. También se puede ver que se produjo una diferencia casi constante entre la temperatura del aire antes y después de salir del condensador, sin embargo la temperatura máxima alcanzada por el aire fue menor a la típica alcanzada sin el uso del enfriador. Aunque es posible ver variaciones térmicas al usar el enfriador, su uso no supuso un cambio notable en la obtención de destilado, ni para bien ni para mal. A pesar de que es muy precipitado descartar su funcionalidad, dado que las condiciones de los días son variables y se construyó pensando en días de verano extremadamente calurosos, es posible que propiciar condiciones favorables para la destilación en el intercambiador de calor a su vez traiga efectos desfavorables en la temperatura del aire húmedo, el cual es capaz de transportar mayor humedad a medida que mayor temperatura posee.

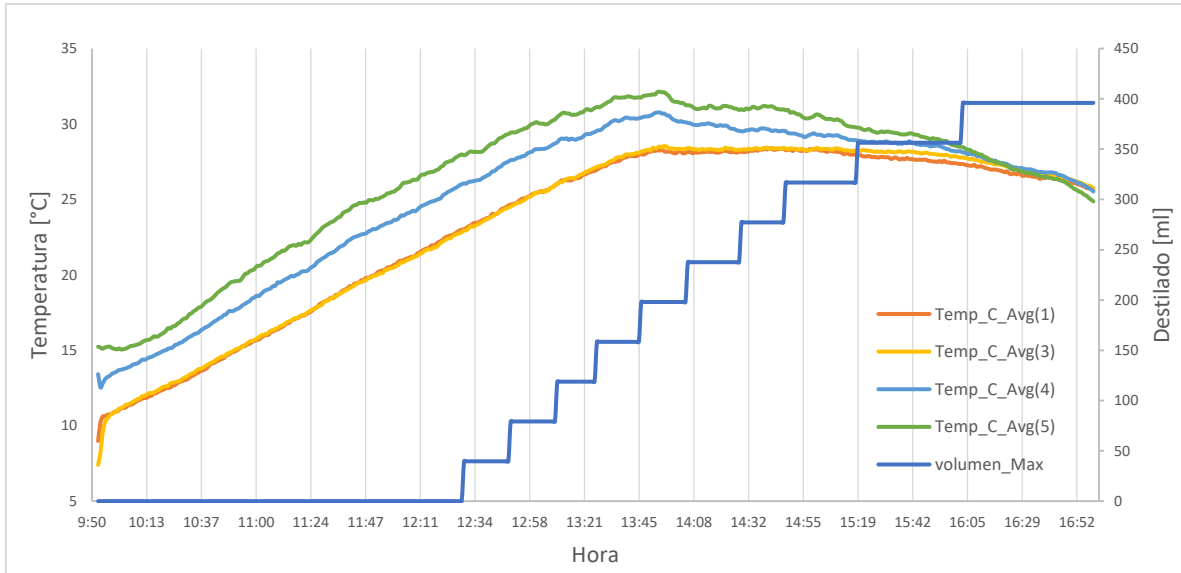


Figura 7.1. Gráfico del desempeño del equipo desalinizador el Domingo 23 de Mayo del 2021. Enfriador de agua encendido a las 13:45 horas y apagado a las 17:00 horas.

Respecto al calentador de agua, a pesar de haber sido utilizado en solo dos de las diez pruebas, mostró ser notablemente efectivo para precalentar el agua durante la primera hora de funcionamiento, especialmente el día 28 de Mayo. Con él se logró reducir notablemente el tiempo entre la puesta en marcha y la primera activación del sensor de nivel, tal como se puede ver en la Figura 7.2. Es imposible comprobarlo pero es muy posible que la aislación haya jugado un papel preponderante en la mantención de la temperatura del agua durante y después del calentamiento.

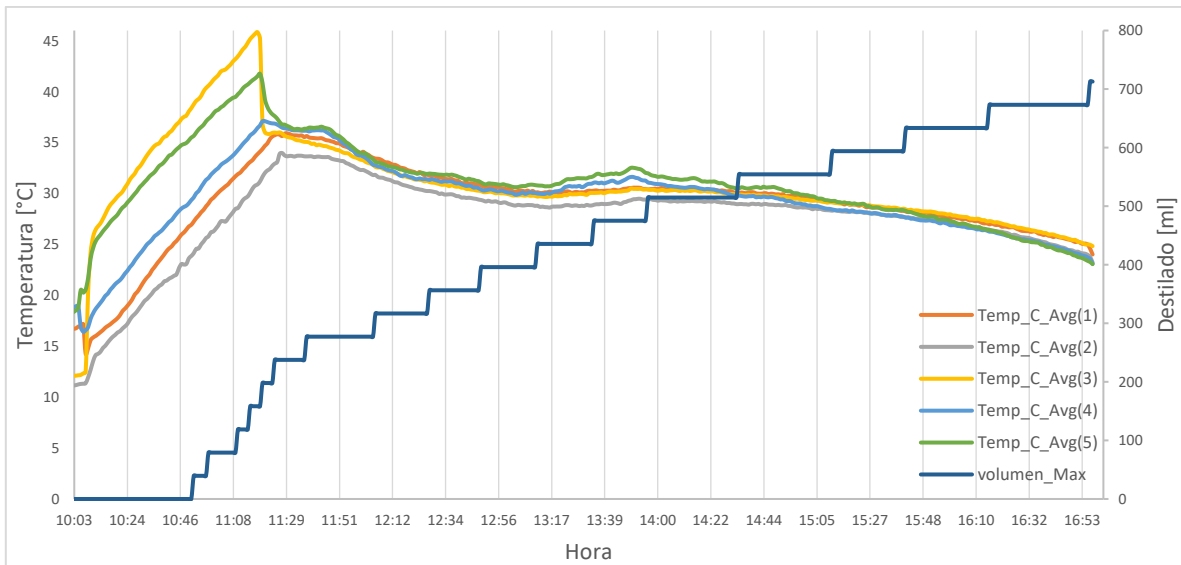


Figura 7.2. Gráfico del desempeño del equipo desalinizador el Viernes 28 de Mayo del 2021. Calentador de agua encendido a las 10:00 horas y apagado a las 11:15 horas.

Respecto al caudal de agua, se anticipaba en base a la experiencia de Droguett y la experiencia propia previa a la instrumentación, que el uso de un caudal de 4 l/min sería favorable frente a otros más grandes. Este caudal es el mínimo necesario para que el jet de agua despedido por el aspersor superior del ramal de rociadores alcance la cara posterior del panel PV. Un factor a tener en cuenta es la velocidad de recuperación del agua de rechazo. Dado que las bombas de alimentación y recuperación son distintas resultó complicado estabilizar la tasa de entrada y salida de agua del equipo, llegando a producirse en ocasiones obturación en el conducto de aire debido a la acumulación de agua. Este hecho impidió el estudio del desempeño del equipo con caudales de alimentación altos.

Otra condición destacable tiene que ver con el caudal de aire húmedo forzado por el ventilador. En todos los experimentos cuya variación radicaba en la potencia del ventilador (excepto el 21-05, día de nubosidad parcial), se cumplió que una potencia del 50% era más efectiva para conseguir la destilación de agua que una del 100%. Esto puede deberse a que el aire tiene más tiempo para calentarse y humedecerse antes de pasar al condensador. Además, un caudal del 25% (utilizado el 26-05), redujo considerablemente la cantidad de destilado, lo que nos da una idea vaga del punto de mayor eficiencia.

Respecto a la ampliación de las posibilidades geométricas de rociado, el uso de tres aspersores mostró ser desfavorable frente al uso de dos, básicamente porque conjugar tal cantidad con un caudal de 4 l/min, el cual muestra ser óptimo, produjo que la presión por aspersor se redujera y solamente uno de ellos, el de menor altura, tuviera suficiente velocidad para alcanzar la cara posterior del panel PV. En otras palabras, en lugar de obtener una mayor área de contacto se obtuvo una reducción del área de contacto. Utilizando la ventanilla se descubrió que a partir de 6 l/min los tres aspersores se desarrollan lo suficiente para alcanzar el panel.

Por último cabe destacar el efecto del tiempo en el desempeño del equipo. El día 13 de Mayo se decidió poner en funcionamiento la maquina a pesar de tratarse de un día nublado y frío, como resultado no se obtuvo destilado. Por otra parte el día 21 de Mayo hubo nubosidad parcial, lo cual influyó notablemente en la temperatura del aire húmedo (ver Figura 7.3, curva azul oscuro), y por ende en la obtención de destilado.

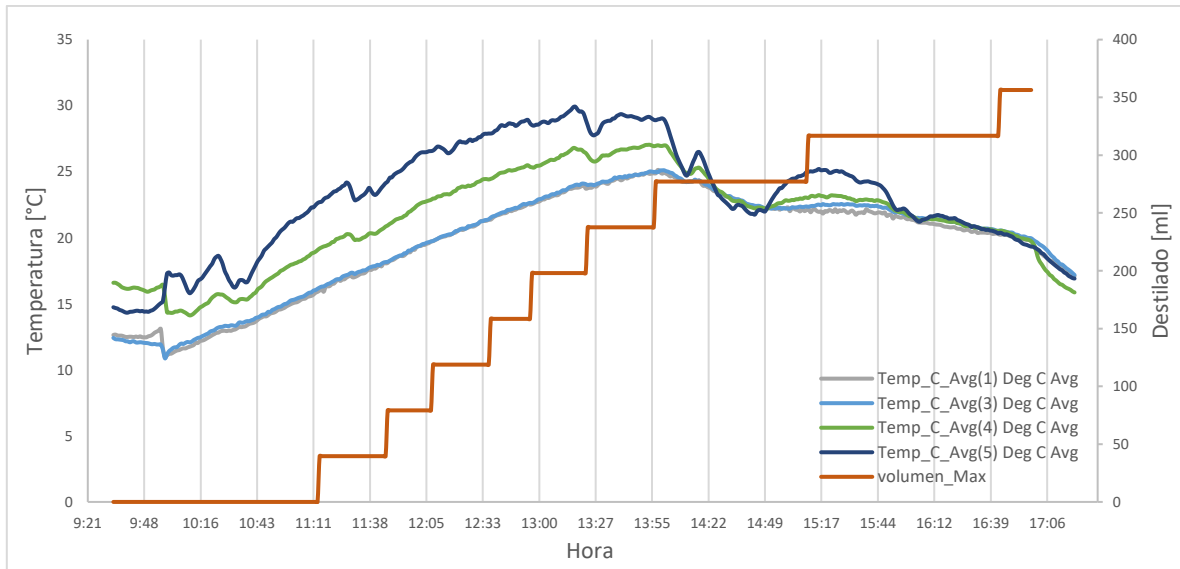


Figura 7.3. Gráfico del desempeño del equipo desalinizador el Viernes 21 de Mayo del 2021. Enfriador de agua encendido a las 14:00 horas y apagado a las 17:00 horas.

7.2. Comentarios finales

Si bien es recomendable realizar un estudio más acabado y con una cantidad de datos mayor, en base a los resultados preliminares conseguidos con las dos primeras semanas de estudio se puede decir que el equipo de desalinización funciona pero tiene un largo camino de mejoramiento. Las dos premisas que deben estudiarse son la **facilitación de la condensación en el intercambiador de calor** y la **elevación continua de la temperatura del aire húmedo**. Como se mencionó con anterioridad estos dos factores son fundamentales para la obtención de destilado y sin embargo en el actual modelo son incompatibles dado que humidificar el aire a alta temperatura con el mismo flujo de agua que se utiliza para condensarlo es una contradicción. Es por ello que se recomienda la modificación del tipo de planta CAOW a una del tipo CACW con la utilización de dos flujos de agua independientes, uno caliente y cerrado y otro frío y abierto, posiblemente con sistema de enfriamiento si no se tiene acceso a una fuente abierta de agua (implementando en el nuevo flujo de agua la mejora expuesta en este trabajo). La importancia del flujo frío se concentrará en la condensación del aire húmedo, mientras que el flujo de agua caliente se encargará de humidificarlo y no disminuir su capacidad de conducción de humedad al mantener una alta temperatura. De todas maneras esta modificación podría traer aparejado un inconveniente si la temperatura del agua recirculando aumenta demasiado, al punto tal de que la transferencia entre el jet atomizado y el panel se anule. Es fundamental identificar el punto óptimo de temperatura que debe tener el agua de humidificación.

También se recomienda una nueva selección de aspersores, utilizar en su lugar nebulizadores o atomizadores, con el objetivo de disminuir el tamaño de partícula y con ello aumentar el área de contacto. En este sentido sería importante también poder abarcar toda el área del panel PV, dado que en la actualidad los aspersores concentran su jet en zonas muy reducidas. La implementación de un hidropack que asegure el correcto rociado de los aspersores, aun trabajando con caudales bajos, también podría resultar recomendable. Por último convendría evaluar la aislación de las tuberías de 110 y 63 mm, conductoras de aire. Esto para evitar que se escape calor a través de ellas o en el peor de los casos que se genere condensación en lugares inconvenientes.

Capítulo 8

Puesta en marcha

El correcto funcionamiento de la planta HDH no depende exclusivamente de su correcta fabricación, constatar el estado de los diferentes componentes antes de comenzar su marcha es crucial. A continuación se presentarán las principales acciones a tener en consideración durante la puesta en marcha, el mantenimiento o las fallas. Cabe destacar que se decidió incluir este capítulo en esta posición debido a que resulta importante incluir recomendaciones referentes a la instrumentación y mejoras, que no habrían sido entendidas en su cabalidad de haberse presentado antes.

8.1. Manual de puesta en marcha

La Tabla 8.1 describe en orden cronológico las diferentes acciones a realizar antes y después de la puesta en marcha de la planta HDH. Las acciones se encuentran numeradas y en correspondencia a la Figura 8.1, de forma que sea fácil identificar el lugar de la acción.

Tabla 8.1. Acciones a realizar para la correcta puesta en marcha del desalinizador HDH.

	Descripción	Objetivo
1	Verificar conexión eléctrica de 220 V	Asegurar el funcionamiento permanente y simultaneo de las bombas, ventilador, calentador, enfriador y datalogger
2	Rellenar trampa de agua para recolección de destilado	Evitar filtración de aire a través de la trampa de agua
3	Agregar agua al receptáculo de destilado hasta el nivel del sensor	Asegurar que la mini bomba esté completamente sumergida
4	Verificar nivel de estanque de agua	Evitar absorción de aire a través de la bomba de alimentación
5	Cebat Bomba de alimentación	Asegurar el correcto funcionamiento de la bomba principal
6	Energizar sistema	Puesta en marcha del sistema
7	Medir el flujo de agua mediante el lector de caudal secundario	Verificar el correcto funcionamiento de la bomba. El caudal debe alcanzar los 4 l/min como mínimo
8	Inspeccionar el correcto desarrollo del jet de agua en los aspersores	Verificar que el agua de los rociadores está impactando el panel PV
9	Constatar el flujo de aire en montura de verificación	Asegurar la correcta circulación del caudal de aire húmedo dentro del sistema
10	Constatar estanqueidad del sistema	Evitar pérdidas de agua
11	Constatar correcta recolección de datos	Evitar que el datalogger no adquiera de forma correcta los datos de funcionamiento

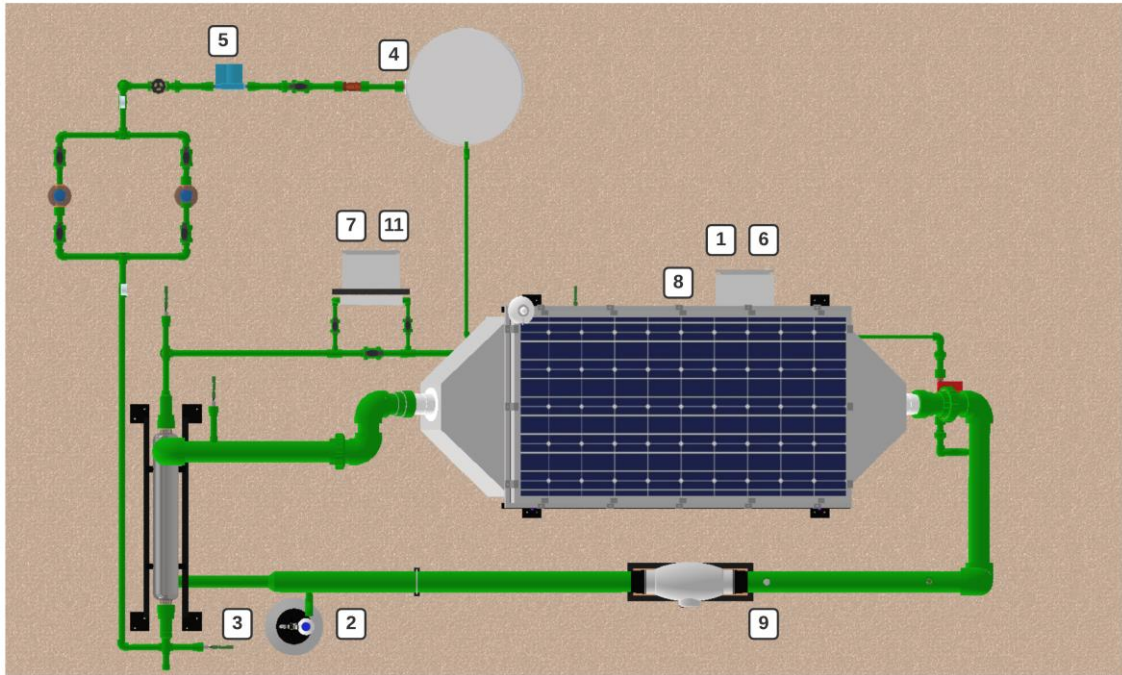


Figura 8.1. Esquema de ubicación de puntos clave durante puesta en marcha.

8.2. Mantenimiento

La automatización de los sistemas de registración de datos y encendido/apagado de la planta no tienen sentido si no se puede asegurar cierto nivel de confiabilidad. Para asegurarlo, y mantener en buen estado los diferentes elementos de la planta, se recomiendan realizar periódicamente las siguientes acciones:

- Realizar limpieza del panel solar, dado que el polvo disminuye la captación de energía.
- Retirar y limpiar los filtros.
- Intercambiar el agua del estanque de almacenamiento.
- Inspeccionar bombas y ventilador.
- Inspeccionar lectura de los sensores

8.3. Manual de fallas

A continuación se presenta un cuadro informativo con las posibles fallas o funcionamientos deficientes a producirse durante la operación de la planta, sus posibles causas asociadas y soluciones a ejecutar para revertirlas.

Tabla 8.2. Listado de fallas posibles durante la operación del desalinizador HDH.

Falla	Causas probables	Solución
Producción baja o nula de destilado	Desperdicio de destilado	- Verificar que la trampa de agua vierta correctamente el destilado. -Verificar el ángulo de inclinación del conducto de agua anterior al ventilador (debe evitar que el agua caiga en el ventilador)
	Caudal de aire muy bajo o nulo	- Verificar fugas de aire. - Elevar la velocidad de evacuación de la bomba de rechazo para evitar obturación del conducto de aire
	Jet de aspersión no hace contacto con el panel PV	- Elevar caudal de alimentación - Reducir número de aspersores
Caudal de agua de alimentación bajo 4 l/min	Burbuja de aire en bomba de alimentación	- Retirar tornillo de despiche de bomba de alimentación
	Burbuja de aire en sistema de filtros	- Retirar tornillo de despiche del filtro en operación
	Burbuja de aire en calentador	- Retirar tornillo de despiche del calentador
	Burbuja en piping	- Abrir uniones americanas y retirar toda el agua de tuberías
Datos incoherentes de alguno de los sensores	Desconexión parcial o completa del sensor	- Corroborar mediante los diagramas de cableado la conexión - Probar con tester las señales de corriente
	Medidor de destilado descalibrado	- Comprobar que no haya obstrucción en el conducto de succión de la mini bomba
Sobrecalentamiento del enfriador de salmuera de rechazo	Polaridad de electroventilador invertida	- Invertir la polaridad de la conexión de 12 V, para asegurar que el flujo de aire enfríe el motor del ventilador.

Capítulo 9

Conclusiones

Mediante el estudio de informes ambientales se comprendió que la inversión en tecnologías que promuevan el uso de fuentes alternativas de agua es vital para combatir la anticipada escases de agua. En ese sentido la utilización de la tecnología HDH con remoción de calor residual se muestra como una excelente opción. Además se estudiaron diferentes tecnologías, configuraciones, en especial las utilizadas con anterioridad en el LER. Los conocimientos transmitidos a través de trabajos anteriores fueron muy relevantes durante la construcción de la planta.

Se construyó una nueva planta de desalinización basada en la patente inscrita por el LER y el diseño de Luis Droguett, a pesar de los inconvenientes relacionados al espacio disponible y sus características. La fabricación se hizo teniendo en vista la ubicación final de la planta y no la actual.

Se puso en marcha el equipo, se instrumentaron todos los sensores que se tenían presupuestados y se calibraron los instrumentos de medición. Se logró programar el datalogger de forma que capturara todos los datos en una misma tabla. Se incluyó en el código programado todos los factores de calibración y conversión, de forma que no sea necesario el post tratamiento de los datos.

Se implementaron mejoras de tres tipos. El primer tipo enfocado en la simulación de condiciones de flujo abierto de agua y aislación. El segundo orientado en la ampliación de variables de funcionamiento. El tercero con el objetivo de mejorar la mantenibilidad y aspectos prácticos. Del primer grupo de mejoras cabe destacar el enfriador de salmuera de rechazo, el cual no logró influir sustancialmente en la obtención de destilado pero sí ayudó en la comprensión de las falencias de la planta y principalmente en la definición de una nueva propuesta de funcionamiento con ciclo cerrado de agua. La aislación de los conductos de agua de 20 y 32 mm supuso una importante mejora en el mantenimiento de las condiciones térmicas del fluido. El segundo grupo de mejoras ayudó a ampliar la geometría de aspersión y con ello tener más variables de estudio a futuro. Con el tercer grupo de mejoras se solucionaron varios problemas pequeños además de las condiciones de mantenimiento y confiabilidad.

Se definió una propuesta de datos y en base a ella se realizaron 10 experimentos en un transcurso de 16 días, de forma automatizada, llegando a obtener un máximo de 712 ml de destilado. Con los resultados adquiridos se generó una base de datos y fue posible realizar un primer análisis cualitativo y recomendaciones para el futuro de la línea investigativa.

Como recomendaciones se incluye estudiar una modificación del tipo de sistema, desde un sistema de flujo de agua abierto a uno de flujo de agua cerrado. Además, implementar un segundo flujo de agua abierto, encargado de la condensación del aire húmedo, utilizando el enfriador de agua construido durante este trabajo para regular su temperatura. De realizarse la anterior modificación se recomienda encarecidamente estudiar el efecto el aumento progresivo de la temperatura de agua de humidificación, esto debido al cese de la transferencia de calor con la celda PV y su efecto en la humidificación. Respecto a los rociadores se hace hincapié en la necesidad de reevaluar los aspersores, dado que el área de contacto conseguido con el panel PV es demasiado bajo. La utilización de nebulizadores o atomizadores regulables en su lugar podría significar un progreso sustancial para una mejor humidificación del aire y una mayor tasa de destilado. Por último se propone la aislación de las tuberías de 110 mm, encargadas del transporte del aire húmedo.

Bibliografía

Aburto, J. (2018). *Rediseño de prototipo de desalinización solar con sistema HDH. (B.S. thesis)*. Santiago: Universidad Técnica Federico Santa María.

Barraza, R., Reyes, M., Castillo, F., & Ramirez, R. (2019). *Santiago, Chile. Patente n° 201901906*.

Bernhard Milow, Eduardo Zarza. (1997). Advanced MED solar desalination plants. Configurations, costs, future — seven years of experience at the Plataforma Solar de Almeria (Spain). *Desalination, Volume 108*, Issues 1–3.

Campbell Scientific. (2018). *CS240 and CS240DM. Product Manual*.

Campbell Scientific. (2021). *CR1000X Product Manual*.

DGA. (2016). *Atlas del Agua: Chile 2016*. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas.

DGA. (2017). *Estimación de la demanda actual, proyecciones futuras y caracterización de la calidad de los recursos hídricos en Chile. S.I.T. N° 419. Realizado por. Unión temporal de proveedores Hídrica Consultores spa y Aquaterra Ingenieros Ltda*. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, División de Estudios Planificación.

Droguett, L. (2021). *Diseño y construcción de un equipo compacto de desalinización hdh acoplado a un colector pvt. (B.S. thesis)*. Santiago: Universidad Técnica Federico Santa María.

FCH. (2018). *Resumen estratégico: Radiografía del Agua Brecha y Riesgo Hídrico en Chile*. Santiago, Chile.: Escenarios Hídricos.

G. Prakash Narayan, M. H. (2009). The potential of a solar-driven humidification-dehumidification desalination for small-scale decentralized water production. *Elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1187–1201.

Ghalavand, Y. Hatamipour, M. Rahimi, A. (2014). A review on energy consumption of desalination processes. *Desalination and water treatment*, 54.

Hernandez, C. (2017). *Modelamiento computacional de sistema de desalinización por método de humidificación-deshumidificación*. (B.S. thesis). Valparaíso: Universidad Técnica Federico Santa María.

Hobbyist. (2021). *hobbyist.co.nz*. Obtenido de <https://www.hobbyist.co.nz/?q=arduino-with-YF-S201-flow-meter>

Jahn, N. (2020). *Modelación numérica de sistema de desalinización HDH con incorporación de PVT*. (B.S. thesis). Santiago: Universidad Técnica Federico Santa María.

Jones, E. (2019). The state of desalination and brine production: A global Outlook. *Science of The Total Environment*, Volume 657, Pages 1343-1356.

Marticorena, J. (6 de Octubre de 2019). Mega sequía impulsa desarrollo de desaladoras en Chile. *El Mercurio*, págs. B-12.

MNA. (2020). *Mesa Nacional del Agua, Primer Informe*. Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas.

Polifusión S.A. (2020). *Catalogo técnico*. Santiago, Chile.

Resnick, R., S. P., Halliday, D., & Krane, K. (2002). *Physics. 5th ed.* New York: Patria.

Reyes, M. (2017). *Diseño y construcción de equipo desalinizador por método de humidificación-deshumidificación (HDH) acoplado con energía Solar*. (B.S. thesis). Valparaíso: Universidad Técnica Federico Santa María.

Rodríguez, M. (2019). *Construcción y puesta en marcha del sistema de desalinización por humidificación y deshumidificación de dos etapas acoplado con energía solar*. (B.S. thesis). Santiago: Universidad Técnica Federico Santa María.

RS Pro. (2021). *Platinum resistance thermometer (PRT). Selection guide*.

SEC. (2010). *Norma Técnica que determina algoritmo para la verificación de la contribución solar mínima de los Sistemas Solares Térmicos acogidos a la franquicia tributaria de la Ley N° 20.365*. Santiago, Chile.: Superintendencia de Electricidad y Combustibles.

UNESCO. (2020). *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2020: Agua y Cambio Climático*. París: UNESCO.

WRI. (2021). *Aqueduct, Water Risk Atlas*. Obtenido de <https://www.wri.org/applications/aqueduct/water-risk-atlas>

Anexo

A. Ecuaciones

Tabla 11.1. Ecuaciones solares utilizadas para determinación de ángulo de inclinación óptimo.

Ecuación	Expresión	No
Ecuación de tiempo	$ET = 9,87 \sin 2B - 7,58 \cos B - 1,5 \sin B$	10.1
	$B = \frac{(N - 81) \cdot 360}{364}$	10.2
Tiempo solar aparente	$TSA = TLE + ET - 4(\lambda_s - \lambda_L)$	10.3
Declinación	$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(\frac{360}{365}(284 + N)\right)$	10.4
Hora solar	$h = (TSA - 12) \cdot 15$	10.5
Altitud y Zenit	$\sin \alpha = \cos \phi = \sin L \sin \delta + \cos L \cos \delta \cos h$	10.6
Azimut	$\sin z = \frac{\cos \delta \sin h}{\cos \alpha}$	10.7
Radiación directa en un plano inclinado β	$G_{b,i} = DNI \cdot \cos \theta$	10.8
Radiación difusa en un plano inclinado β	$G_{d,i} = G_{d,h} \left[\frac{1 + \cos \beta}{2} \right]$	10.9
Radiación reflejada en un plano inclinado β	$G_{r,i} = \rho_r G_h \left[\frac{1 + \cos \beta}{2} \right]$	10.10
Radiación total en el plano inclinado β	$G_i = G_{b,i} + G_{d,i} + G_{r,i}$	10.11
Radiación extraterrestre horizontal	$G_{o,h} = G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos\left(\frac{360 \cdot N}{365}\right) \right] \cdot \cos \Phi$	10.12
Declinación	$\delta = 23,45 \cdot \sin\left(\frac{360}{365}(284 + N)\right)$	10.13
Ángulo de incidencia para colector plano, con ángulo de inclinación β	$\cos \theta = \sin(L + \beta) \sin(\delta) + \cos(L + \beta) \cos(\delta) \cos(h)$	10.14
Radiación global promedio mensual en plano inclinado	$\bar{H}_T = \bar{H}_h \left[R_b \left(1 - \frac{\bar{H}_{dh}}{\bar{H}_h} \right) + \frac{\bar{H}_{dh}}{\bar{H}_h} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \right]$	10.15
Estimación de Liu Jordan del factor geométrico R_b	$\bar{R}_b = \frac{\cos(L + \beta) \cos \delta \sin h'_{ss} + \frac{\pi}{180} \cdot h'_{ss} \sin(L + \beta) \sin \delta}{\cos L \cos \delta \sin h_{ss} + \frac{\pi}{180} \cdot h_{ss} \sin L \sin \delta}$	10.16
Sunset para plano inclinado	$h'_{ss} = \min\{\cos^{-1}(-\tan L \tan \delta), \cos^{-1}(-\tan(L + \beta) \tan \delta)\}$	10.17

Tabla 11.2. Ecuaciones termodinámicas utilizadas para simular en ESS el intercambiador de calor y la aislación de tuberías de agua.

Ecuación		Expresión	No
Número de Reynolds		$Re = \frac{v \cdot D}{\nu}$	10.18
Número de Prandtl		$Pr = \frac{\nu}{\alpha}$	10.19
Nusselt	Laminar ($\dot{q} = cte$)	$Nu = \frac{h \cdot D}{k} = 4,36$	10.20
	En desarrollo	$Nu = 3,66 + \frac{(0,065 \cdot D/L \cdot Re \cdot Pr)}{1 + 0,04 * ([D/L \cdot Re \cdot Pr]^{2/3})}$	10.21
	Turbulento	$Nu = 0,023 * Re^{0,8} \cdot Pr^{0,3}$	10.22
Coef. de convención interno		$h_{int} = \frac{Nu \cdot k}{D}$	10.23
Coef. De transferencia de calor total		$UA = \frac{1}{R_{total}}$	10.24
Resistencia térmica de la capa cilíndrica		$R_{cil} = \frac{\ln \frac{D_2}{D_1}}{2\pi Lk}$	10.25
$\varepsilon - NTU$	Razón de capacidad calorífica	$C_c = \dot{m}_c c_{pc} ; C_h = \dot{m}_h c_{ph}$	10.26
	Transferencia de calor máxima	$Q_{max} = C_{min}(T_{h,ent} - T_{c,ent})$	10.27
	Efectividad de la transferencia de calor	$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{Q_{max}}$	10.28
	Número de unidades de transferencia	$NTU = \frac{UA_s}{C_{min}}$	10.29

B. Radiación mensual para una superficie inclinada en Maipú.

Tabla 11.3. Radiación mensual para ángulos de inclinación entre 21° y 24°. Valores obtenidos mediante tablas dinámicas en Excel

Mes	β	Hh / Mensual		Hdh / Mensual		hss'	Rb Num.	Rb Den.	Rb	Ht / Mensual en plano inclinado	
		kwh/m ²	J/m ²	kwh/m ²	J/m ²					J/m ²	MJ/m ²
-	°					-	-	-	-	J/m ²	MJ/m ²
Enero	21	245	8,82,E+08	76	2,74,E+08	1,652	0,916	0,766	1,196	9,92,E+08	992
Febrero		195	7,02,E+08	65	2,34,E+08	1,620	0,954	0,809	1,179	7,78,E+08	778
Marzo		170	6,12,E+08	58	2,09,E+08	1,580	0,976	0,833	1,171	6,74,E+08	674
Abril		110	3,96,E+08	49	1,76,E+08	1,466	0,958	0,817	1,173	4,28,E+08	428
Mayo		75	2,70,E+08	42	1,51,E+08	1,354	0,905	0,770	1,175	2,86,E+08	286
Junio		57	2,05,E+08	35	1,26,E+08	1,298	0,869	0,739	1,176	2,15,E+08	215
Julio		69	2,48,E+08	37	1,33,E+08	1,324	0,886	0,754	1,176	2,64,E+08	264
Agosto		92	3,31,E+08	47	1,69,E+08	1,419	0,939	0,800	1,174	3,54,E+08	354
Septiembre		126	4,54,E+08	55	1,98,E+08	1,546	0,975	0,832	1,171	4,91,E+08	491
Octubre		180	6,48,E+08	74	2,66,E+08	1,607	0,964	0,821	1,174	7,06,E+08	706
Noviembre		221	7,96,E+08	79	2,84,E+08	1,643	0,927	0,779	1,191	8,84,E+08	884
Diciembre		248	8,93,E+08	81	2,92,E+08	1,661	0,903	0,751	1,203	1,01,E+09	1005
Enero	22	245	8,82,E+08	76	2,74,E+08	1,645	0,920	0,766	1,201	9,94,E+08	994
Febrero		195	7,02,E+08	65	2,34,E+08	1,616	0,957	0,809	1,183	7,79,E+08	779
Marzo		170	6,12,E+08	58	2,09,E+08	1,579	0,979	0,833	1,175	6,75,E+08	675
Abril		110	3,96,E+08	49	1,76,E+08	1,466	0,962	0,817	1,178	4,29,E+08	429
Mayo		75	2,70,E+08	42	1,51,E+08	1,354	0,909	0,770	1,180	2,86,E+08	286
Junio		57	2,05,E+08	35	1,26,E+08	1,298	0,873	0,739	1,181	2,15,E+08	215
Julio		69	2,48,E+08	37	1,33,E+08	1,324	0,890	0,754	1,180	2,64,E+08	264
Agosto		92	3,31,E+08	47	1,69,E+08	1,419	0,943	0,800	1,178	3,54,E+08	354
Septiembre		126	4,54,E+08	55	1,98,E+08	1,546	0,979	0,832	1,176	4,91,E+08	491
Octubre		180	6,48,E+08	74	2,66,E+08	1,604	0,968	0,821	1,179	7,07,E+08	707
Noviembre		221	7,96,E+08	79	2,84,E+08	1,637	0,931	0,779	1,195	8,85,E+08	885
Diciembre		248	8,93,E+08	81	2,92,E+08	1,654	0,907	0,751	1,208	1,01,E+09	1007
Enero	23	245	8,82,E+08	76	2,74,E+08	1,639	0,923	0,766	1,205	9,96,E+08	996
Febrero		195	7,02,E+08	65	2,34,E+08	1,612	0,961	0,809	1,187	7,80,E+08	780
Marzo		170	6,12,E+08	58	2,09,E+08	1,578	0,983	0,833	1,179	6,76,E+08	676
Abril		110	3,96,E+08	49	1,76,E+08	1,466	0,965	0,817	1,182	4,29,E+08	429
Mayo		75	2,70,E+08	42	1,51,E+08	1,354	0,912	0,770	1,184	2,86,E+08	286
Junio		57	2,05,E+08	35	1,26,E+08	1,298	0,876	0,739	1,185	2,15,E+08	215
Julio		69	2,48,E+08	37	1,33,E+08	1,324	0,893	0,754	1,184	2,64,E+08	264
Agosto		92	3,31,E+08	47	1,69,E+08	1,419	0,946	0,800	1,183	3,54,E+08	354
Septiembre		126	4,54,E+08	55	1,98,E+08	1,546	0,982	0,832	1,180	4,92,E+08	492
Octubre		180	6,48,E+08	74	2,66,E+08	1,601	0,971	0,821	1,183	7,07,E+08	707
Noviembre		221	7,96,E+08	79	2,84,E+08	1,632	0,934	0,779	1,200	8,86,E+08	886
Diciembre		248	8,93,E+08	81	2,92,E+08	1,646	0,911	0,751	1,213	1,01,E+09	1009
Enero	24	245	8,82,E+08	76	2,74,E+08	1,632	0,926	0,766	1,209	9,98,E+08	998
Febrero		195	7,02,E+08	65	2,34,E+08	1,608	0,964	0,809	1,191	7,81,E+08	781
Marzo		170	6,12,E+08	58	2,09,E+08	1,578	0,986	0,833	1,183	6,77,E+08	677
Abril		110	3,96,E+08	49	1,76,E+08	1,466	0,968	0,817	1,185	4,29,E+08	429
Mayo		75	2,70,E+08	42	1,51,E+08	1,354	0,915	0,770	1,188	2,86,E+08	286
Junio		57	2,05,E+08	35	1,26,E+08	1,298	0,879	0,739	1,189	2,15,E+08	215
Julio		69	2,48,E+08	37	1,33,E+08	1,324	0,896	0,754	1,188	2,64,E+08	264
Agosto		92	3,31,E+08	47	1,69,E+08	1,419	0,949	0,800	1,186	3,54,E+08	354
Septiembre		126	4,54,E+08	55	1,98,E+08	1,546	0,985	0,832	1,184	4,92,E+08	492
Octubre		180	6,48,E+08	74	2,66,E+08	1,598	0,974	0,821	1,187	7,08,E+08	708
Noviembre		221	7,96,E+08	79	2,84,E+08	1,626	0,937	0,779	1,203	8,87,E+08	887
Diciembre		248	8,93,E+08	81	2,92,E+08	1,639	0,914	0,751	1,217	1,01,E+09	1010

Tabla 11.4. Radiación mensual para ángulos de inclinación entre 25° y 28°. Valores obtenidos mediante tablas dinámicas en Excel

Mes	β	Hh / Mensual		Hdh / Mensual		hss'	Rb Num.	Rb Den.	Rb	Ht / Mensual en plano inclinado	
		kwh/m ²	J/m ²	kwh/m ²	J/m ²					J/m ²	MJ/m ²
-	°					-	-	-	-		
Enero	25	245	8,82,E+08	76	2,74,E+08	1,625	0,929	0,766	1,213	9,99,E+08	999
Febrero		195	7,02,E+08	65	2,34,E+08	1,604	0,966	0,809	1,194	7,82,E+08	782
Marzo		170	6,12,E+08	58	2,09,E+08	1,577	0,988	0,833	1,186	6,77,E+08	677
Abril		110	3,96,E+08	49	1,76,E+08	1,466	0,971	0,817	1,189	4,29,E+08	429
Mayo		75	2,70,E+08	42	1,51,E+08	1,354	0,918	0,770	1,191	2,86,E+08	286
Junio		57	2,05,E+08	35	1,26,E+08	1,298	0,881	0,739	1,192	2,15,E+08	215
Julio		69	2,48,E+08	37	1,33,E+08	1,324	0,898	0,754	1,192	2,64,E+08	264
Agosto		92	3,31,E+08	47	1,69,E+08	1,419	0,952	0,800	1,190	3,54,E+08	354
Septiembre		126	4,54,E+08	55	1,98,E+08	1,546	0,988	0,832	1,187	4,92,E+08	492
Octubre		180	6,48,E+08	74	2,66,E+08	1,595	0,977	0,821	1,190	7,08,E+08	708
Noviembre		221	7,96,E+08	79	2,84,E+08	1,620	0,940	0,779	1,207	8,88,E+08	888
Diciembre		248	8,93,E+08	81	2,92,E+08	1,632	0,916	0,751	1,220	1,01,E+09	1012
Enero	26	245	8,82,E+08	76	2,74,E+08	1,619	0,932	0,766	1,216	1,00,E+09	1000
Febrero		195	7,02,E+08	65	2,34,E+08	1,600	0,969	0,809	1,197	7,82,E+08	782
Marzo		170	6,12,E+08	58	2,09,E+08	1,576	0,991	0,833	1,189	6,78,E+08	678
Abril		110	3,96,E+08	49	1,76,E+08	1,466	0,973	0,817	1,192	4,29,E+08	429
Mayo		75	2,70,E+08	42	1,51,E+08	1,354	0,920	0,770	1,194	2,85,E+08	285
Junio		57	2,05,E+08	35	1,26,E+08	1,298	0,884	0,739	1,195	2,14,E+08	214
Julio		69	2,48,E+08	37	1,33,E+08	1,324	0,901	0,754	1,195	2,64,E+08	264
Agosto		92	3,31,E+08	47	1,69,E+08	1,419	0,955	0,800	1,193	3,54,E+08	354
Septiembre		126	4,54,E+08	55	1,98,E+08	1,546	0,990	0,832	1,190	4,92,E+08	492
Octubre		180	6,48,E+08	74	2,66,E+08	1,592	0,979	0,821	1,193	7,08,E+08	708
Noviembre		221	7,96,E+08	79	2,84,E+08	1,614	0,943	0,779	1,210	8,89,E+08	889
Diciembre		248	8,93,E+08	81	2,92,E+08	1,624	0,919	0,751	1,224	1,01,E+09	1012
Enero	27	245	8,82,E+08	76	2,74,E+08	1,612	0,934	0,766	1,219	1,00,E+09	1000
Febrero		195	7,02,E+08	65	2,34,E+08	1,596	0,971	0,809	1,200	7,83,E+08	783
Marzo		170	6,12,E+08	58	2,09,E+08	1,575	0,993	0,833	1,191	6,78,E+08	678
Abril		110	3,96,E+08	49	1,76,E+08	1,466	0,975	0,817	1,194	4,29,E+08	429
Mayo		75	2,70,E+08	42	1,51,E+08	1,354	0,922	0,770	1,197	2,85,E+08	285
Junio		57	2,05,E+08	35	1,26,E+08	1,298	0,886	0,739	1,198	2,14,E+08	214
Julio		69	2,48,E+08	37	1,33,E+08	1,324	0,903	0,754	1,198	2,64,E+08	264
Agosto		92	3,31,E+08	47	1,69,E+08	1,419	0,957	0,800	1,195	3,54,E+08	354
Septiembre		126	4,54,E+08	55	1,98,E+08	1,546	0,992	0,832	1,192	4,92,E+08	492
Octubre		180	6,48,E+08	74	2,66,E+08	1,589	0,981	0,821	1,195	7,08,E+08	708
Noviembre		221	7,96,E+08	79	2,84,E+08	1,608	0,945	0,779	1,213	8,89,E+08	889
Diciembre		248	8,93,E+08	81	2,92,E+08	1,617	0,921	0,751	1,226	1,01,E+09	1013
Enero	28	245	8,82,E+08	76	2,74,E+08	1,606	0,936	0,766	1,221	1,00,E+09	1001
Febrero		195	7,02,E+08	65	2,34,E+08	1,592	0,972	0,809	1,202	7,83,E+08	783
Marzo		170	6,12,E+08	58	2,09,E+08	1,575	0,995	0,833	1,194	6,78,E+08	678
Abril		110	3,96,E+08	49	1,76,E+08	1,466	0,977	0,817	1,197	4,29,E+08	429
Mayo		75	2,70,E+08	42	1,51,E+08	1,354	0,924	0,770	1,199	2,85,E+08	285
Junio		57	2,05,E+08	35	1,26,E+08	1,298	0,887	0,739	1,200	2,14,E+08	214
Julio		69	2,48,E+08	37	1,33,E+08	1,324	0,904	0,754	1,200	2,64,E+08	264
Agosto		92	3,31,E+08	47	1,69,E+08	1,419	0,959	0,800	1,198	3,53,E+08	353
Septiembre		126	4,54,E+08	55	1,98,E+08	1,546	0,994	0,832	1,195	4,92,E+08	492
Octubre		180	6,48,E+08	74	2,66,E+08	1,586	0,983	0,821	1,197	7,08,E+08	708
Noviembre		221	7,96,E+08	79	2,84,E+08	1,602	0,946	0,779	1,215	8,89,E+08	889
Diciembre		248	8,93,E+08	81	2,92,E+08	1,610	0,923	0,751	1,229	1,01,E+09	1013

Tabla 11.5. Radiación mensual para ángulos de inclinación entre 29° y 32°. Valores obtenidos mediante tablas dinámicas en Excel

Mes	β	Hh / Mensual		Hdh / Mensual		hss'	Rb Num.	Rb Den.	Rb	Ht / Mensual en plano inclinado	
		kwh/m ²	J/m ²	kwh/m ²	J/m ²					J/m ²	MJ/m ²
-	°					-	-	-	-		
Enero	29	245	8,82,E+08	76	2,74,E+08	1,600	0,937	0,766	1,223	1,00,E+09	1001
Febrero		195	7,02,E+08	65	2,34,E+08	1,588	0,974	0,809	1,204	7,83,E+08	783
Marzo		170	6,12,E+08	58	2,09,E+08	1,574	0,996	0,833	1,195	6,78,E+08	678
Abril		110	3,96,E+08	49	1,76,E+08	1,466	0,979	0,817	1,199	4,29,E+08	429
Mayo		75	2,70,E+08	42	1,51,E+08	1,354	0,925	0,770	1,201	2,84,E+08	284
Junio		57	2,05,E+08	35	1,26,E+08	1,298	0,889	0,739	1,202	2,13,E+08	213
Julio		69	2,48,E+08	37	1,33,E+08	1,324	0,906	0,754	1,202	2,63,E+08	263
Agosto		92	3,31,E+08	47	1,69,E+08	1,419	0,960	0,800	1,200	3,53,E+08	353
Septiembre		126	4,54,E+08	55	1,98,E+08	1,546	0,996	0,832	1,196	4,91,E+08	491
Octubre		180	6,48,E+08	74	2,66,E+08	1,584	0,984	0,821	1,199	7,07,E+08	707
Noviembre		221	7,96,E+08	79	2,84,E+08	1,597	0,948	0,779	1,217	8,89,E+08	889
Diciembre		248	8,93,E+08	81	2,92,E+08	1,603	0,924	0,751	1,231	1,01,E+09	1013
Enero	30	245	8,82,E+08	76	2,74,E+08	1,593	0,938	0,766	1,225	1,00,E+09	1000
Febrero		195	7,02,E+08	65	2,34,E+08	1,584	0,975	0,809	1,205	7,82,E+08	782
Marzo		170	6,12,E+08	58	2,09,E+08	1,573	0,997	0,833	1,197	6,77,E+08	677
Abril		110	3,96,E+08	49	1,76,E+08	1,466	0,980	0,817	1,200	4,28,E+08	428
Mayo		75	2,70,E+08	42	1,51,E+08	1,354	0,927	0,770	1,203	2,84,E+08	284
Junio		57	2,05,E+08	35	1,26,E+08	1,298	0,890	0,739	1,204	2,13,E+08	213
Julio		69	2,48,E+08	37	1,33,E+08	1,324	0,907	0,754	1,204	2,63,E+08	263
Agosto		92	3,31,E+08	47	1,69,E+08	1,419	0,961	0,800	1,201	3,52,E+08	352
Septiembre		126	4,54,E+08	55	1,98,E+08	1,546	0,997	0,832	1,198	4,91,E+08	491
Octubre		180	6,48,E+08	74	2,66,E+08	1,581	0,986	0,821	1,201	7,07,E+08	707
Noviembre		221	7,96,E+08	79	2,84,E+08	1,591	0,949	0,779	1,218	8,88,E+08	888
Diciembre		248	8,93,E+08	81	2,92,E+08	1,596	0,925	0,751	1,232	1,01,E+09	1013
Enero	31	245	8,82,E+08	76	2,74,E+08	1,587	0,939	0,766	1,226	1,00,E+09	1000
Febrero		195	7,02,E+08	65	2,34,E+08	1,580	0,976	0,809	1,206	7,82,E+08	782
Marzo		170	6,12,E+08	58	2,09,E+08	1,573	0,998	0,833	1,198	6,77,E+08	677
Abril		110	3,96,E+08	49	1,76,E+08	1,466	0,981	0,817	1,201	4,28,E+08	428
Mayo		75	2,70,E+08	42	1,51,E+08	1,354	0,928	0,770	1,204	2,83,E+08	283
Junio		57	2,05,E+08	35	1,26,E+08	1,298	0,891	0,739	1,205	2,12,E+08	212
Julio		69	2,48,E+08	37	1,33,E+08	1,324	0,908	0,754	1,205	2,62,E+08	262
Agosto		92	3,31,E+08	47	1,69,E+08	1,419	0,962	0,800	1,203	3,52,E+08	352
Septiembre		126	4,54,E+08	55	1,98,E+08	1,546	0,998	0,832	1,199	4,90,E+08	490
Octubre		180	6,48,E+08	74	2,66,E+08	1,578	0,986	0,821	1,202	7,06,E+08	706
Noviembre		221	7,96,E+08	79	2,84,E+08	1,585	0,950	0,779	1,219	8,87,E+08	887
Diciembre		248	8,93,E+08	81	2,92,E+08	1,589	0,926	0,751	1,233	1,01,E+09	1012
Enero	32	245	8,82,E+08	76	2,74,E+08	1,580	0,939	0,766	1,226	9,99,E+08	999
Febrero		195	7,02,E+08	65	2,34,E+08	1,577	0,976	0,809	1,207	7,81,E+08	781
Marzo		170	6,12,E+08	58	2,09,E+08	1,572	0,999	0,833	1,199	6,76,E+08	676
Abril		110	3,96,E+08	49	1,76,E+08	1,466	0,982	0,817	1,202	4,27,E+08	427
Mayo		75	2,70,E+08	42	1,51,E+08	1,354	0,928	0,770	1,205	2,83,E+08	283
Junio		57	2,05,E+08	35	1,26,E+08	1,298	0,892	0,739	1,206	2,12,E+08	212
Julio		69	2,48,E+08	37	1,33,E+08	1,324	0,909	0,754	1,206	2,62,E+08	262
Agosto		92	3,31,E+08	47	1,69,E+08	1,419	0,963	0,800	1,203	3,51,E+08	351
Septiembre		126	4,54,E+08	55	1,98,E+08	1,546	0,999	0,832	1,200	4,90,E+08	490
Octubre		180	6,48,E+08	74	2,66,E+08	1,575	0,987	0,821	1,202	7,05,E+08	705
Noviembre		221	7,96,E+08	79	2,84,E+08	1,579	0,950	0,779	1,220	8,86,E+08	886
Diciembre		248	8,93,E+08	81	2,92,E+08	1,582	0,927	0,751	1,234	1,01,E+09	1011

Tabla 11.6. Radiación mensual para ángulos de inclinación entre 33° y 36°. Valores obtenidos mediante tablas dinámicas en Excel

Mes	β	Hh / Mensual		Hdh / Mensual		hss'	Rb Num.	Rb Den.	Rb	Ht / Mensual en plano inclinado	
		kwh/m ²	J/m ²	kwh/m ²	J/m ²					J/m ²	MJ/m ²
-	°					-	-	-	-		
Enero	33	245	8,82,E+08	76	2,74,E+08	1,574	0,940	0,766	1,226	9,98,E+08	998
Febrero		195	7,02,E+08	65	2,34,E+08	1,573	0,977	0,809	1,207	7,80,E+08	780
Marzo		170	6,12,E+08	58	2,09,E+08	1,571	0,999	0,833	1,199	6,75,E+08	675
Abril		110	3,96,E+08	49	1,76,E+08	1,466	0,982	0,817	1,203	4,26,E+08	426
Mayo		75	2,70,E+08	42	1,51,E+08	1,354	0,929	0,770	1,206	2,82,E+08	282
Junio		57	2,05,E+08	35	1,26,E+08	1,298	0,892	0,739	1,207	2,11,E+08	211
Julio		69	2,48,E+08	37	1,33,E+08	1,324	0,909	0,754	1,206	2,61,E+08	261
Agosto		92	3,31,E+08	47	1,69,E+08	1,419	0,963	0,800	1,204	3,51,E+08	351
Septiembre		126	4,54,E+08	55	1,98,E+08	1,546	0,999	0,832	1,200	4,89,E+08	489
Octubre		180	6,48,E+08	74	2,66,E+08	1,572	0,987	0,821	1,203	7,04,E+08	704
Noviembre		221	7,96,E+08	79	2,84,E+08	1,574	0,951	0,779	1,220	8,85,E+08	885
Diciembre		248	8,93,E+08	81	2,92,E+08	1,574	0,927	0,751	1,234	1,01,E+09	1010
Enero	34	245	8,82,E+08	76	2,74,E+08	1,568	0,939	0,766	1,226	9,96,E+08	996
Febrero		195	7,02,E+08	65	2,34,E+08	1,569	0,977	0,809	1,207	7,79,E+08	779
Marzo		170	6,12,E+08	58	2,09,E+08	1,570	0,999	0,833	1,199	6,74,E+08	674
Abril		110	3,96,E+08	49	1,76,E+08	1,466	0,982	0,817	1,203	4,25,E+08	425
Mayo		75	2,70,E+08	42	1,51,E+08	1,354	0,929	0,770	1,206	2,82,E+08	282
Junio		57	2,05,E+08	35	1,26,E+08	1,298	0,892	0,739	1,207	2,11,E+08	211
Julio		69	2,48,E+08	37	1,33,E+08	1,324	0,910	0,754	1,207	2,61,E+08	261
Agosto		92	3,31,E+08	47	1,69,E+08	1,419	0,964	0,800	1,204	3,50,E+08	350
Septiembre		126	4,54,E+08	55	1,98,E+08	1,546	0,999	0,832	1,200	4,88,E+08	488
Octubre		180	6,48,E+08	74	2,66,E+08	1,569	0,987	0,821	1,203	7,03,E+08	703
Noviembre		221	7,96,E+08	79	2,84,E+08	1,568	0,950	0,779	1,220	8,84,E+08	884
Diciembre		248	8,93,E+08	81	2,92,E+08	1,567	0,927	0,751	1,234	1,01,E+09	1009
Enero	35	245	8,82,E+08	76	2,74,E+08	1,561	0,939	0,766	1,226	9,95,E+08	995
Febrero		195	7,02,E+08	65	2,34,E+08	1,565	0,976	0,809	1,206	7,77,E+08	777
Marzo		170	6,12,E+08	58	2,09,E+08	1,570	0,999	0,833	1,199	6,73,E+08	673
Abril		110	3,96,E+08	49	1,76,E+08	1,466	0,982	0,817	1,202	4,25,E+08	425
Mayo		75	2,70,E+08	42	1,51,E+08	1,354	0,929	0,770	1,206	2,81,E+08	281
Junio		57	2,05,E+08	35	1,26,E+08	1,298	0,892	0,739	1,207	2,10,E+08	210
Julio		69	2,48,E+08	37	1,33,E+08	1,324	0,909	0,754	1,206	2,60,E+08	260
Agosto		92	3,31,E+08	47	1,69,E+08	1,419	0,963	0,800	1,204	3,49,E+08	349
Septiembre		126	4,54,E+08	55	1,98,E+08	1,546	0,999	0,832	1,200	4,87,E+08	487
Octubre		180	6,48,E+08	74	2,66,E+08	1,567	0,987	0,821	1,202	7,01,E+08	701
Noviembre		221	7,96,E+08	79	2,84,E+08	1,562	0,950	0,779	1,219	8,82,E+08	882
Diciembre		248	8,93,E+08	81	2,92,E+08	1,560	0,926	0,751	1,233	1,01,E+09	1007
Enero	36	245	8,82,E+08	76	2,74,E+08	1,555	0,938	0,766	1,225	9,92,E+08	992
Febrero		195	7,02,E+08	65	2,34,E+08	1,561	0,975	0,809	1,206	7,76,E+08	776
Marzo		170	6,12,E+08	58	2,09,E+08	1,569	0,998	0,833	1,198	6,72,E+08	672
Abril		110	3,96,E+08	49	1,76,E+08	1,466	0,981	0,817	1,202	4,23,E+08	423
Mayo		75	2,70,E+08	42	1,51,E+08	1,354	0,928	0,770	1,205	2,80,E+08	280
Junio		57	2,05,E+08	35	1,26,E+08	1,298	0,892	0,739	1,206	2,10,E+08	210
Julio		69	2,48,E+08	37	1,33,E+08	1,324	0,909	0,754	1,206	2,59,E+08	259
Agosto		92	3,31,E+08	47	1,69,E+08	1,419	0,963	0,800	1,203	3,48,E+08	348
Septiembre		126	4,54,E+08	55	1,98,E+08	1,546	0,998	0,832	1,199	4,86,E+08	486
Octubre		180	6,48,E+08	74	2,66,E+08	1,564	0,986	0,821	1,201	6,99,E+08	699
Noviembre		221	7,96,E+08	79	2,84,E+08	1,557	0,949	0,779	1,218	8,80,E+08	880
Diciembre		248	8,93,E+08	81	2,92,E+08	1,553	0,925	0,751	1,232	1,00,E+09	1005

C. Código de programa de registro de datos en CRBasic

Program: 5Prt100NoMux v2.CR1X

```
1  'CR1000X Series
2  'Created by Fadvis
3  SequentialMode
4
5  'Declare Variables and Units
6  Const Rf=1000 ' Value of the fixed resistor in Ohms.
7  Public BattV
8  Public PTemp_C, Temp_C(5)
9  Dim CS240X
10 Dim CS240Rs
11 Public CS240T_C 'CS240 plate sensor 2 wire.
12 Public pyranometer 'Value of the Pyranometer.
13 Public Pulse 'Value of the Flowmeter.
14 Public Water_level 'Signal of the level sensor.
15 Public HBr3W(5)
16 Public Mult(5)={Rf,Rf,Rf,Rf,Rf}
17 Public Offs(5)={0,0,0,0,0}
18 Public volumen=0
19
20 Units Temp_C(5)=Deg C
21 Units BattV=Volts
22 Units PTemp_C=Deg C
23 Units HBr3W=mV/mV
24 Units pyranometer=W/m^2
25 Units Pulse=1/min
26 Units CS240T_C=Deg C
27 Units Water_level=mV
28 Units volumen= ml
29
30 'Define Data Tables
31 DataTable(Table1,True,-1)
32   DataInterval(0,60,Sec,10)
33   Average(1,Temp_C(1),FP2,False)
34   Average(1,Temp_C(2),FP2,False)
35   Average(1,Temp_C(3),FP2,False)
36   Average(1,Temp_C(4),FP2,False)
37   Average(1,Temp_C(5),FP2,False)
38   Average(1,CS240T_C,FP2,False)
39   Average(1,pyranometer,FP2,False)
40   Average(1,Pulse,FP2,False)
41   Maximum(1,volumen,FP2,False,False)
42 EndTable
43
44 'Main Program
45 BeginProg
46   'Main Scan
47   Scan(15,Sec,0,0)
48     'Default CR1000X Datalogger Battery Voltage measurement 'BattV'
49     Battery(BattV)
50     'Default CR1000X Datalogger Wiring Panel Temperature measurement 'PTemp
51     PanelTemp(PTemp_C,15000)
52     'Generic Half Bridge, 3 Wire measurements 'HBr3W()'
53     BrHalf3W(HBr3W(1),1,mV5000,1,VX1,1,1000,True,500,15000,Mult(1),Offs(1))
54     BrHalf3W(HBr3W(2),1,mV5000,3,VX1,1,1000,True,500,15000,Mult(2),Offs(2))
```

```

55 BrHalf3W(HBr3W(3),1,mV5000,5,VX2,1,1000,True,500,15000,Mult(3),Offs(3))
56 BrHalf3W(HBr3W(4),1,mV5000,7,VX2,1,1000,True,500,15000,Mult(4),Offs(4))
57 BrHalf3W(HBr3W(5),1,mV5000,9,VX3,1,1000,True,500,15000,Mult(5),Offs(5))
58 PRTCalc (Temp_C(1),1,HBr3W(1)/99.95017354,1,1.0,0)
59 PRTCalc (Temp_C(2),1,HBr3W(2)/99.51419409,1,1.0,0)
60 PRTCalc (Temp_C(3),1,HBr3W(3)/99.41538039,1,1.0,0)
61 PRTCalc (Temp_C(4),1,HBr3W(4)/99.37680906,1,1.0,0)
62 PRTCalc (Temp_C(5),1,HBr3W(5)/100.1585895,1,1.0,0)
63
64 'CS240 (2-wire) Class A RTD Back of PV Module Temperature Sensor 'CS240
65 BrHalf(CS240X,1,mV200,11,VX4,1,350,True,0,60,1,0)
66 'Convert ratio to ohms and remove cable resistance
67 CS240Rs=CS240X*(1000+1.37)/(1-CS240X)-1.37
68 'Calculate temperature from resistance
69 PRTCalc(CS240T_C,1,CS240Rs/1000,1,1,0)
70
71 'Generic Differential Voltage measurements 'pyranometer (pyranometer)'
72 VoltDiff(pyranometer,1,AutoRange,7,True,500,60,18.55287,0)
73
74 'Generic Pulse measurement 'Pulse'
75 CDM_SW5 (CDM_A108,1,1,1 )
76 PulseCount(Pulse,1,P1,1,1,0.4020,0)
77
78 'Generic Differential Voltage measurements 'Water_level'
79 VoltDiff(Water_level,1,mV5000,8,True,500,50,1,0)
80 If Water_level>=2000 Then
81     SW12 (SW12_1,1 )
82     Delay(0,1.5,Sec)
83     SW12 (SW12_1,0)
84     volumen= volumen + 39.6
85 EndIf
86 CDM_SW5 (CDM_A108,1,1,0 )
87
88 'Call Data Tables and Store Data
89 CallTable Table1
90 NextScan
91 EndProg

```

D. Datos técnicos de instrumentos utilizados

Tabla 11.7. Datos técnicos termómetros Pt-100 marca RS Pro.		
Rango	-20 a 100°C	
Corriente recomendada	1 mV	
Dimensiones	Longitud de vaina	50 mm
	Diámetro de vaina	5 mm
	Largo total (cable + vaina)	1500 mm
Especificaciones	Elemento térmico	PT100Ω Clase A - 1x3 cables
	Protector de punta	SS304L
	Tipo de prensado	Hexagonal
Datos metrológicos	Según	IEC 751
	Estándar de tolerancia PT100 clase A	$\pm 0.15 + 0.002 \cdot t$ [°C]

Tabla 11.8. Datos técnicos termómetro CS240 marca Campbell Scientific.		
Sensor	Precision 1000 ohm class A platinum sensing element	
Accuracy	$\pm 0.15 + 0.002 \cdot t$ [°C]	
Temperature Range	-40 to 135 °C	
Temperature Coefficient	TCR = 3850 ppm/K	
Long-term Stability	Max Ro drift = 0.04% after 1000 h at 400 °C	
CS240 Measuring Current	0.1 to 0.3 mA	
Disk Diameter	2.54 cm (1.0 in)	
Overall Sensor Length	6.35 cm (2.5 in)	
Overmolded Joint Dimensions	Width	1.12 cm (0.44 in)
	Height	1.47 cm (0.58 in)
	Length	5.72 cm (2.25 in)
Cable Diameter:	0.622 cm (0.245 in)	
Disk Material	Anodized aluminum	
Weight	90.7 g (0.2 lb) with 3.2 m (10.5 ft) cable	

Tabla 11.9. Datos técnicos caudalímetro de efecto Hall marca AICHL.

Modelo	OF05ZAT
Capacidad	5 a 600 L/h
Pulso de flujo indicado por fabricante	2,5 $\left[\frac{Hz \cdot min}{L} \right]$
Voltaje de funcionamiento	DC 3,5 V – 12V
Temperatura de funcionamiento	-25°C a 70°C
Precisión	±1%
Diámetro in/out	1/2 "

Tabla 11.10. Datos técnicos piranómetro marca EKO.

Modelo	ML-01
Sensibilidad ($\mu V/W/m^2$)	53,9
Impedancia (ohm)	52
Tiempo de Respuesta 95%	< 1 ms
Ajuste a cero – Radiación térmica(200W/m ²)	0 W/m ²
Ajuste a cero – Cambio de temperatura (5K/hr)	0 W/m ²
No-estabilidad (cambio/anual)	± 2 %
No-linealidad (a 1000W/m ²)	< 0.2 %
Error de respuesta direccional (0 - 80°)	< 10 W/m ²
Selectividad espectral (0.35-1.5 μm)	Respuesta Fotodiodo-Si
Respuesta a la temp. (para 50°C banda)	< 0.15 %/°C
Repuesta de inclinación (a 1000W/m ²)	0 %
Rango de temperatura de trabajo (°C)	-30 a +70
Rango de longitud de onda (nm)	400 - 1100

Tabla 11.11. Datos técnicos sensor de nivel sin contacto marca MCI.

Modelo	Gravity
Voltaje de funcionamiento (InVCC)	DC 5 ~ 24 v
Consumo de corriente	5 mA
Voltaje de salida (nivel alto)	InVCC
Voltaje de salida (nivel bajo)	0V
Corriente de salida	1 ~ 50 mA
Tiempo de respuesta	500 ms
Temperatura de funcionamiento	0 ~ 105 °C
Gama de espesor de inducción (sensibilidad)	0 ~ 13 mm
Humedad	5% ~ 100%
Material	ABS
Funcionamiento impermeable	IP67
Dimensión	28 x 28 mm

Tabla 11.12. Datos técnicos mini bomba sumergible marca MCI.

Voltaje de funcionamiento (InVCC)	DC 5 ~ 24 v
Fuente de alimentación	6 ~ 18V DC, 0,8W - 20W
Columna de agua	60 – 400 cm
Capacidad	280 - 600 L/H
Dimensiones	45mm x 43mm x 30mm
Peso	300 g
Longitud del cable	1 m

Tabla 11.13. Datos técnicos anemómetro de hilo caliente marca Improtek.

Rangos de medida	m/s	0,1 ... 25,0
	km/h	0,3 ... 90,0
	pies/min	20 ... 4925
	nudos	0,2 ... 48,5
	°C	0,0 ... 50,0s
Resolución	m/s	0,01
	km/h	0,1
	pies/min	1
	nudos	0,1
	°C	0,1
Precisión	Velocidad de aire	±5 % ±0,2 m/s
	Temperatura	±1 °C
Especificaciones técnicas generales	Cuota de medición	Aprox. 0,8 s
	Longitud mín. sensor telescópico	185 mm
	Longitud máx. sensor telescópico	1000 mm
	Diámetro mín. sensor telescópico	10 mm
	Diámetro máx. sensor telescópico	12 mm
	Pantalla	Pantalla LCD (46,7 x 60 mm)
	Alimentación	1 x pila de 9 V
	Dimensión del aparato	210 x 75 x 50 mm
	Peso	280 g
	Condiciones ambientales	0 °C ... 50 °C

E. Diagramas de conexión

HalfBr3W (1) - HBr3W(1)	CR1000X Series
V1 _____	1H
V2 _____	1L
Ground _____	$\frac{\perp}{\equiv}$ (Ground)
Shield _____	$\frac{\perp}{\equiv}$ (Ground)
Excite _____	VX1
HalfBr3W (2) - HBr3W(2)	CR1000X Series
V1 _____	2H
V2 _____	2L
Ground _____	$\frac{\perp}{\equiv}$ (Ground)
Shield _____	$\frac{\perp}{\equiv}$ (Ground)
Excite _____	VX1
HalfBr3W (3) - HBr3W(3)	CR1000X Series
V1 _____	3H
V2 _____	3L
Shield _____	$\frac{\perp}{\equiv}$ (Ground)
Ground _____	$\frac{\perp}{\equiv}$ (Ground)
Excite _____	VX2
HalfBr3W (4) - HBr3W(4)	CR1000X Series
V1 _____	4H
V2 _____	4L
Shield _____	$\frac{\perp}{\equiv}$ (Ground)
Ground _____	$\frac{\perp}{\equiv}$ (Ground)
Excite _____	VX2
HalfBr3W (5) - HBr3W(5)	CR1000X Series
V1 _____	5H
V2 _____	5L
Ground _____	$\frac{\perp}{\equiv}$ (Ground)
Shield _____	$\frac{\perp}{\equiv}$ (Ground)
Excite _____	VX3

Figura 11.1. Diagrama de conexión termómetros Pt-100 (1-5). Sacado de PC400.

CS240 (2-wire) - CS240T_C	CR1000X Series
White _____	6L
Clear _____	$\frac{\perp}{\equiv}$ (Ground)
Red _____	$\frac{\perp}{\equiv}$ (Ground)
Black _____	VX4
Black _____	Not Connected
White _____	Not Connected
Red _____	Not Connected

Figura 11.2. Diagrama de conexión termómetro CS240 (6). Sacado de PC400.

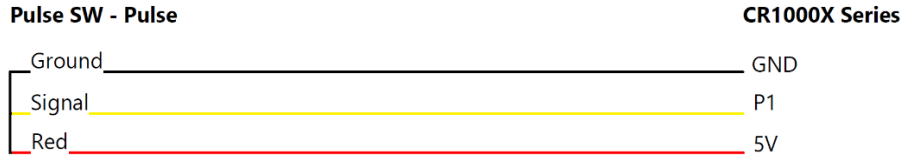


Figura 11.3. Diagrama de conexión caudalímetro (7). Sacado de PC400.

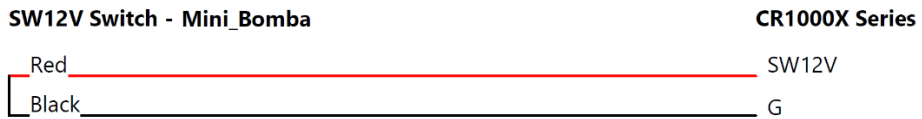


Figura 11.4. Diagrama de conexión medidor de destilado (8). Sacado de PC400.

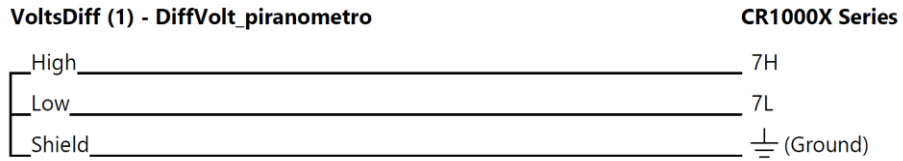


Figura 11.5. Diagrama de conexión piranómetro (9). Sacado de PC400.

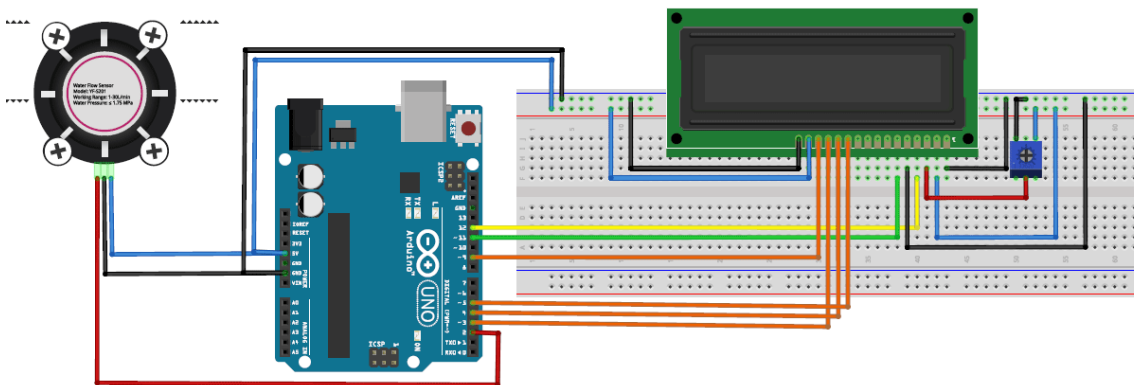


Figura 11.6. Diagrama de conexión lector secundario de caudal. Fuente (Hobbyist, 2021).

F. Código de programación en Arduino IDE del lector secundario de caudal

```
#include <LiquidCrystal.h>
LiquidCrystal lcd(12, 11, 10, 9, 8, 7);
unsigned char flow_sensor_pin = 2;
float flow_per_min;
unsigned long current_time;
unsigned long cloop_time;
float sensor_pulses;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  sei();
  lcd.begin(16, 2);
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print(" Flow Meter USM");
  pinMode(flow_sensor_pin, INPUT);
  digitalWrite(flow_sensor_pin, HIGH);
  attachInterrupt(0, pulses_measure, RISING);
  current_time = millis();
  cloop_time = current_time;
}

void loop ()
{
  current_time = millis();
  if (current_time >= (cloop_time + 1000))
  {
    cloop_time = current_time;
    flow_per_min = (sensor_pulses / 2.48773);
    sensor_pulses = 0;
    Serial.print(flow_per_min);
    Serial.println(" L/MIN");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(" ");
    lcd.setCursor(0, 1);
    // lcd.print(" Flow:");
    lcd.print(flow_per_min, 3);
    lcd.print(" L/MIN");
    delay(100);
  }
}
```

G. Registro de calibración de sensores

Tabla 11.14. Valores registrados durante calibración del caudalímetro.

Medición	Peso [g]	Volumen [l]	Pulsaciones	Factor K
1	1119	1,119	169	2,517128
2	2223	2,223	345	2,586595
3	1417	1,417	207	2,434721
4	2479	2,479	364	2,447223
5	1205	1,205	181	2,503458
6	3112	3,112	479	2,565338
7	1539	1,539	226	2,447477
8	918	0,918	132	2,396514
9	1854	1,854	275	2,472132
10	4222	4,222	635	2,506711
Promedio				2,48773
Desviación estándar				0,05953
Error est. De la media				0,01882

Tabla 11.15. Valores registrados durante calibración de medidor de destilado.

Medición	Masa acumulada [g]	Masa [g]	Medición	Masa Acumulada [g]	Masa [g]
0	50	0	12	520	39
1	90	40	13	557	37
2	127	37	14	597	40
3	168	41	15	640	43
4	206	38	16	683	43
5	247	41	17	723	40
6	284	37	18	761	38
7	325	41	19	801	40
8	362	37	20	842	41
9	402	40	Promedio		39,60
10	440	38	Desviación estándar		1,90
11	481	41	Error est. De la media		0,43

H. Resultados de simulaciones en ESS

Tabla 11.16. Resultados obtenidos a partir de la simulación en EES de intercambiador de calor.

	d_{tubo} [m]	h_{ext} [W/m ² *K]	h_{int} [W/m ² *K]	A_{tubo} [m ²]	L [m]	\dot{m}_c [kg/s]	\dot{m}_h [kg/s]	n	Q [W]	$T_{\text{in;c}}$ [K]	$T_{\text{out;c}}$ [K]	$T_{\text{in;h}}$ [K]	$T_{\text{out;h}}$ [K]
Run 1	0,0095	45	272,9	0,2107	0,353	0,05923	0,06681	20	173,2	298	300,9	303	302,4
Run 2	0,0095	45	272,9	0,2323	0,3707	0,05923	0,06681	21	183	298	301,1	303	302,3
Run 3	0,0095	45	272,9	0,255	0,3883	0,05923	0,06681	22	192,3	298	301,2	303	302,3
Run 4	0,0095	45	272,9	0,2787	0,406	0,05923	0,06681	23	201,1	298	301,4	303	302,3
Run 5	0,0095	45	272,9	0,3034	0,4236	0,05923	0,06681	24	209,3	298	301,5	303	302,3
Run 6	0,0095	45	272,9	0,3292	0,4413	0,05923	0,06681	25	217,1	298	301,6	303	302,2
Run 7	0,0095	45	272,9	0,3561	0,4589	0,05923	0,06681	26	224,3	298	301,8	303	302,2
Run 8	0,0095	45	272,9	0,384	0,4766	0,05923	0,06681	27	231,1	298	301,9	303	302,2
Run 9	0,0095	45	272,9	0,413	0,4942	0,05923	0,06681	28	237,3	298	302	303	302,2
Run 10	0,0095	45	272,9	0,443	0,5119	0,05923	0,06681	29	243,1	298	302,1	303	302,1
Run 11	0,0095	45	272,9	0,4745	0,53	0,05923	0,06681	30	248,4	298	302,2	303	302,1
Run 12	0,0095	45	272,9	0,5062	0,5472	0,05923	0,06681	31	253,2	298	302,3	303	302,1
Run 13	0,0095	45	272,9	0,5394	0,5648	0,05923	0,06681	32	257,6	298	302,3	303	302,1
Run 14	0,0095	45	272,9	0,5736	0,5825	0,05923	0,06681	33	261,6	298	302,4	303	302,1
Run 15	0,0095	45	272,9	0,6089	0,6001	0,05923	0,06681	34	265,3	298	302,5	303	302,1
Run 16	0,0095	45	272,9	0,6453	0,6178	0,05923	0,06681	35	268,6	298	302,5	303	302
Run 17	0,0095	45	272,9	0,6827	0,6354	0,05923	0,06681	36	271,7	298	302,6	303	302
Run 18	0,0095	45	272,9	0,7211	0,6531	0,05923	0,06681	37	274,4	298	302,6	303	302
Run 19	0,0095	45	272,9	0,7607	0,6707	0,05923	0,06681	38	276,8	298	302,7	303	302
Run 20	0,0095	45	272,9	0,8012	0,6884	0,05923	0,06681	39	279	298	302,7	303	302
Run 21	0,0095	45	272,9	0,8428	0,706	0,05923	0,06681	40	281	298	302,7	303	302
Run 22	0,005	45	399,5	0,05089	0,18	0,02962	0,06681	18	71,65	298	300,4	303	302,7
Run 23	0,005	45	399,5	0,06786	0,24	0,02962	0,06681	18	86,28	298	300,9	303	302,7
Run 24	0,005	45	399,5	0,1018	0,36	0,02962	0,06681	18	107,3	298	301,6	303	302,6
Run 25	0,005	45	399,5	0,1357	0,48	0,02962	0,06681	18	120,9	298	302,1	303	302,6

Tabla 11.17. Resultados obtenidos a partir de la simulación en EES de aislación para tuberías de 32mm.

	e [mm]	d_1 [m]	d_2 [m]	k_1 [W/m*K]	k_2 [W/m*K]	$UA_{\text{sin,aislante}}$ [W/K]	UA [W/K]
Run 1	0,001	0,026	0,032	0,24	0,035	43,57	43,48
Run 2	1	0,026	0,032	0,24	0,035	43,57	14,51
Run 3	2	0,026	0,032	0,24	0,035	43,57	8,911
Run 4	3	0,026	0,032	0,24	0,035	43,57	6,528
Run 5	4	0,026	0,032	0,24	0,035	43,57	5,207
Run 6	5	0,026	0,032	0,24	0,035	43,57	4,366
Run 7	6	0,026	0,032	0,24	0,035	43,57	3,784
Run 8	7	0,026	0,032	0,24	0,035	43,57	3,356
Run 9	8	0,026	0,032	0,24	0,035	43,57	3,028
Run 10	9	0,026	0,032	0,24	0,035	43,57	2,769
Run 11	10	0,026	0,032	0,24	0,035	43,57	2,558
Run 12	11	0,026	0,032	0,24	0,035	43,57	2,384
Run 13	12	0,026	0,032	0,24	0,035	43,57	2,237
Run 14	13	0,026	0,032	0,24	0,035	43,57	2,111
Run 15	14	0,026	0,032	0,24	0,035	43,57	2,003
Run 16	15	0,026	0,032	0,24	0,035	43,57	1,908
Run 17	16	0,026	0,032	0,24	0,035	43,57	1,824
Run 18	17	0,026	0,032	0,24	0,035	43,57	1,749
Run 19	18	0,026	0,032	0,24	0,035	43,57	1,683
Run 20	19	0,026	0,032	0,24	0,035	43,57	1,623
Run 21	20	0,026	0,032	0,24	0,035	43,57	1,569

Tabla 11.18. Resultados obtenidos a partir de la simulación en EES de aislación para tuberías de 20mm.

	e	d ₁	d ₂	k ₁	k ₂	UA _{sin,aislante}	UA
	[mm]	[m]	[m]	[W/m*K]	[W/m*K]	[W/K]	[W/K]
Run 1	0,0001	0,016	0,02	0,24	0,035	40,55	40,53
Run 2	1	0,016	0,02	0,24	0,035	40,55	10,32
Run 3	2	0,016	0,02	0,24	0,035	40,55	6,141
Run 4	3	0,016	0,02	0,24	0,035	40,55	4,474
Run 5	4	0,016	0,02	0,24	0,035	40,55	3,576
Run 6	5	0,016	0,02	0,24	0,035	40,55	3,012
Run 7	6	0,016	0,02	0,24	0,035	40,55	2,626
Run 8	7	0,016	0,02	0,24	0,035	40,55	2,343
Run 9	8	0,016	0,02	0,24	0,035	40,55	2,127
Run 10	9	0,016	0,02	0,24	0,035	40,55	1,957
Run 11	10	0,016	0,02	0,24	0,035	40,55	1,818
Run 12	11	0,016	0,02	0,24	0,035	40,55	1,704
Run 13	12	0,016	0,02	0,24	0,035	40,55	1,607
Run 14	13	0,016	0,02	0,24	0,035	40,55	1,525
Run 15	14	0,016	0,02	0,24	0,035	40,55	1,453
Run 16	15	0,016	0,02	0,24	0,035	40,55	1,391
Run 17	16	0,016	0,02	0,24	0,035	40,55	1,335
Run 18	17	0,016	0,02	0,24	0,035	40,55	1,286
Run 19	18	0,016	0,02	0,24	0,035	40,55	1,242
Run 20	19	0,016	0,02	0,24	0,035	40,55	1,203
Run 21	20	0,016	0,02	0,24	0,035	40,55	1,166

I. Códigos de programación en EES

```

1: "Simulación simple de aislación de tuberías de 32mm"
2:
3: "Condiciones geométricas y materiales"
4: L=6[m]
5: d_1= 0,026 [m]
6: d_2= 0,032 [m]
7: k_1=0,24 [W/m*K]
8: k_2=0,035[W/m*K]
9:
10: "Cálculo de resistencias equivalentes"
11: R_PPR=ln(d_2/d_1)/(2*pi*L*k_1)
12: R_aislante=ln((d_2+2*e/1000)/d_2)/(2*pi*L*k_2)
13: R_total=R_PPR+R_aislante
14: UA=1/(R_total)
15: UA_sin_aislante=1/R_PPR

```

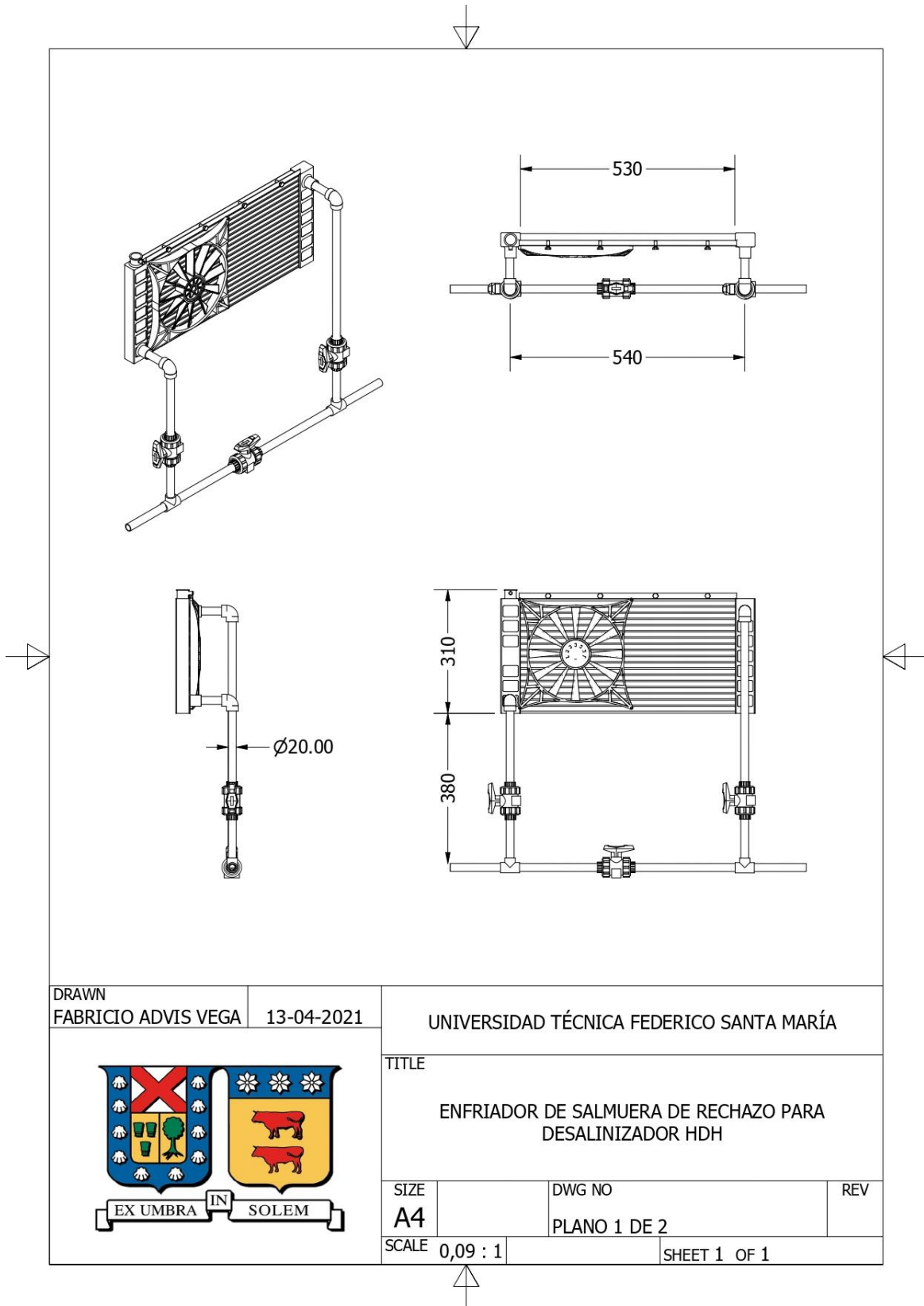
```

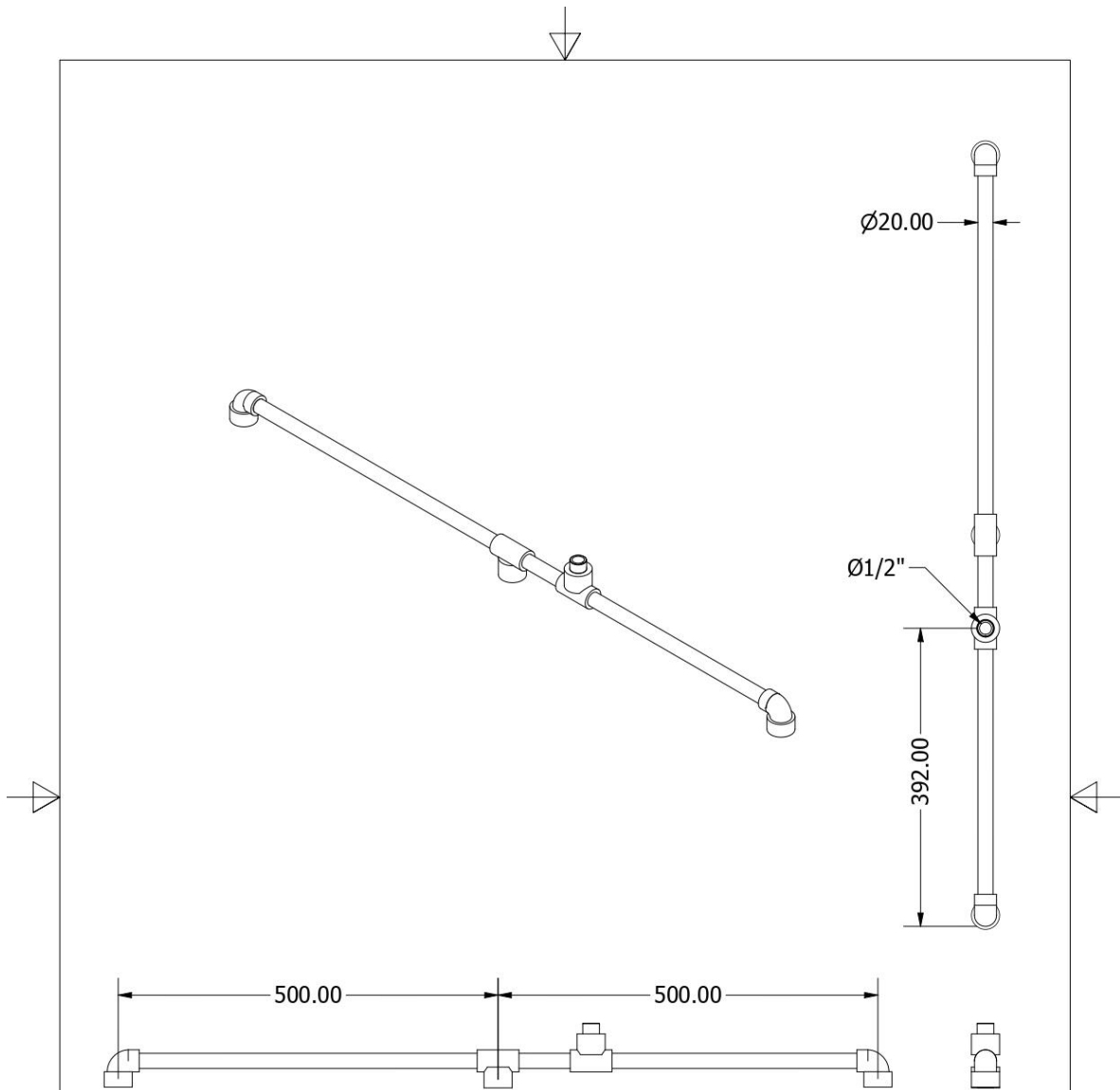
1: "Simulación simple de aislación de tuberías de 20mm"
2:
3: "Condiciones geométricas y materiales"
4: L=6[m]
5: d_1= 0,016 [m]
6: d_2= 0,020 [m]
7: k_1=0,24 [W/m*K]
8: k_2=0,035[W/m*K]
9:
10: "Cálculo de resistencias equivalentes"
11: R_PPR=ln(d_2/d_1)/(2*pi*L*k_1)
12: R_aislante=ln((d_2+2*e/1000)/d_2)/(2*pi*L*k_2)
13: R_total=R_PPR+R_aislante
14: UA=1/R_total
15: UA_sin_aislante=1/R_PPR

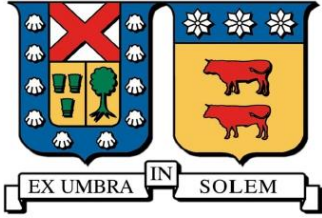
```

1: "Análisis de intercambiador de calor de aletas"
2:
3: "Variables geométricas y operacionales"
4: "L=largo tubos[m]"
5: n=número de tubos
6: d_tubo=diámetro de tubos[m]"
7:
8: T_in_h=303 [K]
9: T_in_c=298 [K]
10: v_dot_c=0,05 [m³/s]
11: m_dot_c=rho_c*v_dot_c
12: v_dot_h=0,000067 [m³/s]
13: m_dot_h=rho_h*v_dot_h
14: v_dot_tubo=v_dot_h/n
15: vel_tubo=v_dot_tubo/(pi*(d_tubo²)/4)
16:
17: "Constantes"
18: T=298 [K]
19: P=101,325 [kPa]
20: rho_h=Density(Water;T=T;P=P)
21: rho_c=Density(Air;T=T;P=P)
22: cp_h=Cp(Water;T=T;P=P)
23: cp_c=Cp(Air;T=T)
24: alpha=ThermalDiffusivity(Water;T=T;P=P)
25: nu=KinematicViscosity(Water;T=T;P=P)
26: k=Conductivity(Water;T=T;P=P)
27:
28: "Coeficiente de convección interior"
29: Re=vel_tubo*d_tubo/nu
30: Pr=Prandtl(Water;T=T;P=P)
31: "cálculo de Nussel en función de la turbulencia del fluido"
32: Nus=if(Re;2300;4,36;3,66+(0,065*(d_tubo/L)*Re*Pr)/(1+0,04*((d_tubo/L)*Re*Pr)^(2/3));0,023*Re^{0,8}*Pr^{0,3})
33: h_int=Nus*k/d_tubo
34:
35: "Coeficiente de convección exterior"
36: h_ext=45 [W/m²*K] "Rescatado de valores típicos experimentales"
37:
38: "Áreas"
39: x= 692,30769 [1/m] "Cantidad de aletas por metro de longitud de tubos"
40: y= 0,018[m] "Distancia vertical entre tubos"
41: z=0,033 [m] "Profundidad de la aleta"
42: eta=0,6 "eficiencia de aletas"
43: A_aletas=x*L*(z*(n/2))*y
44: A_tubo=n*pi*d_tubo*L
45:
46: "Analogía eléctrica para Resistencia equivalente total"
47:
48: R_int=1/(A_tubo*h_int)
49: R_ext=1/((A_tubo+eta*A_aletas)*h_ext)
50: R=R_int+R_ext
51:
52: "Eficiencia NTU"
53: C_c=m_dot_c*cp_c
54: C_h=m_dot_h*cp_h
55: C_min=min(C_c;C_h)
56: Q_max=C_min*(T_in_h-T_in_c)
57: Q=C_h*(T_in_h-T_out_h)
58: Q=C_c*(T_out_c-T_in_c)
59: epsilon=Q/Q_max
60: NTU=(1/R_int)*(1/C_min)
61: TypeHX\$='crossflow_both_unmixed'
62: epsilon=HX(TypeHX\$; NTU; C_h; C_c; 'epsilon') "Función para obtener epsilon a partir de NTU"

J. Planos de construcción





DRAWN FABRICIO ADVIS VEGA		13-04-2021	UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA		
		TITLE			
		RAMAL DE ROCIADORES MODIFICADO			
SIZE	A4	DWG NO	PLANO 2 DE 2		REV
SCALE	1 / 7	SHEET 1 OF 1			