

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE DESTILACIÓN DE AGUA

Diseño y construcción de un sistema de destilación de agua mediante el uso de energía solar para
el laboratorio de Sistemas Térmicos

Luis Felipe Mantilla Medina y Esteban David Salcedo Niño

Trabajo de Grado para optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Juan Pablo Flórez Mera

PhD en Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2025

DEDICATORIA

En primer lugar, a Dios, por brindarme las capacidades que poseo, por guiar mi camino, por darme la salud, el conocimiento y la fortaleza para superar cada desafío y alcanzar este gran logro.

Con todo mi cariño, dedico este triunfo a mi madre, Mónica Medina, y a mi abuela, Luz Marina Santos, a ambas por su amor incondicional, sus consejos y por ser mi apoyo en cada paso dado para conseguir este logro. A mi padre, Gustavo Mantilla (QEPD), quien también estaría inmensamente orgulloso de haberme visto obtener el título de ingeniero mecánico.

Y, por supuesto, a mí mismo. Me dedico este logro por cada noche de esfuerzo, cada obstáculo superado y cada vez que elegí seguir adelante a pesar de las dificultades. Porque la perseverancia, el sacrificio y el compromiso me han traído hasta aquí, y hoy puedo decir con orgullo que todo valió la pena.

Luis Felipe Mantilla Medina

DEDICATORIA

Primeramente, dedico este trabajo de grado a Dios, porque me ha brindado la sabiduría y la salud necesarias para alcanzar esta meta.

A mis padres, María de las Nieves Niño y Jaime Salcedo, por la confianza que depositaron en mí y por su apoyo incondicional a lo largo de todo este proceso. Ellos fueron mi motor para avanzar en los momentos de mayor desafío.

También, especialmente para un profesor que me inspiró durante el proceso académico, el ingeniero Leonidas Vásquez Chaparro (QEPD), cuyo compromiso con la enseñanza y pasión por la ingeniería dejaron una huella imborrable en mi formación. Su guía y ejemplo fueron fundamentales en este camino, y su legado seguirá vivo en cada uno de sus estudiantes.

Esteban David Salcedo Niño

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander, por ser el pilar de nuestra formación académica y profesional. Agradecemos profundamente el acceso a un ambiente de aprendizaje riguroso y de excelencia. Cada reto, cada experiencia y cada conocimiento adquirido en sus aulas y laboratorios fueron fundamentales para nuestra preparación.

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento al director de proyecto Juan Pablo Flórez por su orientación, disposición y apoyo durante el desarrollo de este trabajo, brindando su conocimiento y asesoría en cada consulta realizada.

A la ingeniera electrónica Sindy Chapeta, por su apoyo incondicional y su valiosa colaboración cuando tuvimos dudas en la construcción del circuito de adquisición de datos, y a sus padres, por su generoso respaldo al permitirnos utilizar parte de su espacio para la toma de datos con el banco de pruebas.

Agradecemos también a los compañeros del taller de metalmecánica, Henry, César y Freddy, por su guía y enseñanzas en la construcción del proyecto. De ustedes aprendimos mucho, y su experiencia fue trascendental para materializar nuestras ideas.

Esta hoja se quedaría corta para mencionar a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron a la realización de este proyecto. A nuestros verdaderos amigos, familiares y a los profesionales que, tanto en los laboratorios como en el campus universitario y fuera de él, nos brindaron su conocimiento y apoyo, les extendemos nuestra más profunda gratitud.

Luis Felipe Mantilla Medina y Esteban David Salcedo Niño

Tabla de Contenido

	Pág.
1. Planteamiento del problema.....	19
2. Justificación	21
3. Objetivos.....	23
3.1. Objetivo general.....	23
3.2. Objetivos específicos	23
4. Antecedentes	24
4.1. Antecedente a nivel internacional.....	24
4.1.1. Estudios sobre la transferencia de calor/masa en un sistema de desalinización debido a la integración de una cámara colectora solar y una chimenea disipadora de calor (Hu, 2022) .	24
4.2. Antecedentes Nacionales	25
4.2.1. Prototipo de un destilador solar activo de doble pendiente, como método de obtención de agua potable para las comunidades vulnerables de Antioquia, Medellín, Colombia (Buelvas et al., 2020)	25
4.3. Antecedentes locales.....	26
4.3.1. Diseño y construcción de un destilador solar activo de agua para abastecer el consumo de un hogar ubicado en el asentamiento La Estanzuela del municipio de Girón, departamento Santander (Mejía et al., 2023).....	26
4.3.2. Diseño y construcción de un prototipo de evaporador al vacío por bomba de calor para depuración de aguas residuales industriales (Rojas et al., 2014).....	26
5. Marco teórico	27
5.1. Aguas residuales	27

5.1.1.	Aguas residuales urbanas	27
5.1.2.	Aguas residuales domésticas.....	27
5.1.3.	Aguas residuales industriales	27
5.2.	Características de las aguas residuales.....	27
5.2.1.	Biológicas	28
5.2.2.	Físicas	28
5.2.3.	Químicas	29
5.3.	Destilación de agua.....	29
5.3.1.	Ebullición en piscina.....	30
5.3.2.	Condensación.....	33
5.3.2.1.	Condensación por película líquida.....	33
5.3.2.2.	Condensación en gota	34
5.4.	Energía solar térmica	35
5.5.	Concentración de energía solar térmica.....	36
5.6.	Colección de energía solar térmica.....	37
6.	Metodología	38
6.1.	Enfoque de investigación.....	38
6.2.	Fases del proyecto.....	38
6.2.1.	Fase 1: Determinación de los requerimientos y restricciones de diseño	38
6.2.2.	Fase 2: Diseño conceptual	39
6.2.2.1.	Evaluación cualitativa de alternativas de diseño.	39
6.2.2.2.	Cálculo y dimensionamiento de subsistemas.....	39
6.2.3.	Fase 3: Diseño en detalle	39

6.2.4.	Fase 4: Construcción del sistema.....	39
6.2.5.	Fase 5: Pruebas preoperacionales	39
6.2.6.	Fase 6: Adquisición y tratamiento de datos	40
6.2.6.1.	Obtención de la muestra de agua residual.....	40
6.2.6.2.	Adquisición de variables experimentales.....	40
6.2.6.3.	Tratamiento de datos.....	41
6.2.7.	Fase 7: Análisis de calidad del agua	41
6.2.8.	Fase 8: Elaboración de la documentación de instrucciones de operación, mantenimiento y guía de laboratorio	41
7.	Resolución metodológica de diseño.....	42
7.1.	Resolución de requerimientos y restricciones de diseño	42
7.1.1.	Requerimientos funcionales.....	42
7.1.2.	Requerimientos no funcionales.....	44
7.1.2.1.	Seguridad.	44
7.1.2.2.	Sostenibilidad.....	44
7.1.2.3.	Operabilidad.....	45
7.1.2.4.	Instalación y mantenibilidad.	45
7.1.2.5.	Transporte y espacio.	46
7.1.2.6.	Costo.	46
7.2.	Resolución de diseño conceptual	46
7.2.1.	Evaluación cualitativa de alternativas de diseño	46
7.2.2.	Análisis energético y de transferencia de calor para la ebullición de agua	50
7.2.2.1.	Flujo de potencia para ebullición nucleada.....	51

7.2.3.	Diseño del subsistema de ebullición	52
7.2.3.1.	Características y propiedades del tubo colector solar.	54
7.2.3.2.	Características y propiedades del tubo de cobre.	56
7.2.3.3.	Pérdidas térmicas.	61
7.2.3.4.	Balance energético: potencia neta recibida por el colector solar.	63
7.2.4.	Diseño del subsistema de condensación	66
7.2.4.1.	Tanque de condensación	67
7.2.4.2.	Intercambio de calor en la pared del tanque.	69
7.2.5.	Presentación del diseño del sistema de destilación y sus partes	72
7.3.	Resolución de diseño en detalle	73
7.3.1.	Subsistema de ebullición.....	73
7.3.2.	Subsistema de condensación.....	75
7.3.3.	Subsistema de adquisición de datos	77
8.	Costos del proyecto.....	79
9.	Construcción	81
9.1.	Subsistema de ebullición.....	81
9.2.	Subsistema de condensación.....	84
9.3.	Subsistema de adquisición de datos	85
9.4.	Ensamblaje	85
9.5.	Metodología de operación del sistema de destilación.....	86
9.5.1.	Tipos de montaje.....	86
9.5.2.	Modos de operación en función del tipo de presión interna	90
9.6.	Prueba de evaporación a presión atmosférica.....	91

10.	Resultados de operación del banco de pruebas	95
10.1.	Operación con agua potable.....	96
10.2.	Operación con el agua residual.....	97
10.3.	Consumo energético.....	98
10.4.	Análisis microbiológico y físico químico del agua residual.....	99
11.	Conclusiones	102
12.	Recomendaciones	105
	Referencias Bibliográficas	106
	Apéndices.....	109

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Variables de la tasa de flujo de calor nucleado de la Ecuación 3.</i>	32
Tabla 2 <i>Requerimientos funcionales identificados y las condiciones meteorológicas de Bucaramanga.</i>	42
Tabla 3 <i>Matriz Pugh de selección de alternativas de diseño para el método de colección solar.</i>	49
Tabla 4 <i>Valores de flujo de calor para ebullición nucleada en función de la presión.</i>	51
Tabla 5 <i>Propiedades de la película absorbente</i>	54
Tabla 6 <i>Características técnicas del tubo colector solar</i>	55
Tabla 7 <i>Propiedades del material del tubo colector solar</i>	55
Tabla 8 <i>Factor B en función del factor A y la temperatura de operación para tubo de cobre.</i> ...	59
Tabla 9 <i>Características técnicas del tubo de cobre</i>	60
Tabla 10 <i>Propiedades del cobre</i>	60
Tabla 11 <i>Factor B en función del factor A y la temperatura de operación para acero AISI 304.</i>	68
Tabla 12 <i>Identificación de los componentes del banco de pruebas de este proyecto.</i>	73
Tabla 13 <i>Presupuesto de costos durante el desarrollo.</i>	79
Tabla 14 <i>Resultados de operación con agua potable para los cuatro tipos de operación.</i>	96
Tabla 15 <i>Resultados de operación con agua residual para los cuatro tipos de operación.</i>	98

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 <i>Curva de ebullición para el agua a presión de 1 atm</i>	31
Figura 2 <i>Imagen representativa de la condensación por película y en gota.</i>	33
Figura 3 <i>Clasificación de los componentes de la radiación solar (Matius et al., 2021)</i>	35
Figura 4 <i>Configuraciones de colectores concentradores.</i>	36
Figura 5 <i>Tubo colector solar evacuado con implementación de Heat Pipe de cobre.</i>	37
Figura 6 <i>Elementos sin usar en el laboratorio de sistemas térmicos.</i>	44
Figura 7 <i>Matriz QFD para el sistema de destilación de agua.</i>	48
Figura 8 <i>Valores de energía requerida total para la ebullición de 0.5 kg de agua en función de la presión.</i>	50
Figura 9 <i>Vista frontal del subsistema de calentamiento y evaporación detallando áreas superficiales.</i>	53
Figura 10 <i>Vista isométrica del subsistema de calentamiento y evaporación.</i>	54
Figura 11 <i>Diagrama geométrico de componentes sometidos a cargas externas.</i>	58
Figura 12 <i>Gráfica de flujo de calor recibido en función del ancho del área de apertura.</i>	64
Figura 13 <i>Diagrama geométrico de componentes sometidos a cargas externas.</i>	67
Figura 14 <i>Esquema resumen del diseño propuesto.</i>	72
Figura 15 <i>Vista general del subsistema de ebullición modelado en SolidWorks.</i>	74
Figura 16 <i>Tubos colectores solares al vacío.</i>	75
Figura 17 <i>Vista general del subsistema de condensación modelado en SolidWorks.</i>	76
Figura 18 <i>Nomenclatura empleada para las válvulas y tanques del sistema.</i>	76

Figura 19 <i>Vista lateral derecha del sistema completo modelado en SolidWorks, señalizando las ubicaciones de los tres termopares que miden temperatura superficial.</i>	77
Figura 20 <i>Representación gráfica en detalle de las conexiones del circuito de lectura de temperaturas.</i>	78
Figura 21 <i>Estructura del concentrador parabólico.</i>	82
Figura 22 <i>Estructura del subsistema de ebullición.</i>	82
Figura 23 <i>Ensamblaje de la prueba de vacío para el diseño inicial del tubo</i>	83
Figura 24 <i>Correcciones realizadas al tubo de cobre.</i>	83
Figura 25 <i>Tanque de condensación mejorado para ser ensamblado a la manguera de ingreso de vapor</i>	84
Figura 26 <i>Tanque de recolección de condensado</i>	84
Figura 27 <i>Subsistema de adquisición de datos con Arduino UNO.</i>	85
Figura 28 <i>Unión universal para ensamblar los subsistemas.</i>	85
Figura 29 <i>Sistema completo ensamblado y operando visto desde el lado izquierdo</i>	86
Figura 30 <i>Vista superior y lateral derecha del montaje orientado hacia el sur con concentrador móvil.</i>	87
Figura 31 <i>Rayos solares concentrados en el foco de la parábola, coincidente con la mitad inferior de los soportes del tubo.</i>	88
Figura 32 <i>Vista superior y lateral derecha del montaje orientado hacia el oriente u occidente, con concentrador fijo a un ángulo igual a la latitud del lugar de operación.</i>	89
Figura 33 <i>Montaje de operación del 31 de diciembre de 2024.</i>	92
Figura 34 <i>Gráfica de T1 y T2 en función de la irradiancia solar total recibida el 31 de diciembre de 10:34:10 am a 2:44:19 pm.</i>	94

Figura 35 <i>Uso habitual del lavamanos del taller</i>	97
Figura 36 <i>Inicio de recolección del agua residual con el tapón de drenaje en uso.</i>	97
Figura 37 <i>Análisis microbiológico y fisicoquímico de una muestra de agua (0.8 L) antes de la destilación con el prototipo.</i>	100
Figura 38 <i>Análisis microbiológico y fisicoquímico de una muestra de agua (0.5 L) después de la destilación con el prototipo.</i>	101

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice 1. Registro continuo de valores de irradiancia solar recibida en la Escuela de Ingeniería Mecánica en la Universidad Industrial de Santander del 10 al 13 de mayo, y el 15 de mayo de 2024, por medio de la aplicación DAVIS WeatherLink.....	109
Apéndice 2. Muestra de toma de datos de irradiancia en la aplicación Davis WeatherLink.....	110
Apéndice 3. Valores promedio de irradiancia total recibida en el Área Metropolitana de Bucaramanga durante cada mes del año.	111
Apéndice 4. Valores de irradiancia solar total entre marzo y abril recibida en la Escuela de Ingeniería Mecánica en la Universidad Industrial de Santander (WeatherLink, 2024), distinguiendo únicamente los horarios en una pequeña muestra de días en los que se presentó cielo despejado continuo por minutos suficientes para que el piranómetro de la estación pudiera actualizar la lectura.	112
Apéndice 5. Valores de irradiancia solar total en diciembre, recibidos en la estación meteorológica Instituto Nacional del Petróleo (WeatherLink, 2024) en Piedecuesta, Santander. Distinguiendo únicamente los horarios en una pequeña muestra de días antes de las operaciones reales del prototipo en los que se presentó cielo despejado continuo por minutos suficientes para que el piranómetro de la estación pudiera actualizar la lectura.	113
Apéndice 6. Tasa, flujo de calor y tiempo de evaporación calculados para el diseño conceptual con irradiancia de diseño de 417 vatios por metro cuadrado, en función del ancho de área de apertura del concentrador parabólico y la presión interna.	114
Apéndice 7. Tasa de condensado final en función de la presión e irradiancia, determinando si hay ebullición nucleada con base en los valores mínimos requeridos.....	115

Apéndice 8. Código de Arduino para la lectura de las tres temperaturas.	116
Apéndice 9. Análisis microbiológico y fisicoquímico de una muestra de agua (0.8 L) antes de la destilación con el prototipo.	118
Apéndice 10. Análisis microbiológico y fisicoquímico de una muestra de agua (0.5 L) después de la destilación con el prototipo.	119
Apéndice 11. Resultados de operación presión de vacío, concentrador fijo, 2 de febrero.	120
Apéndice 12. Resultados de operación presión de vacío, concentrador fijo, fecha 3 de febrero	122
Apéndice 13. Resultados de operación presión de vacío, concentrador fijo. 11 de febrero desde las 10:42 am hasta las 3:05 pm.....	129
Apéndice 14. Resultado de operación, presión de vacío con seguimiento solar del concentrador	133
Apéndice 15. Resultado de operación, presión de vacío con seguimiento solar del concentrador del 13 de febrero desde las 2:23 pm hasta las 3:54 pm. 0.76 L	140
Apéndice 16. Resultado de operación, presión de vacío con seguimiento solar del concentrador del 16 de febrero desde las 3:35 pm hasta las 4:37 pm. 0.15 L	142
Apéndice 17. Resultado de operación, presión de vacío con seguimiento solar del concentrador del 17 de febrero desde las 11:13 am hasta las 3:51 pm.....	144
Apéndice 18. Resultado de operación, presión de vacío con seguimiento solar del concentrador del 19 de febrero desde las 8:59 am hasta las 11:39 am. 0.88 L.....	148
Apéndice 19. Resultado de operación, presión atmosférica con concentrador fijo. 4 de febrero desde las 9:19 am hasta las 3:35 pm.	150
Apéndice 20. Resultado de operación, presión atmosférica con seguimiento del concentrador. 9 de febrero desde las 9:57 am hasta la 1:56 pm. Condensado total 0.16 L.....	156

Apéndice 21. Resultado de operación, presión atmosférica con seguimiento del concentrador. 10 de febrero desde las 9:50 am hasta la 1:37 pm. Condensado total 0.2 L.....	160
Apéndice 22. Resultado a presión de vacío con seguimiento del concentrador. Día 23 de febrero desde las 11:48 am hasta las 2:17 pm.	162
Apéndice 23. Resultado a presión de vacío con seguimiento del concentrador. Día 24 de febrero desde las 11:22 am hasta las 12:05 pm. 0.28 L.....	164
Apéndice 24. Resultado a presión de vacío con seguimiento del concentrador. Día 24 de febrero desde las 8:21 am hasta las 9:51 am.	166
Apéndice 25 Características técnicas del vidrio borosilicato 3.3.	168
Apéndice 26 Ficha técnica para vidrio Pyrex Borosilicato.....	170
Apéndice 27. Catálogo para tubería de cobre de Nacobre.....	181
Apéndice 28 Guía de laboratorio para la signatura de Sistemas Térmicos.....	183
Apéndice 29 Manual de operación y mantenimiento del banco de pruebas.....	186
Apéndice 30. Planos en detalle del sistema de destilación.....	207

RESUMEN

Título: Diseño y construcción de un sistema de destilación de agua mediante el uso de energía solar para el laboratorio de Sistemas Térmicos *

Autores: Luis Felipe Mantilla Medina y Esteban David Salcedo Niño **

Palabras Clave: Destilación solar, tratamiento de agua, calidad del agua, banco de pruebas, energía renovable, *Escherichia coli*

Descripción:

Este trabajo de grado presenta el diseño, construcción y evaluación de un sistema de destilación simple para agua empleando energía solar, desarrollado como un banco de pruebas experimental para uso académico en la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander. El sistema es flexible y opera a diferentes presiones incluida la presión de vacío, consta de un colector solar térmico, un tubo de cobre para la evaporación y un tanque de condensación. Se realizaron pruebas comparativas de muestras de agua de lavamanos del taller de metalmecánica, antes y después del tratamiento, evaluando parámetros fisicoquímicos (pH, conductividad, turbidez, alcalinidad, presencia de iones) y microbiológicos (coliformes totales y *Escherichia coli*). Los resultados mostraron una mejora significativa en la calidad fisicoquímica del agua, con una reducción en la turbidez, conductividad y la presencia de nitratos y sulfatos, lo que indica una remoción efectiva de sólidos disueltos y contaminantes químicos. Sin embargo, se observó un incremento en la presencia de *Escherichia coli* en el agua tratada, lo que sugiere una posible recontaminación en la etapa de condensación porque las temperaturas no son controladas.

Como conclusión, el sistema de destilación es eficiente en la eliminación de impurezas físicas y químicas, pero no garantiza la potabilidad del agua sin una etapa adicional de desinfección. Este banco experimental representa una herramienta valiosa para la enseñanza y la investigación en energías renovables y procesos de tratamiento de agua, permitiendo a los estudiantes analizar el impacto de la destilación solar y proponer mejoras en el diseño del sistema.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica
Director: Juan Pablo Flórez Mera. PhD. Ingeniería Mecánica

ABSTRACT

Title: Design and Construction of a Water Distillation System Using Solar Energy for the Thermal Systems Laboratory *

Authors: Luis Felipe Mantilla Medina y Esteban David Salcedo Niño **

Key Words: Solar distillation, water treatment, water quality, test bench, renewable energy, *Escherichia coli*.

Description:

This undergraduate thesis presents the design, construction, and evaluation of a simple water distillation system utilizing solar energy, developed as an experimental test bench for academic use at the School of Mechanical Engineering of the Universidad Industrial de Santander. The system is flexible and operates at different pressure levels, including vacuum pressure. It consists of an evacuated solar thermal collector, a copper tube for evaporation, and a condensation tank. Comparative tests were conducted on water samples from a mechanical workshop sink, before and after treatment, evaluating physicochemical parameters (pH, conductivity, turbidity, alkalinity, ion presence) and microbiological factors (total coliforms and *Escherichia coli*).

The results showed a significant improvement in the physicochemical quality of the water, with reductions in turbidity, conductivity, and the presence of nitrates and sulfates, indicating effective removal of dissolved solids and chemical contaminants. However, an increase in *Escherichia coli* concentration was observed in the treated water, suggesting possible recontamination during the condensation stage due to the lack of controlled temperatures.

In conclusion, the distillation system is efficient in removing physical and chemical impurities but does not ensure water potability without an additional disinfection stage. This experimental test bench serves as a valuable tool for teaching and research in renewable energy and water treatment processes, allowing students to analyze the impact of solar distillation and propose improvements to the system design.

* Undergraduate thesis.

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering
Project Director: Juan Pablo Flórez Mera. PhD in Mechanical Engineering

1. Planteamiento del problema

La escasez de agua y el cambio climático hacen parte de los desafíos más alarmantes que enfrenta la humanidad. Según la Organización de las Naciones Unidas (2024), el agua y el cambio climático están estrechamente relacionados, el cambio climático afecta al agua presente en el planeta de formas complejas desde los patrones de lluvia impredecibles hasta la reducción de las capas de hielo, inundaciones y sequías. Actualmente, alrededor de 2 mil millones de personas carecen de agua potable segura y la mitad de la población mundial sufre escasez de agua en algún momento del año, cifras que se prevé que aumenten debido al cambio climático y al crecimiento poblacional.

En el ámbito de la gestión del agua, la potabilización es un proceso esencial antes de que ésta llegue a los hogares. De acuerdo con el Acueducto de Bogotá (2023), para la potabilización del agua cruda en plantas convencionales que utilizan fuentes de agua superficial se sigue una secuencia de procesos más o menos estándar en donde luego de filtrar objetos grandes como peces y residuos naturales se inicia el proceso de floculación en el que se añaden coagulantes químicos al agua para lograr que las diminutas partículas en suspensión que la enturbian se atraigan entre sí para formar “flóculos”, y cuando son lo suficientemente grandes y pesados como para sedimentarse se procede a trasladar el agua hacia estanques calmos de sedimentación o decantación. Luego, cuando la mayoría de los sólidos se ha sedimentado, típicamente ocurre alguna forma de filtración ya sea por medio de arena o de membranas, también con la posibilidad de agregar otros productos químicos para ajustar el pH.

Es evidente que se requieren procesos bioquímicos adicionales para potabilizar el agua, tal cual como se hace en los acueductos de las ciudades, sin embargo, la destilación puede utilizarse

para separar del agua una gran cantidad de los residuos sólidos y sustancias miscibles no deseadas. Para este fin, y teniendo en cuenta la crisis climática actual, es posible apoyarse en la búsqueda de soluciones sostenibles desarrollando sistemas que aprovechen la energía residual de otros procesos o que se integren más fuentes de energía renovable como la solar térmica.

Por otro lado, el laboratorio de Sistemas Térmicos de la escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander se destaca por contar con una amplia variedad de bancos de pruebas, por ejemplo, para sistemas de refrigeración por ciclo de vapor, de control de temperatura, de conducción de calor en estado transitorio, entre otros. Esta diversidad de equipos permite que los estudiantes interactúen directamente con los procesos termodinámicos y de transferencia de calor, y con este trabajo se busca dotar al laboratorio con un sistema enfocado al uso de energías renovables, específicamente la radiación solar, utilizando un colector solar como fuente de energía para destilar agua residual proveniente, por ejemplo, de un lavamanos en la universidad y determinar si es posible que el producto condensado pueda reincorporarse a algún proceso y reutilizarse.

Con el fin de solucionar la problemática se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué características debe tener el diseño de un sistema de destilación de agua que priorice el aprovechamiento de la energía solar térmica recibida en Bucaramanga y pueda ser utilizado para el aprendizaje en los laboratorios de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander?

2. Justificación

Se propone diseñar este sistema de destilación de agua residual para su uso en el campus universitario y destinarlo a ser una herramienta para hacer pruebas sobre este proceso en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Mecánica, logrando abrir oportunidades para que en la universidad puedan llevarse a cabo investigaciones relacionadas con el área de energías renovables. Por lo cual, este banco de pruebas de destilación solar es una contribución académica que aumenta el valor científico e investigativo de la Escuela de Ingeniería Mecánica considerando los laboratorios como una herramienta valiosa en la formación, ya que con ellos los estudiantes alcanzan objetivos como experimentar y aplicar conceptos teóricos y desarrollar capacidades para interpretar resultados reales.

Socialmente se brinda una oportunidad de desarrollo a comunidades en regiones que carecen de agua potable, mejorando significativamente la calidad de vida proporcionando a las generaciones presentes y futuras un acceso seguro a este recurso hídrico indispensable si el banco de laboratorio se adapta para tal fin. Desde la perspectiva ambiental, se busca incentivar más el uso de energías limpias, en este caso, el hecho de aprovechar el sol como esa fuente inagotable y natural de energía permite obtener ventajas como la disminución en la emisión de gases de efecto invernadero. De la mano con ello, se complementa que en el presente trabajo de investigación se aprovecharán equipos y elementos que han llegado al punto de no usarse en el laboratorio de Sistemas Térmicos de Ingeniería Mecánica.

Como contribución adicional, el modelo de destilación de agua propuesto tiene la capacidad de beneficiar tanto a la comunidad académica como a las instalaciones de la universidad,

ya que promueve una alternativa ambientalmente sostenible para la gestión de recursos en caso de que se desee implementar en un proceso que requiera destilación.

Desde el punto de vista funcional, se logrará mejorar la eficiencia de un colector solar por medio de la implementación de concentradores solares que permiten multiplicar el flujo de radiación por unidad de área hacia la zona donde convergen los rayos, representando una ventaja potencial cuando la irradiancia solar en un momento determinado del día es baja debido a las condiciones climáticas.

3. Objetivos

3.1.Objetivo general

Contribuir con la misión de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander en la formación de Ingenieros Mecánicos de alta calidad científica y espíritu investigativo, mediante el desarrollo de un prototipo para la destilación de agua al vacío utilizando colectores solares.

3.2.Objetivos específicos

- Dimensionar los subsistemas encargados de la concentración de la irradiancia solar, evaporación y condensación para producir medio litro de agua destilada por hora.
- Evaluar la calidad del agua destilada al emplear el sistema de destilación propuesto.
- Desarrollar una guía de aprendizaje para el uso del prototipo en el Laboratorio de Sistemas Térmicos, así como documentación instructiva de plan de mantenimiento y operación.

4. Antecedentes

4.1. Antecedente a nivel internacional

4.1.1. *Estudios sobre la transferencia de calor/masa en un sistema de desalinización debido a la integración de una cámara colectora solar y una chimenea disipadora de calor (Hu, 2022)*

En este trabajo de investigación se aborda el problema de la escasez de agua potable, destacando su importancia en un contexto de crecimiento poblacional y cambio climático. Se han desarrollado tecnologías de desalinización que, a pesar de ser altamente efectivas, presentan desventajas en términos de consumo energético y contaminación al largo plazo, por lo tanto, en esta investigación se propone un sistema de desalinización solar térmica que busca ser energéticamente eficiente, de bajo costo y con impacto ambiental mínimo. El sistema consta de una cámara colectora solar acoplada a una chimenea de cobre que actúa como disipador de calor, permitiendo la producción de agua destilada sin residuos.

Este trabajo de investigación es una contribución sustancial a la tesis en el análisis de los factores que determinan la recolección de agua en el sistema de desalinización, los fundamentos teóricos que son necesarios para trabajar con energía solar térmica en procesos de destilación, las ecuaciones y correlaciones que son empleadas y la metodología aplicada en el tratamiento y análisis de datos.

4.2. Antecedentes Nacionales

4.2.1. *Prototipo de un destilador solar activo de doble pendiente, como método de obtención de agua potable para las comunidades vulnerables de Antioquia, Medellín, Colombia (Buelvas et al., 2020)*

El propósito de esta investigación es construir un destilador solar activo de doble pendiente con la finalidad de proporcionar agua potable haciendo uso de fuentes de energía renovable. Tiene un enfoque exploratorio y descriptivo con el propósito de reducir los costos de producción y cubrir las necesidades de comunidades vulnerables que carecen de acceso a la electricidad o redes de agua convencionales. Para ello, se siguió una metodología que comprendió la observación, investigación y revisión bibliográfica para formular el proyecto, identificando las necesidades específicas de las comunidades y diseñando un prototipo que se adecuara a sus recursos disponibles y limitaciones. Como resultado de este proyecto, se logró desarrollar un destilador solar que optimizó y economizó el proceso de obtención de agua potable gracias a su alto rendimiento energético.

Se aborda la problemática de la falta de agua potable en muchas regiones de Colombia desde una perspectiva ingenieril y de diseño. Se espera también que este trabajo sirva como base para implementaciones futuras del banco de pruebas propuesto y para investigaciones posteriores que mejoren la eficiencia y economía de los equipos tecnológicos ya que el proyecto podría en el futuro ser fabricado a una escala mayor.

Este estudio no solo contribuye a la investigación en la reducción de costos y la durabilidad, sino que también identifica los materiales necesarios y disponibles en el mercado para la construcción de un destilador que emplee energía solar térmica.

4.3. Antecedentes locales

4.3.1. Diseño y construcción de un destilador solar activo de agua para abastecer el consumo de un hogar ubicado en el asentamiento La Estanzuela del municipio de Girón, departamento Santander (Mejía et al., 2023)

Este trabajo de grado implementa tubos colectores solares al vacío que contienen el fluido y un colector parabólico compuesto (CPC) orientado de manera estratégica para maximizar la captación, el reflejo y concentración de la radiación solar, desarrollando la máquina en base a un modelo matemático existente para prever el rendimiento del equipo, calculando la producción anual aproximada de agua destilada y presentando resultados de pruebas fisicoquímicas y microbiológicas. El estudio realizado contribuye en este proyecto a complementar la definición de algunos parámetros funcionales y no funcionales, determinar un ángulo de inclinación de la superficie de un colector solar dependiendo de la época del año, y las mediciones experimentales realizadas de las condiciones ambientales del sector donde se hace el estudio.

4.3.2. Diseño y construcción de un prototipo de evaporador al vacío por bomba de calor para depuración de aguas residuales industriales (Rojas et al., 2014)

En este trabajo de grado, se diseñó y construyó un prototipo para el tratamiento de aguas residuales industriales, se enfocó el uso de este en la industria tintorera debido a que ésta necesita agua para todos sus procesos en grandes cantidades diarias. El agua tratada fue sometida a análisis físicos y químicos que permitieron determinar su calidad final. Los resultados obtenidos al usar el prototipo diseñado y construido abren la posibilidad de profundizar en este estudio e implementar este tipo de sistema en otras industrias, y la contribución de su desarrollo al presente trabajo de grado es a modo de orientación hacia la termodinámica que implica este tipo de procesos industriales y el procedimiento de verificación de resultados.

5. Marco teórico

5.1. Aguas residuales

Las aguas residuales son cualquier tipo de agua cuya calidad está afectada negativamente por la influencia antropogénica. Se trata de agua que no tiene valor inmediato para el fin para el que se utilizó ni para el propósito para el que se produjo debido a su calidad, cantidad o al momento en que se dispone de ella (Zarza, 2024).

5.1.1. Aguas residuales urbanas

Las aguas residuales domésticas o la mezcla de éstas con aguas residuales industriales o con aguas de escorrentía pluvial. (Zarza, 2024)

5.1.2. Aguas residuales domésticas

Las aguas residuales procedentes de zonas de vivienda y de servicios, generadas principalmente por el metabolismo humano y las actividades domésticas. (Zarza, 2024)

5.1.3. Aguas residuales industriales

Todas las aguas residuales vertidas desde locales utilizados para cualquier actividad comercial o industrial, que no sean aguas residuales domésticas ni aguas de escorrentía pluvial. (Zarza, 2024)

5.2. Características de las aguas residuales

Los parámetros físicos, químicos y biológicos son utilizados para definir las características de las aguas residuales, dado que cada muestra de agua residual es única, los aspectos evaluados en cada uno de estos parámetros variarán según su origen. Para llevar a cabo este proceso de caracterización se realiza un muestreo cuidadoso que preserve sus cualidades para su análisis en laboratorio. Se emplean tantos métodos de análisis químico, físico y biológico.

5.2.1. *Biológicas*

Las propiedades biológicas se presentan a través de microorganismos que pueden servir como indicadores de la contaminación del agua tales como:

- Bacterias: pueden estar presentes en grandes cantidades y son índice de contaminación fecal como es el caso de E. Coli.
- Hongos: organismos eucariotas que pueden estar presentes en aguas residuales en forma de esporas u otras estructuras. Algunos hongos pueden estar asociados con la descomposición de materia orgánica presente en el agua.
- Protozoos: microorganismos unicelulares eucariotas, muchos de ellos patógenos y pueden causar enfermedades si el agua no está adecuadamente tratada.
- Algas: organismos fotosintéticos que pueden crecer en aguas residuales ricas en nutrientes. Puede indicar un exceso de nutrientes en el agua, lo que provoca problemas de eutrofización en cuerpos de agua receptores. Animales: en las aguas residuales también pueden encontrarse organismos macroscópicos como insectos, crustáceos y gusanos. La presencia de ciertas especies puede indicar la presencia de altos niveles de contaminación orgánica.

5.2.2. *Físicas*

El agua pura en estado líquido carece de olor y sabor. A temperatura y presión atmosférica normales, su punto de congelación se sitúa en 0 °C, mientras que su punto de ebullición alcanza los 100 °C. La densidad del agua alcanza su valor máximo a 4 °C, y al congelarse, su volumen aumenta. Las características físicas del agua se emplean como estándares en la definición de escalas de temperatura (Muñoz, 2008) y en resumen comprenden aquellas como turbiedad, color, olor, sabor, temperatura y conductividad.

5.2.3. Químicas

Debido a su capacidad para disolver numerosas sustancias en grandes cantidades, el agua pura es escasa en la naturaleza. Durante su circulación a través de la corteza terrestre, el agua interactúa con los minerales del suelo y las rocas, por lo cual los componentes disueltos en el agua superficial y subterránea incluyen sulfatos, cloruros, bicarbonatos de sodio y potasio, y óxidos de calcio y magnesio (Muñoz, 2008). En este tipo de propiedades las más importantes que se tienen son la alcalinidad, acidez y grupos de nitrógeno.

5.3. Destilación de agua

La destilación permite separar sustancias líquidas o fundidas, evaporando las partículas más volátiles mediante la aplicación de calor externo para posteriormente ser condensadas mediante enfriamiento, es decir, se transforman del estado gaseoso al estado líquido. Durante este proceso sólo se mueve una fase, es decir, el vapor del líquido en ebullición. (BÜCHI Labortechnik AG, 1998).

Primero, la energía sensible (en kJ) toma su lugar para llevar una cantidad de masa m del agua desde una temperatura inicial $T_{inicial}$ a su temperatura de saturación T_{sat} de acuerdo con la Ecuación 1, y cuando se ha alcanzado la temperatura de saturación, el flujo de energía latente requerido (en kW), en este caso, entre líquido y gaseoso para el agua, se calcula con la Ecuación 2. Si se requiere un análisis más especializado en transferencia de calor se puede recurrir a correlaciones experimentales.

$$Q = m \cdot c_{p,l}(T_{sat} - T_{inicial}) \quad \text{Ecuación 1}$$

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot h_{fg} \quad \text{Ecuación 2}$$

En donde para las anteriores expresiones,

\dot{m} en kg/s, es el flujo másico en cambio de fase del fluido, puede interpretarse como la tasa de vapor de agua que se está generando.

\dot{Q} en kW, es la tasa de calor necesaria para que el cambio de fase ocurra a esa tasa \dot{m} .

h_{fg} en kJ/kg, es la entalpía de vaporización, es decir, la cantidad de energía requerida para el cambio de fase por unidad de masa.

$c_{p,l}$ es el calor específico a presión constante en estado líquido, en kJ/Kg°C.

5.3.1. *Ebullición en piscina*

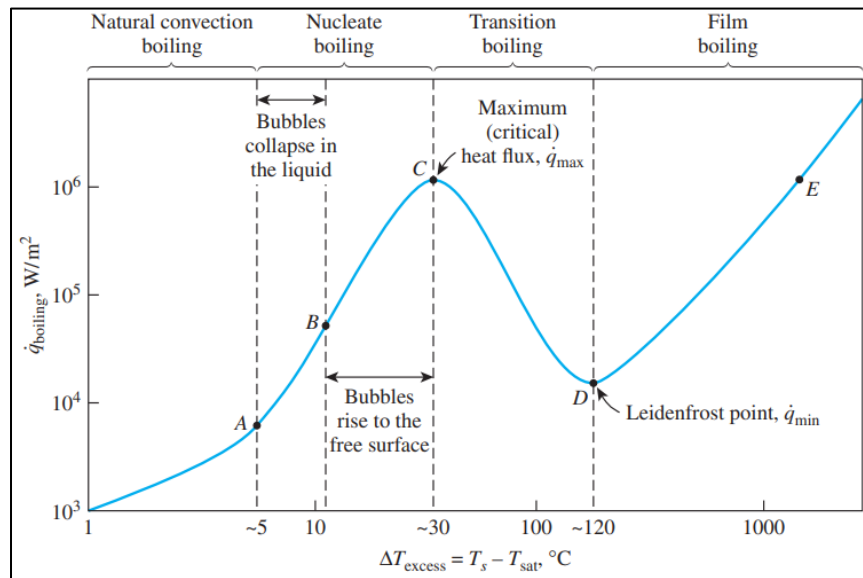
La vaporización es el proceso en el que la sustancia se transforma desde su estado líquido al estado gaseoso y puede ocurrir por medio de evaporación o ebullición. Se conoce como evaporación cuando la temperatura del líquido está por debajo de su temperatura de ebullición, por ejemplo, un charco de agua eventualmente se evaporará al ambiente sin haber sido forzado, esto ocurre únicamente desde la superficie del fluido (interfaz líquido-vapor con el exterior).

Por otro lado, la ebullición sucede en una interfaz sólido-líquido donde la transferencia de energía en el líquido se da en todo su volumen. El líquido está en contacto con la superficie que se mantiene a una temperatura lo suficientemente superior a la temperatura de saturación. Se caracteriza por la rápida formación de burbujas de vapor en la interfaz sólido-líquido que se desprenden de la superficie cuando alcanzan cierto tamaño e intentan ascender a la superficie libre del líquido. En la ebullición en piscina, el fluido no está forzado a moverse con ningún tipo de ayuda mecánica, sino que se mueve debido a las corrientes de convección natural y por el movimiento de las burbujas bajo la influencia de la flotabilidad. S. Nukiyama en 1934 se convirtió en el pionero del estudio de la ebullición,

utilizó alambres de platino y nicromo calentados eléctricamente sumergidos en líquidos en sus experimentos y concluyó que en este proceso se pueden identificar cuatro regímenes dependiendo del valor de la diferencia de temperatura de exceso, como se ilustra en la curva de ebullición del agua de la Figura 1. (Çengel, 2015, pág. 601)

Figura 1

Curva de ebullición para el agua a presión de 1 atm



Nota: Regímenes de ebullición para el agua. Adaptado de: Çengel, Y. (2015) Heat and Mass Transfer Fundamentals & Applications.

La ebullición por convección natural inicia cuando la superficie que se calienta se lleva a una temperatura ligeramente superior a la de saturación del agua. En la Figura 1 está representado desde el inicio de la curva hasta el punto A.

En la ebullición nucleada la formación de burbujas inicia en el punto A, en la superficie de calentamiento, a una velocidad cada vez mayor en sitios de nucleación a medida que se avanza a lo largo de la curva de ebullición hacia el punto C. De acuerdo con la Figura 1, la ebullición nucleada existe aproximadamente en el rango de 5°C a 30°C.

La tasa de transferencia de calor depende en gran medida de la naturaleza de la nucleación (el número de sitios de nucleación activos en la superficie, la tasa de formación de burbujas en cada sitio, etc.), así como las imperfecciones en las superficies. Estas complicaciones, dificultaron el desarrollo de relaciones teóricas para la transferencia de calor en ebullición nucleada por lo que la confianza tuvo que recaer en correlaciones experimentales. La correlación más utilizada para la ebullición nucleada fue propuesta en 1952 por Rohsenow de la Ecuación 3, constituida por las variables de la Tabla 1. (Çengel, 2015, pág. 601).

$$\dot{q}_{nuc} = \mu_L \cdot h_{fg} \cdot \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{\frac{1}{2}} \left[\frac{c_{pl}(T_s - T_{sat})}{C_{sf} \cdot h_{fg} \cdot Pr_l^n} \right]^3 \quad \text{Ecuación 3}$$

Tabla 1.

Variables de la tasa de flujo de calor nucleado de la Ecuación 3.

Variable	Significado	Unidades
\dot{q}_{nuc}	Flujo de tasa de calor para ebullición nucleada	W/m^2
μ_L	Viscosidad del líquido	$kg/m \cdot s$
g	Aceleración gravitacional	m/s^2
ρ_L	Densidad del líquido	kg/m^3
ρ_v	Densidad del vapor	kg/m^3
σ	Tensión superficial de la interfaz líquido-vapor	N/m
c_{pl}	Calor específico del líquido	$J/kg \cdot ^\circ C$
T_s	Temperatura superficial del calentador	$^\circ C$
T_{sat}	Temperatura de saturación del fluido	$^\circ C$
C_{sf}	Constante experimental de la combinación superficie-fluido	Adimensional
Pr_l	Número de Prandtl del líquido	Adimensional
n	Constante experimental que depende del fluido	Adimensional

Nota. Regímenes de ebullición para el agua. Adaptado de: Çengel, Y. (2015) Heat and Mass Transfer Fundamentals & Applications.

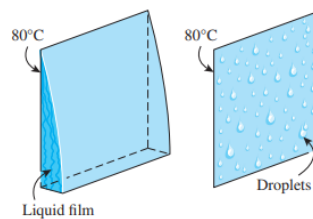
5.3.2. Condensación

La condensación ocurre cuando la temperatura del vapor se reduce por debajo de su temperatura de saturación T_{sat} . Cuando esto es requerido, usualmente el vapor se pone en contacto con una superficie sólida cuya temperatura T_s cumple con esa condición. (Çengel, 2015, pág. 613)

Se estudiaron dos formas de condensación aplicables para el proyecto: condensación por película líquida y condensación en gota.

Figura 2

Imagen representativa de la condensación por película y en gota.



Nota. Cuando el vapor se expone a una superficie cuya temperatura es menor a la de saturación del vapor, sobre esta superficie se forma condensación por película líquida o en gotas individuales. (Çengel, 2015, pág. 614)

5.3.2.1. Condensación por película líquida.

El condensado humedece la superficie y forma una película líquida sobre ella que se desliza hacia abajo por la influencia de la gravedad y el espesor de la película líquida aumenta en la dirección del flujo a medida que se condensa más vapor sobre ella. Así es como se produce normalmente la condensación en la práctica. (Çengel, 2015, pág. 614).

El calor latente de vaporización h_{fg} es el calor liberado cuando se condensa una unidad de masa de vapor, y representa la transferencia de calor por unidad de masa de condensado formado. Sin embargo, el condensado en un proceso de condensación real se enfría aún

más hasta una temperatura promedio entre T_{sat} y T_s , liberando más calor en el proceso, por lo tanto, la transferencia de calor real será mayor. Rohsenow demostró en 1956 que el enfriamiento del líquido por debajo de la temperatura de saturación puede explicarse reemplazando h_{fg} por el calor latente de vaporización modificado h_{fg}^* , definido en la Ecuación 4, donde c_{pl} es el calor específico del líquido a la temperatura promedio de la película. (Çengel, 2015, pág. 615).

$$h_{fg}^* = h_{fg} + 0.68 \cdot c_{pl} \cdot (T_{sat} - T_s) \quad \text{Ecuación 4}$$

Teniendo eso en cuenta, cuando el vapor de agua está en saturación, la ecuación de la tasa de transferencia de calor para la condensación \dot{Q}_{cond} en función del área superficial, el flujo másico condensado en la parte más baja, y el coeficiente de transferencia de calor por convección, siendo respectivamente, A_s , \dot{m} , h , se expresa como dos igualdades a continuación

$$\dot{Q}_{cond} = h \cdot A_s (T_{sat} - T_s) = \dot{m}_{cond} \cdot h_{fg}^* \quad \text{Ecuación 5}$$

5.3.2.2. Condensación en gota

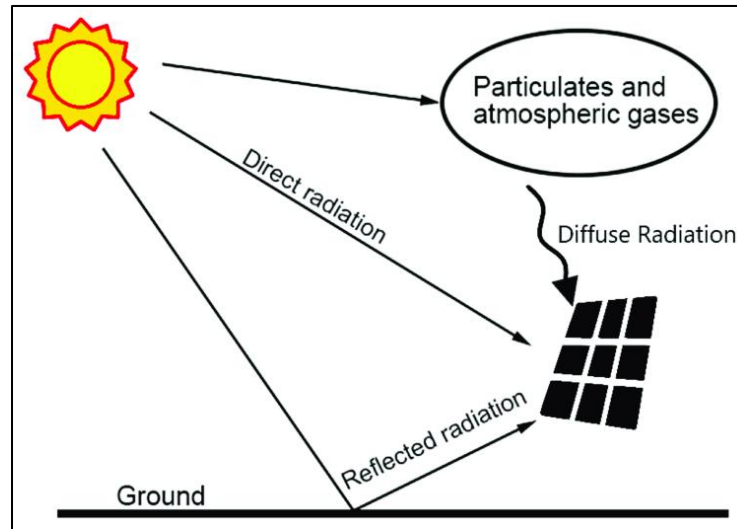
Caracterizada por innumerables gotas de distintos diámetros sobre la superficie de condensación en lugar de una película líquida continua, es uno de los mecanismos más eficaces de transferencia de calor. Las gotas que se forman en los sitios de nucleación en la superficie crecen debido a la condensación continua, se fusionan en gotas grandes y se deslizan hacia abajo cuando alcanzan un cierto tamaño limpiando la superficie y exponiéndola al vapor. El desafío de la condensación gota a gota no es lograrla, sino sostenerla durante períodos prolongados de tiempo, se puede obtener agregando un químico promotor al vapor o recubriendo la superficie con un polímero como teflón o un metal noble como oro, plata, rodio, paladio o platino. (Çengel, 2015, p. 628).

5.4. Energía solar térmica

La energía solar térmica contempla cualquier tecnología de aprovechamiento de la radiación solar y la convierte en calor para transferirlo generalmente a un fluido.

Figura 3

Clasificación de los componentes de la radiación solar (Matius et al., 2021)



Nota. Adaptado de: Matius et al. (2021). On the Optimal Tilt Angle and Orientation of an On-Site Solar Photovoltaic Energy Generation System for Sabah's Rural Electrification. doi:10.3390/su13105730

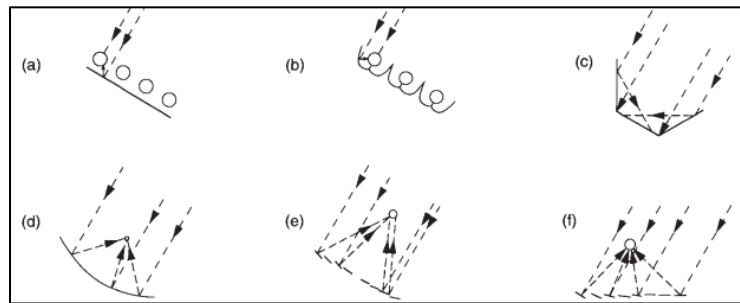
De la radiación solar recibida se identifican tres tipos, la radiación solar directa recibida por el sol sin haber sido dispersada por la atmósfera, la radiación solar difusa que se recibe del sol después de que su dirección ha cambiado por dispersión de la atmósfera, y la reflejada por las superficies cercanas. De acuerdo con esto, sobre una superficie, la suma de las tres es la radiación solar total, las mediciones más comunes son la radiación total sobre una superficie horizontal, a menudo denominada radiación global en la superficie. (Duffie & Beckam, 2013)

5.5. Concentración de energía solar térmica

Para muchas aplicaciones es deseable suministrar energía a temperaturas superiores a las posibles con colectores de placa plana, esto se puede realizar disminuyendo el área desde donde se producen las pérdidas de calor interponiendo un dispositivo óptico entre la fuente de radiación y la superficie absorbente, pueden ser reflectores o refractores, cilíndricos para enfocar una “línea” o circulares para enfocar un “punto”. Los receptores pueden ser cóncavos, planos o convexos. (Duffie & Beckam, 2013, págs. 322, 323)

Figura 4

Configuraciones de colectores concentradores.



Nota. a) absorbentes tubulares con retroreflector difuso; (b) absorbentes tubulares con reflectores de cúspide especulares; (c) receptor plano con reflectores planos; (d) concentrador parabólico; (e) reflector de Fresnel; (f) helióstatos con receptor central. (Duffie & Beckam, 2013, p. 323).

La relación de concentración es una relación entre las áreas de apertura y del receptor. Por la segunda ley de termodinámica, tiene un límite superior de 45,000 para concentradores tridimensionales y de 212 para bidimensionales. (Duffie & Beckam, 2013, pág. 325).

$$C = \frac{A_{ap}}{A_{rec}}$$

Ecuación 6

En donde A_{ap} es el área de apertura del concentrador, y A_{rec} es el área del receptor.

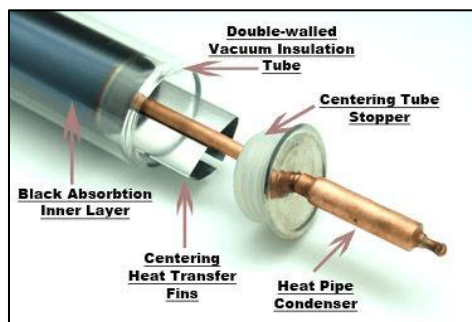
5.6. Colección de energía solar térmica

Existen diversos métodos para usar la radiación solar y convertirla en calor, uno de ellos es el implementado en el banco de pruebas, justificado por los cálculos de la resolución metodológica.

Los tubos de vacío solares han sido los sistemas de producción de energía solar más eficientes para aplicaciones de alta temperatura o climas fríos, pero son más caros que otros sistemas planos o colectores de paneles. Un tubo de vacío solar tiene un diseño similar al de un termo de café, consta de dos capas de vidrio con un vacío entre ellas. La capa exterior del tubo solar es vidrio borosilicato, con bajo contenido en hierro y permite el paso del 98% de la radiación solar y la segunda capa interior tiene aplicados revestimientos con alta absorptividad y baja emisividad. (Nothern Lights Solar Solutions, 2024).

Figura 5

Tubo colector solar evacuado con implementación de Heat Pipe de cobre.



Nota. Componentes de un tubo colector solar evacuado, adaptado de: Nothern Lights Solar Solutions. (2024). solartubs.com. Obtenido de How does a solar vacuum tubes work:

<https://www.solartubs.com/how-do-solar-vacuum-tubes-work.html>

Generalmente, estos recubrimientos son de nitruro de aluminio y acero inoxidable mediante tecnología de pulverizado.

6. Metodología

6.1. Enfoque de investigación

El presente proyecto tiene un desarrollo cuantitativo y experimental, ya que se estudian los aspectos objetivos y susceptibles de cuantificación del diseño de un sistema térmico destacando el análisis numérico de dimensiones, fabricación y costo que son resultado de un proceso de cálculo, de forma que estos resultados se ajusten a las necesidades sociales y académicas de acuerdo con los objetivos planteados.

6.2. Fases del proyecto

6.2.1. Fase 1: Determinación de los requerimientos y restricciones de diseño

Una vez definido el problema, en esta fase metodológica se determinan los requerimientos funcionales, que son aquellos que describen lo que debe hacer el sistema y cómo lo debe hacer, qué datos debe almacenar y qué operaciones debe realizar; y los requerimientos no funcionales que están orientados a aspectos no directos al funcionamiento, como el uso, portabilidad, mantenibilidad y restricciones de espacio, legales y de recursos.

Adicionalmente, se analiza cuantitativamente la irradiancia solar recibida, presión atmosférica y temperatura ambiental en la Universidad Industrial de Santander, datos adquiridos por estaciones meteorológicas en la aplicación web WeatherLink y datos oficiales del IDEAM. Para el montaje del sistema en la universidad se utiliza la estación meteorológica de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Esta información obtenida asentará las bases para conocer el potencial de energía solar que se dispone e iniciar con el diseño del banco de pruebas.

6.2.2. Fase 2: Diseño conceptual

Esta parte metodológica contempla aterrizar ideas conceptuales que podrían utilizarse para solucionar el problema y ajustarlas progresivamente con los requerimientos de diseño considerando que algunos cálculos y modificaciones son de tipo iterativo.

6.2.2.1. Evaluación cualitativa de alternativas de diseño. Se presentan alternativas de diseño para el método de concentración y colección de radiación solar. En esta fase, por medio de una matriz QFD y Pugh se analizan los requerimientos de diseño para seleccionar la mejor alternativa.

6.2.2.2. Cálculo y dimensionamiento de subsistemas. Por medio de cálculos de transferencia de calor y termodinámica, se diseñan los subsistemas de la máquina correspondientes al calentamiento, evaporación y condensación del agua.

6.2.3. Fase 3: Diseño en detalle

Con el fin de precisar la función de cada subsistema, se determinarán todos los componentes para cada uno, sus dimensiones y la manera en que serán ensamblados. Se utiliza la versión de SolidWorks proporcionada por la Escuela de Ingeniería Mecánica para la creación de piezas, ensamblajes y planos.

6.2.4. Fase 4: Construcción del sistema

La construcción implica la compra del material, herramientas e instrumentación necesaria, adquisición de servicios de manufactura y el proceso de ensamblaje que puede realizarse progresivamente a medida que se adquieren las piezas.

6.2.5. Fase 5: Pruebas preoperacionales

Se verifica y garantiza el buen estado de tuberías, soldaduras, mangueras, accesorios de tubería y el correcto funcionamiento de máquinas rotativas. De igual forma, se realizan pruebas a

los dispositivos de lectura electrónicos y mecánicos antes de realizar la puesta en marcha del sistema con el agua de tratamiento.

6.2.6. Fase 6: Adquisición y tratamiento de datos

6.2.6.1. Obtención de la muestra de agua residual. Se escoge como fuente de este recurso el agua residual de lavamanos en la Universidad Industrial de Santander la cual será sometida a un estudio físico químico y microbiológico antes de ser tratada en el banco de pruebas.

6.2.6.2. Adquisición de variables experimentales. Una vez terminadas las correcciones durante la fase preoperacional, el sistema puede ponerse en marcha. Para la toma de datos se plantea realizar un seguimiento a presión atmosférica, irradiancia solar, temperatura ambiente por medio de la aplicación web Davis WeatherLink, en paralelo con la lectura y registro de datos como la temperatura del agua y temperatura del vapor para determinar la presencia de flujo másico hacia el subsistema de condensación y la presión del sistema con mediciones periódicas ya que se implementará un vacuómetro mecánico.

Las pruebas que son objeto de estudio estarán compuestas por la destilación de agua a presión atmosférica y a presión reducida en aproximadamente un 70% dependiendo de la bomba de vacío a utilizar. Por motivo de logística y facilidad para el proyecto se traslada el banco de pruebas al municipio de Piedecuesta, Santander para la toma de datos experimentales de prueba con agua limpia y con el agua de tratamiento. Esta ubicación a solo 24 kilómetros de la universidad, con muy poca variación en la latitud inicial, cuenta con una presión atmosférica casi idéntica a Bucaramanga (en promedio 101.1 kPa). Finalmente, al completar el proceso de destilación del día de trabajo, se realiza la medición de masa del condensado obtenido.

6.2.6.3. Tratamiento de datos. El tratamiento de datos será llevado a cabo en Microsoft Excel para realizar la comparación de los datos experimentales con los datos teóricos, generar gráficas para el análisis y explicar las relaciones existentes entre las variables térmicas, de posicionamiento e inclinación del tubo y concentrador parabólico.

6.2.7. Fase 7: Análisis de calidad del agua

Se realiza un estudio fisicoquímico y microbiológico del condensado obtenido comparándolo con el estado antes del tratamiento. A partir de esto, se determinan las aplicaciones que puede tener esta agua y si podría reincorporarse al proceso.

6.2.8. Fase 8: Elaboración de la documentación de instrucciones de operación, mantenimiento y guía de laboratorio

Se plantea el desarrollo de un manual de operación y de mantenimiento que contenga instrucciones claras sobre el funcionamiento del banco de pruebas, incluyendo procedimientos de inicio, operación normal, parada y mantenimiento preventivo. El manual también está conformado por los planos detallados que se realizan en la fase 3.

Finalmente, como objetivo sólido se propone diseñar la guía de laboratorio que permita a los estudiantes comprender los componentes y su funcionamiento, incluyendo actividades prácticas que sean objeto de evaluación en la asignatura de sistemas térmicos.

7. Resolución metodológica de diseño

A lo largo de las primeras etapas es donde se puede evaluar con precisión las alternativas del proyecto y determinar su viabilidad ejecutiva.

7.1. Resolución de requerimientos y restricciones de diseño

7.1.1. Requerimientos funcionales

En la Tabla 2 se presentan los requerimientos de diseño del banco de pruebas.

Tabla 2

Requerimientos funcionales identificados y las condiciones meteorológicas de Bucaramanga.

Requerimientos funcionales	
Requerimiento	Descripción
Origen del agua a tratar	Lavamanos del taller de metalmecánica de la escuela de ingeniería mecánica
Tipo de energía a utilizar	Energía solar para la ebullición, con poco uso de energía eléctrica para una bomba de vacío
Demanda de condensado	Mínimo 0.5 L/h
Horario de operación	De 8 am a 4 pm
Condiciones meteorológicas	
Variable	Descripción
Temperatura ambiente	Entre 21 °C y 29 °C
Velocidad del viento	Promedio 1.78 m/s
Presión atmosférica	756.15 mmHg = 100.8 kPa
Irradiancia total solar promedio	Promedio min. 305 W/m ² Promedio máx. 439 W/m ²
Irradiancia directa estimada según estación meteorológica	Mínimo 417 W/m ²

Nota. Adaptado de: autores.

Los datos son tomados de la aplicación Davis WeatherLink con las estaciones meteorológicas de la escuela de ingeniería mecánica para la futura operación en el campus, y del Instituto Colombiano del Petróleo para la toma de datos experimental en Piedecuesta. En el Apéndice 3 se presentan los valores promedio de irradiancia durante cada mes en el área metropolitana de Bucaramanga para que sean de referencia al lector.

A pesar de que son valores promedio durante todo el día, el banco de pruebas solo operará en horarios de mayor potencial solar. Es debidamente necesario tener en cuenta que el promedio de la irradiancia obtenido por las fuentes corresponde a la irradiancia total, la cual es la suma de las irradiancias directa, dispersada por la atmósfera y reflejada por objetos adyacentes en la superficie, es decir que los piranómetros de las estaciones meteorológicas utilizadas miden la irradiancia total sin hacer esa distinción, esto es un factor de decisión muy influyente para determinar el diseño y operación debido a que en la región se presentan días con cielo bastante nublado en la mayoría del año, y de acuerdo con el libro de ingeniería solar de Duffie & Beckam (2013, pág. 324), los concentradores con receptores mucho más pequeños que el área de apertura (de concentración lineal y puntual, no planos) son efectivos únicamente con la radiación directa. Esto se debe a que enfocan la radiación directa en el receptor si el Sol se encuentra en el plano central del concentrador (es decir, el plano que incluye el eje focal y la línea del vértice del reflector), y lo que ocurre con la radiación difusa es que la luz se dispersa en múltiples direcciones y estos rayos dejan de comportarse casi de forma directa como se esperaba.

Luego de realizar inspecciones periódicas al valor de la irradiancia recibida, durante cada tiempo de actualización de datos en las estaciones (tiempo variable entre 1 y 10 minutos), se presentan las tablas del Apéndice 4 y Apéndice 5 correspondientes a momentos, estrictamente distinguidos por los autores, con cielo despejado tabulando la irradiancia total promedio y el valor máximo, en horarios extremo 8 am, 9 am, 3pm y 4 pm, obteniendo como promedio de los valores máximos que sugieren irradiancia directa $562 W/m^2$, y el mínimo captado entre esos máximos fue $417 W/m^2$, el cual será utilizado en el proceso de cálculo.

7.1.2. *Requerimientos no funcionales*

7.1.2.1. Seguridad. En los acabados de las piezas, se asegura la ausencia de bordes afilados que puedan representar un riesgo al operario. Además, se emplea señalización en áreas de peligro, y materiales resistentes al calor y aislantes para evitar el riesgo de quemaduras.

7.1.2.2. Sostenibilidad. Debe ser diseñado con un enfoque integral de sostenibilidad, asegurando que su operación y disposición final no generen impactos negativos en el medio ambiente ni representen riesgos para la salud humana. Para el caso de los residuos o subproductos, se debe implementar un plan de gestión responsable para su adecuada disposición, garantizando que no se depositen en sitios que puedan afectar el ecosistema o la salud de las personas. Esto aplica también para el uso de materiales y consumibles que no se estén utilizando en el laboratorio de la escuela de ingeniería mecánica y puedan ser aptos para reutilizarse, como láminas de acero inoxidable para tanques de almacenamiento, aislantes térmicos, entre otros. En la Figura 6 se presentan los tubos colectores solares y la pared en acero inoxidable para un tanque.

Figura 6

Elementos sin usar en el laboratorio de sistemas térmicos.



Nota. Tubos colectores solares al vacío (izquierda) y cuerpo de tanque en lámina de acero inoxidable (derecha). Adaptado de: autores.

7.1.2.3. Operabilidad. El sistema de destilación debe ser fácil de usar y entender tanto para los profesionales capacitados como para los estudiantes. El monitoreo de los datos experimentales como temperatura y presión debe ser simple y claro, puede implementarse una placa Arduino UNO, y usar manómetros mecánicos, de esta manera se requieren competencias que ya se han adquirido en la carrera y que encajan muy bien en el entorno académico. La instrumentación mecánica y electrónica del sistema deben ubicarse en lugares accesibles y que sean intuitivos para su lectura. Se requiere que la puesta en marcha del sistema una vez ensamblado en el sitio sea menor a 15 minutos, y para la práctica un máximo de 1.5 horas, considerando el tiempo disponible para una sesión regular de laboratorio.

7.1.2.4. Instalación y mantenibilidad. Generalmente los sistemas de captación de energía solar se ubican en sitios elevados donde puedan evitarse las sombras de construcciones de los alrededores. Esto implica que tanto para su instalación como mantenimiento se requiera personal capacitado para trabajo en alturas, por lo cual, en caso de que el sistema requiera estar en un área de riesgo de caída, de acuerdo con la Resolución 4272 de 2021 de Colombia, se deben definir las medidas de prevención a ser utilizadas sea tarea rutinaria o no rutinaria. Debe ser práctico para instalar y realizar labores de mantenimiento, priorizando uniones y accesorios removibles en lugar de uniones fijas como soldadura, siempre y cuando sea posible y las condiciones funcionales, de operación y seguridad lo permitan. Para evitar pérdidas en la eficiencia de los componentes, se debe realizar labores de limpieza y mantenimiento periódicamente.

7.1.2.5. Transporte y espacio. Al tratarse de un banco de pruebas que utiliza energía solar, y evaluando los espacios disponibles para tomar pruebas y conservar el sistema, se establece como limitación sobre el suelo un área máxima de 3 m x 1 m, considerando las dimensiones del tubo solar y el subsistema de condensación. Siendo fácil de operar para cualquier persona se estima una altura máxima de 150 cm, y para facilitar el traslado entre diferentes ubicaciones sin comprometer funcionalidad ni seguridad se debe priorizar un diseño modular en subsistemas y que cada uno cuente con ruedas para su movilización y frenado.

7.1.2.6. Costo. Se debe tener en cuenta los costos directos, aquellos como materiales, componentes electrónicos y servicios de fabricación, garantizando su viabilidad económica dentro del alcance de los autores, para lo cual se determina un límite de COP \$3.000.000

7.2. Resolución de diseño conceptual

Se presentan los requerimientos funcionales tales como el flujo másico y área, en términos de otros parámetros como las temperaturas, presión, energía y potencia. El diseño de estos sistemas posee un carácter iterativo y de parametrizar variables para dimensionar las piezas.

7.2.1. Evaluación cualitativa de alternativas de diseño

De acuerdo con la matriz QFD en la Figura 7, se prioriza un diseño orientado al aprendizaje implementando componentes para lectura de temperaturas y presión, dar preferencia al aumento de la eficiencia energética solar, sostenible para todo el proceso, y que la generación del producto condensado si bien no necesariamente será en cantidades grandes como a nivel industrial pero que sí sea una variable posible de caracterizar y medir dentro del tiempo que dure una sesión regular de laboratorio. Todo lo anterior está limitado por el espacio donde se va a ubicar y transportar el

banco de pruebas, y en caso de que sea necesario desensamblar, se requiere que esta labor pueda realizarse sin demasiada complejidad.

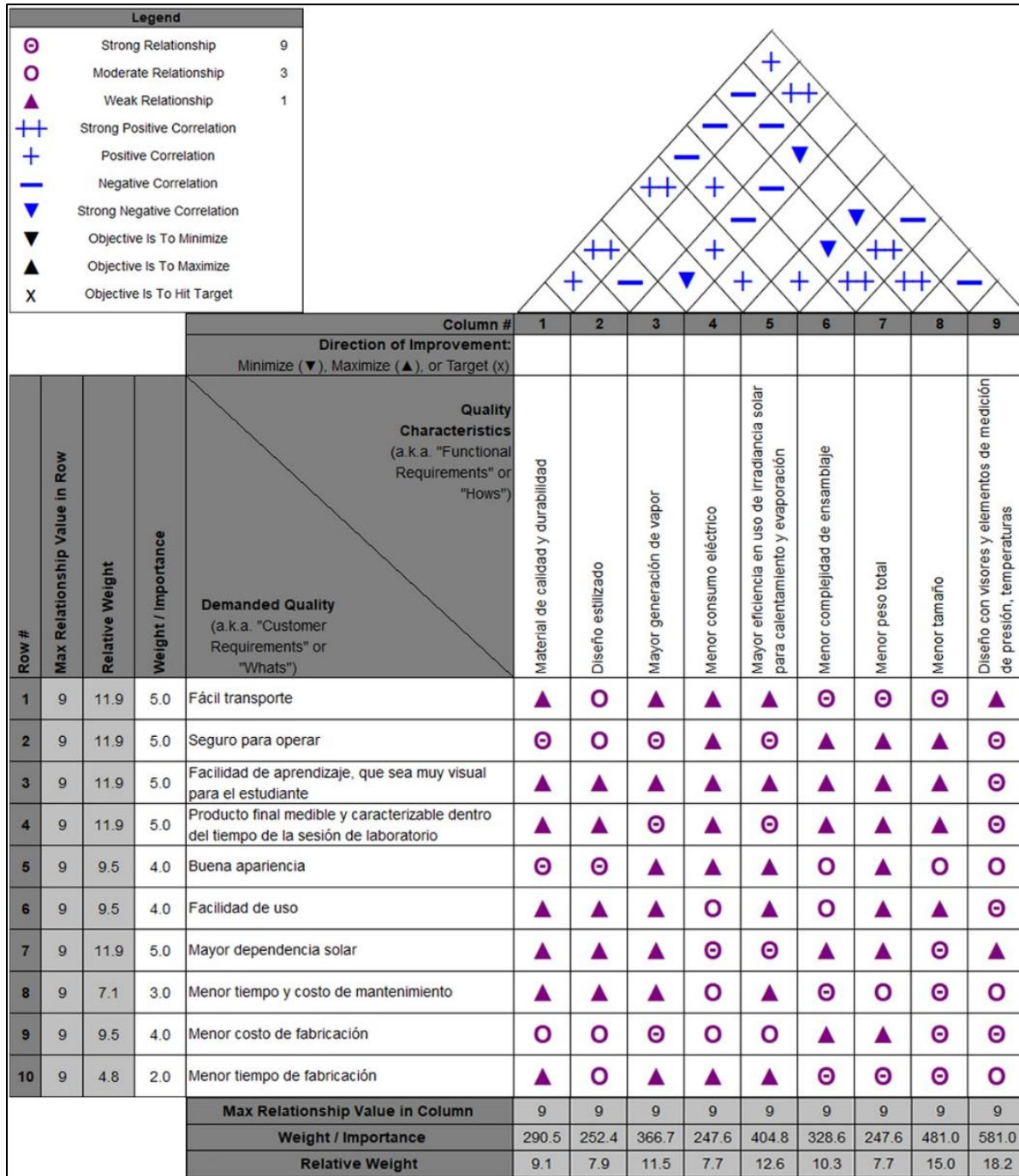
Luego, se usa una matriz Pugh para la selección de alternativas de esta manera:

- Se añaden especificaciones a cada criterio que está relacionado con las alternativas de diseño de la matriz QFD aumentando el nivel de detalle para una buena selección.
- Se utilizan los niveles de prioridad de la matriz QFD para establecer puntos de importancia de acuerdo con su peso relativo: de 0 a 5 es igual 1 punto, 5 a 10 son 2 puntos, 10 a 15 son 3 puntos, y 15 a 20 son 4 puntos.
- Se evalúa el cumplimiento de cada alternativa en una escala de cumplimiento del 1 al 5 donde el 5 significa cumplimiento con el criterio en su totalidad y el 1 es nulo cumplimiento.
- El puntaje final de cada alternativa es la suma de la multiplicación entre el cumplimiento de cada criterio y su respectivo nivel de importancia.

La alternativa seleccionada es el diseño con enfoque de colección de radiación solar en línea, es decir, a lo largo de un tubo, favoreciendo el uso de los tubos solares y además debido a que por su alta capacidad térmica ocupando menos área se consiguen temperaturas más altas que en un concentrador plano y presenta más facilidad para construirlo en lugar de uno de enfoque puntual.

Figura 7

Matriz QFD para el sistema de destilación de agua.



Nota. Adaptado de: autores. Se utilizó plantilla del sitio web QFDOnline.com.

Tabla 3

Matriz Pugh de selección de alternativas de diseño para el método de colección solar.

Importancia	Criterio	Alternativa	Placa plana		Enfoque de línea (tubo)		Enfoque puntual	
			Puntaje	Puntaje x importancia	Puntaje	Puntaje x importancia	Puntaje	Puntaje x importancia
2	Materiales de calidad y durables		4	8	4	8	4	8
2	Diseño estilizado		4	8	5	10	5	10
3	Mayor generación de vapor		4	12	5	15	3	9
3	Mayor eficiencia en uso de irradiación solar		2	6	4	12	5	15
2	Menor consumo energético (eléctrico)		5	10	5	10	5	10
3	Menor complejidad de ensamblaje: mejor implementación de un concentrador solar		5	15	4	12	2	6
2	Menor peso total		3	6	5	10	4	8
3	Menor tamaño		2	6	3	9	4	12
2	Menor costo de fabricación e implementación		4	8	5	10	2	4
Puntaje total				79		96		82

Nota. Adaptado de: autores.

7.2.2. Análisis energético y de transferencia de calor para la ebullición de agua

Reformulando la Ecuación 1 y Ecuación 2 con variables identificables para el análisis, el subíndice w hace referencia al agua, y se estudia la energía de calentamiento y ebullición en Joules.

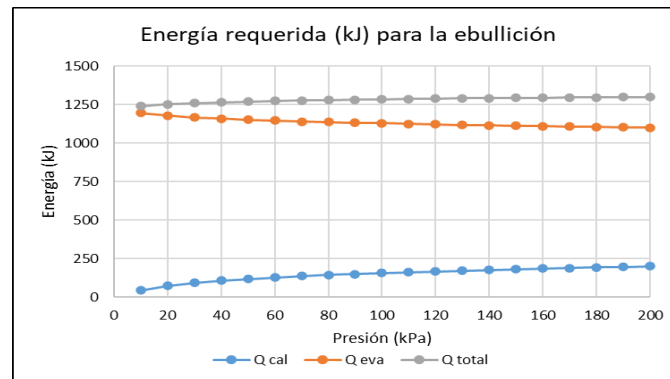
Con el objetivo de conservar la utilidad sencilla del banco de pruebas y evitar sobrecostos, el reabastecimiento de agua residual se realiza manualmente por lotes. El calor sensible requerido $Q_{req,cal}$ se calcula con la Ecuación 7 y el calor latente requerido es $Q_{req,eva}$ en la Ecuación 8. En la Figura 8 se presentan estos valores y el calor total, para 0.5 kg de agua, en función de la presión.

$$Q_{req,cal} = m_w \cdot c_{p,w} \cdot (T_{w,sat} - T_{w,0}) \quad \text{Ecuación 7}$$

$$Q_{req,eva} = m_w \cdot h_{fg,w} \quad \text{Ecuación 8}$$

Figura 8

Valores de energía requerida total para la ebullición de 0.5 kg de agua en función de la presión.



Nota. Adaptado de: autores.

De acuerdo con el cálculo, se evidencia que la demanda energética puede ser menor si se realiza vacío al sistema, pero esta reducción parece no ser tan significativa, por ejemplo, si se reduce la presión interna hasta 20kPa, se logra reducir la energía requerida total hasta apenas un 2.5%, lo que en condiciones reales estas mejoras se ven opacadas por pérdidas térmicas y mecánicas. Sin embargo, se requiere conocer el flujo de potencia para la ebullición nucleada.

7.2.2.1. Flujo de potencia para ebullición nucleada.

Se presentan en la Tabla 4 los valores mínimos de flujo de potencia requeridos para garantizar ebullición, en función de la presión interna, calculados con la Ecuación 3 para una temperatura de exceso de 5°C, empleando $C_{sf} = 0.0130$ y $n = 1.0$ correspondientes a la interfaz agua-cobre pulido referenciado en el libro de Transferencia de Calor y Masa (Çengel, 2015).

Tabla 4

Valores de flujo de calor para ebullición nucleada en función de la presión.

P [bar]	\dot{q}_{nuc} [W/m^2]	% reducción respecto a la presión atmosférica
0.2	4738	71.05
0.3	6562	59.90
0.4	8220	49.77
0.5	9758	40.37
0.6	11205	31.53
0.7	12578	23.14
0.8	13890	15.12
0.9	15150	7.42
1	16365	0.00

Nota. Adaptado de: autores.

De acuerdo con las estaciones meteorológicas UIS-IngMecánica y del ICP en Piedecuesta, a través de la aplicación WeatherLink, se recibieron valores iguales y mayores a $950 W/m^2$ entre los días 28 de diciembre de 2024 y 10 de febrero de 2025 durante momentos entre 11 am y 1 pm, evidenciando un alto flujo cuando las condiciones atmosféricas eran muy favorables, pero esto es apenas un 6% de lo que necesita el agua para garantizar ebullición nucleada, es decir, el tubo colector solar evacuado por sí solo no tiene la capacidad de hacer el proceso de forma continua, por lo tanto, es necesario implementar un concentrador para que el flujo recibido por el tubo colector solar pueda superar los valores mínimos calculados. Además, hay que considerar que la presión interna nunca será constante, a pesar de que se pudiera hermetizar el 100% del sistema,

ésta tiende a subir por el cambio de fase que experimenta el agua, haciendo que el vapor ocupe más volumen a mayor temperatura.

7.2.3. Diseño del subsistema de ebullición

El subsistema de ebullición de este banco de pruebas está conformado por un concentrador de irradiancia, un tubo colector solar y un tubo de cobre dentro de él. En esta sección se presenta el cálculo para determinar el área del concentrador de acuerdo con los requerimientos de diseño.

El uso de otro tubo dentro del tubo colector de vidrio soluciona la necesidad de conectar el subsistema de ebullición al subsistema de condensación que consta de tanques en acero inoxidable. Se selecciona como material el cobre debido a su excelente conductividad térmica, que se encuentra entre el rango de 385 a 401 $W/(m \cdot K)$. Al utilizar un tubo de cobre en el interior del colector, se asegura que el calor captado por el colector se transmita de manera eficiente al agua que se desea destilar, minimizando las pérdidas de energía y optimizando el rendimiento global del sistema.

Además, el cobre, debido a sus propiedades mecánicas permite hacer una conexión segura entre ambos subsistemas porque intentar realizar estas conexiones directamente en un tubo de vidrio no solo sería técnicamente complejo, sino también riesgoso, ya que el vidrio es frágil y no soporta bien la manipulación mecánica necesaria para instalar accesorios como bridas, válvulas o uniones. El cobre, en cambio, es un material ampliamente utilizado en sistemas de tuberías por su facilidad de soldadura y adaptación a diferentes configuraciones con metales.

El tubo colector de vidrio, a pesar de ser eficiente en la captación de energía solar, es susceptible a daños por estrés mecánico, debido a los cambios de presión positivos o negativos del agua y sus cambios de fase dentro del sistema. La inclusión de un tubo de cobre en el interior independiza del vidrio estos esfuerzos mecánicos reduciendo el riesgo de fracturas.

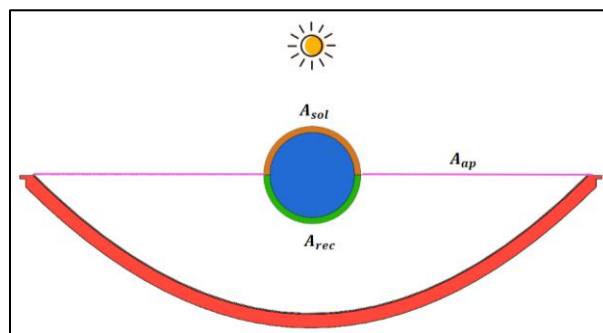
El cobre es un material altamente resistente a la corrosión, lo que lo hace compatible con una amplia gama de fluidos y condiciones de operación. Esta resistencia garantiza la durabilidad del sistema y reduce el mantenimiento requerido, a diferencia de otros materiales que podrían degradarse más rápido.

El uso de un tubo de cobre permite una mayor flexibilidad en el diseño del sistema porque este material puede ser fácilmente modificado o reconfigurado para adaptarse a cambios en el diseño o para integrar nuevos componentes en el futuro. Aunque el cobre puede representar un costo inicial más alto en comparación con otros materiales, su durabilidad, eficiencia térmica y baja necesidad de mantenimiento lo convierten en una inversión rentable a largo plazo.

Con el motivo de mantener una instalación simple y comprensible, se diseña el subsistema para que el tubo colector esté alineado de forma horizontal con los extremos de la lámina reflectora, dejando al foco de ésta en el centro como se muestra en la Figura 9 y Figura 10.

Figura 9

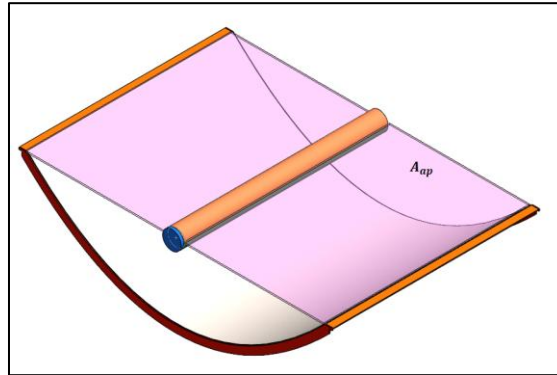
Vista frontal del subsistema de calentamiento y evaporación detallando áreas superficiales.



Nota. El tamaño de las piezas no está a escala para mejorar su visibilidad y comprensión. Se muestra el área del tubo expuesta al sol, área del tubo expuesta a la radiación recibida por el concentrador parabólico, y área de apertura del concentrador parabólico. Adaptado de: autores.

Figura 10

Vista isométrica del subsistema de calentamiento y evaporación.



Nota. El tamaño de las piezas no está a escala para mejorar su visibilidad y comprensión. El área sombreada rosa es el área de apertura de la parábola reflectora. Adaptado de: autores.

7.2.3.1. Características y propiedades del tubo colector solar.

A continuación, se presentan las características técnicas y propiedades de materiales.

Tabla 5

Propiedades de la película absorbente

Variable	Significado	Valor	Unidades
α_{abs}	Coefficiente de absorptividad	0.92	Adimensional
ϵ_{abs}	Coefficiente de emisividad	0.09	Adimensional
ρ_{abs}	Coefficiente de reflectividad	0.08	Adimensional
τ_{abs}	Coefficiente de transmisividad	0	Adimensional

Nota. Adaptado de: autores.

Tabla 6*Características técnicas del tubo colector solar*

Variable	Significado	Valor	Unidades
$A_{cs,si}$	Área superficial longitudinal interna (despreciando la punta)	0.2435	m^2
$A_{cs,se}$	Área superficial longitudinal externa (despreciando la punta)	0.3279	m^2
$D_{cs,i}$	Diámetro interno	42.9	mm
$D_{cs,abs}$	Diámetro anular interno (donde está la película absorbente)	48.9	mm
$D_{cs,e1}$	Diámetro anular externo	52	mm
$D_{cs,e2}$	Diámetro externo	58	mm
$e_{cs,pared}$	Espesor de la pared de vidrio	3	mm
L_{cs}	Longitud del tubo colector solar	1.8	m

Nota. Adaptado de: autores.

En la siguiente tabla se presentan las propiedades del material del tubo colector solar conocido también como vidrio Pyrex (ver Apéndice 25 y Apéndice 26).

Tabla 7*Propiedades del material del tubo colector solar*

Variable	Significado	Valor	Unidades
k_{cs}	Conductividad térmica	1.2	$W/(m \cdot K)$
ρ_{cs}	Densidad	2230	kg/m^3
α_{vidrio}	Coefficiente de absortividad	0.04	Adimensional
ε_{vidrio}	Coefficiente de emisividad	0.89	Adimensional
ρ_{vidrio}	Coefficiente de reflectividad	0.06	Adimensional
τ_{vidrio}	Coefficiente de transmisividad	0.85	Adimensional

Nota. Vidrio borosilicato 3.3 conocido como vidrio Pyrex. Adaptado de: autores.

7.2.3.2. Características y propiedades del tubo de cobre. Para determinar las características técnicas del tubo de cobre se hace necesario conocer su espesor mínimo. Su presión interna estará en el rango entre 0.2 bar a 2 bar refiriéndose en términos de presión absoluta.

Por medio del código ASME B31-3 se calcula el espesor mínimo para soportar presión interna. Para el tramo recto su espesor de pared se determina usando la siguiente ecuación.

$$e_{t,min} = e_{t,dis} + c_t \quad \text{Ecuación 9}$$

En donde:

c_t es la suma de las tolerancias mecánicas del tubo de cobre más las tolerancias por corrosión y erosión, se asume un valor de 0.5 mm para superficies maquinadas o ranuradas cuya tolerancia no se especifica.

$e_{t,dis}$ es el espesor de diseño por presión interna calculado con la Ecuación 10.

$$e_{t,dis} = \frac{P_{int} \cdot D_{t,ext}}{2 \cdot (S \cdot E \cdot W + P_{int} \cdot Y)} \quad \text{Ecuación 10}$$

$D_{t,ext}$ es el diámetro externo del tubo y debe ser menor al diámetro interno del colector solar, y el espacio entre los tubos debe ser suficiente para que pueda ingresar un termopar de 7 mm de diámetro de cabeza.

$$D_{t,ext} = D_{cs,int} - 7 \text{ mm} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$D_{t,ext} = 42.9 \text{ mm} - 7 \text{ mm}$$

$$D_{t,ext} = 35.9 \text{ mm}$$

Comercialmente la tubería de cobre más aproximada por debajo del $D_{t,ext}$ calculado, es el tubo de diámetro nominal 1"1/4 con un diámetro exterior de 34.925 mm, o 1" 3/8.

E es el factor de calidad para juntas longitudinales soldadas en tuberías, tubos y accesorios. Según el código para tubería sin costura de cobre y sus aleaciones, su valor es 1.0.

P_{int} es la presión interna del subsistema y por lo tanto la presión interna que tendrá que soportar el tubo, para emplearla en la ecuación debe ser la presión manométrica, para este banco de pruebas es 0.1 MPa equivalente a la presión atmosférica.

S es el esfuerzo permisible para tubería de cobre. Bajo condiciones de operación con el concentrador solar la temperatura máxima será 200°C, es decir, 392°F, y el valor del esfuerzo permisible es 3 ksi, equivalente a 20.68 MPa.

W es un factor de reducción de la resistencia de soldadura, que, para este caso según el código, se utilizará el valor de 1.0 debido a que la temperatura de operación se encuentra por debajo de 427°C.

El coeficiente Y toma el valor de 0.4 de acuerdo con la norma ya que los espesores comerciales para tubería de cobre menores o iguales al diámetro exterior calculado son menores al cociente $D_{t,ext}/6$ estipulado en el código, es decir, 6.31 mm para el diseño.

Ahora, calculando en la Ecuación 10 el espesor mínimo requerido para operar a presión manométrica interna de 2 bar = 0.2 MPa es:

$$e_{t,min} = \frac{0.2 \text{ MPa} \cdot 34.93 \text{ mm}}{2 \cdot (20.68 \text{ MPa} \cdot 1 \cdot 1 + 0.2 \text{ MPa} \cdot 0.4)} + 0.5 \text{ mm}$$

$$e_{t,min} = 0.6682 \text{ mm}$$

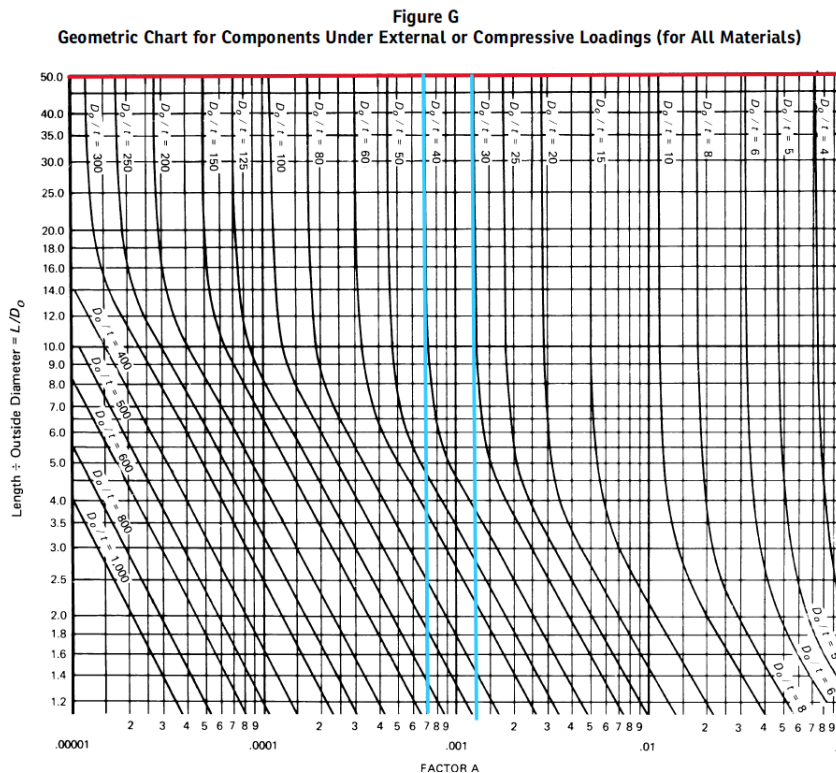
De acuerdo con el cálculo del espesor se puede seleccionar una tubería de cobre tipo M cuyo espesor de pared para ese diámetro es 0.042 pulgadas, equivalente a 1.067 mm.

Ahora bien, para la condición de operación con vacío, a presión absoluta interna de 0.2 bar, se determina si un tubo de cobre con esas características puede soportar la presión atmosférica externa. Si tiene 2 metros de longitud, la cual es aquella comercialmente disponible y puede usarse completo para el subsistema de ebullición, asumiendo el espesor de 1.067 mm para diámetro externo de 37.9 mm se calculan las siguientes relaciones: $\frac{L_t}{D_{t,ext}} = 52.77$ y $\frac{D_{t,ext}}{e_t} = 35.52$.

Luego, en la Figura 11, proporcionada en el código, se determina el factor A.

Figura 11

Diagrama geométrico de componentes sometidos a cargas externas.



Nota. Adaptado de: 2021 ASME Boiler & Pressure Vessel Code.

Según el código ASME, si $\frac{L_t}{D_{t,ext}} > 50$ se debe tomar el valor de 50 en el eje vertical.

Interpolando entre 0.0007 y aproximadamente 0.00145 se obtiene como resultado que el factor A es 0.0010359.

Luego en la Tabla 8, se determina que el valor del factor B es 5400 psi.

Tabla 8

Factor B en función del factor A y la temperatura de operación para tubo de cobre.

**Table NFC-6
Tabular Values for Figure NFC-6**

Temp., °F	A	B, psi	Temp., °F	A	B, psi
200	0.301 -03	2,500	300	0.442 -03	3,600
	0.669	5,550		0.70	4,550
	0.10 -02	6,500		0.10 -02	5,400
	0.20	8,200		0.20	7,200
	0.40	10,000		0.40	9,000
	0.60	11,000		0.60	10,000
	0.80	11,850		0.80	10,600
	0.10 -01	12,400		0.10 -01	11,100
	0.20	13,900		0.20	12,200
	0.40	14,900		0.40	12,800
	0.60	15,000	0.60	13,000	
300	0.307 -03	2,500			

Nota. Adaptado de: 2021 ASME Boiler & Pressure Vessel Code.

Finalmente, con la Ecuación 12 se calcula el valor de la presión externa máxima permisible,

$$P_{ext,max} = \frac{4 \cdot B}{3 \cdot (D_{t,ext}/e_t)} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$P_{ext,max} = \frac{4 \cdot 5400 \text{ psi}}{3 \cdot 35.52}$$

$$P_{ext,max} = 202.7 \text{ psi}$$

Su valor equivalente en bar es 13.9, un valor casi 14 veces más grande que el de la presión atmosférica en Bucaramanga que es 1 bar. Por consiguiente, la selección final del tubo de cobre cumple con los requisitos mínimos para operar a presión interna de vacío y también a presiones mayores pudiendo llegar hasta 13 bar absoluta.

Tabla 9*Características técnicas del tubo de cobre*

Variable	Significado	Valor	Unidades
$A_{t,se}$	Área superficial longitudinal externa (despreciando la punta)	0.2194	m^2
$A_{t,si}$	Área superficial longitudinal interna (despreciando la punta)	0.206	m^2
$D_{t,ext}$	Diámetro externo	34.925	mm
$D_{t,int}$	Diámetro interno	32.79	mm
L_t	Longitud	2	mm
$e_{t,pared}$	Espesor	1.067	mm

Nota. Para las características de las tuberías de cobre ver el Apéndice 27. Adaptado de: autores.

Tabla 10*Propiedades del cobre*

Variable	Significado	Valor	Unidades
k_t	Conductividad térmica	400	$W/(m \cdot K)$
ρ_t	Densidad	2230	kg/m^3

Nota. Para las características de las tuberías de cobre ver el Apéndice 27. Adaptado de: autores.

Para el diseño se tienen en cuenta las siguientes consideraciones con ayuda de la interpretación gráfica de la Figura 9 y Figura 10.

- El tubo se posiciona a una inclinación permanente de 7° respecto al suelo (que corresponde a la latitud de Bucaramanga), y orientado hacia el sur, para hacer seguimiento solar con el concentrador parabólico. Si se desea operar con concentrador fijo se puede orientar de oriente a occidente o viceversa, dependiendo del énfasis que quiera realizarse sea en la mañana o en la tarde.

- Las pérdidas por convección que experimenta el colector solar con el aire son muy cercanas a cero debido a que el espacio anular entre las dos capas del colector solar está evacuado. Por lo tanto, el área superficial de la película absorbente $A_{cs,abs}$ presenta pérdidas de radiación hacia los alrededores.
- Se asume que el sistema está en estado estacionario y que la temperatura en la película absorbente está 10°C por encima a de la superficie del tubo de cobre. Considerando además que esta temperatura del tubo de cobre para ebullición nucleada siempre debe estar por lo menos 5°C encima de la temperatura de saturación del agua, la cual depende de la presión interna del sistema. Por lo tanto, con la Ecuación 13 se calcula la temperatura asumida para la película absorbente de forma general.

$$T_{cs,abs} = T_{w,sat} + \Delta T_{excess} + 10^{\circ}\text{C} \quad \text{Ecuación 13}$$

- Debido al montaje a realizar, la mitad superior de la superficie absorbente emite radiación hacia el cielo y la mitad inferior lo hace hacia la superficie de acero de la parábola concentradora.
- La temperatura del cielo es $T_{sky} = 270 \text{ K}$.

7.2.3.3. Pérdidas térmicas. La temperatura máxima de la superficie interior es función de la presión interna a la que se encuentra el agua. Se realiza el ejemplo de cálculo para el caso de mayor demanda energética de acuerdo con la Tabla 4 en el que la presión interna es igual a la presión atmosférica. Si se garantiza la mínima condición de ebullición nucleada con $\Delta T_{excess} = 5^{\circ}\text{C}$, se cumple que $T_{cs,abs} = 114.6^{\circ}\text{C}$. Y en Kelvin $T_{cs,abs,K} = 387.8 \text{ K}$.

El montaje debe favorecer el movimiento giratorio de la parábola concentradora respecto a su foco, por lo cual se requiere de soportes rígidos en forma cilíndrica para el tubo, de manera

que el mecanismo de giro de la parábola pueda cumplir su función. De acuerdo con lo establecido en los requerimientos de diseño, se implementarán 2 parábolas por lo cual se tendrá en cuenta 3 soportes cilíndricos de acero para el tubo colector solar. Si los soportes se diseñan para que los dos extremos sean de 8 cm de largo y el del medio 10 cm ocupando en total 26 cm, por lo tanto, la longitud útil del colector solar se reduce a $L_{cs,u} = 1.54 \text{ m}$.

La superficie emite radiación considerada como pérdida térmica hacia los siguientes tres entornos:

- Radiación hacia el cielo

$$\dot{Q}_{L,rad1} = \pi \cdot D_{cs,abs} \cdot L_{cs,u} \cdot \varepsilon_{abs} \cdot \sigma \cdot (T_{cs,abs,K}^4 - T_{sky,K}^4) \quad \text{Ecuación 14}$$

$$\dot{Q}_{L,rad1} = \pi \cdot 0.0489\text{m} \cdot 1.54\text{m} \cdot 0.09 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4} \cdot ((387.8\text{K})^4 - (270\text{K})^4)$$

$$\dot{Q}_{L,rad1} = 20.89 \text{ W}$$

- Radiación hacia la parábola concentradora, asumiendo que el tubo es un objeto pequeño dentro de una cavidad (concentrador parabólico).

$$\dot{Q}_{L,rad2} = 0.5 \cdot \pi \cdot D_{cs,abs} \cdot L_{cs,u} \cdot \varepsilon_{abs} \cdot \sigma \cdot (T_{cs,abs}^4 - T_{cp,s}^4) \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\dot{Q}_{L,rad2} = 0.5 \cdot \pi \cdot 0.0489\text{m} \cdot 1.54\text{m} \cdot 0.09 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4} \cdot ((387.8\text{K})^4 - (314.9\text{K})^4)$$

$$\dot{Q}_{L,rad2} = 7.72 \text{ W}$$

- Radiación hacia la superficie interna de los soportes, se estima una temperatura de superficie en el interior del soporte cilíndrico de 32°C equivalente a 305.15 K.

$$\dot{Q}_{L,rad3} = \frac{\pi \cdot D_{cs,abs} \cdot 0.26\text{m} \cdot \varepsilon_{abs} \cdot \sigma \cdot (T_{cs,abs}^4 - T_{sf,si}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{abs}} + \frac{1 - \varepsilon_{sf}}{\varepsilon_{sf}} \cdot \frac{D_{cs,abs}}{D_{sf,i}}} \quad \text{Ecuación 16}$$

$$\dot{Q}_{L,rad3} = \frac{\pi \cdot 0.0489m \cdot 0.26m \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2K^4} \cdot ((387.8K)^4 - (305.15K)^4)}{\frac{1}{0.09} + \frac{1-0.3}{0.3} \cdot \frac{48.9mm}{65mm}}$$

$$\dot{Q}_{L,rad3} = 2.85 W$$

De esta manera la pérdida total por radiación es la suma de las tres:

$$\dot{Q}_{L,rad} = \dot{Q}_{L,rad1} + \dot{Q}_{L,rad2} + \dot{Q}_{L,rad3} \quad \text{Ecuación 17}$$

$$\dot{Q}_{L,rad} = 31.45 W$$

7.2.3.4. Balance energético: potencia neta recibida por el colector solar. En la siguiente Ecuación 18 se presenta el balance de energía para calcular el valor de irradiancia G_{foc} que se requiere recibir en la línea focal del concentrador parabólico y que está definido por la Ecuación 19, la cual es función de la incógnita de diseño que es el área de apertura de la parábola, y donde ρ_{cp} es la reflectividad del acero inoxidable de la lámina, aproximadamente 0.85.

$$\dot{Q}_{rec} = \alpha_{abs} \cdot (0.5 \cdot A_{cs,abs} \cdot G_{sol} + 0.5 \cdot A_{cs,abs} \cdot G_{foc}) - \dot{Q}_{L,rad} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$G_{foc} = \frac{A_{ap}}{A_{rec}} \cdot \rho_{cp} \cdot G_{sol} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$\dot{Q}_{rec} = \dot{q}_{rec} \cdot A_{t,si} \quad \text{Ecuación 20}$$

La aproximación a la solución del problema consiste en establecer un valor para el ancho de área de apertura X_{ap} , con él calcular la tasa de calor que recibe el tubo colector \dot{Q}_{rec} , y comparar el flujo recibido \dot{q}_{rec} con el \dot{q}_{nuc} teórico para la ebullición nucleada del agua. Si el valor de \dot{q}_{rec} es mayor o igual que el \dot{q}_{nuc} teórico para ese valor escogido de X_{ap} , entonces ese X_{ap} es válido.

Reemplazando en la Ecuación 21 y solucionando para \dot{q}_{rec} se obtiene:

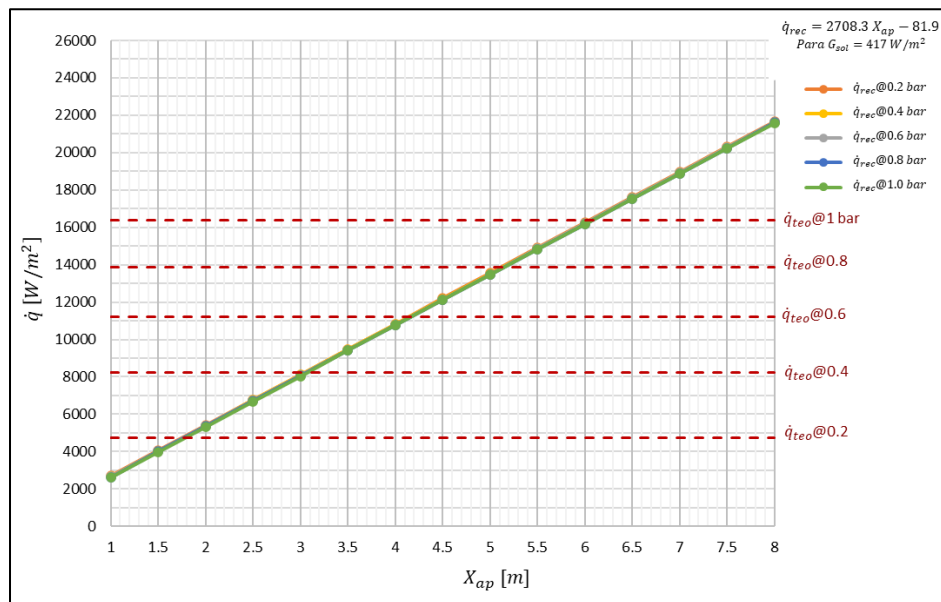
$$\dot{q}_{rec} = \frac{1}{A_{t,si}} \cdot [\alpha_{abs} \cdot G_{sol} \cdot (0.5 \cdot A_{cs,abs} + r_{cp} \cdot A_{ap}) - \dot{Q}_{L,rad}] \quad \text{Ecuación 21}$$

La demanda energética más alta ocurre cuando la presión iguala o supera la atmosférica, en donde según la Tabla 4 el flujo de potencia nucleado para presión atmosférica es 16365 W/m^2 . Calculando, se obtiene que el ancho de apertura para alta demanda es $X_{ap} = 6.08 \text{ m}$.

Gráficamente es posible ver que para este caso de diseño de $G_{sol} = 417 \text{ W/m}^2$, la relación entre el ancho del área de apertura y el flujo de calor recibido es lineal y la diferencia en el cálculo no es tan perceptible entre distintos valores de presión interna. Aunque no sea algo tan intuitivo, en la Figura 12 se pueden observar las tendencias lineales de \dot{q}_{rec} a presiones absolutas de 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 y 1 bar, pero las rectas se superponen entre ellas (ver tabla de valores calculados en el Apéndice 6). Sin embargo, es un hecho que al reducir la presión interna el área necesaria para el concentrador también disminuye.

Figura 12

Gráfica de flujo de calor recibido en función del ancho del área de apertura



Nota. Adaptado de: autores.

Por medio de las siguientes ecuaciones 22 y 23 se calcula el tiempo teórico con el concepto de termodinámica que tomaría el calentamiento y la evaporación para 1 kg de agua.

$$t_{cal} = \frac{m \cdot c_{p,w} \cdot (T_{w,sat} - 25^{\circ}C)}{\dot{Q}_{rec}} \quad \text{Ecuación 22}$$

$$t_{cal} = \frac{1 \text{ kg} \cdot 4183 \frac{J}{\text{kg} \cdot ^{\circ}C} \cdot (99.63^{\circ}C - 25^{\circ}C)}{3038 \frac{J}{s}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}$$

$$t_{cal} = 1.71 \text{ min}$$

$$t_{eva} = \frac{h_{fg,w}}{\dot{Q}_{rec}} \quad \text{Ecuación 23}$$

$$t_{eva} = \frac{2.26 \cdot 10^6 \frac{J}{\text{kg}}}{3038 \frac{J}{s}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}}$$

$$t_{eva} = 14.1 \text{ min}$$

El inconveniente es que el resultado de 6.08 m ocupa un área muy grande y esto excede los requisitos del proyecto, por lo que el ancho de apertura que se establece para el propósito de este trabajo es el máximo permitido de 1 metro.

Recalculando con este valor para esa nueva área de apertura se obtiene que la irradiancia solar directa incidente en el área de apertura debe ser como mínimo 720 W/m^2 para que ocurra ebullición nucleada con un mínimo de 4738 W/m^2 habiendo realizado una reducción a la presión interna del sistema para llevarlo hasta 0.2 bar iniciales, un valor promedio que puede ser obtenido durante el medio día, por lo que el subsistema de ebullición puede entregar vapor en ebullición nucleada.

Es posible evaporar agua cuando hay menos irradiancia hasta un determinado valor mínimo, pero ya no se va a garantizar el régimen de ebullición nucleada y la tasa de evaporación

que llegue al tanque de condensación será más baja o podría ser nula. Ahora, para las condiciones actualizadas, cuando $G_{sol} = 720 \text{ W/m}^2$, $P_{int} = 0.2 \text{ bar}$ y $X_{ap} = 1 \text{ m}$, los tiempos de calentamiento y evaporación para 1 kg de agua son respectivamente 2.78 minutos y 45 minutos.

Finalmente, con esta área de apertura se diseña en SolidWorks el modelo de una parábola de acuerdo con las indicaciones para el montaje y se determina que las dimensiones de la lámina para este concentrador parabólico deben ser 1.15 m de ancho y 1.54 m de largo.

Para cálculos posteriores, teóricamente en condiciones meteorológicas ideales, es decir, a irradiancia solar máxima y mayoritariamente directa de 1000 W/m^2 , y a presión de vacío de 0.2 bar, el sistema con las características geométricas ya establecidas puede entregarle un flujo de 6621 W/m^2 a la superficie del tubo de cobre donde está el agua y de esta forma generar vapor hacia el tanque a una tasa de 1.76 kg/h, considerando también el tiempo de calentamiento del agua y que las condiciones de operación tendrían que mantenerse durante esa hora.

Bajo esa premisa, en media hora se puede evaporar 0.88 kg equivalente a 0.88 L de agua. Estos valores máximos serán utilizados para calcular el área de transferencia de calor mínima para el subsistema de condensación.

7.2.4. *Diseño del subsistema de condensación*

El vapor generado ingresa a un tanque hermético fabricado en acero inoxidable a través de un único agujero perforado en la superficie longitudinal del tanque. La condensación ocurre cuando la temperatura de superficie del tanque está por debajo de la de saturación del vapor.

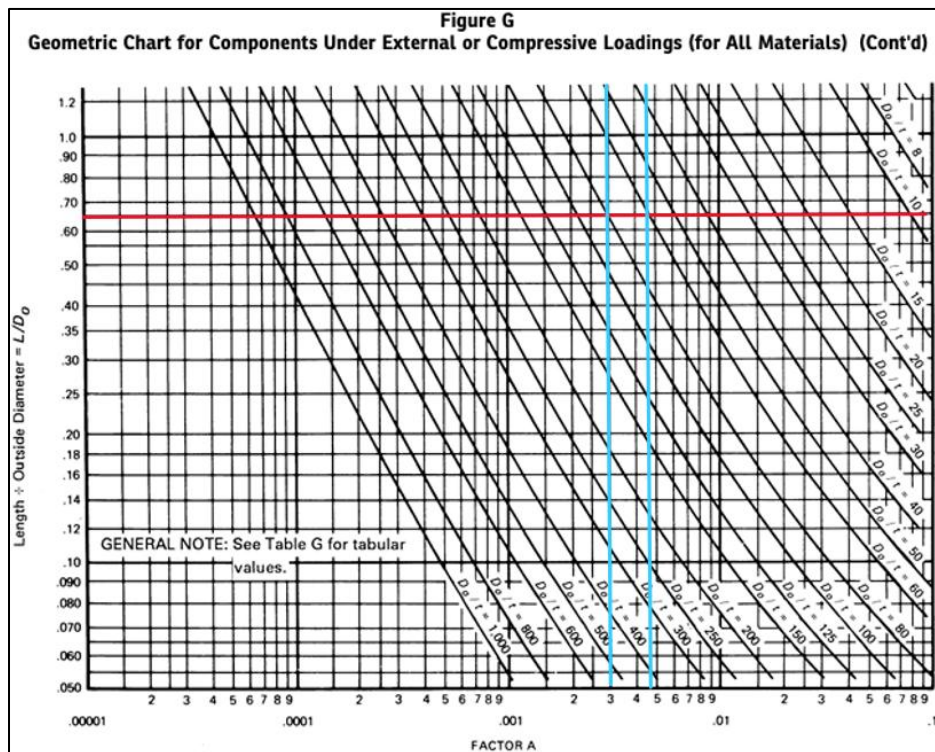
7.2.4.1. Tanque de condensación Las dimensiones conocidas de la lámina soldada que se reutiliza son, su espesor de 3 mm, altura de 138 mm y diámetro exterior de 206 mm.

Bajo el mismo principio de cálculo empleado en el espesor del tubo de cobre, se calcula el espesor de diseño del Tanque No. 1 de acuerdo con el código ASME para recipientes a presión y se compara con la lámina de acero inoxidable disponible en el taller de laboratorio.

Las relaciones por emplear en el código ASME se calculan y son: $D_{ta1,e}/e_{ta1} = 68.67$, $L_{ta,c}/D_{ta1} = 0.6699$. En la Figura 13, interpolando se obtiene el factor $A = 0.00396305$. Luego para una temperatura de 204°C equivalente a 400°F, se realiza interpolación en la Tabla 11 con ese valor de A, obteniendo para el factor B el valor de 9100 psi.

Figura 13

Diagrama geométrico de componentes sometidos a cargas externas.



Nota. Adaptado de: 2021 ASME Boiler & Pressure Vessel Code.

Tabla 11

Factor B en función del factor A y la temperatura de operación para acero AISI 304.

Table HA-1 Tabular Values for Figure HA-1					
Temp., °F	A	B, psi	Temp., °F	A	B, psi
100	0.142 -04	0.200 +03	900	0.181 -04	0.200 +03
	0.463 -03	0.650 +04		0.315 -03	0.350 +04
	0.150 -02	0.106 +05		0.400	0.386
	0.200	0.115		0.500	0.416
	0.300	0.125		0.150 -02	0.548
	0.100 -01	0.140		0.300	0.612
	0.631	0.158		0.100 -01	0.707
	0.100 +00	0.158		0.200	0.742
400	0.159 -04 0.391 -03 0.200 -02 0.300 0.400 0.500 0.100 -01 0.538 0.100 +00	0.200 +03 0.500 +04 0.820 0.910 0.969 0.100 +05 0.106 0.116 0.116	1,200	0.200 -04	0.200 +03
				0.283 -03	0.284 +04
				0.100 -02	0.416
				0.200	0.483
				0.500	0.554
				0.100 -01	0.595
				0.200	0.635
				0.488	0.670
700	0.170 -04 0.338 -03 0.400 0.500 0.600 0.100 -02 0.200 0.500 0.600 0.100 -01 0.542 0.100 +00	0.200 +03 0.400 +04 0.433 0.471 0.500 0.576 0.667 0.765 0.780 0.810 0.900 0.900	1,500	1.00 -04	0.905 +03
				1.10	0.100 +04
				3.12	0.2825
				4.00	0.300
				1.27 -03	0.350
				5.06	0.400
				4.00 -02	0.465
				1.00 -01	0.465

Nota. Adaptado de: 2021 ASME Boiler & Pressure Vessel Code.

Luego, con la siguiente ecuación se calcula la presión máxima permitida.

$$P_{ext,max} = \frac{4 \cdot B}{3 \cdot (D_{ta1,e}/e_{ta1})}$$

Ecuación 24

$$P_{ext,max} = \frac{4 \cdot 9100 \text{ psi}}{3 \cdot (68.67)}$$

$$P_{ext,max} = 176.7 \text{ psi}$$

La presión externa que puede soportar el tanque es 12 veces mayor a la presión atmosférica de Bucaramanga, por lo cual la lámina puede ser utilizada bajo condiciones de presión de vacío.

Ahora bien, para condiciones de presión interna mayores, se debe calcular también el valor de la presión máxima permitida. Según el mismo código para cualquier recipiente cilíndrico se calcula el factor A con la Ecuación 25, teniendo en cuenta la relación $\frac{R_{ta1}}{e_{ta}} = 34.33$

$$A = \frac{0.125}{(R_{ta1}/e_{ta})} \quad \text{Ecuación 25}$$

$$A = \frac{0.125}{34.33}$$

$$A = 0.003641$$

Luego, de forma similar se determina el valor del factor B por medio de interpolación en la Tabla 11 anteriormente utilizada, obteniendo B = 9478 psi, mucho mayor a incluso 2 bar (29 psi) como ejemplo de la posible presión interna máxima de operación en el tanque.

Se concluye que la lámina soldada disponible en el laboratorio es aceptable para el diseño y puede ser utilizada para continuar con la fabricación del tanque de condensación.

7.2.4.2. Intercambio de calor en la pared del tanque. El tiempo que toma la condensación a medida que va ingresando vapor al tanque, solamente puede ser igual o mayor al tiempo empleado en el primer proceso (calentamiento y evaporación). Es decir, cuando ambos procesos ocurren en simultáneo, por la ley de conservación de masa y energía el flujo másico de vapor generado nunca será menor al flujo másico de condensado.

Bajo ese orden de ideas, para el diseño del subsistema el valor del flujo másico de condensado requerido es igual al del máximo flujo másico de vapor generado en el subsistema de evaporación, es decir, cuando la irradiancia solar está en su máximo valor posible y la presión es reducida ya que se reduce el flujo nucleado necesario. Se calculó el valor de 1.76 kg/h, pero éste experimenta pérdidas en su camino hasta ingresar al tanque, tales como pérdidas por rugosidad de

los materiales, longitud de la manguera de unión entre el tubo y tanque, accesorios como uniones universales e instrumentos de medición, así como pérdidas térmicas debidas al ingreso al tanque cuando se inician las operaciones e inicialmente todo el sistema está a temperatura ambiente.

Investigaciones en libros y estándares de ingeniería sugieren el uso de factores como 1.25 y 1.3 lo que implica pérdidas del 25 y 30% en sistemas de transporte de vapor. Por lo tanto, para garantizar que el flujo de 1.76 kg/h pueda condensarse en el tiempo deseado, se aplica el factor de seguridad resultando en 2.29 kg/h compensando esas pérdidas.

Para iniciar, la temperatura de superficie promedio del área expuesta del tanque se asume como el promedio entre la temperatura del vapor que está dentro y la temperatura ambiente exterior.

$$T_{s,ta} = \frac{T_{v,sat} + T_{amb}}{2}$$

Ecuación 26

$$T_{s,ta} = \frac{60.25^{\circ}C + 25^{\circ}C}{2}$$

$$T_{s,ta} = 42.62^{\circ}C$$

Se calcula una entalpía modificada para condensación con la Ecuación 4 revisada en la teoría y reemplazando los valores de las variables se obtiene:

$$h_{fg}^* = 2.357 \cdot 10^6 \frac{J}{kg} + \left(0.68 \cdot 4182 \frac{J}{kg^{\circ}C} \cdot (60.25^{\circ}C - 42.62^{\circ}C) \right)$$

$$h_{fg}^* = 2.407 \cdot 10^6 \frac{J}{kg}$$

Se debe determinar el coeficiente de transferencia de calor del vapor, para este caso se asume pared vertical plana. La Ecuación 27 es la correlación citada por Çengel (2015), donde las propiedades del fluido dependientes de la presión se calculan a la presión reducida 0.2 bar de diseño del subsistema.

$$h_v = 0.943 \cdot \left[\frac{g \cdot (\rho_L - \rho_v) \cdot h_{fg}^* \cdot k_L^3}{\mu_L \cdot (T_{v,sat} - T_{s,ta}) \cdot H_{ta}} \right]^{\frac{1}{4}} \quad \text{Ecuación 27}$$

$$h_v = 0.943 \cdot \left[\frac{9.81 \frac{m}{s^2} \cdot \left(987.3 \frac{kg}{m^3} - 0.132 \frac{kg}{m^3} \right) \cdot 2.407 \cdot 10^6 \frac{J}{kg} \cdot \left(0.632 \frac{W}{m \cdot K} \right)^3}{5.342 \cdot 10^{-4} \frac{kg}{m \cdot s} \cdot (60.25^\circ C - 42.62^\circ C) \cdot 0.13m} \right]^{\frac{1}{4}}$$

$$h_v = 7828 \frac{W}{m^2 K}$$

En la cual se identifican las siguientes variables,

ρ_L es la densidad del agua en estado líquido, kg/m^3

ρ_v es la densidad del agua en estado gaseoso (vapor), kg/m^3

k_L es la conductividad térmica del agua en estado líquido, $W/(m \cdot K)$

μ_L es la viscosidad del agua en estado líquido, $kg/(m \cdot s)$

H_{ta} es la altura de la pared del tanque, m

Y la tasa de energía que debe transferir el vapor para hacer efectivo el cambio de fase se calcula con la Ecuación 28 de transferencia de calor.

$$\dot{Q}_{cond} = h_v \cdot A_{cond} \cdot (T_{v,sat} - T_s) \quad \text{Ecuación 28}$$

Al igualarlo con la ecuación de termodinámica se puede obtener cuánto condensado se está generando por unidad de tiempo, en función del área superficial de condensación, despejando las variables de interés se obtiene la ecuación Ecuación 29.

$$\dot{m}_{cond} = \frac{h_v \cdot A_{cond} \cdot (T_{v,sat} - T_s)}{h_{fg}^*} \quad \text{Ecuación 29}$$

Si se decide dejar expuesta al ambiente la mitad del área superficial longitudinal del tanque, se puede obtener una generación de condensado de 8.247 kg/h, un valor mayor a la tasa de vapor que ingresa, lo que indica que sí es posible dejar como intercambiador de calor con el aire ambiente a la mitad del área.

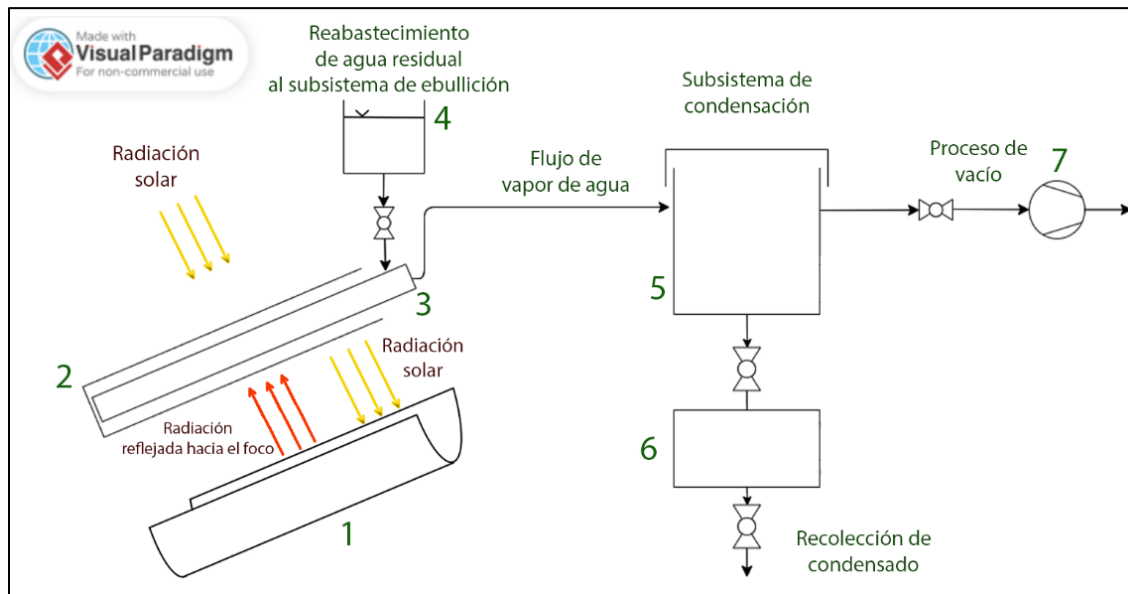
De acuerdo con los datos calculados y presentados en el Apéndice 7 se concluye que a partir de 0.4 bar no ocurre ebullición nucleada para un delta de 5°C, pero podría estarse presentando ebullición natural a bajos valores de delta. Cuando la presión es 0.2 bar, se pueden producir teóricamente en ebullición nucleada desde 0.66 kg/h de producto en adelante. La tabla de ese apéndice puede servir como referencia de la cantidad teórica de condensado obtenido luego de 1 hora de operación, asumiendo que la presión e irradiancia dentro de los valores correspondientes se llegara a mantener constante en ese tiempo.

7.2.5. Presentación del diseño del sistema de destilación y sus partes

En la siguiente figura se muestra un esquema del diseño propuesto del banco de pruebas.

Figura 14

Esquema resumen del diseño propuesto.



Nota. Diseño propuesto del banco de pruebas, elaborado en Visual Paradigm Online. Adaptado de: autores.

Tabla 12

Identificación de los componentes del banco de pruebas de este proyecto.

Ítem	Descripción de componente
Subsistema de ebullición	
1	Concentrador solar parabólico
2	Tubo colector solar al vacío
3	Tubo de cobre
4	Apertura para reabastecimiento de agua residual
Subsistema de condensación de vapor	
5	Tanque de condensación de vapor
6	Tanque de recolección de condensado
7	Bomba de vacío

Nota. Adaptado de: autores.

7.3. Resolución de diseño en detalle

En el Apéndice 30 se encuentran los planos en detalle de cada subsistema, sus piezas, componentes, ensamblajes y vistas explosionadas.

7.3.1. Subsistema de ebullición

El concentrador parabólico consiste en una lámina de acero inoxidable 430 con acabado brillante recocido (BA), es un acero laminado en frío que se somete a un recocido en una atmósfera controlada para mantener un acabado altamente reflectante. El acabado cuenta con una película de PVC en una de sus caras para ayudar a protegerlo contra rayones durante la fabricación e instalación. Comercialmente está disponible una lámina de 2438 mm x 1219 mm x 0.7 mm.

Figura 15

Vista general del subsistema de ebullición modelado en SolidWorks.



Nota. Adaptado de: autores.

El concentrador consiste en dos parábolas iguales que van soldadas a las estructuras de acero en las que cada una tiene dos marcos manufacturados en corte láser para garantizar la precisión de la geometría y están soldados con perfiles de acero que además le otorgan rigidez a todo el conjunto.

El tubo de cobre de 2 metros de longitud debe incorporar un agujero en la superficie longitudinal para soldar un adaptador de cobre y ensamblar una válvula. A través de ese agujero se reabastecerá el agua residual para el proceso de destilación y esta válvula para propósito de identificación en este trabajo adopta el nombre de “Válvula #1”. El tubo de cobre se introduce dentro del tubo colector solar de forma que la longitud restante permita acoplar la válvula

mencionada y un orificio adicional para hacer pruebas de estanqueidad, el cual tendrá ensamblado un tapón para el proceso de destilación real.

Figura 16

Tubos colectores solares al vacío.



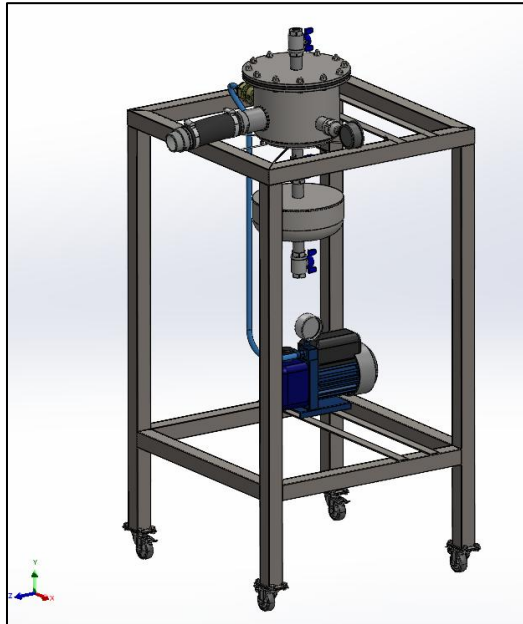
Nota: tubos colectores solares al vacío en el Laboratorio de Sistemas Térmicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Adaptado de: autores.

7.3.2. Subsistema de condensación

El subsistema de condensación consiste en dos tanques: el tanque de condensación y el tanque de recolección de condensado con el propósito de independizar la recolección únicamente del condensado que se ha generado y evitar que salga vapor todavía por la válvula cuando ella se abriera si se utilizara solo un tanque. La bomba de vacío seleccionada es una bomba de 1 etapa modelo SP-VP115N, de 2 CFM y $\frac{1}{4}$ HP de potencia.

Figura 17

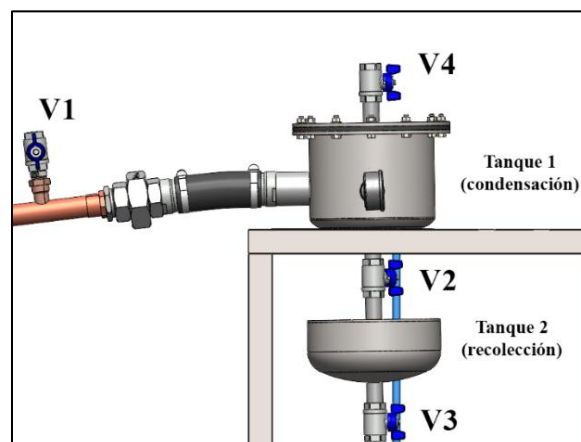
Vista general del subsistema de condensación modelado en SolidWorks.



Nota. Adaptado de: autores.

Figura 18

Nomenclatura empleada para las válvulas y tanques del sistema.



Nota. Adaptado de: autores.

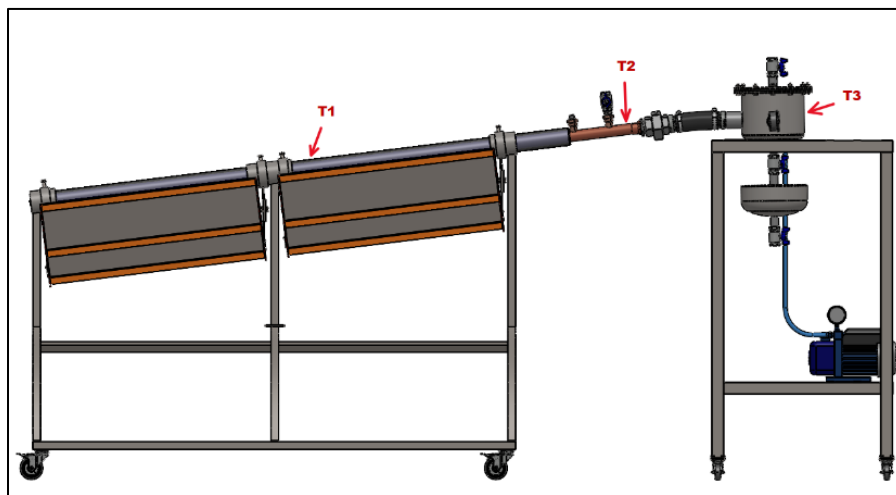
La válvula entre los dos tanques para el análisis de este proyecto adopta el nombre de “Válvula #2”, y la última válvula ubicada a la salida del tanque de recolección se llama “Válvula #3”. Como aislante térmico se emplea fibra de vidrio cubriendo todo el tanque de condensación excepto la mitad trasera del área superficial longitudinal tal y como fue calculado en el diseño y el soporte de estos tanques es una mesa sencilla fabricada en acero estructural que permite ubicar un computador portátil en la parte superior y la bomba de vacío en un nivel inferior.

7.3.3. Subsistema de adquisición de datos

Se implementan dos termopares en el subsistema de ebullición y una en el de condensación como se muestra en la siguiente vista lateral derecha.

Figura 19

Vista lateral derecha del sistema completo modelado en SolidWorks, señalizando las ubicaciones de los tres termopares que miden temperatura superficial.



Nota. Adaptado de: autores.

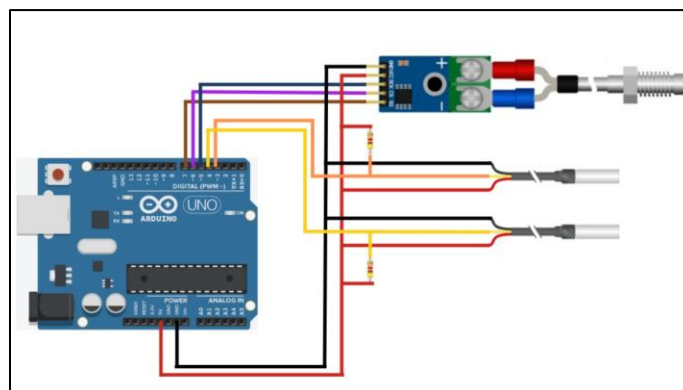
- Termopar #1: mide la temperatura del fluido estancado en estado líquido dentro del tubo de cobre, o puede medir la temperatura superficial del tubo de cobre para el caso que no sea posible introducirla.

- Termopar #2: ubicada al final del tubo de cobre antes de la unión universal que ensambla los dos subsistemas principales, mide la temperatura del vapor que se dirige hacia el tanque de condensación.
- Termopar #3: se encarga de medir la temperatura superficial promedio de la pared del tanque que está expuesta al ambiente y se puede introducir un poco debajo de la sección que tiene aislante térmico si se desea. Esta temperatura sirve para tener una noción de la generación del vapor hacia el tanque de condensación.

Los termopares están conectados a un circuito soldado en una baquelita, y una placa de microcontrolador Arduino será la que permita realizar la lectura de las tres temperaturas. Se emplea un software libre, por ejemplo, CoolTerm para guardar los datos del monitor serial que genera Arduino como archivo de texto para realizar el posterior procesamiento y análisis de datos. Se utiliza un termopar tipo K con su módulo MAX 6675 para T1, y dos termopares DS18B20 de Maxium Integrated para T2 y T3. El código de Arduino se encuentra en el Apéndice 8.

Figura 20

Representación gráfica en detalle de las conexiones del circuito de lectura de temperaturas.



Nota. Adaptado de: autores.

8. Costos del proyecto

Se presenta un excedente de \$ 568,297 respecto al presupuesto estimado en el plan inicial del proyecto debido a correcciones que tuvieron que realizarse.

Tabla 13

Presupuesto de costos durante el desarrollo.

Ítem	Descripción	Fuente de financiamiento	Unidad	Cant	Valor unitario	Subtotal
RECURSO HUMANO - GASTO INDIRECTO						
1	Estudiante 1	estudiante	hora	900	\$ 15,000.00	\$ 13,500,000.00
2	Estudiante 2	estudiante	hora	900	\$ 15,000.00	\$ 13,500,000.00
3	Técnico soldador UIS	universidad	hora	100	\$ 75,000.00	\$ 7,500,000.00
4	Director de proyecto	universidad	hora	40	\$ 80,000.00	\$ 3,200,000.00
					Subtotal	\$ 37,700,000.00
EQUIPO DE CÓMPUTO - GASTO INDIRECTO						
5	Servicio de internet / datos	estudiante	mes	6	\$ 39,000.00	\$ 234,000.00
6	Equipo de cómputo	estudiante	unidad	2	\$ 1,500,000.00	\$ 3,000,000.00
					Subtotal	\$ 3,234,000.00
SOFTWARE PARA ESTUDIO - GASTO INDIRECTO						
7	Microsoft Office	estudiante	mes	6	\$ 46,000.00	\$ 276,000.00
8	SolidWorks académico	universidad	mes	6	\$ 50,000.00	\$ 300,000.00
					Subtotal	\$ 576,000.00
DOCUMENTACIÓN Y PAPELERÍA - GASTO INDIRECTO						
9	Papelería	estudiante	unidad	1	\$ 80,000.00	\$ 80,000.00
					Subtotal	\$ 80,000.00
MATERIALES DISPONIBLES PARA USO INMEDIATO - GASTO INDIRECTO UNIVERSIDAD						
10	Tubos colectores solares	universidad	unidad	1	\$ 105,000.00	\$ 105,000.00
11	Tanque de almacenamiento acero inoxidable (lámina tratada)	universidad	unidad	1	\$ 450,000.00	\$ 450,000.00
					Subtotal	\$ 555,000.00
MATERIAL Y SERVICIO DE DISEÑO Y FABRICACIÓN - GASTO DIRECTO ESTUDIANTE						
12	Acero estructural: ángulo y platinas	estudiante	unidad	1	\$ 255,000.00	\$ 255,000.00
13	Electrodos de soldadura	estudiante	unidad	30	\$ 13,000.00	\$ 390,000.00
14	Unión inoxidable 1 1/2" roscada	estudiante	unidad	1	\$ 42,000.00	\$ 42,000.00
15	Tubo de cobre 1 1/4" DN x 2 m	estudiante	unidad	1	\$ 350,000.00	\$ 350,000.00
16	Vacuómetro mecánico 3/4"	estudiante	unidad	1	\$ 37,478.00	\$ 37,478.00
17	Buje HN 3/4" x 1/4"	estudiante	unidad	1	\$ 31,923.00	\$ 31,923.00
18	Buje 1 1/2" - 1 1/4"	estudiante	unidad	1	\$ 7,889.00	\$ 7,889.00
19	Unión inoxidable 1/4"	estudiante	unidad	1	\$ 8,823.00	\$ 8,823.00
20	Válvula bola 3/4" inoxidable	estudiante	unidad	4	\$ 23,781.00	\$ 95,124.00
21	Niple 3/4" x 1"	estudiante	unidad	1	\$ 3,193.00	\$ 3,193.00
22	Termopares tipo K con modulo MAX6675	estudiante	unidad	1	\$ 30,000.00	\$ 30,000.00
23	Termopares tipo J	estudiante	unidad	2	\$ 7,000.00	\$ 14,000.00
24	Servicio de corte láser de 8 piezas, incluyendo material	estudiante	unidad	1	\$ 190,400.00	\$ 190,400.00

25	Servicios metalmecánica fabricación de 1 brida + 2 tapas para tanque en acero inoxidable 304	estudiante	unidad	1	\$ 675,000.00	\$ 675,000.00
26	Servicio de soldadura externo para corrección de fugas	estudiante	unidad	1	\$ 75,000.00	\$ 75,000.00
27	Servicio de fabricación de tanque en acero inoxidable	estudiante	unidad	1	\$ 375,000.00	\$ 375,000.00
28	Cinta teflón 3/4"	estudiante	unidad	5	\$ 9,000.00	\$ 45,000.00
29	Componentes electrónicos para lectura de datos: Arduino, cables, baquelita	estudiante	unidad	1	\$ 90,000.00	\$ 90,000.00
30	Tubos de acero inoxidable sch40 2 1/2" x 0.5 m y 3 1/2" x 0.16 m	estudiante	unidad	1	\$ 138,000.00	\$ 138,000.00
31	Ruedas PVC 2 1/2" con freno	estudiante	unidad	4	\$ 8,500.00	\$ 34,000.00
32	Lámina reflectora	estudiante	unidad	1	\$ 130,000.00	\$ 130,000.00
33	Aislante térmico fibra de vidrio 1.22m x 1m x 1" 1/2	estudiante	unidad	2	\$ 25,126.00	\$ 50,252.00
34	Macho 1" 1/2 acero galvanizado redondo	estudiante	unidad	2	\$ 17,000.00	\$ 34,000.00
35	Manguera 20 bar negra 1" 1/2 gruesa de alta temperatura x 14 cm	estudiante	metros	1	\$ 8,500.00	\$ 8,500.00
36	Abrazadera T507 TITAN 48-52 mm acero al carbono	estudiante	unidad	2	\$ 11,000.00	\$ 22,000.00
37	Tapón galvanizado hembra 1"	estudiante	unidad	1	\$ 2,582.00	\$ 2,582.00
38	Tapón galvanizado macho 3/4"	estudiante	unidad	1	\$ 1,500.00	\$ 1,500.00
39	Reducción 1 a 1/4 galvanizado	estudiante	unidad	1	\$ 4,885.00	\$ 4,885.00
40	Bushing 1 x 1/4 galvanizado	estudiante	unidad	1	\$ 13,332.00	\$ 13,332.00
41	Tornillo hexagonal inox 304, 1/4 x 1/2	estudiante	unidad	16	\$ 180.00	\$ 2,880.00
42	Tuerca hexagonal inox 304, 1/4	estudiante	unidad	16	\$ 120.00	\$ 1,920.00
43	Wasa inoxidable 304 de 1/4"	estudiante	unidad	16	\$ 33.60	\$ 537.60
44	Válvula bola mariposa amarilla 1/2"	estudiante	unidad	1	\$ 35,357.00	\$ 35,357.00
45	Cable eléctrico dúplex 2x18	estudiante	metros	30	\$ 2,000.00	\$ 60,000.00
46	Cinta industrial gris	estudiante	unidad	1	\$ 9,000.00	\$ 9,000.00
47	Cinta foil de aluminio	estudiante	unidad	1	\$ 25,000.00	\$ 25,000.00
48	Manguera para manómetro R22	estudiante	unidad	1	\$ 6,772.00	\$ 6,772.00
49	Thinner	estudiante	unidad	1	\$ 2,950.00	\$ 2,950.00
50	1/4 pintura 3 en 1 color aluminio	estudiante	unidad	1	\$ 18,000.00	\$ 18,000.00
51	Bomba de vacío de una etapa	estudiante	unidad	1	\$ 251,000.00	\$ 251,000.00
					Subtotal	\$ 3,568,297.60
SEGURIDAD						
52	Póliza UIS	estudiante	unidad	1	\$ 50,000.00	\$ 50,000.00
					Subtotal	\$ 50,000.00
					TOTAL	\$ 45,763,297.60

Nota. Adaptado de: autores.

9. Construcción

La idea inicial de la funcionalidad de los sensores de temperatura era medir temperaturas internas del agua en las dos fases de interés pero, debido al tamaño de los termopares y componentes en general, para las pruebas de vacío no es posible garantizar un sello hermético en los dos sitios donde ingresaban los termopares al interior del tubo, requiriendo entonces de instrumentación más sofisticada a nivel industrial la cual supera en tamaño y precio a los espacios actuales que se tienen en el tubo de cobre para el calentamiento y en el tanque de condensación.

Como se explica posteriormente, el diseño fue corregido para medir temperaturas de superficie en el tubo de cobre, la primera en donde está el agua a tratar, la segunda para medir la temperatura a la salida del tubo antes de pasar por la manguera que conecta al tanque de condensación midiendo de esta manera un aproximado a la temperatura del vapor, y el tercer termopar mantiene el propósito de medir la temperatura superficial externa del tanque de condensación en un punto medio entre la pared expuesta al ambiente y el área cubierta con aislante térmico.

9.1. Subsistema de ebullición

Las estructuras del concentrador consisten en dos marcos parabólicos fabricados en corte láser unidos con perfiles de acero estructural y se diseña un mecanismo tipo bisagra para facilitar la calibración y movilidad del concentrador. En la parte superior está la ranura para ajustar la altura del concentrador y de esta forma subir o bajar la línea focal

Figura 21

Estructura del concentrador parabólico.



Nota. A la izquierda, estructura del concentrador. A la derecha, mecanismo bisagra para montaje y calibración del foco experimentalmente. Adaptado de: autores.

Figura 22

Estructura del subsistema de ebullición.



Nota. A la izquierda, base soldada sin soportes para el tubo. A la derecha, base completa ensamblada con la estructura del concentrador. Adaptado de: autores.

A continuación, se muestra la construcción del diseño inicial para la toma de datos en el tubo de cobre. Debido al trenzado de acero y a la pequeña rosca de la cabeza del termopar tipo K, se presentaban fugas que se intentaron solucionar utilizando soldadura epóxica para metales, inicialmente en la unión de la rosca del termopar T2 y el accesorio soldado al tubo de cobre logrando reducir un poco la fuga. Luego se aplicó la en la holgura entre el cable trenzado y el tornillo roscado de la cabeza del termopar, pero a pesar de estos dos intentos la fuga persistía.

De la misma forma ocurría con el termopar T1 que mide la temperatura del agua en el fondo del tubo, a este se le hizo un proceso de solidificación más extensivo, pero no fue posible implementar el subsistema de medición de la temperatura real de los fluidos, por lo cual se implementa la medición de temperaturas superficiales en el tubo de cobre. Se corrige el diseño retirando el accesorio roscado que estaba soldado al tubo de cobre para el ensamblaje del termopar T2, se tapa el agujero residual y donde se roscaba el termopar T1 se deja un tapón sin perforar el cual se rosca con la adición de soldadura epóxica.

Figura 23

Ensamblaje de la prueba de vacío para el diseño inicial del tubo



Nota. Ensamblajes de izquierda a derecha: vista general, termopar T1 y termopar T2. Adaptado de: autores.

Figura 24

Correcciones realizadas al tubo de cobre.



Nota. Adaptado de: autores.

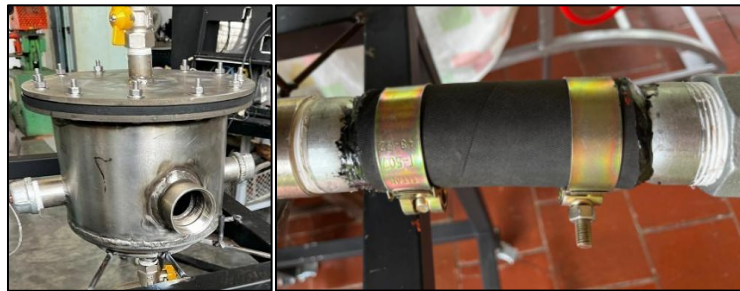
9.2. Subsistema de condensación

El vapor generado se transporta hacia el tanque de condensación en una manguera que tiene una pequeña flexibilidad debido a su calibre, y que permite ensamblar los dos subsistemas. Entre los accesorios metálicos y la manguera se aplicó soldadura epóxica garantizando un buen sellado añadiendo una abrazadera en cada extremo.

El soporte del tanque 1 consiste en alambres gruesos de acero soldados haciendo la función de asiento al tanque, sin tener que fijarlo con tornillos, garantizando la unión de los subsistemas.

Figura 25

Tanque de condensación mejorado para ser ensamblado a la manguera de ingreso de vapor



Nota. Izquierda: tanque de condensación con una capa de aislante térmico longitudinalmente.

Derecha: detalle de ensamblaje de manguera de ingreso de vapor. Adaptado de: autores.

Figura 26

Tanque de recolección de condensado



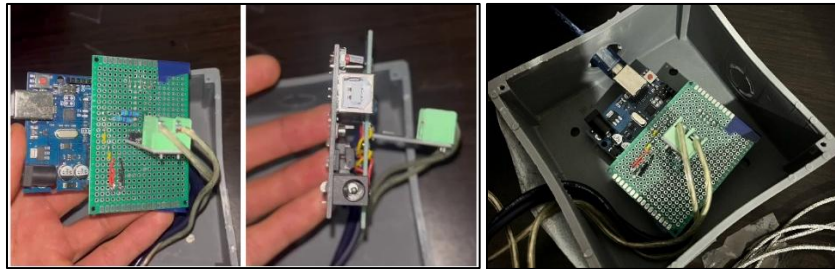
Nota. Fabricado nuevo con un cap de 8 pulgadas en acero inoxidable.

9.3. Subsistema de adquisición de datos

La baquelita y el Arduino se ubican dentro de una caja derivación plástica y se pueden desensamblar ya que se soldaron pines para este propósito si se requiere hacer cambios.

Figura 27

Subsistema de adquisición de datos con Arduino UNO.



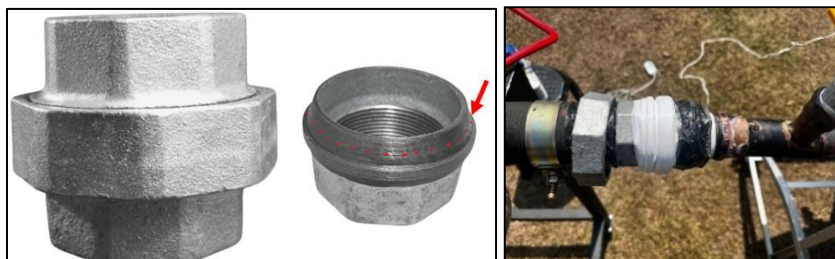
Nota. Adaptado de: autores.

9.4. Ensamblaje

Como se describe en el manual de operación y mantenimiento, para la operación regular con los subsistemas ya ensamblados solo se necesitará aplicar teflón en la sección cónica de la unión universal, luego de unirlo y antes de roscarlo se recubre con un par de vueltas adicionales.

Figura 28

Unión universal para ensamblar los subsistemas.



Nota. Adaptado de: autores.

Se utilizan aislamientos en fibra de vidrio para cubrir el sistema desde unos 5 centímetros antes de llegar al final de tubo colector solar hasta el inicio del tanque de condensación.

Figura 29

Sistema completo ensamblado y operando visto desde el lado izquierdo



Nota. Adaptado de: autores.

9.5. Metodología de operación del sistema de destilación

La operación durante la toma de datos consta de dos tipos de montaje y cada uno tiene las formas de operación de presión inicial de vacío y presión atmosférica.

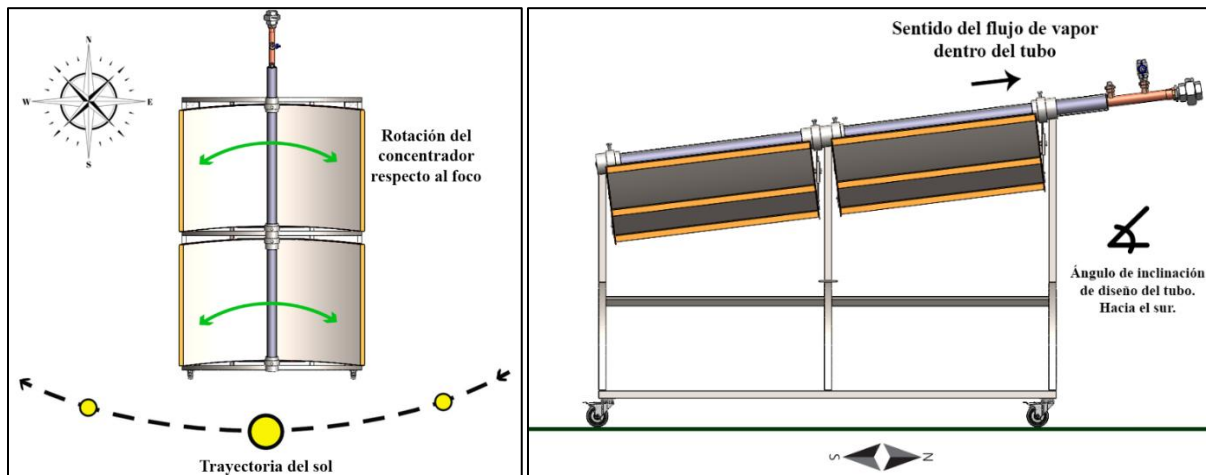
9.5.1. Tipos de montaje

El primer montaje consiste en orientar el tubo hacia el sur, es decir, el Azimut del tubo es de 180° , debido a que Bucaramanga y su área metropolitana se encuentran a 7° latitud norte, y el sistema no está diseñado para moverlo completamente (los dos subsistemas) por motivos de seguridad y conservación de las piezas especialmente el tubo colector solar que es de vidrio. Estos grados de inclinación ya están montados rígidamente en la base a través de los soportes cilíndricos.

El Azimut del área de apertura del concentrador no cambia debido a que ese grado de libertad para que rote la máquina sobre el plano (suelo) está limitado, pero al girar el área de apertura sobre el foco haciendo seguimiento permite el mejor aprovechamiento de la irradiancia solar y será motivo de estudio en el análisis de resultados.

Figura 30

Vista superior y lateral derecha del montaje orientado hacia el sur con concentrador móvil.



Nota. Adaptado de: autores.

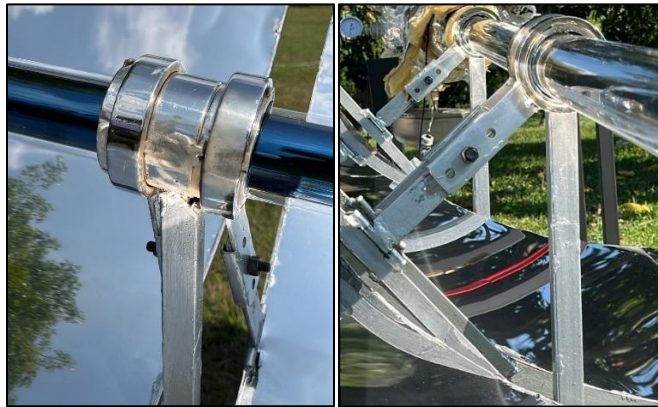
Este montaje requiere que el concentrador parabólico haga un seguimiento solar girando sobre su foco a una tasa de aproximadamente 15 grados por hora, y debido a que el área receptora es un tubo delgado en comparación con la parábola, el foco puede desviarse completamente del colector en cuestión de 10 minutos, por lo cual el seguimiento con la inclinación se debe realizar en menos de ese tiempo, revisando el enfoque de los rayos solares para mayor practicidad.

El diseño realizado permite hacer el seguimiento de forma experimental con el ajuste de un tornillo que fija al foco giratorio sobre la superficie externa del soporte del tubo de forma que la proyección de la línea focal coincida con la línea donde se ubica el tubo colector solar evacuado.

Una forma segura de garantizar esa alineación sin poner en riesgo la salud visual al ver directamente la parábola para saber hacia dónde están apuntando los rayos, es prestar atención detalladamente a la proyección de esa concentración de luz en los soportes cilíndricos del tubo, si están reflejándose en la mitad inferior es un buen indicador de que los rayos se están concentrando correctamente.

Figura 31

Rayos solares concentrados en el foco de la parábola, coincidente con la mitad inferior de los soportes del tubo.



Nota. Adaptado de: autores.

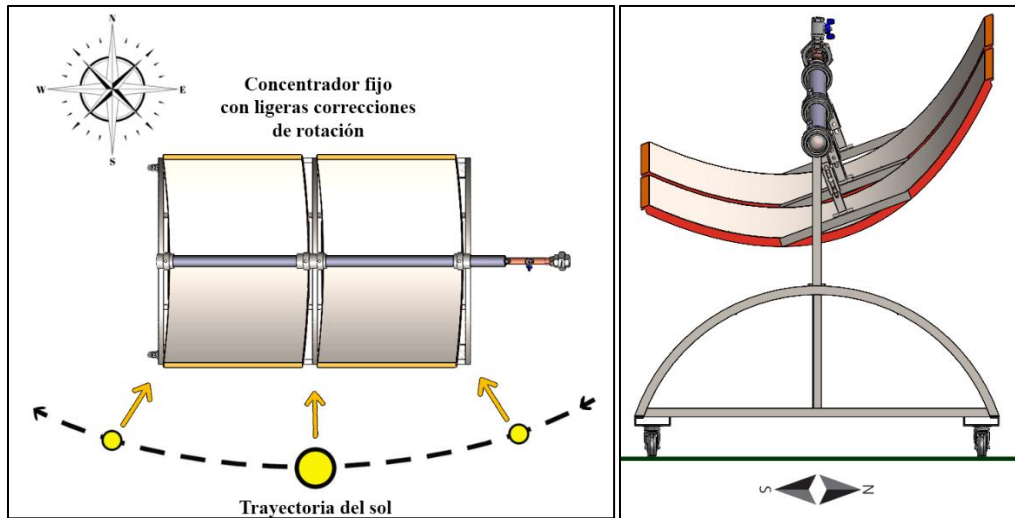
El segundo montaje es menos exhaustivo para ser operado ya que el concentrador parabólico se mantiene fijo con su área de apertura inclinada a la latitud del sitio de operación y no se requiere que el operador esté cada 5 minutos haciendo el seguimiento manual del concentrador al ángulo de altura solar. Otra ventaja adicional es que así el sistema puede operar en cualquier sitio del mundo haciendo necesario solo ajustar el ángulo de inclinación del área de apertura. Sin embargo, debido a las posibles irregularidades del terreno y a que el azimut también se mantiene fijo, se debe hacer correcciones cada cierto tiempo con el mismo método de verificación de los rayos del montaje anterior.

El Azimut del sistema esta vez se gira 90 grados, dejando el tubo a lo largo de oriente a occidente, o viceversa. El resultado final se ve afectado si la operación se realiza en la mañana o

en la tarde ya que, por los 7° de inclinación, y debido al movimiento del sol, la radiación en el foco se terminará proyectando más arriba o más abajo del tubo solar.

Figura 32

Vista superior y lateral derecha del montaje orientado hacia el oriente u occidente, con concentrador fijo a un ángulo igual a la latitud del lugar de operación.



Nota. Adaptado de: autores.

Las variables analizadas en todos los tipos de operación del sistema son las siguientes:

- Irradiancia solar total (W/m^2): dato tomado con la aplicación Davis WeatherLink y en pocas ocasiones se realiza una estimación de su valor cuando no se ha actualizado la lectura desde el servidor web.
- Temperatura del agua de entrada ($^\circ\text{C}$): medida por el termopar T1
- Temperatura del vapor de agua ($^\circ\text{C}$): medida por el termopar T2
- Temperatura promedio entre la superficie del tanque de condensación y el aire ($^\circ\text{C}$): medida por el termopar T3.

- Presión interna absoluta (bar): en la destilación al vacío, la presión se reduce entre aproximadamente un 70% y 80% iniciales respecto a la presión atmosférica para disminuir la temperatura de ebullición del agua.
- Volumen de agua destilada (L/h): permite evaluar el rendimiento del sistema por unidad de tiempo de operación.

9.5.2. Modos de operación en función del tipo de presión interna

La operación a presión atmosférica inicial no requiere el uso de la bomba de vacío, el agua residual se deposita en el tubo de ebullición y se cierran todas las válvulas.

Si la presión en el sistema (incluyendo al tanque 1) aumenta, el tanque 2 permanecerá aislado y cuando la presión absoluta sea muy alta acercándose a 2 bar, la válvula 2 se puede abrir en un 10% permitiendo liberar vapor a alta presión del tanque 1 y también el posible condensado que se haya podido producir, liberando de esta manera un poco de presión del tanque 1. Una vez se completa esa tarea se cierra la válvula 2.

La válvula 3 de recolección nunca se debe abrir sin haber cerrado antes la válvula 2 ya que implica pérdida de producto condensado, y en caso de altas presiones es un riesgo directo para el operario. Luego de un tiempo en que se haya enfriado y condensado el vapor, con la válvula 2 cerrada se abre la válvula 3 para obtener el producto.

Las mediciones se hacen periódicamente, pensadas para hacerse cada hora, sin embargo a veces se genera vapor rápidamente porque las condiciones de irradiancia son muy favorables y se requiere hacer recolección de condensado en un tiempo menor, así como también puede ocurrir que la generación de condensado esté siendo muy poca, lo cual se puede determinar con las lecturas de las temperaturas T2 y T3 y se decida dejar operar el sistema sin abrir válvulas por más tiempo,

o, una opción también válida es verificar si se ha producido condensado haciendo apertura de la válvula 2, cierre después de unos 30 segundos y posteriormente abrir la válvula 3.

Para el caso de operación con bomba de vacío, ella se puede realizar con la válvula 2 abierta, permitiendo vaciar el tanque 2 y dejarlo a una presión reducida independiente de la generación de vapor durante el proceso, cuando se completa el mayor vacío posible (el cual está alrededor de 0.2 bar absoluta) se cierra la válvula 2, se procede a dejar el sistema funcionando y de esta forma emplear la misma metodología mencionada para el caso donde la presión del tanque 1 vaya aumentando y se desee recolectar el producto condensado.

Los tipos de montaje y modos de presión interna pueden combinarse reuniendo en total 4 tipos de operación del sistema para observar los resultados y compararlos, lo cual se verá en las secciones posteriores.

9.6. Prueba de evaporación a presión atmosférica

El día 31 de diciembre de 2024 se hizo una prueba operando el sistema incompleto ya que el tanque de condensación presentó una fuga, al igual que el tubo de cobre al que le debía sellar el espacio donde ingresaba el termopar 1, corregir una fuga en la soldadura del adaptador de la válvula 1 y se debía cambiar la manguera que conectaba los dos subsistemas, pero para esas fechas no fue posible llevarlo a un sitio que prestara el servicio de soldadura.

Se presentan las características del montaje para esta toma preliminar de datos con agua limpia:

- Tubo colector solar orientado hacia el sur.
- Operación con concentrador parabólico haciendo seguimiento al ángulo de altura solar.
- El tubo de cobre en su extremo expuesto se encuentra abierto, sin tapa, para darle salida al vapor.

- Solo se utilizan los termopares en las posiciones 1 y 2, midiendo las temperaturas de los fluidos dentro del tubo, respectivamente, del agua estancada y del vapor a la salida del tubo de cobre.
- El código de Arduino para adquisición de temperaturas estaba programado para medir temperatura cada 3 segundos.
- El promedio de irradiancia solar total se refiere al promedio de los valores de irradiancia solar directa más las irradiancias solar difusa y reflejada captada por el piranómetro de la estación meteorológica de la ubicación en cuestión. Por motivos de no poder acceder al campus de la universidad, la máquina se traslada a Piedecuesta y los datos meteorológicos aproximados son tomados con la estación del Instituto Colombiano de Petróleo, ubicado en la vía Piedecuesta kilómetro 7, a través de la aplicación WeatherLink así como en estimaciones de la percepción de irradiancia en el sitio de operación del banco de pruebas.

Figura 33

Montaje de operación del 31 de diciembre de 2024.



Nota. Adaptado de: autores.

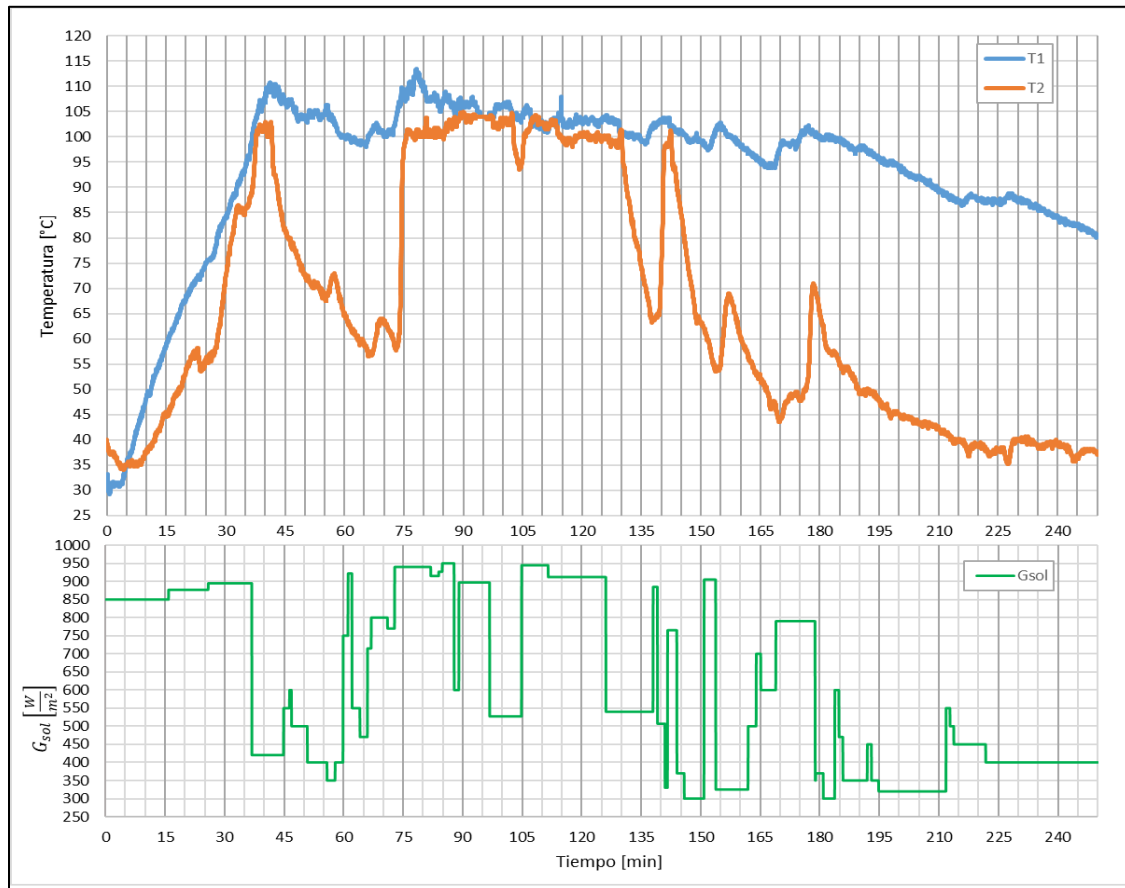
Se observa que la temperatura T1 correspondiente a la real del agua dentro del tubo colector solar, muestra un aumento progresivo desde el inicio de la prueba, alcanzando un máximo de aproximadamente 110°C alrededor del minuto 90. Luego, la temperatura se mantiene oscilante en un rango cercano a los 100-110°C, lo que indica la existencia de ebullición.

La temperatura T2 que representa la temperatura del vapor a la salida del tubo de cobre, también presenta un comportamiento ascendente en la primera parte, alcanzando valores de aproximadamente 100°C, pero con una tendencia más fluctuante lo que sugiere pérdidas térmicas debidas al viento y condensación parcial del vapor en la trayectoria hacia la salida.

También se observa que ambas temperaturas disminuyen cuando la irradiancia solar también cae debido a la nubosidad presente en el cielo, afectando de forma negativa el proceso de ebullición cuando se reduce hasta valores por debajo de 600 W/m², y durante los períodos de irradiancia mayor a 800 W/m² la temperatura del agua y el vapor se estabiliza en valores que indican una producción continua de vapor.

Figura 34

Gráfica de T1 y T2 en función de la irradiancia solar total recibida el 31 de diciembre de 10:34:10 am a 2:44:19 pm.



Nota: Adaptado de: autores.

10. Resultados de operación del banco de pruebas

Inicialmente se realizó el proceso de destilación con agua potable con los cuatro tipos de operación detallados. Debido a la cantidad grande de datos recopilados, se presenta un resumen de los días en la Tabla 14, los detalles de las gráficas y registros de eventos se encuentran a partir del Apéndice 11.

Los 4 tipos de operación para ambos casos de agua potable y agua residual son:

- Destilación a presión de vacío y seguimiento del concentrador
- Destilación a presión de vacío y concentrador fijo
- Destilación a presión atmosférica y seguimiento del concentrador
- Destilación a presión atmosférica y concentrador fijo.

De los resultados con agua potable y agua residual se obtuvo que el vacío con seguimiento solar tiene la mejor eficiencia con 0.397 L/h promedio y le sigue el vacío con concentrador fijo con 0.316 L/h.

Las operaciones con presión atmosférica con concentrador fijo y con concentrador en seguimiento obtuvieron valores muy bajos, de 0.11 L y 0.08 L en promedio para 1h de operación desde el inicio de esta fase operativa. Tendría sentido que la presión atmosférica con seguimiento de concentrador mostrara un promedio mayor respecto al concentrador fijo, y para demostrarlo se requerirían de más días en operación, pero no se hicieron con tanta frecuencia como las operaciones con presión de vacío con el objetivo de optimizar el tiempo de toma de datos para finalizar el proyecto, al ver que no se alcanzaba el mínimo requerido bajo condiciones muy favorables de irradiancia solar directa.

10.1. Operación con agua potable

Tabla 14

Resultados de operación con agua potable para los cuatro tipos de operación.

MODO OPERACIÓN	FECHA	TIEMPO DE OPERACIÓN REAL (h)	RANGO DE TIEMPO		G_{sol} total, promedio en el tiempo de operación	Condensado obtenido (L)
			Inicio	Fin		
VACIO Y SEGUIMIENTO	26 enero	1.00	14:00	15:00	887	0.5
VACIO Y SEGUIMIENTO	26 enero	1.00	15:10	16:10	526	0.2
VACIO Y SEGUIMIENTO	27 enero	1.00	12:30	13:30	873	0.7
VACIO Y SEGUIMIENTO	27 enero	1.00	14:00	15:00	726	0.6
VACIO Y SEGUIMIENTO	27 enero	1.50	15:10	16:40	448	0.25
VACIO FIJO	2 febrero	2.99	13:14	16:13	502	0.15
VACIO FIJO	3 febrero	0.98	10:55	11:54	698	0.4
VACIO FIJO	3 febrero	1.03	12:05	13:06	926	0.73
ATM FIJO	3 febrero	1.22	13:10	14:24	803	0.2
ATM FIJO	3 febrero	1.02	14:26	15:26	416	0.05
ATM FIJO	3 febrero	1.02	15:27	16:28	492	0
ATM FIJO	4 febrero	2.18	9:19	11:30	731	0.4
ATM FIJO	4 febrero	2.02	11:30	13:31	722	0.44
ATM FIJO	4 febrero	2.05	13:32	15:35	576	0.06
ATM Y SEGUIMIENTO	9 febrero	3.98	9:57	13:56	536	0.11
ATM Y SEGUIMIENTO	9 febrero	0.82	13:56	14:45	417	0.05
ATM Y SEGUIMIENTO	10 febrero	3.48	9:50	13:18	679	0.18
ATM Y SEGUIMIENTO	10 febrero	0.31	13:18	13:37	354	0.02
VACIO FIJO	11 febrero	3.32	10:42	14:01	698	0.62
VACIO FIJO	11 febrero	1.10	14:01	15:07	467	0.25
VACIO Y SEGUIMIENTO	12 febrero	2.25	10:18	12:33	740	0.51
VACIO Y SEGUIMIENTO	12 febrero	0.96	12:33	13:31	771	0.26
VACIO Y SEGUIMIENTO	12 febrero	1.25	14:24	15:39	604	0.8
VACIO Y SEGUIMIENTO	12 febrero	0.22	15:40	15:53	554	0.1
VACIO Y SEGUIMIENTO	13 febrero	1.50	14:24	15:54	650	0.76
VACIO Y SEGUIMIENTO	16 febrero	1.07	15:35	16:39	536	0.15
VACIO Y SEGUIMIENTO	17 febrero	2.03	11:14	13:16	771	0.5
VACIO Y SEGUIMIENTO	17 febrero	1.25	14:36	15:51	472	0.7
VACIO Y SEGUIMIENTO	19 febrero	1.58	9:00	10:35	636	0.68
VACIO Y SEGUIMIENTO	19 febrero	0.55	10:35	11:07	876	0.2

Nota. Adaptado de: autores.

10.2. Operación con el agua residual

La muestra de agua residual, como se estableció en la metodología, fue tomada de uno de los lavamanos del taller de metalmecánica de la Escuela de Ingeniería Mecánica.

Figura 35

Uso habitual del lavamanos del taller



Nota. Adaptado de: autores.

Se utilizó el tapón de drenaje del lavamanos para estancar el agua y posteriormente se logró almacenar 3.5 L en una botella de plástico.

Figura 36

Inicio de recolección del agua residual con el tapón de drenaje en uso.



Nota. Adaptado de: autores.

En la Tabla 15 se muestran los resultados de operación de la máquina con el agua residual, se escogieron los mejores métodos correspondientes al seguimiento solar, y se hacen las pruebas a presión atmosférica y a presión de vacío.

Tabla 15

Resultados de operación con agua residual para los cuatro tipos de operación.

MODO OPERACIÓN	FECHA	TIEMPO DE OPERACIÓN REAL (h)	RANGO DE TIEMPO		G_{sol} total, promedio en el tiempo de operación	Condensado obtenido (L)
			Inicio	Fin		
VACIO Y SEGUIMIENTO	23 febrero	2.48	11:48	14:17	533	0.9
ATM Y SEGUIMIENTO	24 febrero	1.47	8:22	9:50	581	0.30
VACIO Y SEGUIMIENTO	24 febrero	0.73	11:22	12:06	907	0.28

Nota. Adaptado de: autores.

Desde el Apéndice 22 hasta el Apéndice 24 se presentan los detalles de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas con el agua residual.

10.3. Consumo energético

La bomba de vacío se encendía antes de iniciar la primera toma de datos del día, y al hacer la segunda toma de datos si era necesario reducir la presión nuevamente se dejaba enfriar el sistema primero. Durante las pruebas la máxima cantidad de vacío fue dos veces por día, pero durante el horario solar es posible utilizar la bomba tres veces si se desea hacerlo. Reducir la presión hasta 0.2 bar toma alrededor de 2 minutos con 20 segundos, si la potencia nominal es de 0.25 HP (0.184 kW), operando a 110 V, se calcula el promedio ideal al mes, asumiendo factor de carga del 100% y que se opera todos los días.

$$E_{bvacio,mes} = 0.184 \text{ kW} \cdot 140 \text{ s} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \cdot \frac{3}{\text{día}} \cdot \frac{30 \text{ días}}{1 \text{ mes}}$$

$$E_{bvacio,mes} = 0.644 \text{ kWh}$$

Ahora, según la Electrificadora de Santander, la tarifa comercial más alta se ubica en 1181.58 \$/kWh, y al multiplicar por la energía promedio al mes, indica que el consumo en pesos colombianos es de \$760.9.

10.4. Análisis microbiológico y físico químico del agua residual

De las dos operaciones realizadas se escoge la muestra de agua resultado del proceso a presión de vacío debido a que se obtiene una cantidad mayor.

Se presentan los resultados de los análisis de las muestras de agua correspondientes al antes y después del tratamiento es los cuales se observan las siguientes mejoras en el agua después de pasar por el sistema de destilación.

- Reducción de sales disueltas: la disminución en la conductividad eléctrica indica que el proceso eliminó una cantidad significativa de iones en solución.
- Disminución de la turbidez y color: el agua es visualmente más clara, lo que sugiere la remoción de partículas suspendidas.
- Disminución de nitratos y sulfatos: se evidencia una importante reducción, lo que es positivo, ya que altos niveles de nitratos pueden ser perjudiciales para la salud.
- Menor Demanda Química de Oxígeno (DQO): podría indicar la eliminación de compuestos orgánicos oxidables.



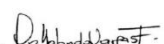

Sin embargo, se evidencian los siguientes problemas:

- Aumento de la bacteria *Escherichia Coli*: el conteo bacteriano de *E. coli* se incrementó drásticamente de 450 a 29,600 UFC/100 ml. Este resultado es crítico, ya que la presencia de *E. coli* en grandes cantidades es índice de contaminación y hace que el agua sea inadecuada para consumo humano sin que se realice una desinfección posterior.

- Aumento de minerales como el calcio, magnesio, cloruros y la alcalinidad total: podría deberse a la recontaminación del agua en el tanque de condensación por la falta de una desinfección.

Figura 37



Análisis microbiológico y fisicoquímico de una muestra de agua (0.8 L) antes de la destilación con el prototipo.

 Laboratorio Químico de Consultas Industriales Post - Analítico INFORME DE RESULTADOS		Código: F-PA-02 Versión: 15 Última modificación: 2024-01-15	
INFORME DE ENSAYO INF 25-0148			
Fecha de emisión	2025-03-20	Informe N.º 25-0148	
Fecha de recepción	2025-02-26	Solicitud N.º 25-0148-0149	
1. INFORMACIÓN SUMINISTRADA POR EL CLIENTE			
1.1 Información del cliente			
Cliente	Luis Felipe Mantilla Medina	Contacto Luis Felipe Mantilla Medina	
Dirección		Teléfono	
Correo		C.C.	
1.2 Información del muestreo			
Fecha	24 febrero 2025, 8:00 am	Tipo Puntual	
Lugar	Santander, Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander	Muestreo Realizado por el Cliente	
Punto	Lavamanos de taller de metalmecánica, Escuela de Ingeniería Mecánica		
Nota: La identificación de la muestra también es información suministrada por el cliente.			
2. INFORMACIÓN DE ENSAYOS			
Agua antes de tratamiento (25-0148)			
<i>Agua Residual Industrial</i>			
Fecha inicial análisis	2025-02-26	Lugar de análisis	
Fecha final análisis	2025-03-07	Calle 9 # 27, UIS Campus Central	
Tabla 1. Resultados de ensayos			
Parámetro	Método	Resultado	Unidades
Análisis Físicoquímico			
pH ¹	Potenciométrico, SM 4500-H ¹ B	6,74	Und. pH
Conductividad Eléctrica	Conductivimétrico, SM 2510 B	232,00	µS/cm
Color	Espectrofotométrico, SM 2120 B	18,00	UPC
Turbiedad	Nefelométrico, SM 2130 B	81,80	NTU
Alcalinidad Total	Titrimétrico, SM 2320 B	107,80	mg CaCO ₃ /L
Cloruros	Argentométrico, SM 4500-Cl ⁻ B	20,97	mg Cl ⁻ /L
Dureza Cálcica	Titrimétrico, SM 2340 C	64,00	mg CaCO ₃ /L
Dureza Total	Titrimétrico, SM 2340 C	86,00	mg CaCO ₃ /L
Calcio	Absorción Atómica, SM 3111 B	25,55	mg Ca/L
Magnesio	Absorción Atómica, SM 3111 B	5,33	mg Mg/L
Hierro Total	Espectrofotométrico, SM 3500-Fe B	<0,070	mg Fe/L
Nitros	Espectrofotométrico, SM 4500-NO ₂ ⁻ B	42,43	mg NO ₂ ⁻ /L
Nitritos	Espectrofotométrico, SM 4500-NO ₂ ⁻ B	0,11	mg N-NO ₂ ⁻ /L
Sulfatos	Turbidimétrico, SM 4500-SO ₄ ²⁻ E	55,26	mg SO ₄ ²⁻ /L
Surfactantes Aniónicos como SAAM	Espectrofotometría, Rodier J. Analisis de aguas, 2009. D 3.1.1 Modificado	1,58	mg SAAM/L
Demanda Química de Oxígeno	Espectrofotométrico, SM 5220 D	343,32	mg O ₂ /L
Análisis Microbiológicos			
Coliformes Totales	Filtración por membrana, SM 9222 J	1500	UFC/100 ml
<i>Escherichia coli</i>	Filtración por membrana, SM 9222 J	450	UFC/100 ml
¹ Temperatura de la lectura de pH: 25.0°C			
<p>a) La información de muestreo es proporcionada por el cliente. Por lo tanto, no se realizará referencia alguna al plan y método de muestreo utilizado. Los resultados se aplican a la muestra como se recibió. b) Los resultados reportados en el presente informe están relacionados exclusivamente a los ítems que han sido sometidos a ensayo. c) Sin la aprobación del laboratorio no se debe reproducir el informe, excepto cuando se reproduce en su totalidad. d) El laboratorio no es responsable por la información identificada como suministrada por el cliente y su posible afectación en la validez de los resultados.</p>			
 Coordinadora de laboratorio Qca. Esp. Bibiana Herrera MP PQ-3003		 Directora de laboratorio Qca. M.Sc. Yolanda Vargas MP PQ-1144	
Fin del informe			
Laboratorio Químico de Consultas Industriales Calle 9 # 27, Universidad Industrial de Santander 321941.7311 - (607) 6344000 ext. 1469 labquimco@uis.edu.co			
		 Página 1 de 1	

Nota. Estudio realizado en el LQCI. Adaptado de: autores.

Figura 38

Análisis microbiológico y fisicoquímico de una muestra de agua (0.5 L) después de la destilación con el prototipo.

Laboratorio Químico de Consultas Industriales		Código: F-PA-02	
Post - Analítico		Versión: 15	
INFORME DE RESULTADOS		Última modificación: 2024-01-15	
INFORME DE ENSAYO INF 25-0149			
Fecha de emisión	2025-03-20	Informe N.º 25-0149	
Fecha de recepción	2025-02-26	Solicitud N.º 25-0148-0149	
1. INFORMACIÓN SUMINISTRADA POR EL CLIENTE			
1.1 Información del cliente			
Cliente	Luis Felipe Mantilla Medina	Contacto Luis Felipe Mantilla Medina	
Dirección		Teléfono	
Correo		C.C.	
1.2 Información del muestreo			
Fecha	24 febrero 2025, 11:50 am	Tipo Puntual	
Lugar	Santander, Piedecuesta	Muestreo Realizado por el Cliente	
Punto	Prototipo de destilación simple con energía solar, salida del tanque de condensación		
Nota: La identificación de la muestra también es información suministrada por el cliente.			
2. INFORMACIÓN DE ENSAYOS			
Agua después de tratamiento (25-0149)			
<i>Agua Residual Industrial</i>			
Fecha inicial análisis	2025-02-26	Lugar de análisis	
Fecha final análisis	2025-03-07	Calle 9 # 27; UIS Campus Central	
Tabla 1. Resultados de ensayos			
Parámetro	Método	Resultado	Unidades
Análisis Fisicoquímico			
pH ¹	Potenciométrico, SM 4500-H ¹ B	7,07	Und. pH
Conductividad Eléctrica	Conductivimétrico, SM 2510 B	69,00	µS/cm
Color	Espectrofotométrico, SM 2120 B	15,50	UPC
Turbiedad	Nefelométrico, SM 2130 B	20,90	NTU
Alcalinidad Total	Titrimétrico, SM 2320 B	134,75	mg CaCO ₃ /L
Cloruros	Argentométrico, SM 4500-Cl ¹ B	26,05	mg Cl/L
Dureza Cálcica	Titrimétrico, SM 2340 C	64,00	mg CaCO ₃ /L
Dureza Total	Titrimétrico, SM 2340 C	105,00	mg CaCO ₃ /L
Calcio	Absorción Atómica, SM 3111 B	26,05	mg Ca/L
Magnesio	Absorción Atómica, SM 3111 B	9,70	mg Mg/L
Hierro Total	Espectrofotométrico, SM 3500-Fe B	<0,070	mg Fe/L
Nitratos	Espectrofotométrico, SM 4500-NO ₃ ⁻ B	20,56	mg NO ₃ /L
Nitritos	Espectrofotometría, SM 4500-NO ₂ ⁻ B	0,11	mg NO ₂ /L
Sulfatos	Turbidimétrico, SM 4500-SO ₄ ²⁻ E	12,65	mg SO ₄ ²⁻ /L
Surfactantes Aniónicos como SAAM	Espectrofotometría, Rodier J. Analisis de aguas, 2009. D 3.1.1 Modificado	1,22	mg SAAM/L
Demanda Química de Oxígeno	Espectrofotométrico, SM 5220 D	230,73	mg O ₂ /L
Análisis Microbiológicos			
Coliformes Totales	Filtración por membrana, SM 9222 J	1024	UFC/100 ml
<i>Escherichia coli</i>	Filtración por membrana, SM 9222 J	29600	UFC/100 ml
 Coordinadora de laboratorio Qca. Esp. Bibiane Herrera MP PQ-3003	 Directora de laboratorio Qca. M.Sc. Yolanda Vargas MP PQ-1144		

Nota. Estudio realizado en el LQCI. La cantidad de esta muestra fue menor. Adaptado de:
 autores.

11. Conclusiones

El sistema diseñado cumple con las expectativas de ser utilizado en entornos académicos y experimentales, proporcionando una herramienta educativa para el estudio de transferencia de calor y energías renovables. El prototipo presenta la característica de ser escalable, puesto que, es posible realizar mejoras en la captación solar para aumentar la producción de agua destilada.

La guía de laboratorio desarrollada facilitará la aplicación práctica de los conceptos de energía solar térmica. Además, se entrega el manual de operación y mantenimiento para asegurar el máximo rendimiento y vida útil del banco de pruebas.

El dimensionamiento final de los subsistemas se mantuvo dentro de los requerimientos obteniendo como resultado final al sistema completo y ensamblado ocupando un espacio de 2.8 m de largo x 1 m de ancho x 1.4 m de altura, con un peso total de 96.7 kg, y se presentaron cuatro tipos distintos de operación para caracterizar el sistema y permitir realizar comparaciones de producto destilado en función de la irradiancia solar.

Se concluye que la producción de agua destilada guarda una correlación con la irradiancia solar directa. Durante los periodos de máxima irradiancia (entre el horario de 10:00 y 14:00), se alcanzaron tasas de destilación cercanas a 0.45 L/h cumpliendo con el objetivo específico de producción de condensado.

Se realizó el estudio físico químico y microbiológico, del cual se concluye que el agua tratada en el sistema de destilación presenta mejoras en la reducción de turbidez, sales disueltas y contaminantes químicos. Sin embargo, la grave contaminación microbiológica después del tratamiento la convierte en un producto de alto riesgo para consumo humano y de riesgo moderado

para cultivos y suelos, por lo cual se descarta totalmente su reutilización en el sistema de lavamanos e incluso para irrigación agrícola.

La alta concentración de microbiológica al final del proceso indica que el sistema de condensación podría ser un punto crítico de recontaminación, como también puede ser porque la muestra de agua destilada era de menor cantidad en comparación con la muestra de agua inicial y por esta razón la concentración aumenta, sin embargo, es un aumento significativo que sugiere hacer una desinfección a toda la máquina, interior de los tanques y garantizar también que los recipientes de almacenamiento estén desinfectados. Otra posible causa, es que las condiciones de baja presión y el no controlar la temperatura, son factores que favorecen el crecimiento de bacterias ya presentes, y para el caso de E. Coli, las temperaturas oscilan entre 7°C y 50°C, siendo la óptima 37°C (Organización Mundial de la Salud, 2018).

El sistema construido podría llegar a cumplir con el objetivo para separar sólidos y sales del agua que previamente haya tenido un proceso de desinfección, y también puede ser utilizado en otras industrias como la de aceites.

La utilización del concentrador parabólico con seguimiento solar permitió alcanzar temperaturas más elevadas para la ebullición del agua y por ende un aprovechamiento mayor de la irradiancia solar, reduciendo las caídas bruscas de temperatura que se observan en sistemas fijos cuando la incidencia de los rayos solares cambia.

La destilación al vacío permitió reducir la temperatura de ebullición inicial del agua a aproximadamente 55-60 °C, en comparación con los 100 °C requeridos a presión atmosférica. Esto confirma que la estrategia de operar bajo presión reducida disminuye el tiempo de destilación y mejora la eficiencia energética del sistema.

La diferencia entre T1 y T2 es más pronunciada en momentos donde la irradiancia disminuye, lo que es coherente con que la eficiencia del sistema en la conversión de energía solar en vapor se ve afectada por la tasa de energía recibida. Es decir, el agua se puede mantener entre un rango de temperatura para un determinado valor de irradiancia, pero eso no significa que sea lo mínimo para que se garantice la ebullición.

El sistema opera en condiciones casi herméticas pero a medida que se genera vapor dentro del colector, la presión interna aumenta progresivamente y se evidencia que esta acumulación de presión eleva la temperatura de saturación del agua, lo que implica que se requiere mayor energía y por lo tanto mayor tiempo para seguir evaporando el agua disponible.

Las mediciones de temperatura indican que la salida del tubo de cobre (T2) se acerca a la temperatura de saturación del agua, lo que confirma que el proceso de evaporación está ocurriendo y hay transporte de vapor hacia el tanque de condensación.

12. Recomendaciones

Se recomienda verificar que el concentrador parabólico mantenga un ángulo adecuado de inclinación a lo largo del día para garantizar la correcta ubicación del foco y así evitar desviaciones que reduzcan la eficiencia del tubo colector solar.

En lo relacionado con la presión interna, se podría evaluar la posibilidad de implementar un tanque auxiliar de reabastecimiento que permitiría agregar agua residual, también a través de la válvula #1, pero esta vez sin necesidad de abrir el sistema directamente al ambiente, evitando la entrada de aire y la pérdida de vacío. Este tipo de diseño mejoraría la continuidad del proceso sin afectar el equilibrio térmico interno, similar a los tanques de alimentación en calderas de baja presión utilizados en procesos industriales.

Un problema recurrente en este tipo de operaciones es la acumulación de vapor de agua residual en la bomba de vacío, lo que se puede mitigar con estrategias de separación de humedad. Se recomienda instalar una trampa de condensado o separador de humedad en la línea de succión de la bomba de vacío, de esta forma se captura el agua antes de que ingrese a la bomba, y si hay vapor residual, se evita que se condense dentro de ella. También se pueden emplear filtros coalescentes o separadores ciclónicos que retienen las gotas de agua mientras permiten el paso del aire o vapor seco como se utiliza en procesos industriales y farmacéuticos.

Para solucionar la recontaminación se puede estudiar la posibilidad de implementar sistemas de desinfección como radiación UV, cloración o filtración con membranas microbiológicas y realizar pruebas periódicas para garantizar la higiene del sistema y producto final.

Referencias Bibliográficas

- Bejan, A., & Kraus, A. (2003). *Heat Transfer Handbook*. John Wiley & Sons, Inc.
- BÜCHI Labortechnik AG. (1998). Training Papers Basics of distillation. Obtenido de https://www.syntechinnovation.com/images/catalog/general-equipment/3Rotary/basics_of_distillation.pdf
- Buelvas et al. (2020). Diseño de prototipo de destilador solar activo de doble pendiente como método para obtención de agua potable. Medellín, Antioquia, Colombia. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=880263>
- CalorSolar. (2021). *Tipos de colectores*. Obtenido de Iniciativa Calor Solar: <https://calorsolar.mx/tecnologias/>
- Çengel, Y. (2015). *Heat and Mass Transfer Fundamentals & Applications*. New York: McGraw-Hill Education.
- Duffie, J., & Beckam, W. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, Inc.
- Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - ESP. (2023). *Potabilización del agua*. Obtenido de Acueducto de Bogotá: <https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/acueducto-y-alcantarillado/la-infraestructuraAcueducto/sistemas-abastecimiento/potabilizacion-del-agua>
- Hu, Q. (2022). Studies of the Heat/Mass Transfer in a Desalination System Due to the Integration of a Solar Collecting Chamber and a Heat Dissipating Chimney. Obtenido de https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/667288/azu_etd_20171_sip1_m.pdf?sequence=1

- Jofré, N. (2024). *El análisis del recurso solar en un proyecto de instalación fotovoltaica*. Obtenido de International Business School: <https://eiposgrados.com/blog-energias/analisis-recurso-solar-fotovoltaica/>
- Madera Community College. (s.f.). *LibreTexts Chemistry*. Obtenido de 9.3.2: Boiling, Evaporation and Condensation: https://chem.libretexts.org/Courses/Madera_Community_College/MacArthur_Chemistry_3A_v_1.2/09%3A_Attractive_Forces/9.03%3A_Phase_Transitions/9.3.02%3A_Boiling_Evaporation_and_Condensation
- Mata Hernández, G., & Garibay Jiménez, R. (2014). *Relevance of laboratories in the education of engineers*. Barcelona, España: IATED. Obtenido de <https://library.iated.org/view/MATAHERNANDEZ2014REL>
- Matus et al. (2021). On the Optimal Tilt Angle and Orientation of an On-Site Solar Photovoltaic Energy Generation System for Sabah's Rural Electrification. doi:10.3390/su13105730
- Mejía et al. (2023). Diseño y construcción de un destilador solar activo de agua para abastecer el consumo de un hogar ubicado en el asentamiento La Estanzuela del municipio de Girón, departamento Santander. Bucaramanga, Santander, Colombia. Obtenido de <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/7d05fd5e-cfde-4d8c-8a1d-e8e3a9ff2af1/content>
- Mosquera, L. (2020). Estudio físico comparativo de pinturas comerciales de alta temperatura para aplicación en colectores solares. Pereira, Colombia. Obtenido de Universidad Tecnológica de Pereira: <https://repositorio.utp.edu.co/items/29cb07fd-53a3-4166-b9cc-bbd5bfd1e13d>
- Muñoz, A. (2008). Caracterización y tratamiento de aguas residuales. Obtenido de <http://dgsa.uaeh.edu.mx:8080/bibliotecadigital/handle/231104/514>

- Nothern Lights Solar Solutions. (2024). *solartubs.com*. Obtenido de How does a solar vacuum tubes work: <https://www.solartubs.com/how-do-solar-vacuum-tubes-work.html>
- ONU. (2024). *El agua: en el centro de la crisis climática*. Obtenido de Naciones Unidas: <https://www.un.org/es/climatechange/science/climate-issues/water>
- ONU. (2024). *El agua: en el centro de la crisis climática*. Obtenido de Naciones Unidas: Acción por el Clima: <https://www.un.org/es/climatechange/science/climate-issues/water>
- Organización Mundial de la Salud. (2018). *E. Coli*. Obtenido de Organizacion Mundial de la Salud: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/e-coli#:~:text=por%20Shigella%20dysenteriae,-.E.,\)%20m%C3%ADnima%20de%200%2C95](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/e-coli#:~:text=por%20Shigella%20dysenteriae,-.E.,)%20m%C3%ADnima%20de%200%2C95).
- Rojas et al. (2014). Diseño y construcción de un prototipo de evaporador al vacío por bomba de calor para depuración de aguas residuales industriales. Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander. Obtenido de <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/30697>
- WeatherLink. (2024). Boletín de Estación Meteorológica UIS-IngMECANICA. Bucaramanga, Colombia. Obtenido de <https://www.weatherlink.com/bulletin/db349359-e081-46f3-ac95-05ce128a7c12>
- Zarza, L. (2024). *¿Qué son las aguas residuales?* Obtenido de Calidad de agua: iAgua: <https://www.iagua.es/respuestas/que-son-aguas-residuales>

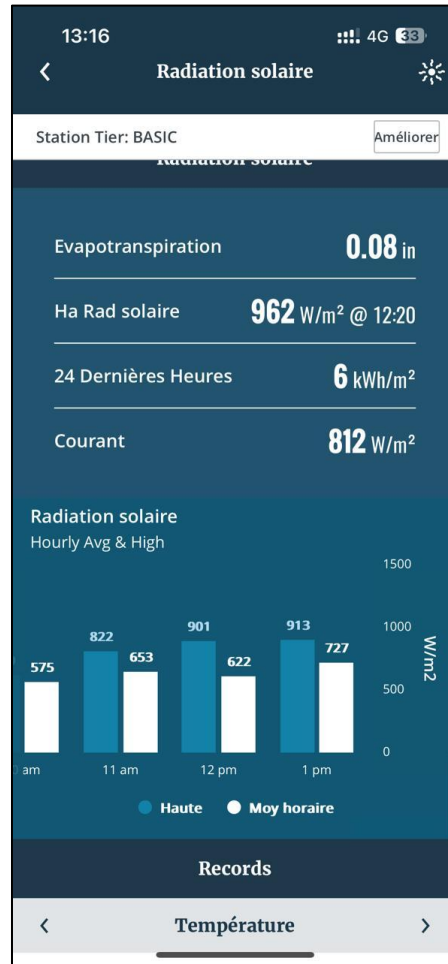
Apéndices

Apéndice 1. Registro continuo de valores de irradiancia solar recibida en la Escuela de Ingeniería Mecánica en la Universidad Industrial de Santander del 10 al 13 de mayo, y el 15 de mayo de 2024, por medio de la aplicación DAVIS WeatherLink.

Fecha	Hora	G_{sol} máximo $\left(\frac{W}{m^2}\right)$	G_{sol} promedio hora $\left(\frac{W}{m^2}\right)$	G_{sol} Promedio día $\left(\frac{W}{m^2}\right)$
10-May	10	813	570	419.14
10-May	11	912	696	
10-May	12	826	534	
10-May	13	273	256	
10-May	14	472	369	
10-May	15	285	211	
10-May	16	531	298	
11-May	8	421	273	381.22
11-May	9	432	388	
11-May	10	379	341	
11-May	11	408	383	
11-May	12	789	590	
11-May	13	804	636	
11-May	14	526	437	
11-May	15	275	217	
11-May	16	177	166	
12-May	8	461	177	199.33
12-May	9	582	421	
12-May	10	631	427	
12-May	11	124	62	
12-May	12	127	82	
12-May	13	152	109	
12-May	14	177	153	
12-May	15	217	203	
12-May	16	174	160	
13-May	8	384	304	651.77
13-May	9	575	491	
13-May	10	733	670	
13-May	11	834	770	
13-May	12	862	855	
13-May	13	858	839	
13-May	14	801	761	
13-May	15	775	653	
13-May	16	608	523	
15-May	8	309	171	430.22
15-May	9	383	268	
15-May	10	736	546	
15-May	11	489	321	
15-May	12	939	547	
15-May	13	858	455	
15-May	14	853	636	
15-May	15	615	565	
15-May	16	469	363	

Nota. Adaptado de: autores.

Apéndice 2. Muestra de toma de datos de irradiancia en la aplicación Davis WeatherLink.



Nota. Adaptado de: autores, a través de la aplicación descargable en celular.

Apéndice 3.

Valores promedio de irradiancia total recibida en el Área Metropolitana de Bucaramanga durante cada mes del año.

Mes	Promedio W/m^2
Enero	345.7
Febrero	321.6
Marzo	313
Abril	320.1
Mayo	345.8
Junio	331.9
Julio	439.5
Agosto	343.5
Septiembre	317
Octubre	312.7
Noviembre	305.7
Diciembre	314.4

Nota. Se presenta la irradiancia solar total promedio durante cada mes (Mejía et al., 2023).

Recuperado de: autores.

Apéndice 4. Valores de irradiancia solar total entre marzo y abril recibida en la Escuela de Ingeniería Mecánica en la Universidad Industrial de Santander (WeatherLink, 2024), distinguiendo únicamente los horarios en una pequeña muestra de días en los que se presentó cielo despejado continuo por minutos suficientes para que el piranómetro de la estación pudiera actualizar la lectura.

Fecha	Hora	Máximo W/m^2	Promedio W/m^2
22-mar-2024	8 a 9 am	N/A	N/A
	9 a 10 am	N/A	N/A
	3 a 4 pm	777	642
	4 a 5 pm	520	367
23-mar-2024	8 a 9 am	N/A	N/A
	9 a 10 am	580	382
	3 a 4 pm	N/A	N/A
	4 a 5 pm	N/A	N/A
31-mar-2024	8 a 9 am	417	325
	9 a 10 am	510	377
	3 a 4 pm	N/A	N/A
	4 a 5 pm	545	460
3-abr-2024	8 a 9 am	480	415
	9 a 10 am	562	387
	3 a 4 pm	730	520
	4 a 5 pm	N/A	N/A
10-abr-2024	8 a 9 am	N/A	N/A
	9 a 10 am	N/A	N/A
	3 a 4 pm	N/A	N/A
	4 a 5 pm	537	415
19-abr-2024	8 a 9 am	445	430
	9 a 10 am	597	435
	3 a 4 pm	N/A	N/A
	4 a 5 pm	N/A	N/A

Nota. La descripción de “No Aplica” se empleó si en el horario el cielo fue mayoritariamente nublado. Sólo se distinguen los valores para los horarios o momentos en donde hubo cielo despejado y continuo por minutos, y el piranómetro de la estación pudo actualizar la lectura. Tomado por medio de la aplicación DAVIS WeatherLink. Adaptado de: autores.

Apéndice 5. Valores de irradiancia solar total en diciembre, recibidos en la estación meteorológica Instituto Nacional del Petróleo (WeatherLink, 2024) en Piedecuesta, Santander. Distinguiendo únicamente los horarios en una pequeña muestra de días antes de las operaciones reales del prototipo en los que se presentó cielo despejado continuo por minutos suficientes para que el piranómetro de la estación pudiera actualizar la lectura.

Fecha	Hora	Máximo W/m^2	Promedio W/m^2
9-dic-2024	8 a 9 am	N/A	N/A
	9 a 10 am	497	425
	3 a 4 pm	800	565
	4 a 5 pm	540	302
18-dic-2024	8 a 9 am	N/A	N/A
	9 a 10 am	635	597
	3 a 4 pm	N/A	N/A
	4 a 5 pm	N/A	N/A
21-dic-2024	8 a 9 am	492	465
	9 a 10 am	685	500
	3 a 4 pm	N/A	N/A
	4 a 5 pm	530	287
22-dic-2024	8 a 9 am	520	372
	9 a 10 am	660	602
	3 a 4 pm	725	310
	4 a 5 pm	587	350
24-dic-2024	8 a 9 am	N/A	N/A
	9 a 10 am	N/A	N/A
	3 a 4 pm	N/A	N/A
	4 a 5 pm	502	485

Nota. La descripción de “No Aplica” se empleó si en el horario el cielo fue mayoritariamente nublado. Sólo se distinguen los valores para los horarios o momentos en donde hubo cielo despejado y continuo por minutos, y el piranómetro de la estación pudo actualizar la lectura.

Tomado por medio de la aplicación DAVIS WeatherLink. Adaptado de: autores.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE DESTILACIÓN DE AGUA

Apéndice 6. Tasa, flujo de calor y tiempo de evaporación calculados para el diseño conceptual con irradiancia de diseño de 417 vatios por metro cuadrado, en función del ancho de área de apertura del concentrador parabólico y la presión interna.

$X_{ap}[m]$	C	P = 0.2 bar			P = 0.4 bar		
		$\dot{Q}_{rec}[W]$	$\dot{q}_{rec} \left[\frac{W}{m^2} \right]$	Tiempo total calentamiento + evaporación [min]	$\dot{Q}_{rec}[W]$	$\dot{q}_{rec} \left[\frac{W}{m^2} \right]$	Tiempo total calentamiento + evaporación [min]
1	12.26	502.9	2712	82.99	497.2	2681	84.85
1.5	18.77	754	4066	55.35	748.3	4035	56.38
2	25.28	1005	5421	41.52	999.4	5390	42.21
2.5	31.79	1256	6775	33.22	1250	6744	33.74
3	38.3	1507	8129	27.69	1502	8098	28.1
3.5	44.81	1758	9483	23.74	1753	9452	24.07
4	51.32	2009	10837	20.77	2004	10806	21.05
4.5	57.83	2261	12191	18.46	2255	12160	18.71
5	64.34	2512	13546	16.62	2506	13515	16.84
5.5	70.85	2763	14900	15.11	2757	14869	15.3
6	77.36	3014	16254	13.85	3008	16223	14.02
6.5	83.87	3265	17608	12.78	3259	17577	12.94
7	90.38	3516	18962	11.87	3510	18931	12.02
7.5	96.89	3767	20316	11.08	3761	20285	11.22
8	103.4	4018	21671	10.39	4012	21640	10.51

$X_{ap}[m]$	C	P = 0.6 bar			P = 0.8 bar			P = 1 bar		
		$\dot{Q}_{rec}[W]$	$\dot{q}_{rec} \left[\frac{W}{m^2} \right]$	Tiempo total calentamiento o + evaporación [min]	$\dot{Q}_{rec}[W]$	$\dot{q}_{rec} \left[\frac{W}{m^2} \right]$	Tiempo total calentamiento o + evaporación [min]	$\dot{Q}_{rec}[W]$	$\dot{q}_{rec} \left[\frac{W}{m^2} \right]$	Tiempo total calentamiento o + evaporación [min]
1	12.26	493.1	2659	86.12	489.8	2642	87.12	487	2626	87.95
1.5	18.77	744.2	4013	57.06	740.9	3996	57.59	738.1	3981	58.03
2	25.28	995.3	5368	42.67	992	5350	43.01	989.2	5335	43.3
2.5	31.79	1246	6722	34.07	1243	6704	34.33	1240	6689	34.53
3	38.3	1497	8076	28.36	1494	8058	28.56	1491	8043	28.72
3.5	44.81	1749	9430	24.29	1745	9412	24.45	1742	9397	24.58
4	51.32	2000	10784	21.24	1996	10766	21.37	1994	10751	21.48
4.5	57.83	2251	12138	18.87	2247	12121	18.99	2245	12105	19.08
5	64.34	2502	13493	16.97	2499	13475	17.08	2496	13460	17.16
5.5	70.85	2753	14847	15.43	2750	14829	15.52	2747	14814	15.59
6	77.36	3004	16201	14.14	3001	16183	14.22	2998	16168	14.29
6.5	83.87	3255	17555	13.05	3252	17537	13.12	3249	17522	13.18
7	90.38	3506	18909	12.11	3503	18891	12.18	3500	18876	12.24
7.5	96.89	3757	20263	11.3	3754	20246	11.37	3751	20230	11.42
8	103.4	4008	21617	10.59	4005	21600	10.65	4002	21585	10.7

Apéndice 7. Tasa de condensado final en función de la presión e irradiancia, determinando si hay ebullición nucleada con base en los valores mínimos requeridos.

G_{sol}	P = 0.2 bar				P = 0.4 bar			
	\dot{q}_{rec}	Tasa de evaporación	Tasa total de producto final	Ebullición Nucleada (SI / NO)	\dot{q}_{rec}	Tasa de evaporación	Tasa total de producto final	Ebullición Nucleada (SI / NO)
$\left(\frac{W}{m^2}\right)$	$\left(\frac{W}{m^2}\right)$	(kg/h)	(kg/h)		$\left(\frac{W}{m^2}\right)$	(kg/h)	(kg/h)	
400	2598	0.69	0.35	NO	2567	0.68	0.34	NO
417	2712	0.72	0.36	NO	2681	0.71	0.35	NO
450	2934	0.78	0.39	NO	2903	0.77	0.38	NO
500	3269	0.87	0.44	NO	3238	0.85	0.43	NO
550	3604	0.96	0.48	NO	3573	0.94	0.47	NO
600	3939	1.05	0.53	NO	3908	1.03	0.52	NO
650	4275	1.14	0.57	NO	4244	1.12	0.56	NO
700	4610	1.23	0.61	NO	4579	1.21	0.60	NO
750	4945	1.32	0.66	SI	4914	1.30	0.65	NO
800	5280	1.41	0.70	SI	5249	1.38	0.69	NO
850	5616	1.50	0.75	SI	5585	1.47	0.74	NO
900	5951	1.59	0.79	SI	5920	1.56	0.78	NO
950	6286	1.68	0.84	SI	6255	1.65	0.83	NO
1000	6621	1.77	0.88	SI	6590	1.74	0.87	NO

Nota. La tasa final es la suma del tiempo de calentamiento y evaporación más el tiempo de condensación, y de acuerdo con el diseño del condensador, se puede estimar la tasa final en kg/h dividiendo a la mitad la tasa de evaporación porque el tiempo total sería, de forma ideal, el doble del tiempo en evaporar.

Apéndice 8. Código de Arduino para la lectura de las tres temperaturas.

```

#include <max6675.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <TimeLib.h>

String dato(int digit){
  String dt=String("0")+digit;
  return dt.substring(dt.length()-2);
}

void reloj(){
  String tiempo=String(hour()+":"+dato(minute())+": "+dato(second()));
  Serial.print(tiempo);
}

// Define the Arduino pins, the MAX6675 module is connected to
int SO_PIN = 7; // Serail Out (SO) pin
int CS_PIN = 6; // Chip Select (CS) pin
int SCK_PIN = 5; // Clock (SCK) pin

// Create an instance of the MAX6675 class with the specified pins
MAX6675 thermocouple(SCK_PIN, CS_PIN, SO_PIN);

OneWire ourWire2(3); //Se establece el pin 3 como bus OneWire
OneWire ourWire3(4); //Se establece el pin 4 como bus OneWire

DallasTemperature sensors2(&ourWire2); //Se declara una variable u objeto para nuestro sensor2
DallasTemperature sensors3(&ourWire3); //Se declara una variable u objeto para nuestro sensor3

void setup() {
  //setTime(hr,mm,s,d,m,y);
  setTime(11,14,00,24,2,2025);
  delay(1000);
  Serial.begin(9600);

  sensors2.begin(); //Se inicia el sensor 2
  sensors3.begin(); //Se inicia el sensor 3
}

void loop() {



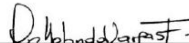
  sensors2.requestTemperatures(); //Se envía el comando para leer la temperatura

```

```
float temp2= sensors2.getTempCByIndex(0); //Se obtiene la temperatura en °C del sensor 2
sensors3.requestTemperatures(); //Se envía el comando para leer la temperatura
float temp3= sensors3.getTempCByIndex(0); //Se obtiene la temperatura en °C del sensor 3
reloj();
Serial.print("|");
Serial.print(thermocouple.readCelsius());
Serial.print("|");
Serial.print(temp2);
Serial.print("|");
Serial.print(temp3);
Serial.println("|");
delay(1000);


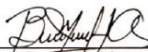
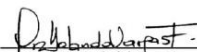
}
```

Apéndice 9. Análisis microbiológico y fisicoquímico de una muestra de agua (0.8 L) antes de la destilación con el prototipo.

	Laboratorio Químico de Consultas Industriales	Código: F-PA-02	
	Post - Analítico	Versión: 15	
	INFORME DE RESULTADOS	Última modificación: 2024-01-15	
INFORME DE ENSAYO INF 25-0148			
Fecha de emisión	2025-03-20	Informe N.º 25-0148	
Fecha de recepción	2025-02-26	Solicitud N.º 25-0148-0149	
1. INFORMACIÓN SUMINISTRADA POR EL CLIENTE			
1.1 Información del cliente			
Cliente	Luis Felipe Mantilla Medina	Contacto Luis Felipe Mantilla Medina	
Dirección		Teléfono	
Correo		C.C.	
1.2 Información del muestreo			
Fecha	24 febrero 2025, 8:00 am	Tipo Puntual	
Lugar	Santander, Bucaramanga, Universidad Industrial de Santander	Muestreo Realizado por el Cliente	
Punto	Lavamanos de taller de metalmecánica, Escuela de Ingeniería Mecánica		
Nota: La identificación de la muestra también es información suministrada por el cliente.			
2. INFORMACIÓN DE ENSAYOS			
Agua antes de tratamiento (25-0148)			
<i>Agua Residual Industrial</i>			
Fecha inicial análisis	2025-02-26	Lugar de análisis	
Fecha final análisis	2025-03-07	Calle 9 # 27, UIS Campus Central	
Tabla 1. Resultados de ensayos			
Parámetro	Método	Resultado	Unidades
Análisis Fisicoquímico			
pH^a	Potenciométrico, SM 4500-H ⁺ B	6,74	Und. pH
Conductividad Eléctrica	Conductivimétrico, SM 2510 B	232,00	µS/cm
Color	Espectrofotométrico, SM 2120 B	18,00	UPC
Turbiedad	Nefelométrico, SM 2130 B	81,80	NTU
Alcalinidad Total	Titrimétrico, SM 2320 B	107,80	mg CaCO ₃ /L
Cloruros	Argentométrico, SM 4500-Cl ⁻ B	20,97	mg Cl ⁻ /L
Dureza Cálcica	Titrimétrico, SM 2340 C	64,00	mg CaCO ₃ /L
Dureza Total	Titrimétrico, SM 2340 C	86,00	mg CaCO ₃ /L
Calcio	Absorción Atómica, SM 3111 B	25,65	mg Ca/L
Magnesio	Absorción Atómica, SM 3111 B	5,33	mg Mg/L
Hierro Total	Espectrofotométrico, SM 3500-Fe B	<0,070	mg Fe/L
Nitratos	Espectrofotométrico, SM 4500-NO ₃ ⁻ B	42,43	mg NO ₃ ⁻ /L
Nitritos	Espectrofotometría, SM 4500-NO ₂ ⁻ B	0,11	mg N-NO ₂ ⁻ /L
Sulfatos	Turbidimétrico, SM 4500-SO ₄ ²⁻ E	55,26	mg SO ₄ ²⁻ /L
Surfactantes Aniónicos como SAAM	Espectrofotometría, Rodier J. Analisis de aguas, 2009. D 3.1.1 Modificado	1,58	mg SAAM/L
Demanda Química de Oxígeno	Espectrofotométrico, SM 5220 D	343,32	mg O ₂ /L
Análisis Microbiológicos			
Coliformes Totales	Filtración por membrana, SM 9222 J	1500	UFC/100 ml
Escherichia coli	Filtración por membrana, SM 9222 J	450	UFC/100 ml
^a Temperatura de la lectura de pH: 25.0°C			
<p>a) La información de muestreo es proporcionada por el cliente. Por lo tanto, no se realizará referencia alguna al plan y método de muestreo utilizado. Los resultados se aplican a la muestra como se recibió. b) Los resultados reportados en el presente informe están relacionados exclusivamente a los ítems que han sido sometidos a ensayo. c) Sin la aprobación del laboratorio no se debe reproducir el informe, excepto cuando se reproduce en su totalidad. d) El laboratorio no es responsable por la información identificada como suministrada por el cliente y su posible afectación en la validez de los resultados.</p>			
 Coordinadora de laboratorio Qca. Esp. Bibiana Herrera MP PQ-3003		 Directora de laboratorio Qca. M.Sc. Yolanda Vargas MP PQ-1144	
Fin del informe			

Nota. Estudio realizado en el LQCI. Adaptado de: autores.

Apéndice 10. Análisis microbiológico y fisicoquímico de una muestra de agua (0.5 L) después de la destilación con el prototipo.

	Laboratorio Químico de Consultas Industriales	Código: F-PA-02	
	Post - Analítico	Versión: 15	
	INFORME DE RESULTADOS	Última modificación: 2024-01-15	
INFORME DE ENSAYO INF 25-0149			
Fecha de emisión	2025-03-20	Informe N.º 25-0149	
Fecha de recepción	2025-02-26	Solicitud N.º 25-0148-0149	
1. INFORMACIÓN SUMINISTRADA POR EL CLIENTE			
1.1 Información del cliente			
Cliente	Luis Felipe Mantilla Medina	Contacto Luis Felipe Mantilla Medina	
Dirección		Teléfono	
Correo		C.C.	
1.2 Información del muestreo			
Fecha	24 febrero 2025, 11:50 am	Tipo Puntual	
Lugar	Santander, Piedecuesta	Muestreo Realizado por el Cliente	
Punto	Prototipo de destilación simple con energía solar, salida del tanque de condensación		
Nota: La identificación de la muestra también es información suministrada por el cliente.			
2. INFORMACIÓN DE ENSAYOS			
Agua después de tratamiento (25-0149)			
<i>Agua Residual Industrial</i>			
Fecha inicial análisis	2025-02-26	Lugar de análisis	
Fecha final análisis	2025-03-07	Calle 9 # 27; UIS Campus Central	
Tabla 1. Resultados de ensayos			
Parámetro	Método	Resultado	Unidades
Análisis Fisicoquímico			
pH ¹	Potenciométrico, SM 4500-H ⁺ B	7,07	Und. pH
Conductividad Eléctrica	Conductivimétrico, SM 2510 B	69,00	µS/cm
Color	Espectrofotométrico, SM 2120 B	15,50	UPC
Turbiedad	Nefelométrico, SM 2130 B	20,90	NTU
Alcalinidad Total	Titrimétrico, SM 2320 B	134,75	mg CaCO ₃ /L
Cloruros	Argentométrico, SM 4500-Cl ⁻ B	26,05	mg Cl ⁻ /L
Dureza Cálcica	Titrimétrico, SM 2340 C	64,00	mg CaCO ₃ /L
Dureza Total	Titrimétrico, SM 2340 C	105,00	mg CaCO ₃ /L
Calcio	Absorción Atómica, SM 3111 B	26,05	mg Ca/L
Magnesio	Absorción Atómica, SM 3111 B	9,70	mg Mg/L
Hierro Total	Espectrofotométrico, SM 3500-Fe B	<0,070	mg Fe/L
Nitratos	Espectrofotométrico, SM 4500-NO ₃ ⁻ B	20,56	mg NO ₃ ⁻ /L
Nitritos	Espectrofotometría, SM 4500-NO ₂ ⁻ B	0,11	mg NO ₂ ⁻ /L
Sulfatos	Turbidimétrico, SM 4500-SO ₄ ²⁻ E	12,65	mg SO ₄ ²⁻ /L
Surfactantes Aniónicos como SAAM	Espectrofotometría, Rodier J. Analisis de aguas, 2009. D 3.1.1 Modificado	1,22	mg SAAM/L
Demanda Química de Oxígeno	Espectrofotométrico, SM 5220 D	230,73	mg O ₂ /L
Análisis Microbiológicos			
Coliformes Totales	Filtración por membrana, SM 9222 J	1024	UFC/100 ml
<i>Escherichia coli</i>	Filtración por membrana, SM 9222 J	29600	UFC/100 ml
 Coordinadora de laboratorio Qca. Esp. Bibiana Herrera MP PQ-3003	 Directora de laboratorio Qca. M.Sc. Yolanda Vargas MP PQ-1144		

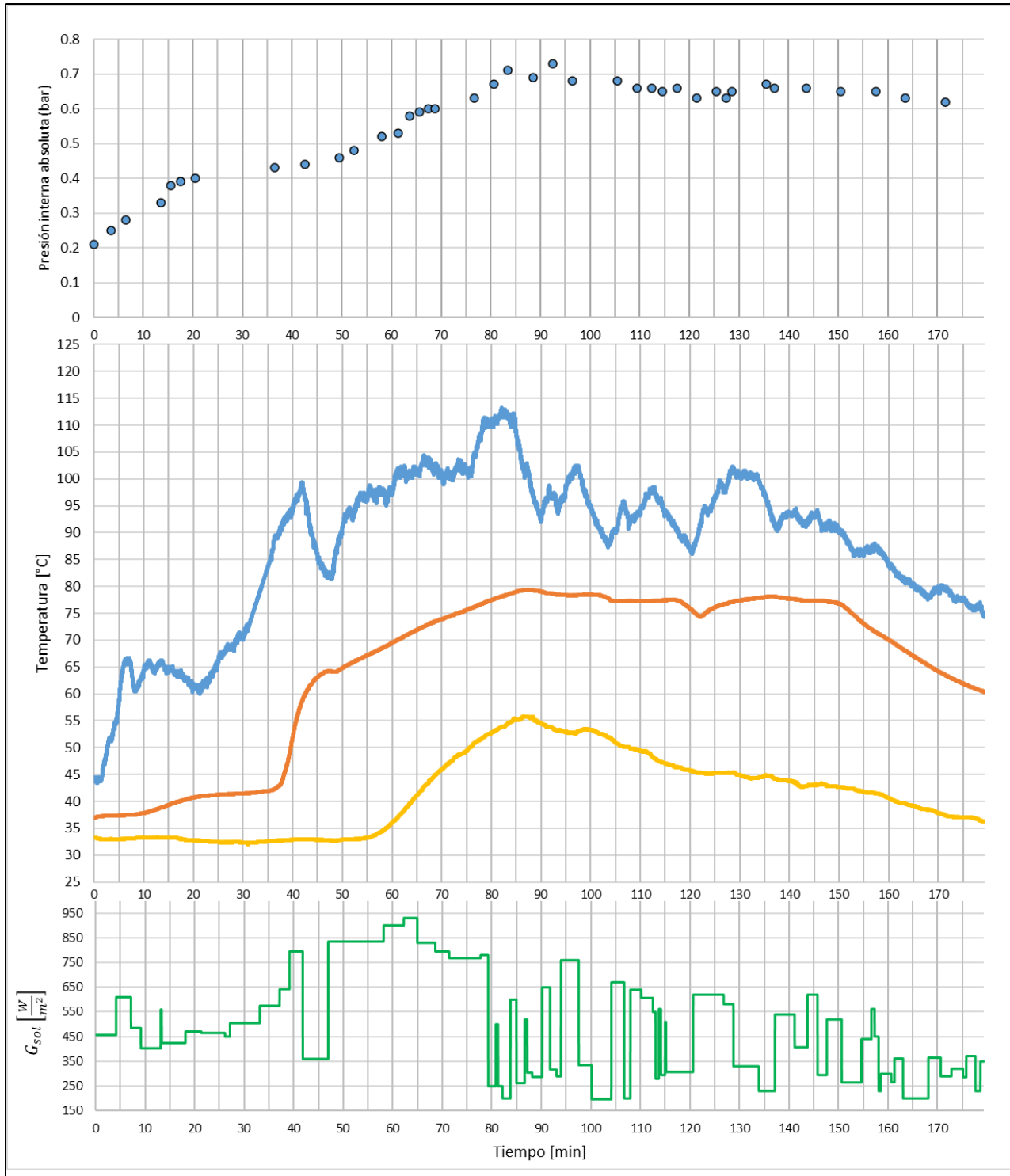
Nota. Estudio realizado en el LQCI. La cantidad de esta muestra fue menor. Adaptado de: autores.

Resultados de operación con agua potable a presión de vacío y concentrador fijo

Apéndice 11. Resultados de operación presión de vacío, concentrador fijo, 2 de febrero.

Se realizó una sola toma de datos, por medio de las temperaturas se pudo determinar si había generación de condensado, por lo tanto, debido a las condiciones climáticas de la mayor parte del día con radiación difusa por las nubes, se deja en operación continua hasta terminar el día de trabajo. Además, el concentrador parabólico en horas de la tarde ya no concentra tantos rayos en el extremo tapado del tubo, sino más hacia el extremo abierto y se puede concluir que no toda el área superficial donde está el agua se calienta completamente, esto ocurre debido a la orientación de oriente a occidente del tubo solar.

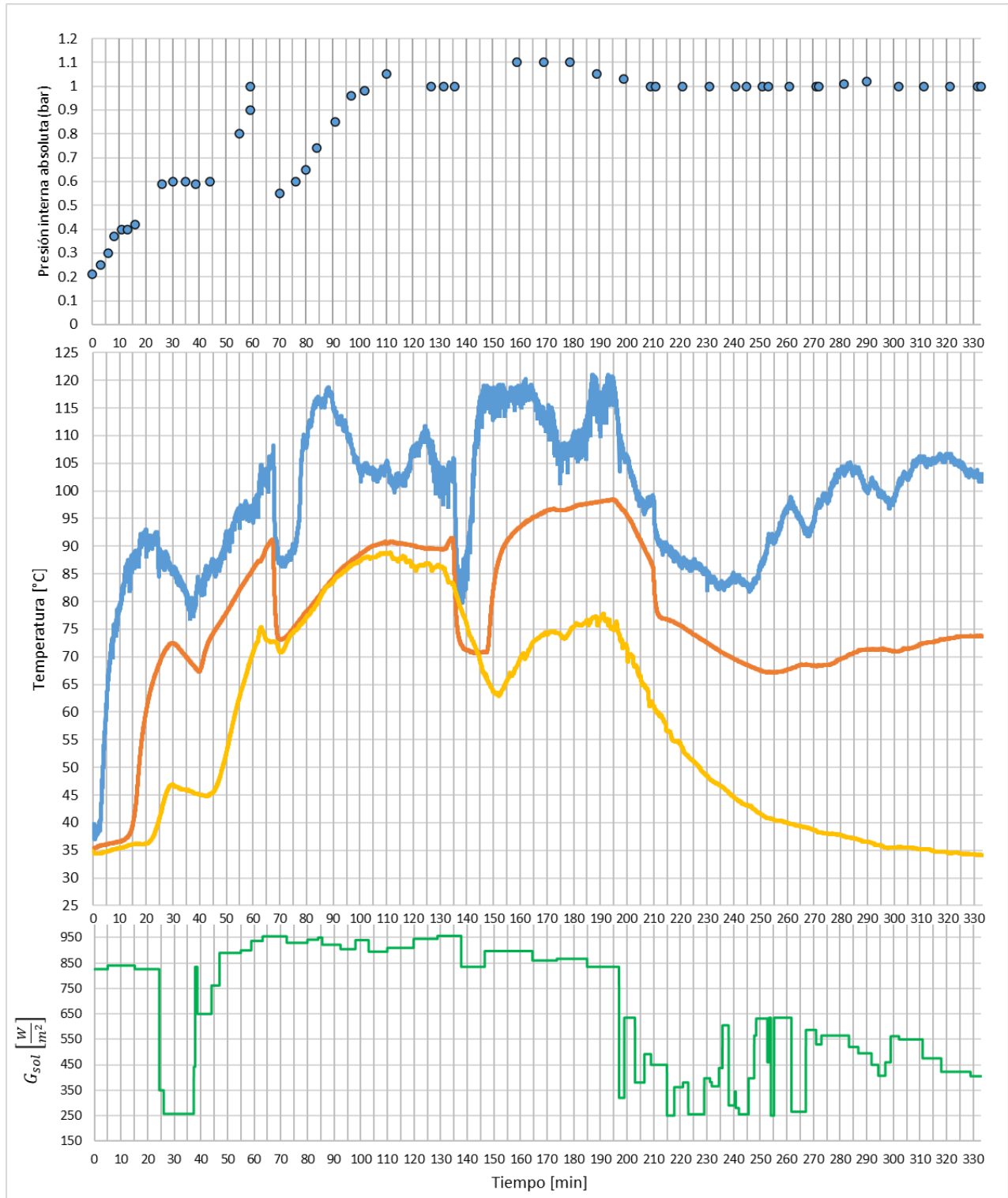
Hora local	Tiempo absoluto (min)	Descripción de operación	Prod (L)	Tiempo de operación (min)	Promedio $G_{sol\ total} \left(\frac{W}{m^2}\right)$
1:14:00 pm	0	Inicio toma de datos para 1 L de agua, presión inicial interna absoluta 0.21 bar	-	2.99	502.2
4:13:00 pm	179.33	Apertura V2, cierre V2 y apertura V3. Obtención de condensado. Fin de operaciones.	0.15		



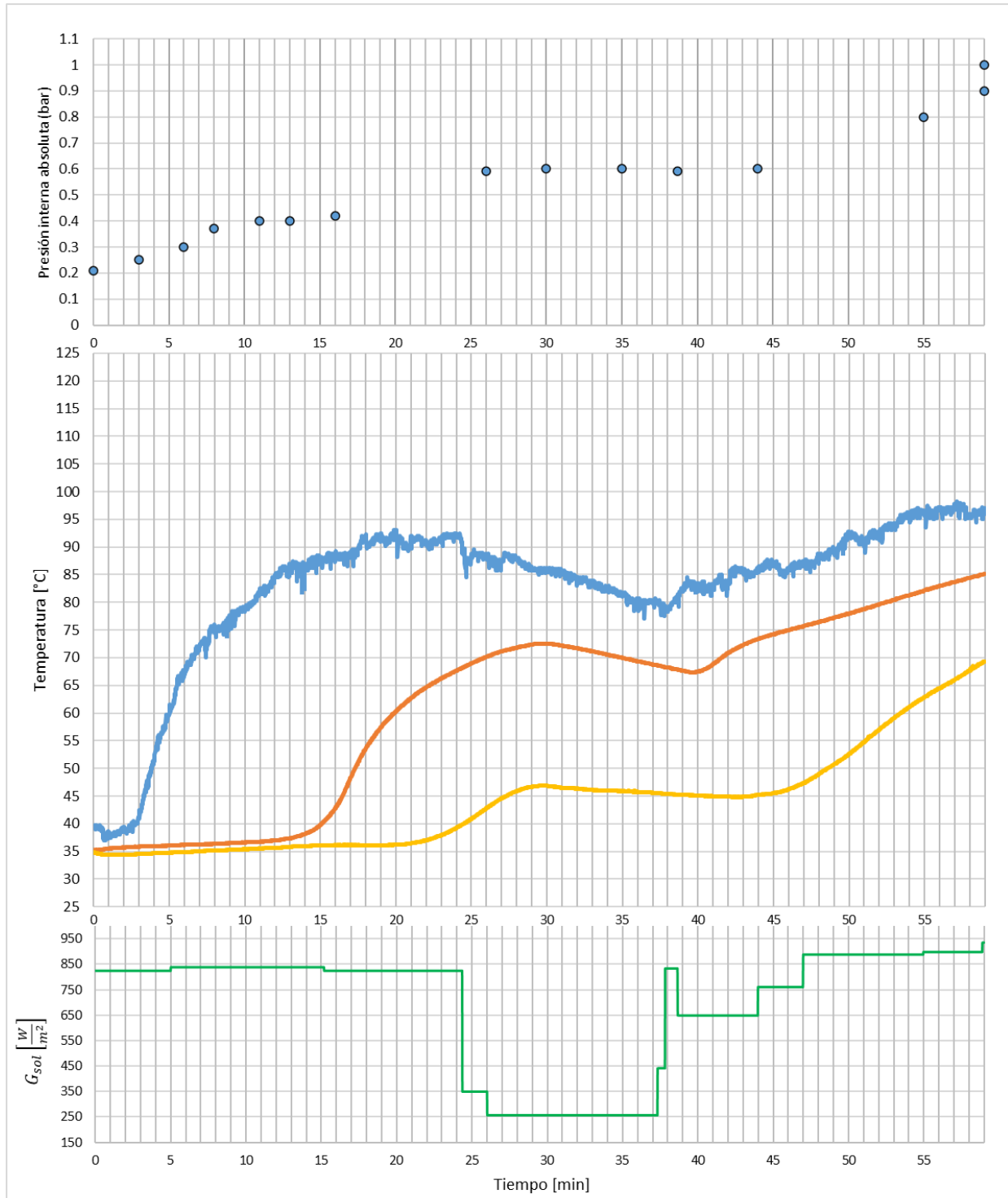
Apéndice 12. Resultados de operación presión de vacío, concentrador fijo, fecha 3 de febrero

Hora local	Tiempo absoluto (min)	Descripción de operación	Prod (L)	Tiempo de operación (min)	Promedio $G_{sol\ total} \left(\frac{W}{m^2}\right)$
10:55:00 am	0	Inicio toma de datos para 1 L de agua, presión inicial interna absoluta 0.21 bar	-	59	698
11:54:00 am	59	Apertura V2, cierre V2 y apertura V3. Obtención de condensado. Reabastecimiento de agua de tratamiento.	0.4		
12:05:00 pm	70	Inicio toma de datos para 1 L de agua. Nuevo vacío, presión inicial interna absoluta 0.55 bar	-	61.58	926
1:06:35 pm	131.58	Apertura V2, cierre V2 y apertura V3. Obtención de condensado. Reabastecimiento de agua de tratamiento.	0.73		
1:10:44 pm	135.73	Inicio toma de datos para 1 L de agua, presión inicial interna absoluta 1 bar (atmosférica)	-	73.27	803
2:24:00 pm	209	Apertura V2, cierre V2 y apertura V3. Obtención de condensado Reabastecimiento de agua de tratamiento.	0.22		
2:26:00 pm	211	Inicio toma de datos para 1 L de agua, presión inicial interna absoluta 1 bar (atmosférica)		60.98	416
3:26:59 pm	271.98	Apertura V2, cierre V2 y apertura V3. Obtención de condensado. No se reabastece agua.	0.05		
3:27:00 pm	272	Inicio toma de datos. Presión inicial interna absoluta 1 bar (atmosférica)		61	492
4:28:00 pm	333	Apertura V2, cierre V2 y apertura V3. No se obtuvo condensado Fin de operaciones	0		

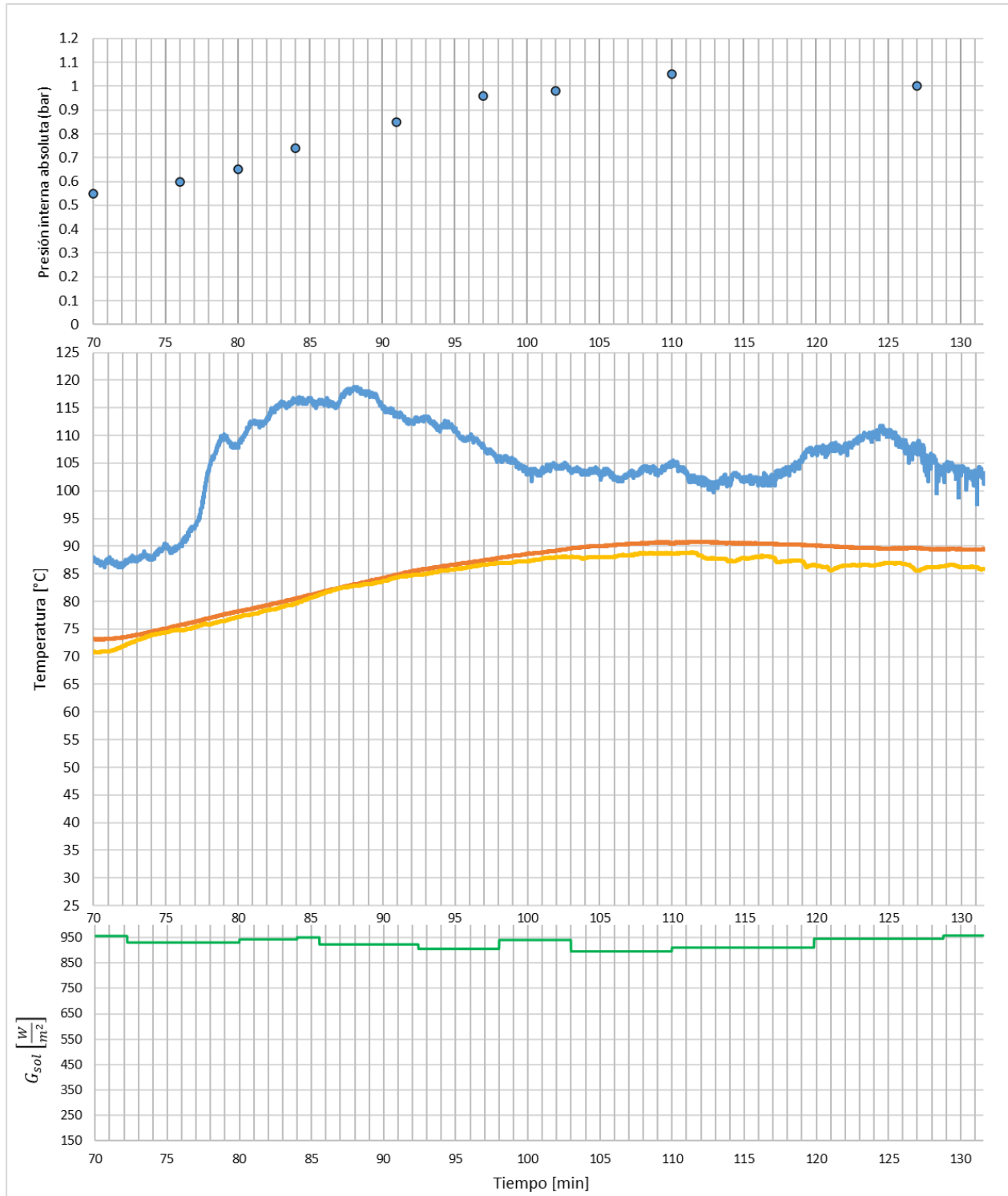
Gráfico total de operación presión de vacío, concentrador fijo, fecha 3 de febrero.



Toma de datos #1. 3 de febrero. De 10:55 am hasta 11:54 am. 0.4 L condensado.

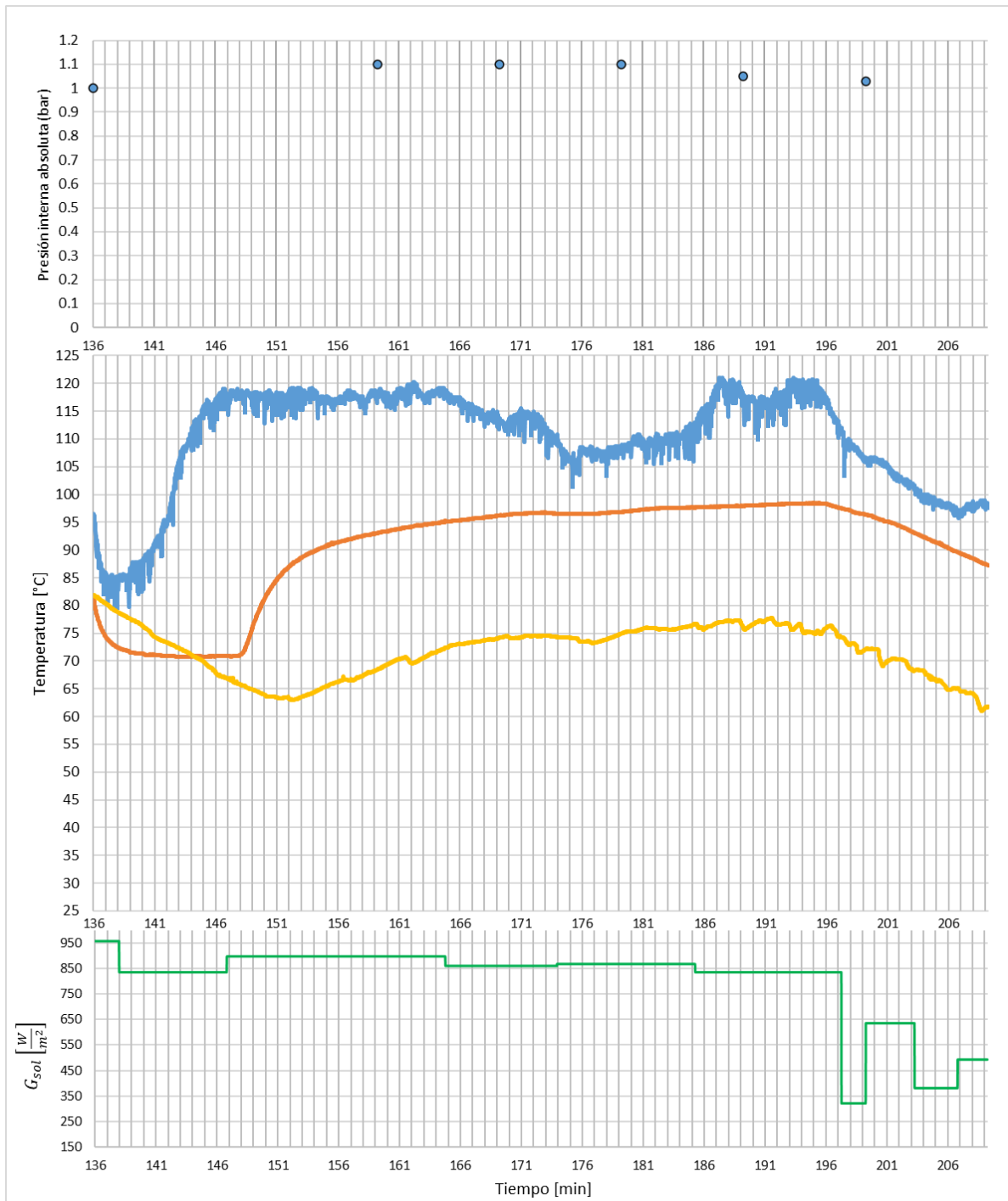


Toma de datos #2. Se reabastece agua. Desde 12:05 pm hasta 1:06 pm. 0.73 L condensado.

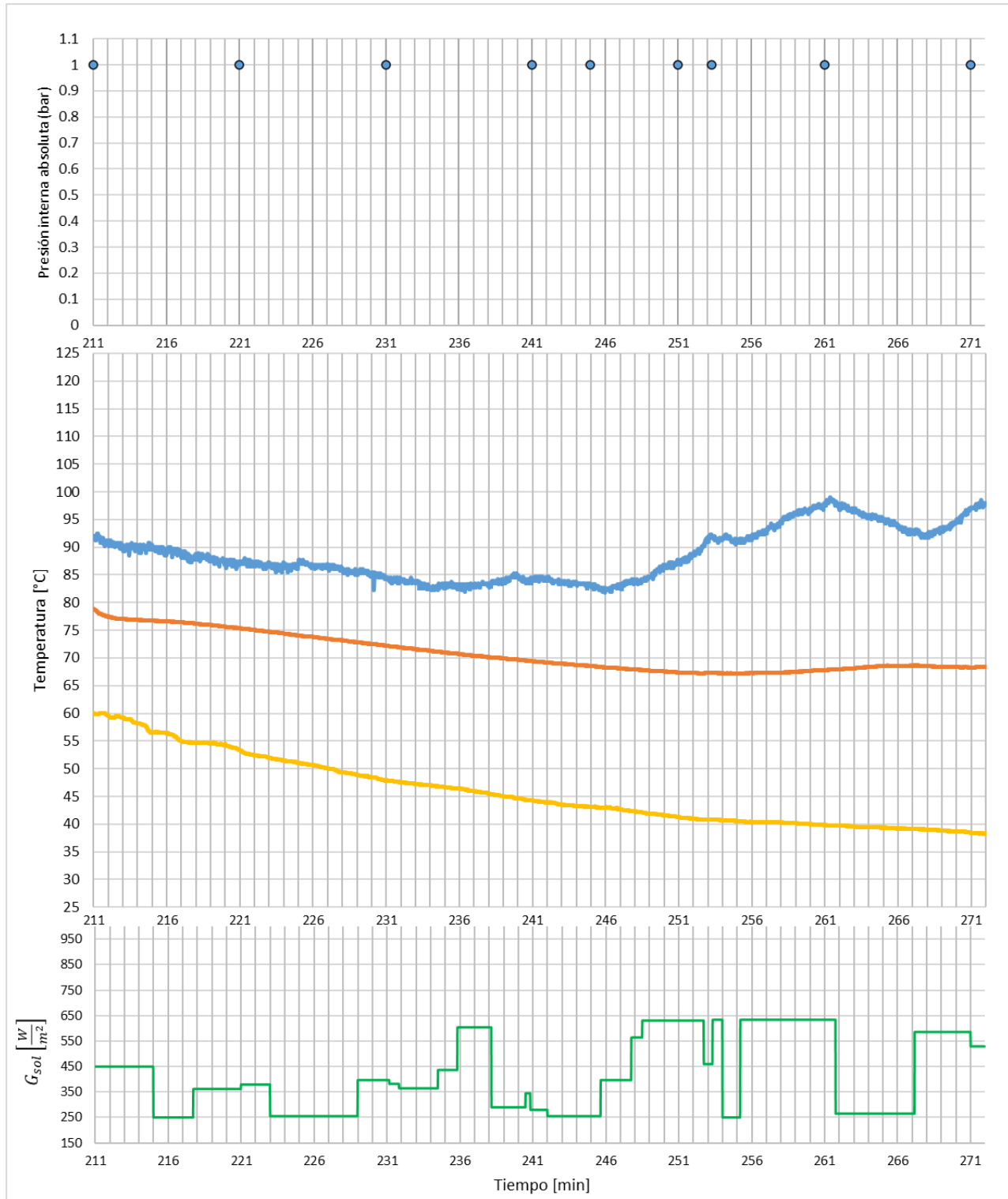


Toma de datos #3. Se reabastece agua. Desde 1:10 pm hasta las 2:24 pm, no se realizó vacío porque el aceite de la bomba ya estaba con residuos de vapor y mugre, debido a la operación continua sin dejar enfriar el sistema, la bomba absorbía mucho vapor que se había generado.

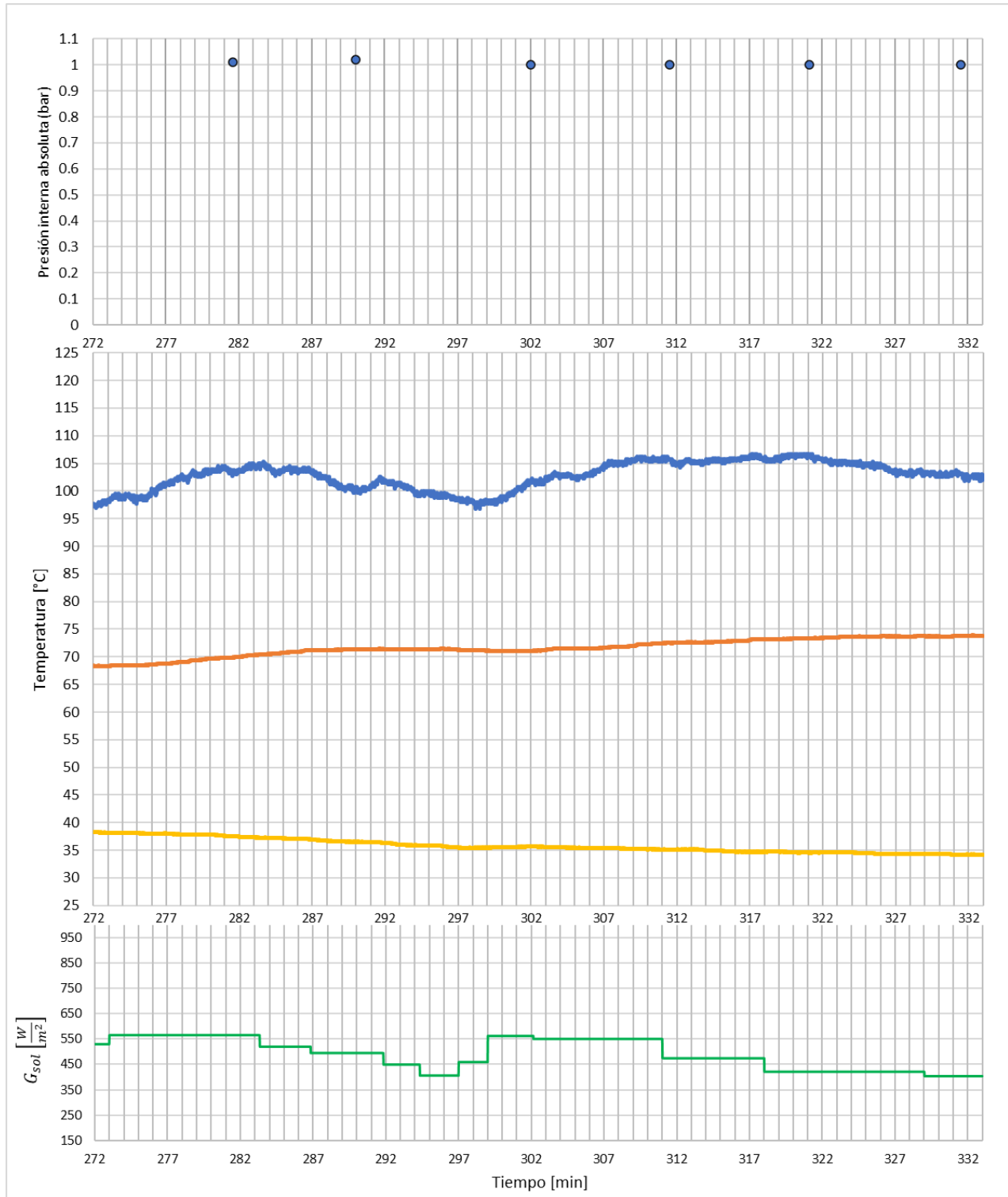
Condensado obtenido 0.22 L



Toma de datos #4. Desde las 2:26 pm hasta las 3:26 pm, sin vacío, a P atm. 0.05 L



Toma de datos #5. Desde las 3:27 pm hasta las 4:28 pm, sin vacío a P atm. 0 L



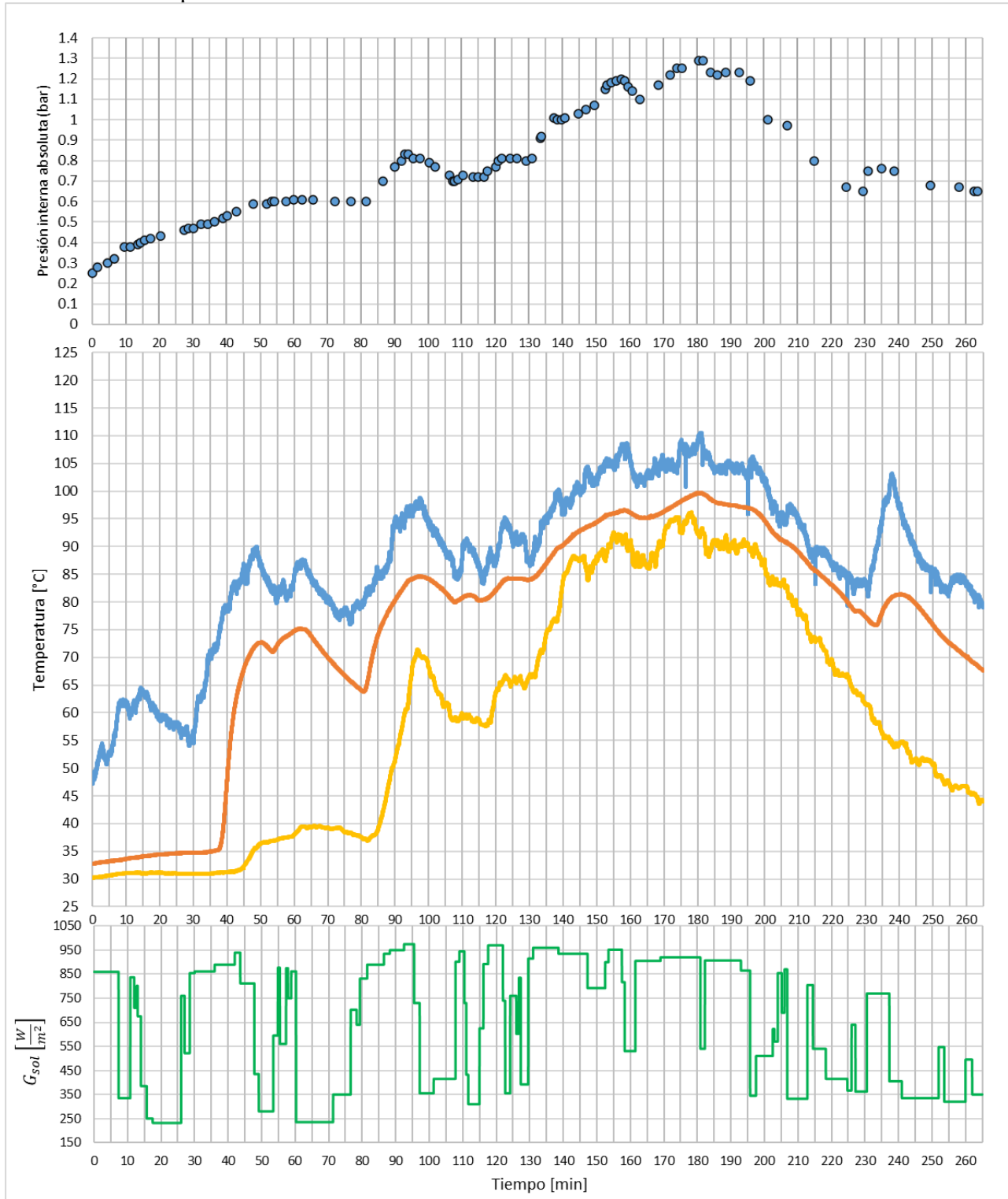
Apéndice 13. Resultados de operación presión de vacío, concentrador fijo. 11 de febrero desde las 10:42 am hasta las 3:05 pm

Se realizan dos tomas de datos sin realizar vacío nuevamente entre ellas ni reabastecimiento de agua. Único vacío realizado al iniciar la operación. Se realiza apertura y cierre de la válvula #2 de almacenamiento de condensado para intentar reducir la presión interna dejando llevar el producto poco a poco hacia el tanque de recolección y también para evitar el posible retorno al tubo en caso de que se llene hasta el orificio de entrada de vapor.

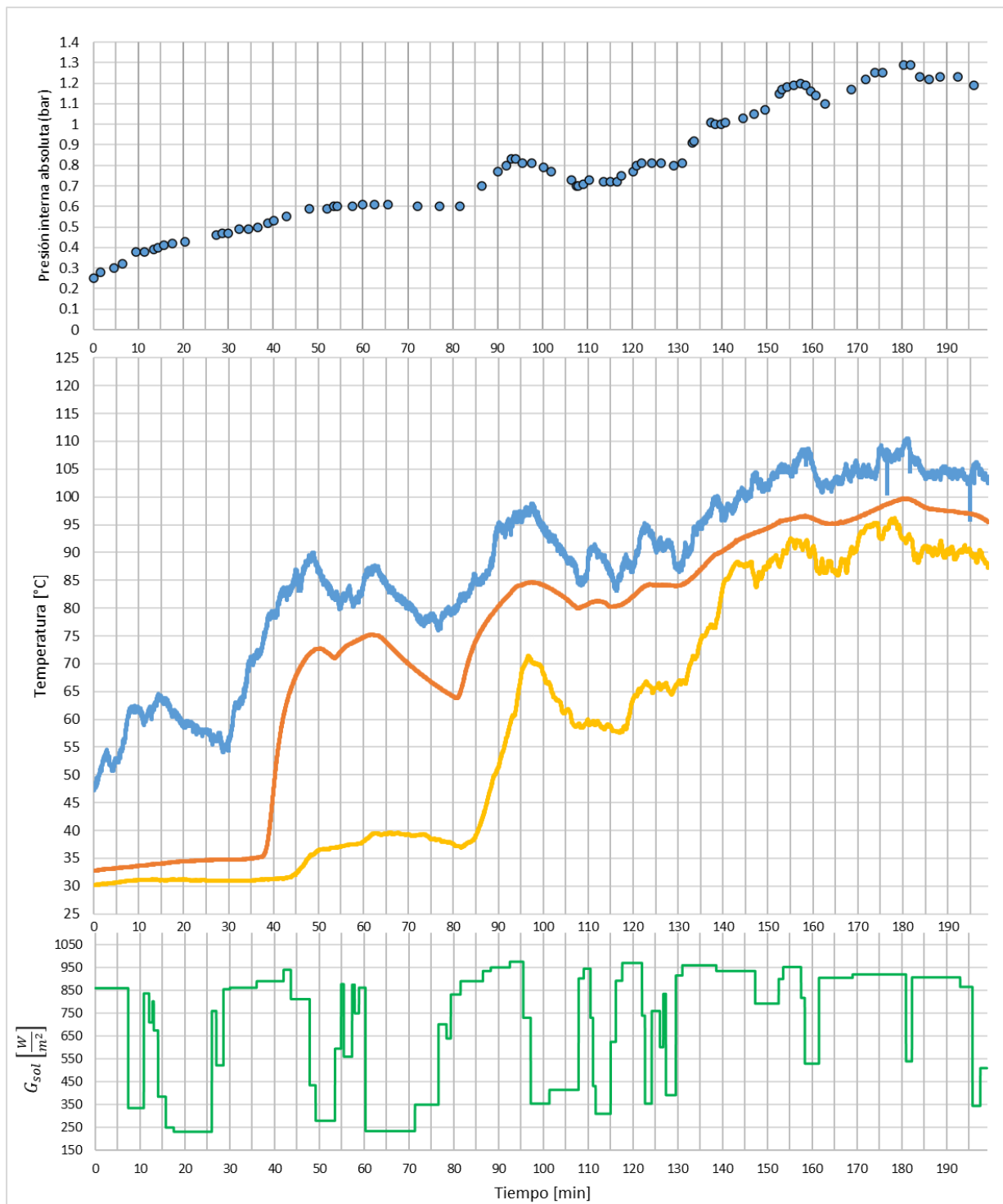
Registro de eventos. Obtención total 0.87 L.

Hora local	Tiempo absoluto (min)	Descripción de operación	Prod (L)	Tiempo de operación (min)	Promedio $G_{sol\ total} \left(\frac{w}{m^2}\right)$
10:42:00 am	0	Inicio toma de datos para 1 L de agua, presión inicial interna absoluta 0.21 bar	-	199	698
12:15:40 pm	93.67	Apertura V2			
12:17:00 pm	95	Cierre V2			
1:00:00 pm	138	Apertura V2			
1:00:15 pm	138.25	Cierre V2			
1:15:00 pm	153	Apertura V2			
1:15:07 pm	153.12	Cierre V2			
1:45:20 pm	183.33	Apertura V2			
1:46:20 pm	184.33	Cierre V2			
2:00:00 pm	199	Apertura V2, cierre V2 y apertura V3. Obtención de condensado. No se reabastece agua de trabajo.	0.62		
2:00:01 pm	200	Continúa la toma de datos, sin hacer vacío otra vez. Presión interna absoluta 1.19 bar			
2:32:30 pm	230.5	Apertura V2			
2:33:30 pm	231.5	Cierre V2			
3:05:40 pm	263.67	Apertura V2			
3:06:00 pm	264	Cierre V2			
3:07:00 pm	265	Apertura V2, cierre V2 y apertura V3. Obtención de condensado. Final de operaciones debido a lluvia.	0.25		

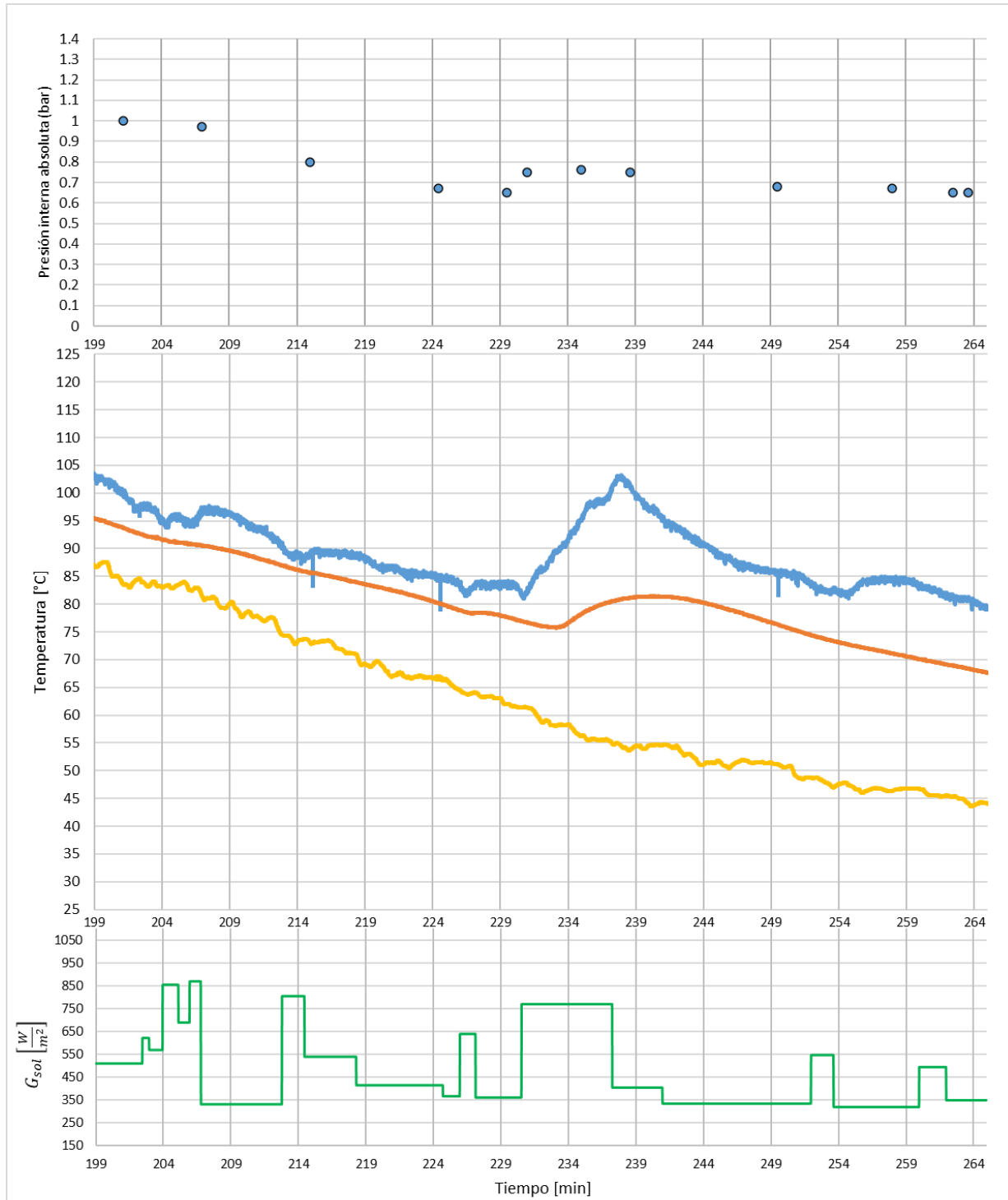
Grafica total de operación del día 11 de febrero



Toma de datos #1. Desde las 10:42 am hasta las 2:01 pm. 0.62 L



Toma de datos #2. Desde las 2:01 pm hasta las 3:07 pm. 0.25 L



Resultados de operación con agua potable a presión de vacío y seguimiento del concentrador

Apéndice 14. Resultado de operación, presión de vacío con seguimiento solar del concentrador

12 de febrero desde las 10:18 am hasta las 3:53 pm

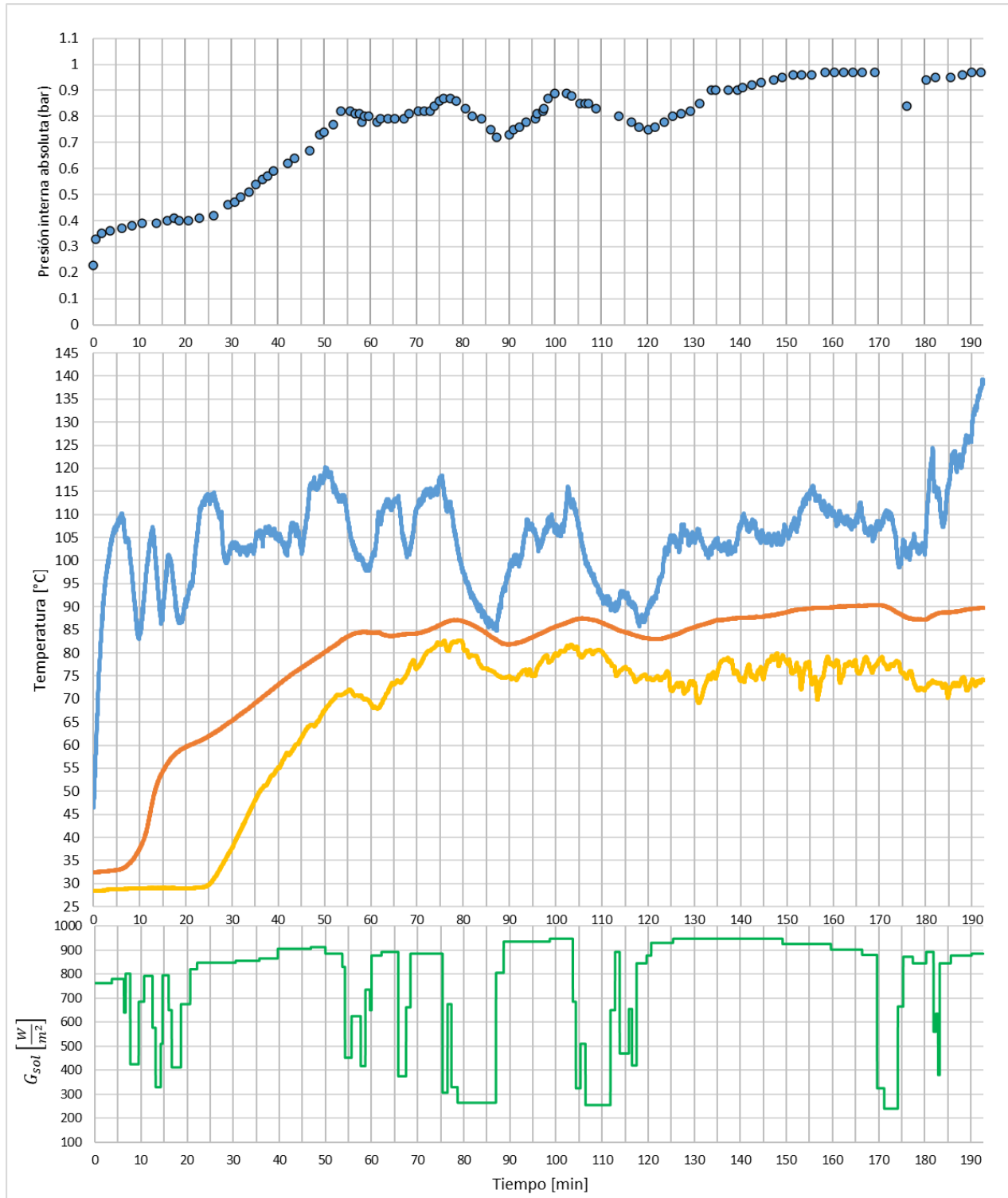
Registro de eventos operación 1.

Hora local	Tiempo absoluto (min)	Descripción de operación	Prod (L)	Tiempo de operación (min)	Promedio $G_{sol\ total} \left(\frac{W}{m^2}\right)$
10:18:20 am	0	Inicio toma de datos para 1 L de agua, presión inicial interna absoluta 0.23 bar	-	135.17	740
11:20:00 am	61.67	Apertura V2			
11:20:20 am	62	Cierre V2			
12:18:00 pm	119.67	Apertura V2			
12:19:00 pm	120.67	Cierre V2			
12:32:45 pm	134.42	Apertura V2			
12:32:55 pm	134.58	Cierre V2			
12:33:30 pm	135.17	Apertura V2, cierre V2 y apertura V3. Obtención de condensado. No se reabastece agua de trabajo.	0.51	65.98	771
12:33:35 pm	135.25	Continúa la toma de datos, sin hacer vacío otra vez. Presión interna absoluta 0.9 bar			
1:18:00 pm	179.67	Apertura V2			
1:18:40 pm	180.33	Cierre V2			
1:31:00 pm	192.67	Apertura V2, cierre V2 y apertura V3. Obtención de condensado. Se reabastece agua de trabajo con 0.8 L. Se deja enfriar el sistema, cubriendo subsistema de calentamiento y retirando aislantes del tanque y unión universal.	0.26		

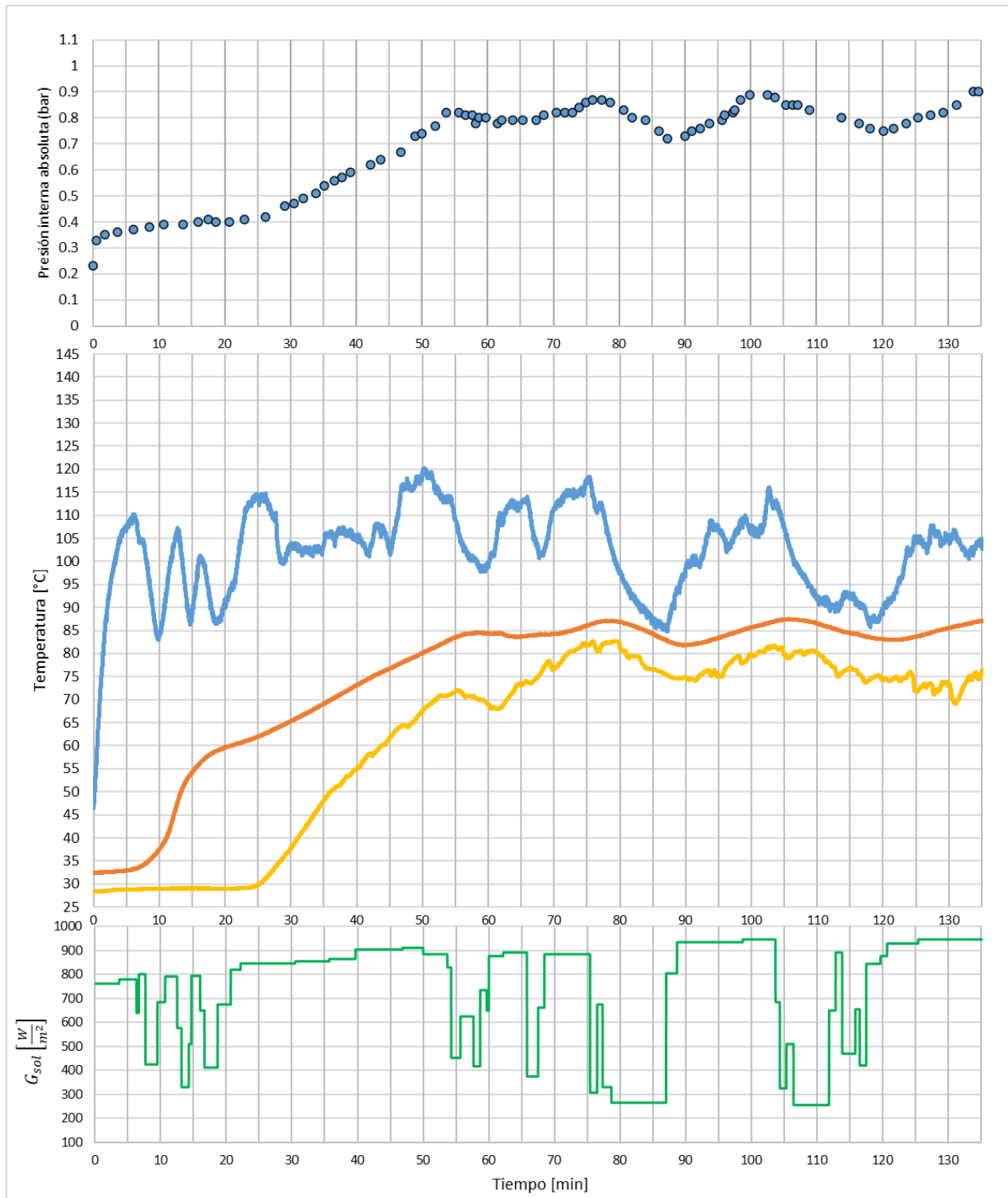
Registro de eventos operación 2.

Hora local	Tiempo absoluto (min)	Descripción de operación	Prod (L)	Tiempo de operación (min)	Promedio $G_{sol\ total} \left(\frac{W}{m^2}\right)$
2:24:45 pm	0	Inicio toma de datos Presión inicial interna absoluta 0.29 bar	-	75.08	604 en su mayoría directa.
3:26:00 pm	61.25	Apertura V2			
3:27:00 pm	62.25	Cierre V2			
3:39:50 pm	75.08	Apertura V2, cierre V2 y apertura V3. Obtención de condensado. No se reabastece agua de trabajo.	0.8	13	554 en su mayoría directa.
3:40:00 pm	75.25	Continúa la toma de datos, sin hacer vacío otra vez. Presión interna absoluta 0.59 bar			
3:48:00 pm	83.25	Apertura V2			
3:48:30 pm	83.75	Cierre V2			
3:53:00 pm	88.25	Apertura V2, cierre V2 y apertura V3. Obtención de condensado. Fin de operaciones. Se presenta cielo cubierto con mucha nubosidad	0.1		

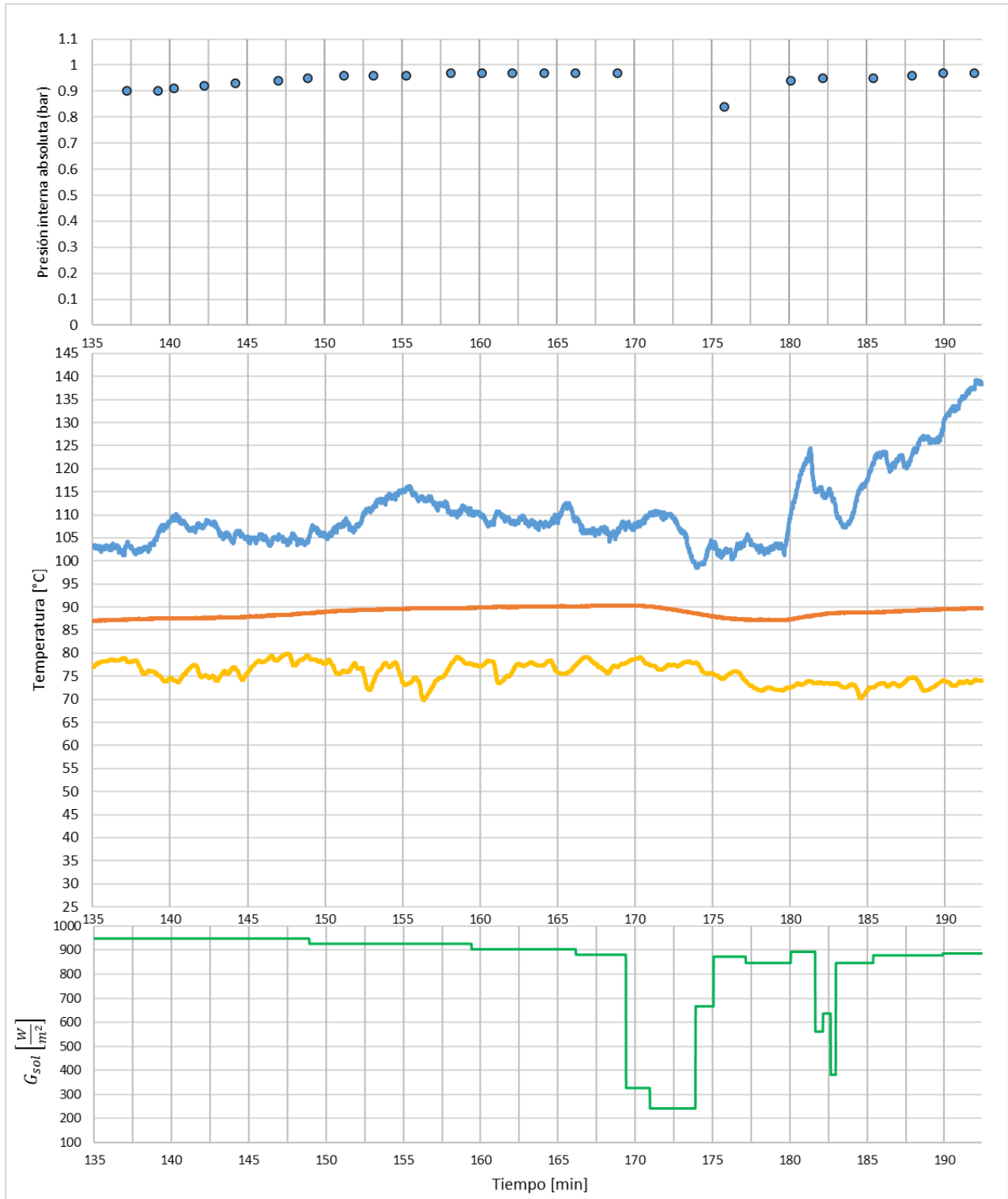
Gráfico general de operación #1 12 de febrero.



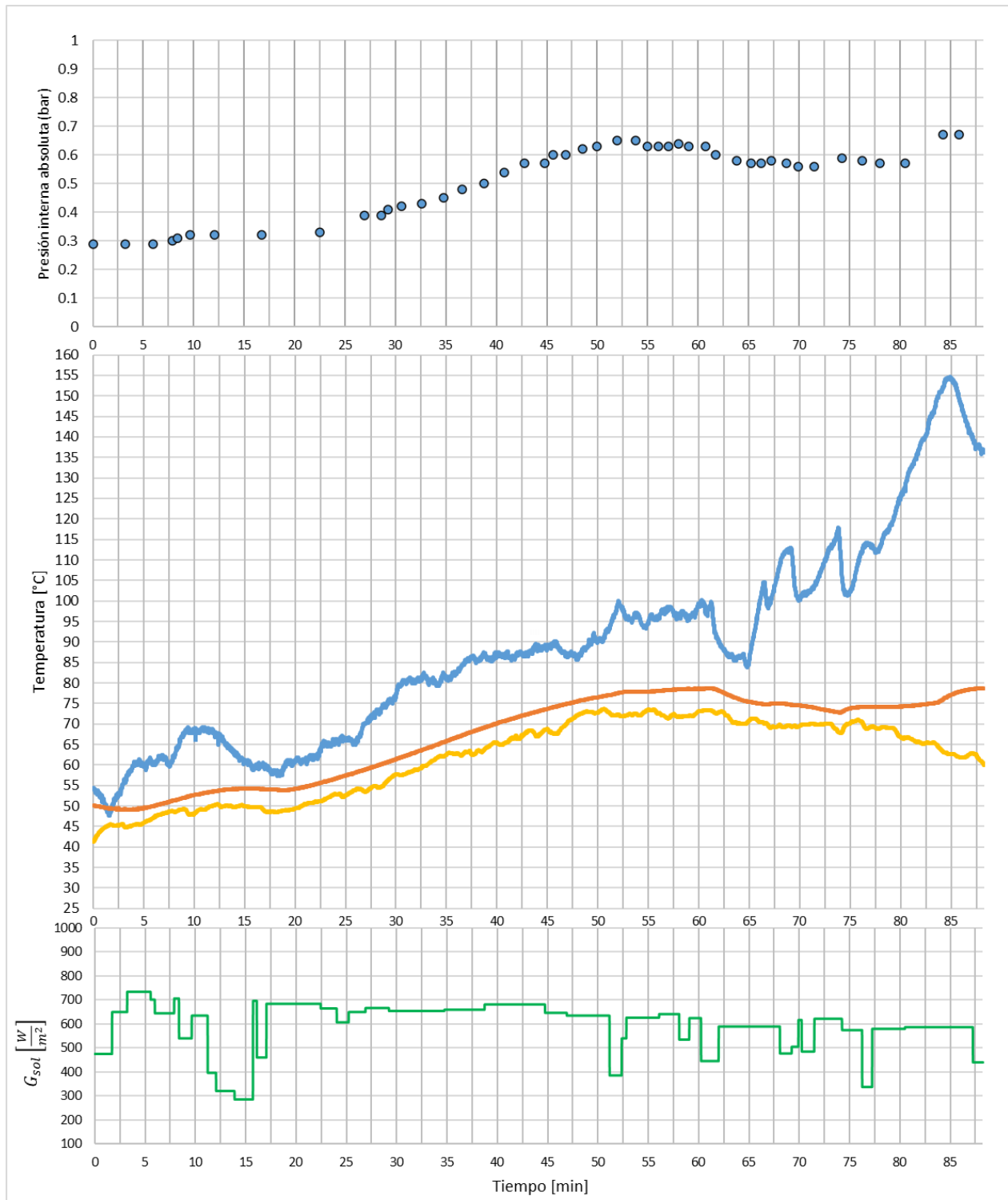
Operación 1 toma 1. 12 de febrero.



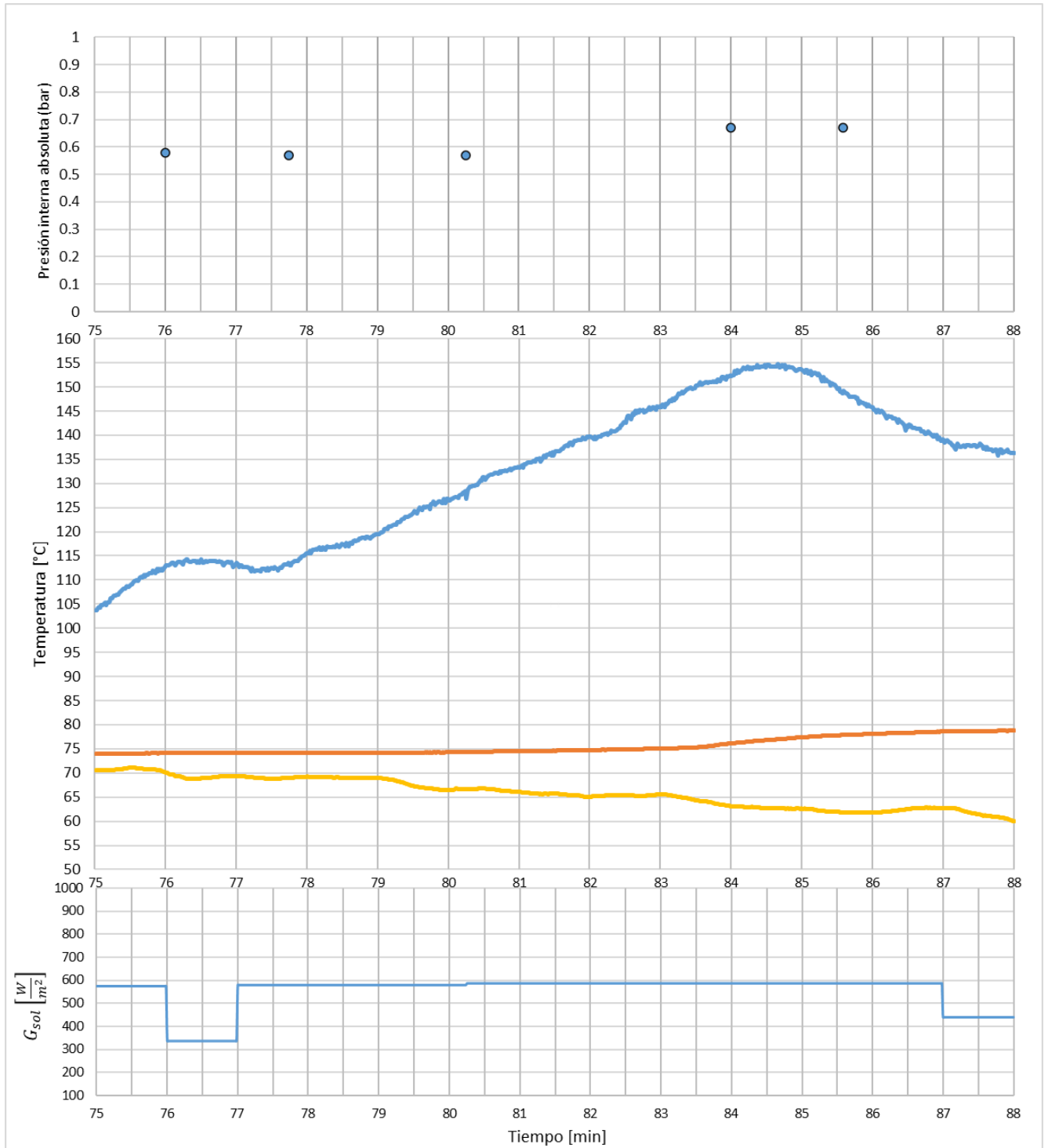
Operación 1 toma 2



Operación 2 toma 1.



Operación 2 toma 2.

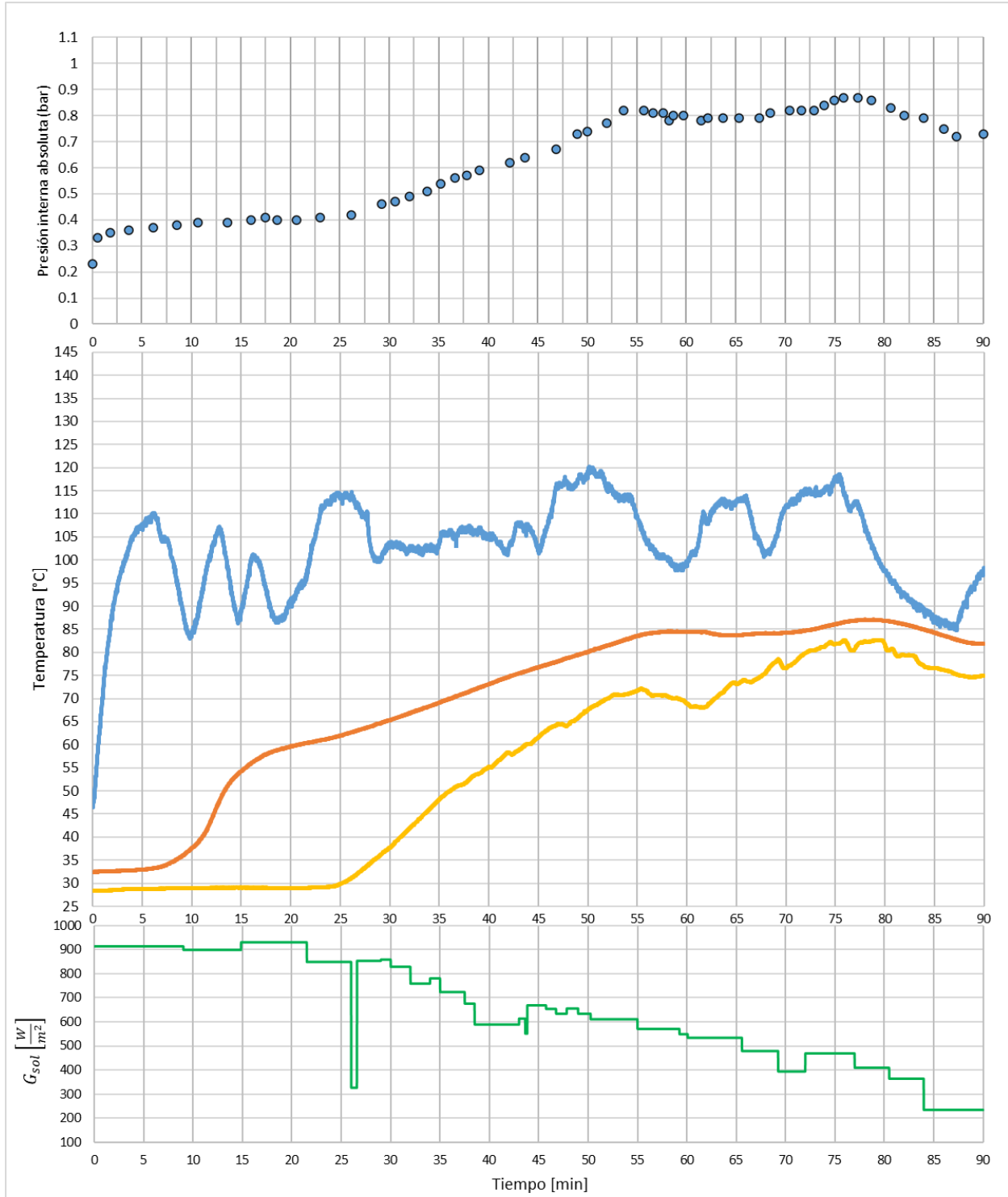


Apéndice 15. Resultado de operación, presión de vacío con seguimiento solar del concentrador del 13 de febrero desde las 2:23 pm hasta las 3:54 pm. 0.76 L

Registro de eventos. En total 0.76 L.

Hora local	Tiempo absoluto (min)	Descripción de operación	Prod (L)	Tiempo de operación (min)	Promedio $G_{sol\ total} \left(\frac{W}{m^2}\right)$
2:24:00 pm	0	Inicio toma de datos para 1 L de agua, presión inicial interna absoluta 0.2 bar	-	60	770
3:24:00 pm	60	Apertura V2			
3:25:30 pm	61.5	Cierre V2		28.5	404
3:50:00 pm	86	Apertura V3. Obtención de condensado de los primeros 60 minutos	0.71		
3:52:15 pm	88.25	Apertura V2			
3:54:00 pm	90	Cierre V2 y apertura V3. Obtención de condensado de los últimos 28 minutos. Fin de operaciones.	0.05		

Gráfico completo, la última toma de datos fue de 28 minutos obteniendo 0.05 L.



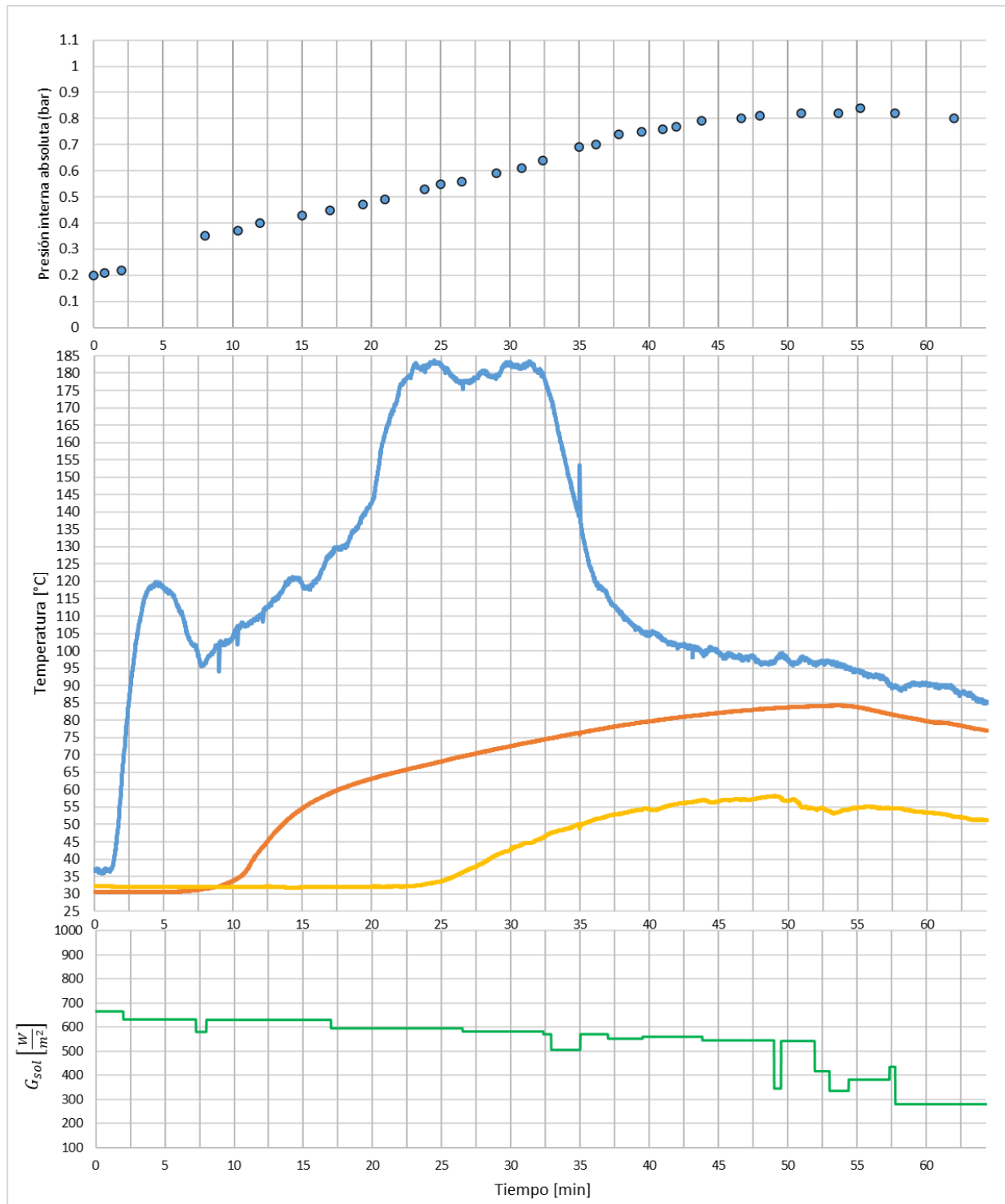
Apéndice 16. Resultado de operación, presión de vacío con seguimiento solar del concentrador del 16 de febrero desde las 3:35 pm hasta las 4:37 pm. 0.15 L

A las 4:10 p m la parábola ya no se puede girar más debido al diseño de la estructura. Se hizo una única toma de datos durante 1 hora de operación, el objetivo era evaluar el comportamiento del proceso en las últimas horas productivas del sol.

Registro de eventos.

Hora local	Tiempo absoluto (min)	Descripción de operación	Prod (L)	Tiempo de operación (min)	Promedio $G_{sol\ total} \left(\frac{W}{m^2}\right)$
3:35:00 pm	0	Inicio toma de datos para 1 L de agua, presión inicial interna absoluta 0.2 bar	-	64.33	555
4:35:00 pm	60	Apertura V2			
4:37:00 pm	62	Cierre V2 y apertura V3			
4:39:20 pm	64.33	Obtención de condensado de los primeros 60 minutos. Fin de operaciones.	0.15		280

Gráfico 16 febrero



Apéndice 17. Resultado de operación, presión de vacío con seguimiento solar del concentrador del 17 de febrero desde las 11:13 am hasta las 3:51 pm

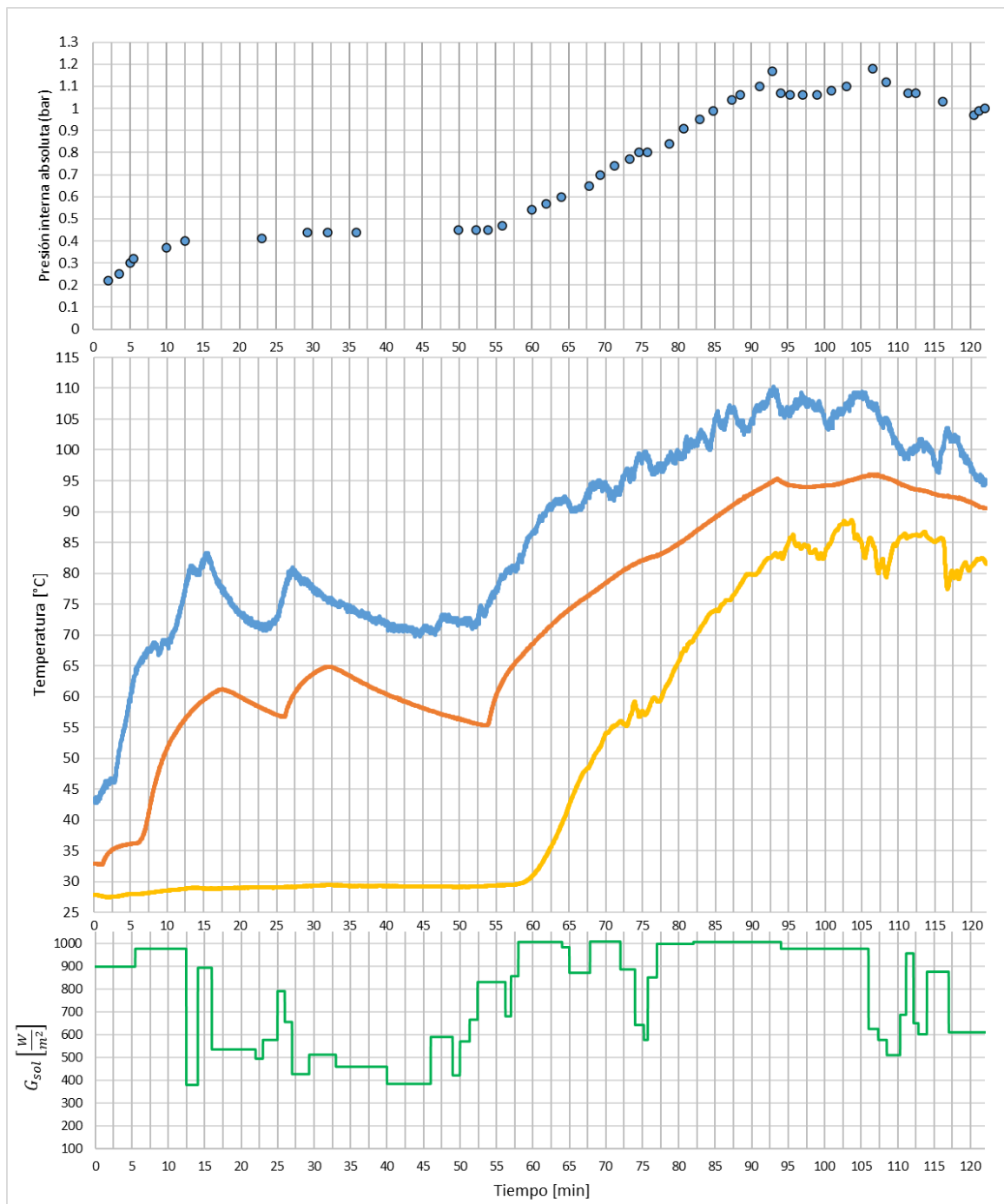
Se hacen dos tomas de datos separadas, con tiempo de enfriamiento entre ellas para realizar vacío.

Toma de datos #1. Desde las 11:13 am hasta la 1:15 pm. 0.5 L Al final se reabastece y se deja enfriar el sistema.

Registro de eventos.

Hora local	Tiempo absoluto (min)	Descripción de operación	Prod (L)	Tiempo de operación (min)	Promedio $G_{sol\ total} \left(\frac{W}{m^2}\right)$
11:14:00 am	0	Inicio toma de datos Presión inicial interna absoluta 0.21 bar	-	122	771
12:47:30 pm	93.5	Apertura V2			
12:48:00 pm	94	Cierre V2			
1:14:30 pm	120.5	Apertura V2			
1:15:35 pm	121.58	Cierre V2			
1:16:00 pm	122	Apertura V3. Obtención de condensado. Se reabastece 0.5 L al agua de trabajo. Se deja enfriar el sistema completo.	0.5		

Gráfico de operación 1 del 17 de febrero.

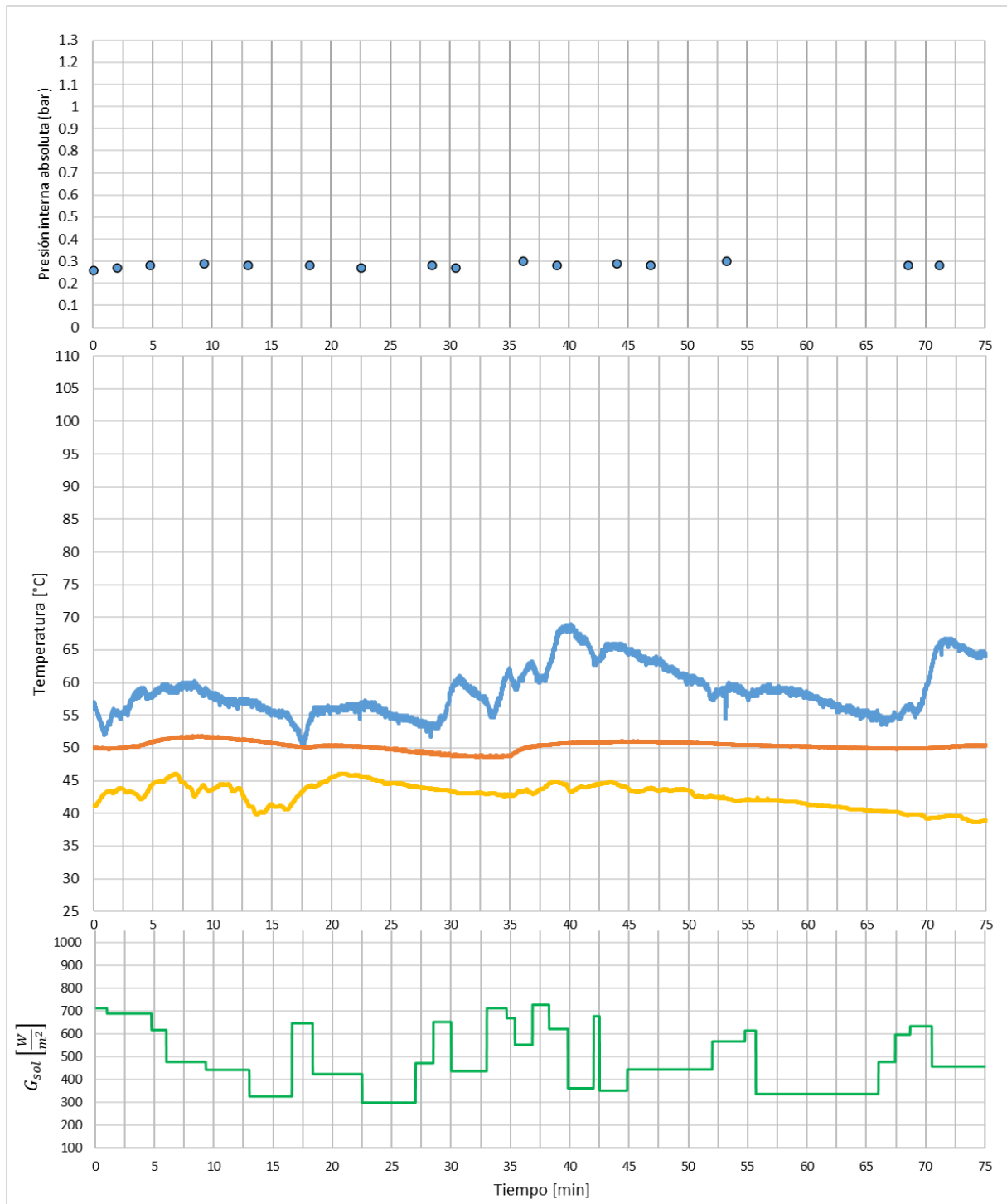


Toma de datos #2. Desde las 2:35 pm hasta las 3:51 pm. 0.7 L.

Registro de eventos.

Hora local	Tiempo absoluto (min)	Descripción de operación	Prod (L)	Tiempo de operación (min)	Promedio $G_{sol\ total} \left(\frac{W}{m^2}\right)$
2:36:00 pm	0	Inicio toma de datos. Nuevo vacío. Presión inicial interna absoluta 0.26 bar	-	75.02	472, en su mayoría radiación directa
3:50:00 pm	74.02	Apertura V2			
3:50:59 pm	75	Cierre V2			
3:51:00 pm	75.02	Apertura V3. Obtención de condensado. Fin de operaciones.	0.7		

Gráfica de operación 2 del 17 de febrero.



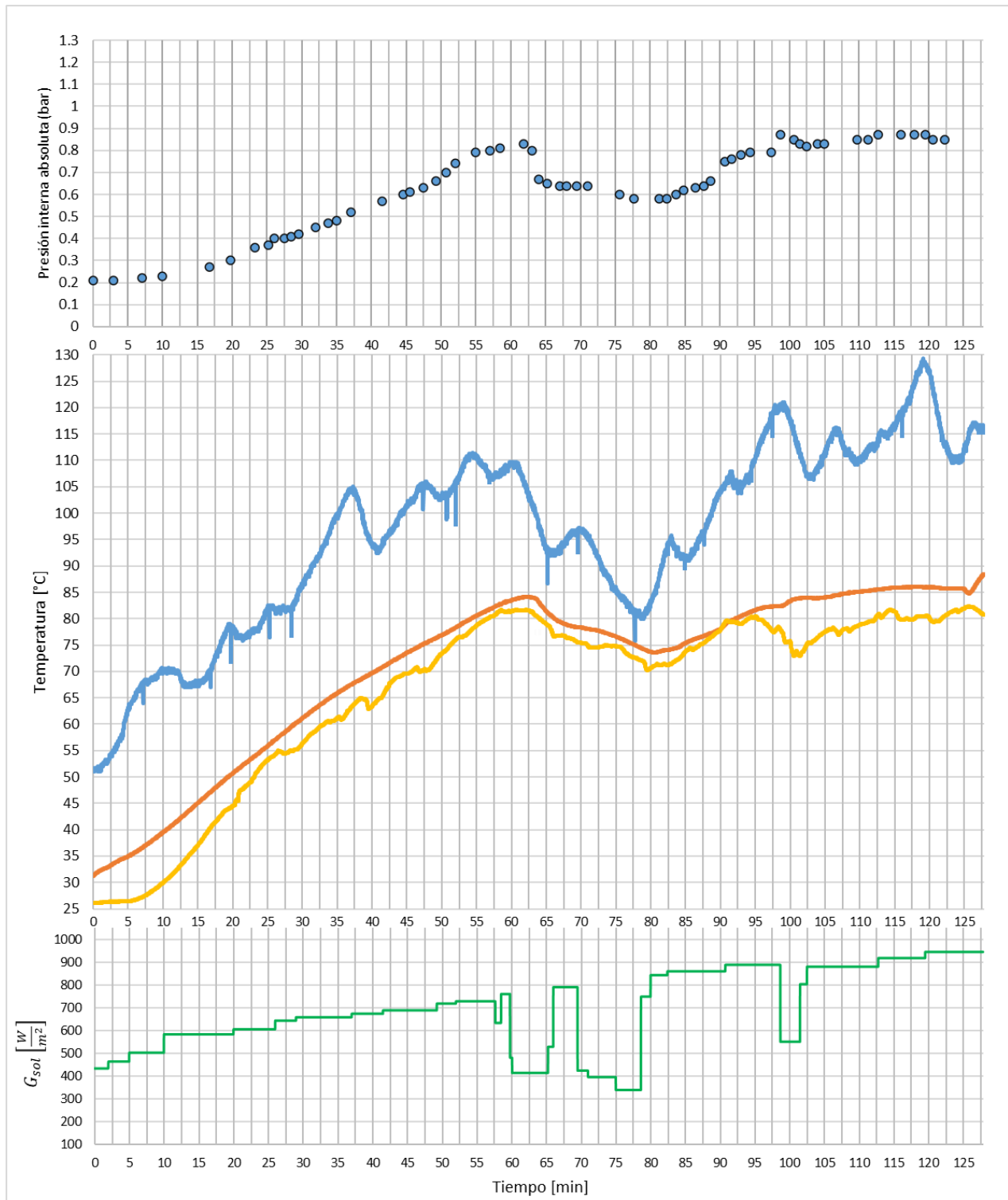
Apéndice 18. Resultado de operación, presión de vacío con seguimiento solar del concentrador del 19 de febrero desde las 8:59 am hasta las 11:39 am. 0.88 L

Suma total de condensado 0.88 L en aproximadamente un poco más de 2 horas de operación (127.8 minutos). Se realizó un solo proceso de vacío al inicio.

Registro de eventos

Hora local	Tiempo absoluto (min)	Descripción de operación	Prod (L)	Tiempo de operación (min)	Promedio $G_{sol\ total} \left(\frac{W}{m^2}\right)$
9:00:00 am	0	Inicio toma de datos Presión inicial interna absoluta 0.21 bar	-	95	636
10:03:30 am	63.5	Apertura V2			
10:04:50 am	64.83	Cierre V2			
10:35:00 am	95	Apertura V2, cierre V2 y apertura V3. Obtención de condensado. No se reabastece agua de trabajo.	0.68	32.8	876
10:35:01 am	95.02	Continúa la toma de datos, sin hacer vacío otra vez. Presión interna absoluta 0.79 bar			
10:38:30 am	98.5	Apertura V2			
10:40:30 am	100.5	Cierre V2			
11:00:00 am	120	Apertura V2			
11:04:00 am	124	Cierre V2			
11:07:49 am	127.82	Apertura V2, cierre V2 y apertura V3. Obtención de condensado. Fin de operaciones.	0.2		

Gráfica de datos completo del día 19 de febrero.



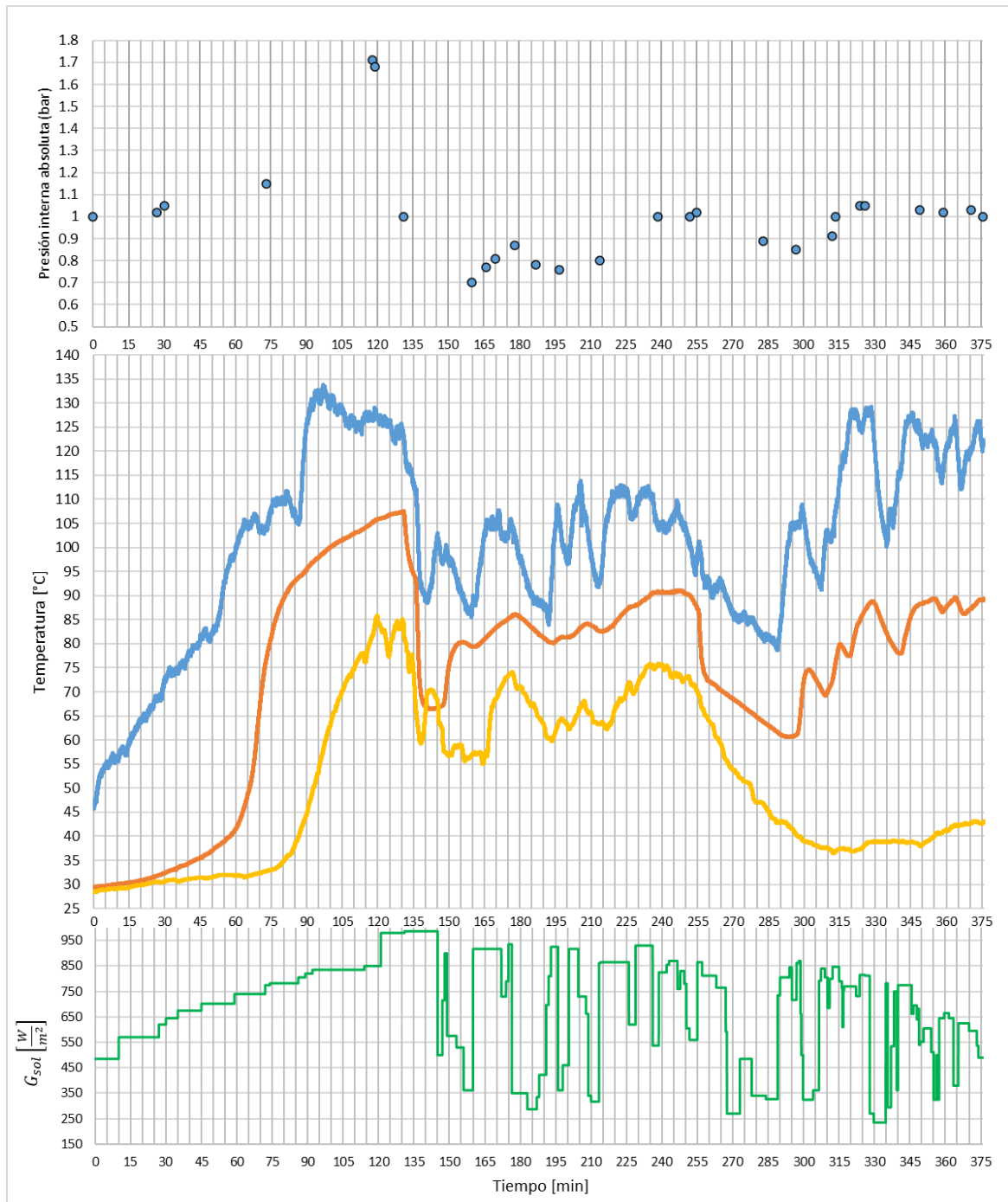
Resultados de operación con agua potable a presión atmosférica y concentrador fijo

Apéndice 19. Resultado de operación, presión atmosférica con concentrador fijo. 4 de febrero desde las 9:19 am hasta las 3:35 pm.

Se realizaron 3 tomas de condensado, las operaciones se realizaron de forma continua sin pausas. En total se obtuvo 1 L condensado.

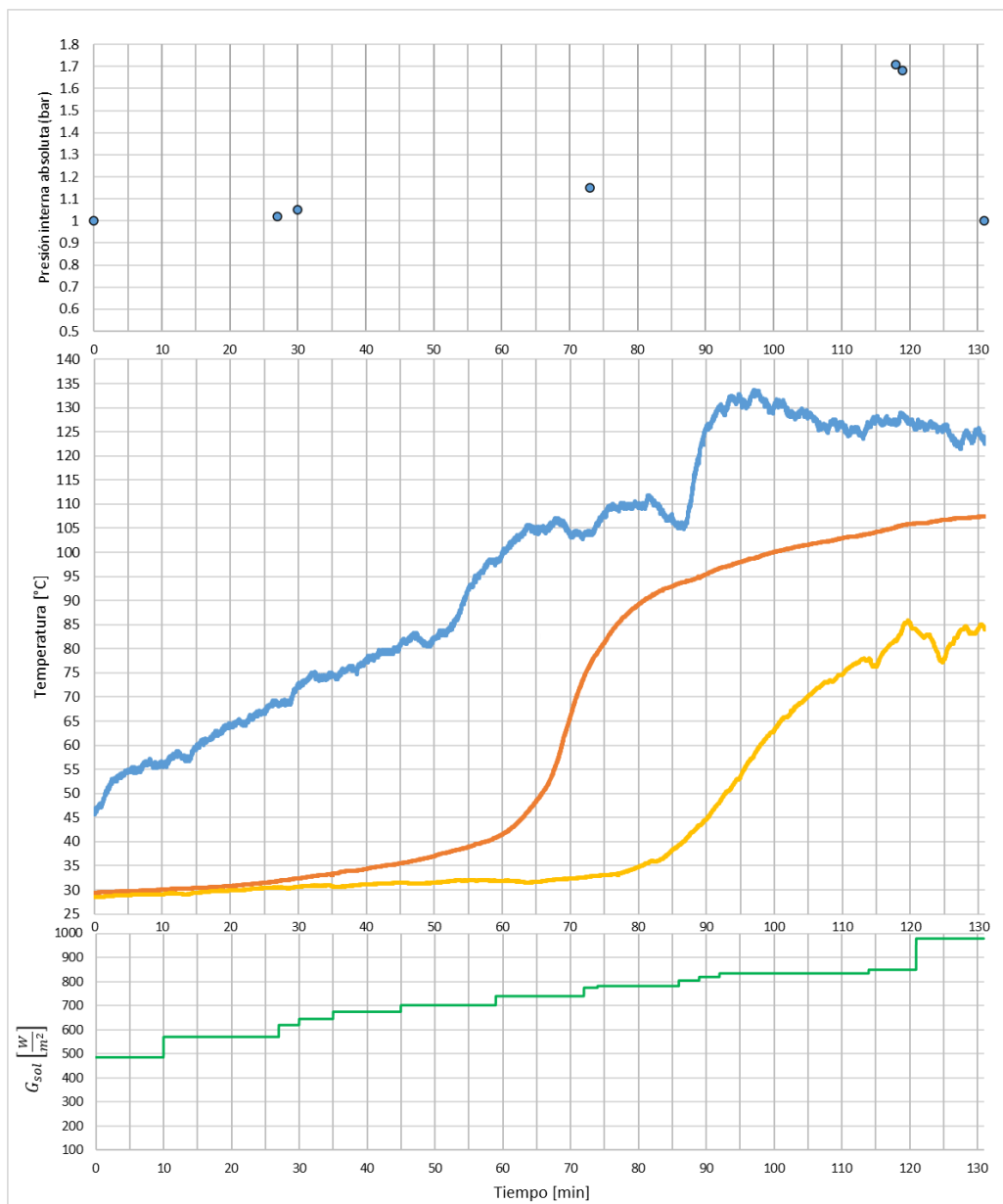
Las caídas de T2 corresponden a reabastecimiento con agua de trabajo, ya que el aislante de la válvula se quita para introducir agua, el termopar está cerca a esa válvula midiendo la temperatura aproximada del vapor que fluye por esa sección. Por eso cuando este paso del proceso se realiza, T2 puede verse menor a T3.

Gráfico total de operación del 4 de febrero.



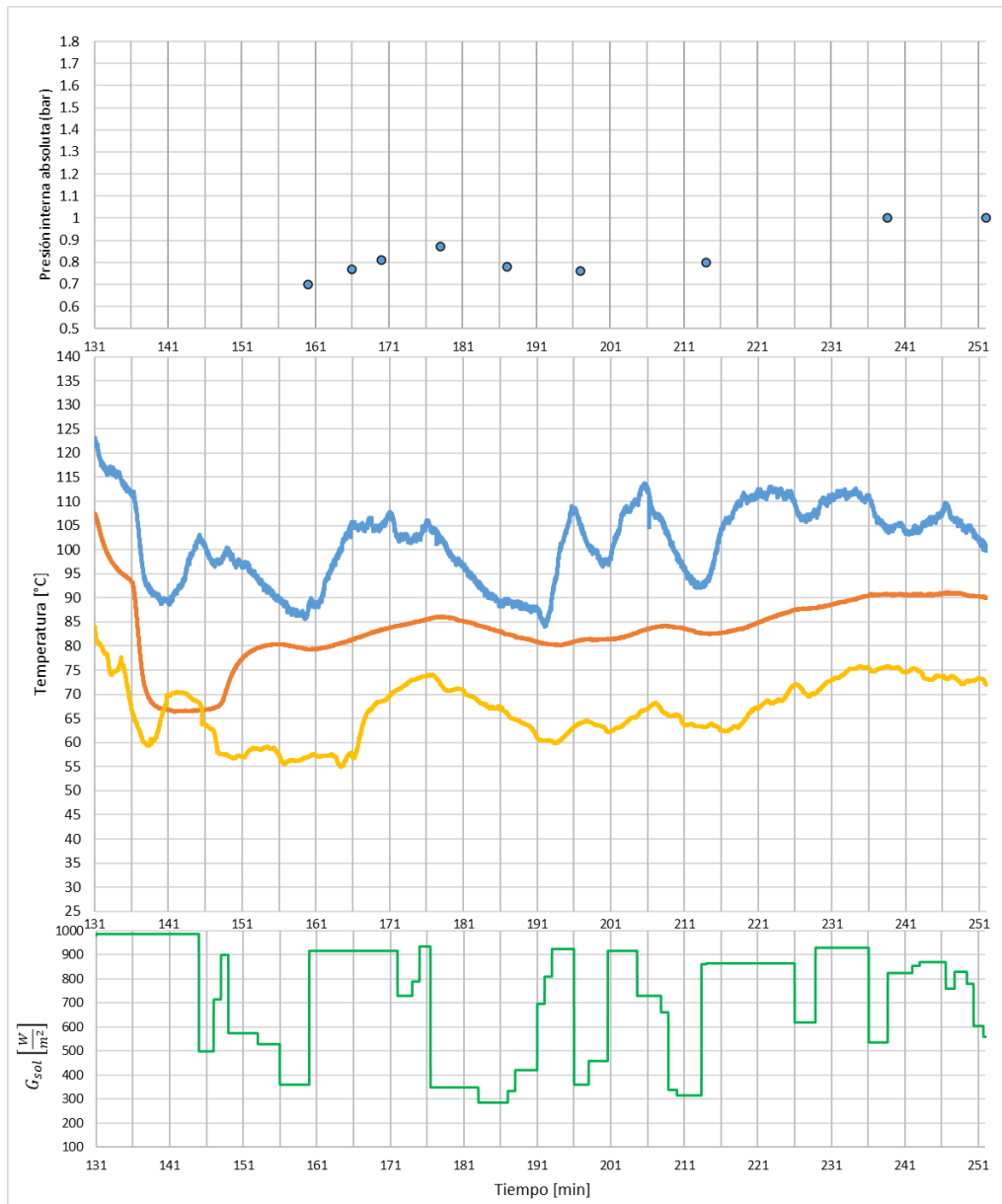
Toma de datos #1: 4 de febrero desde las 9:19 am hasta las 11:30 am

Hora local	Tiempo absoluto (min)	Descripción de operación	Prod (L)	Tiempo de operación (min)	Promedio $G_{sol\ total} \left(\frac{W}{m^2}\right)$
9:19:00 am	0	Inicio toma de datos Presión inicial interna absoluta 1 bar	-	131	731
11:18:00 am	119	Apertura V2			
11:30:00 am	131	Cierre V2 90% y apertura V3. Obtención de condensado. Se reabastece 0.5 L de agua de trabajo.	0.41		



Toma de datos #2: 4 de febrero desde las 11:30 am hasta las 1:31 pm

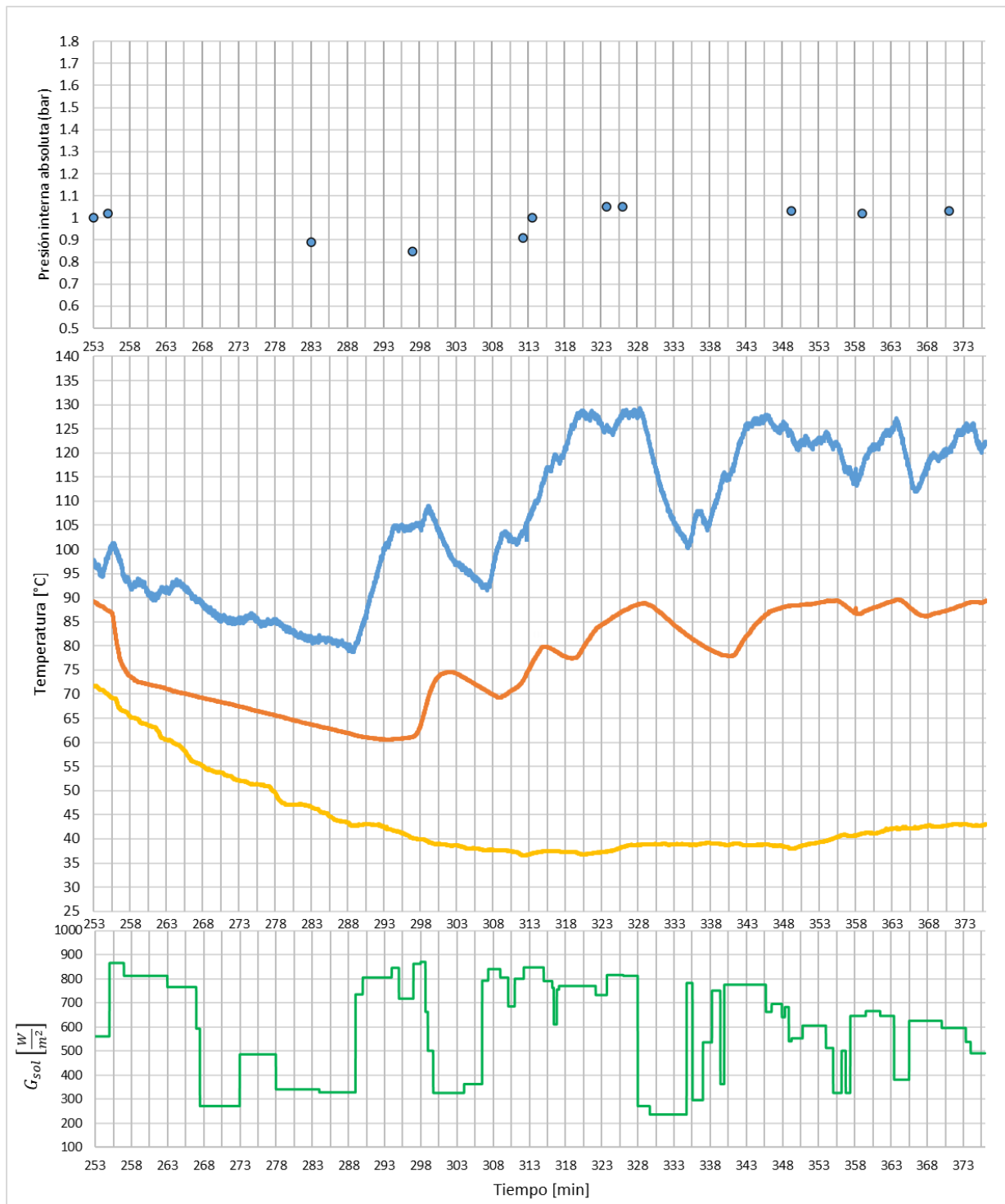
Hora local	Tiempo absoluto (min)	Descripción de operación	Prod (L)	Tiempo de operación (min)	Promedio $G_{sol\ total} \left(\frac{W}{m^2}\right)$
11:30:00 am	131	Inicio toma de datos Presión inicial interna absoluta 1 bar	-	121	722
1:31:00 pm	252	Apertura V2 10% y apertura V3. Obtención de condensado. Se reabastece 0.5 L de agua de trabajo.	0.44		



Toma de datos #3: 4 de febrero desde las 1:32 pm hasta las 3:35 pm

Hora local	Tiempo absoluto (min)	Descripción de operación	Prod (L)	Tiempo de operación (min)	Promedio $G_{sol\ total} \left(\frac{W}{m^2}\right)$
1:32:00 pm	253	Inicio toma de datos Presión inicial interna absoluta 1 bar	-	60.5	576
2:32:30 pm	313.5	Apertura V2 y apertura V3. Obtención de condensado. No se reabastece agua de trabajo.	0		
3:35:00 pm	376	Apertura V2 y apertura V3. Obtención de condensado. Fin de operaciones.	0.06	62.48	602

Gráfica de toma de datos #3.



Resultados de operación con agua potable a presión atmosférica y seguimiento del concentrador

Apéndice 20. Resultado de operación, presión atmosférica con seguimiento del concentrador. 9 de febrero desde las 9:57 am hasta la 1:56 pm. Condensado total 0.16 L.

A presión atmosférica necesita mucha más irradiancia en comparación con la operación a presión de vacío. Por lo tanto, se opera en horarios con mayor potencial solar, entre las 10 am y 2 pm. Dado que es evidente la gran desventaja de operar a presión atmosférica, se hacen menos tomas de datos en esas condiciones en comparación con la presión de vacío.

Hora local	Tiempo absoluto (min)	Descripción de operación	Prod (L)	Tiempo de operación (min)	Promedio $G_{sol\ total} \left(\frac{w}{m^2}\right)$
9:57:00 am	0	Inicio toma de datos Presión inicial interna absoluta 1 bar	-	238.5	536
1:52:00 pm	234.5	Apertura V2			
1:56:00 pm	238.5	Cierre V2, apertura V3. Obtención de condensado No se reabastece agua de trabajo.	0.11		
1:56:01 pm	238.52	Continúa la toma de datos #2		49	876
2:45:00 pm	287.5	Apertura V2, cierre V2 y apertura V3. Obtención de condensado. Fin de operaciones.	0.05		

Gráfico total de operación 9 de febrero.

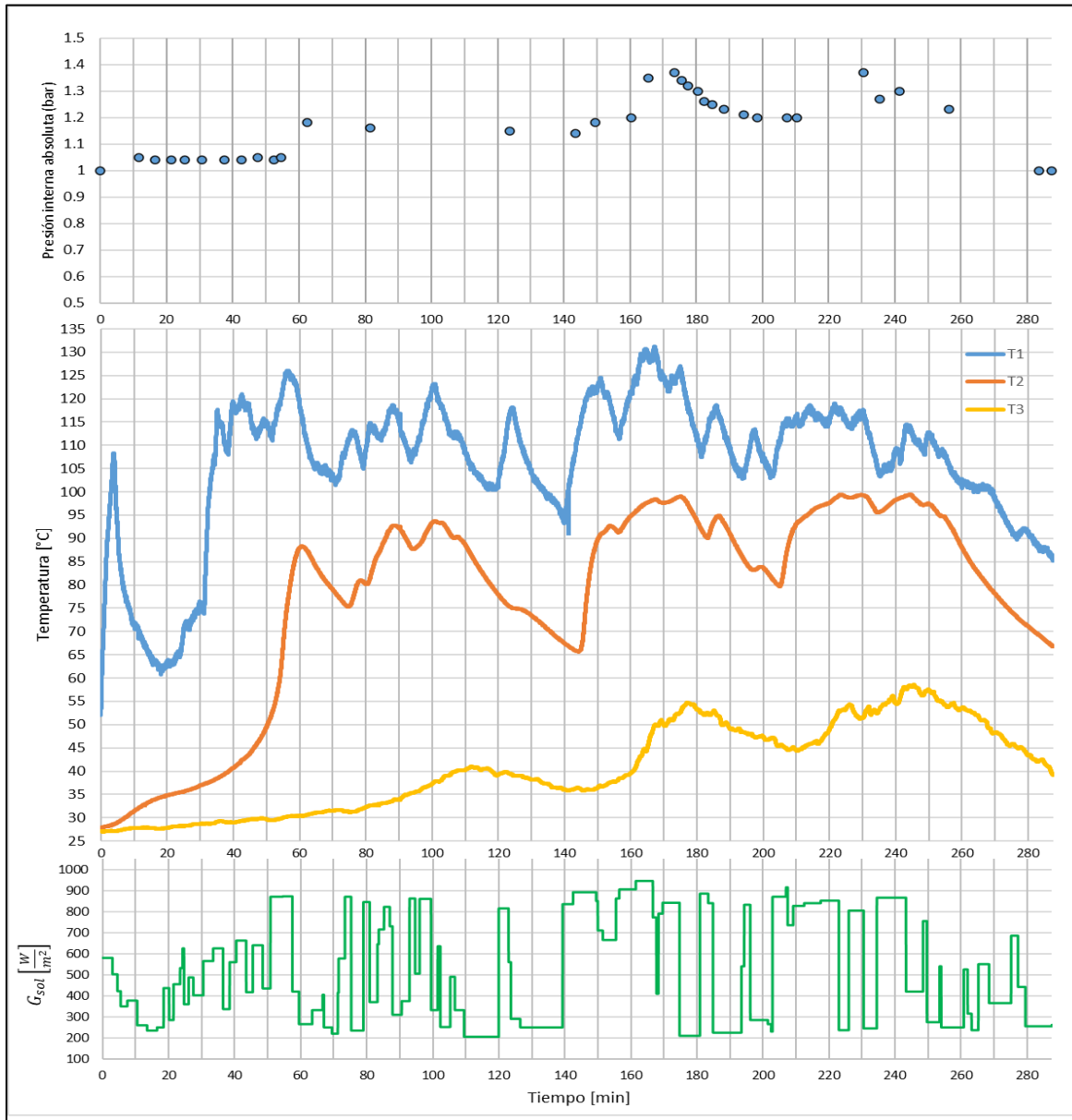


Gráfico Toma de datos #1

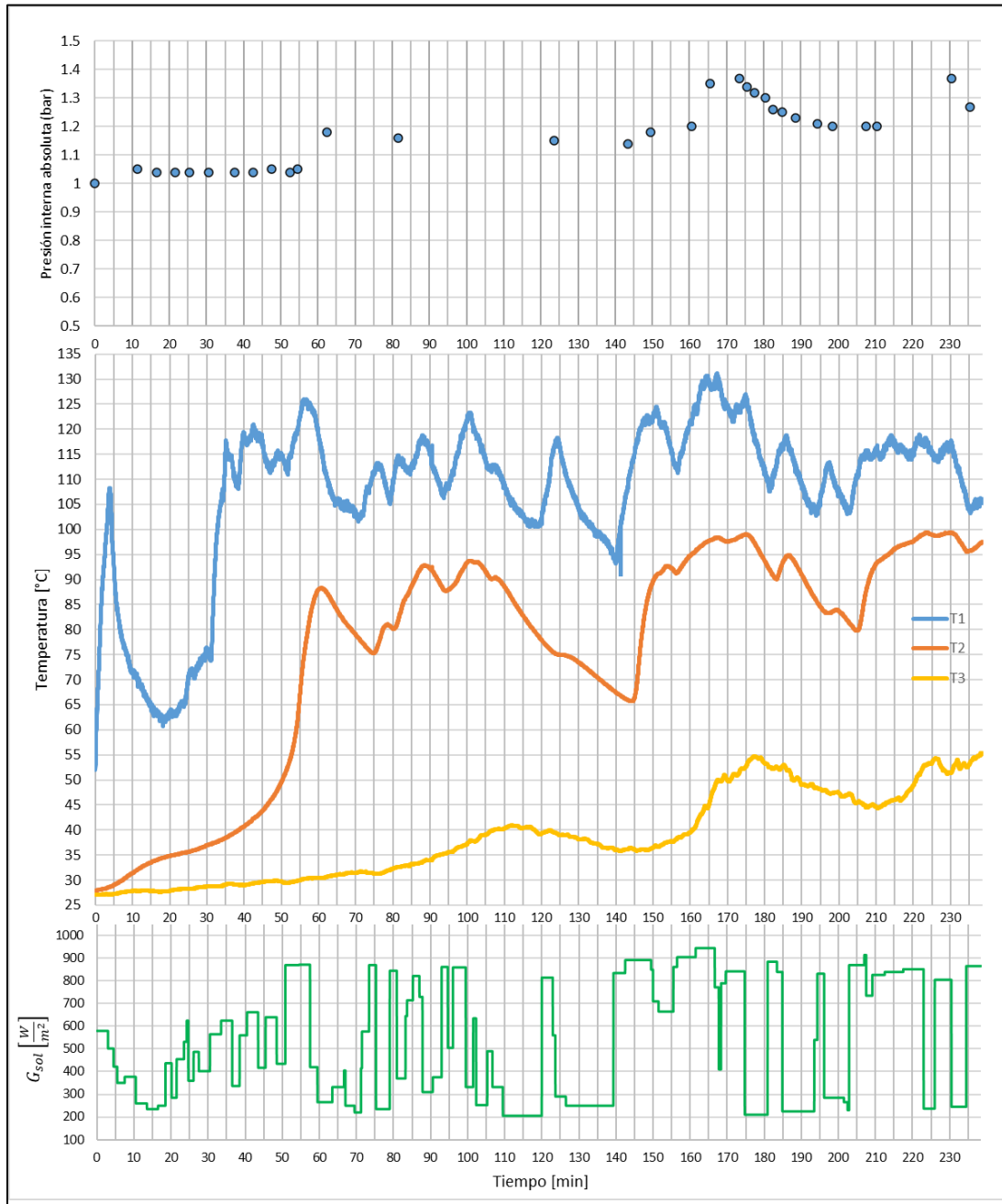
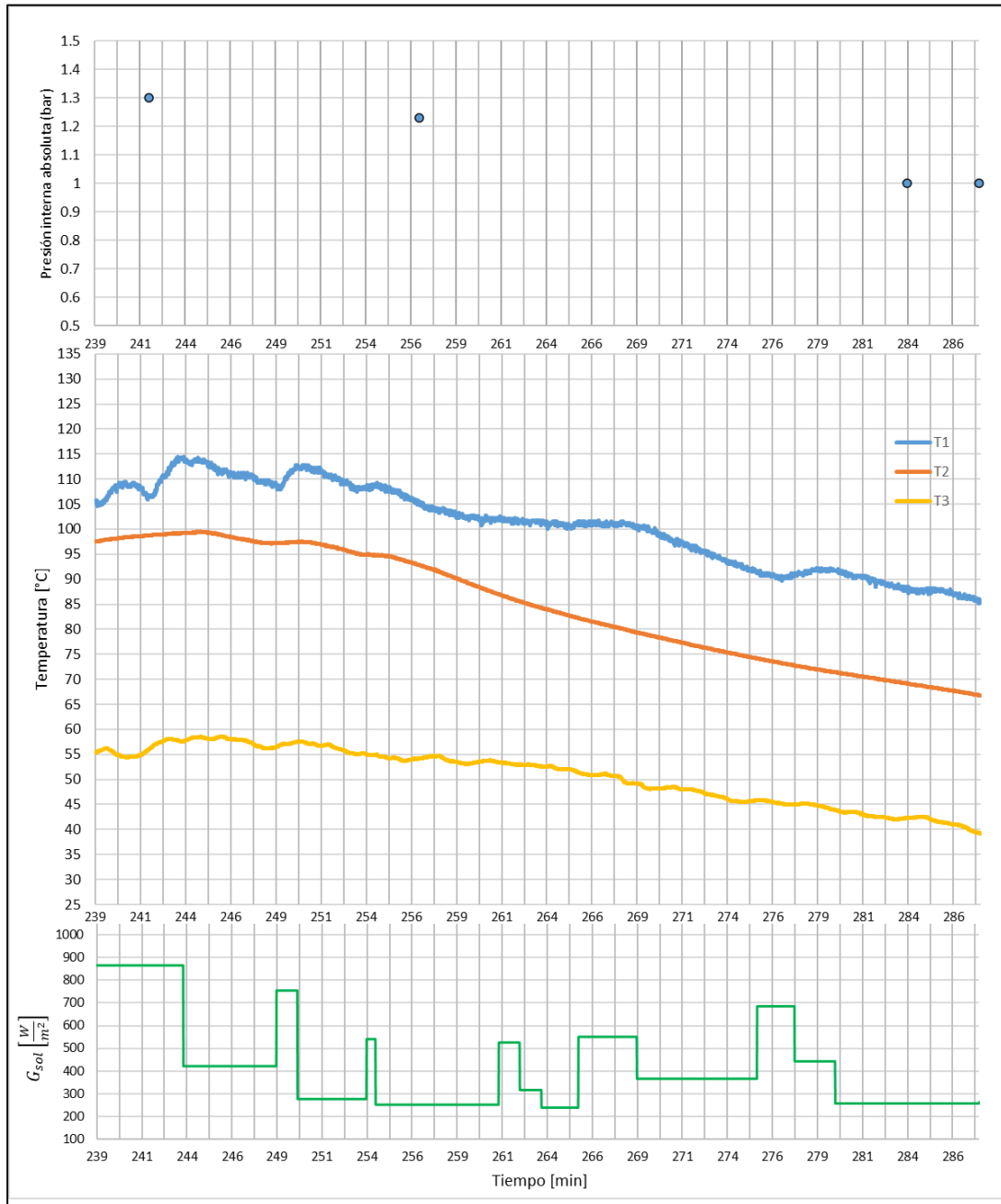


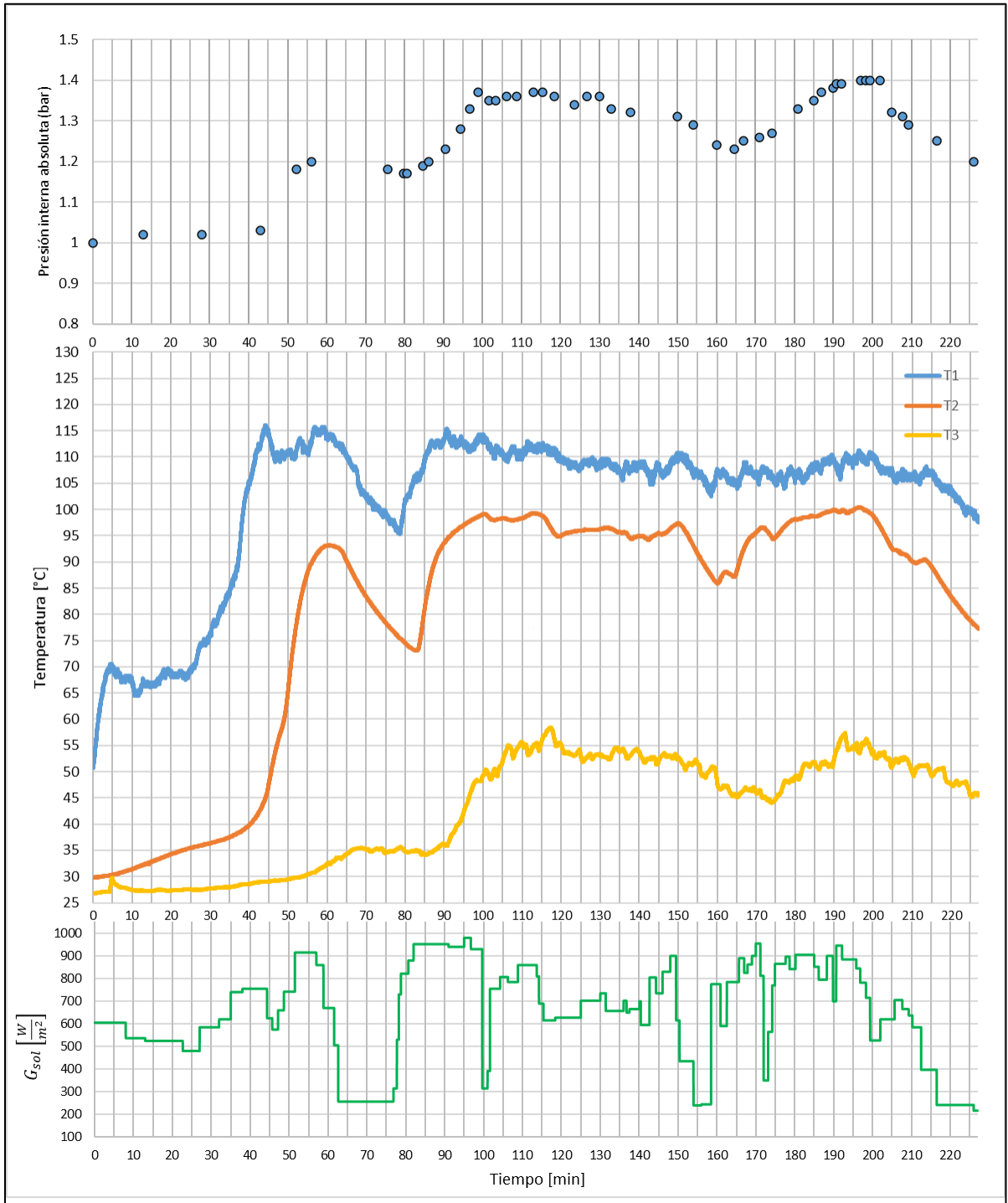
Gráfico Toma de datos #2



Apéndice 21. Resultado de operación, presión atmosférica con seguimiento del concentrador. 10 de febrero desde las 9:50 am hasta la 1:37 pm. Condensado total 0.2 L.

Hora local	Tiempo absoluto (min)	Descripción de operación	Prod (L)	Tiempo de operación (min)	Promedio $G_{sol\ total} \left(\frac{W}{m^2}\right)$
9:50:00 am	0	Inicio toma de datos Presión inicial interna absoluta 1 bar	-	208.5	679
1:14:00 pm	204.17	Apertura V2			
1:15:40 pm	205.67	Cierre V2			
1:18:30 pm	208.5	Apertura V2, cierre V2, Apertura V3. Obtención de condensado No se reabastece agua de trabajo	0.18	18	354
1:18:30 pm	208.52	Continúa la toma de datos #2			
1:37:00 pm	227	Apertura V2, cierre V2 y apertura V3. Obtención de condensado. Fin de operaciones debido a inicio de lluvia en la tarde.	0.05		

Gráfico de operación completa 10 de febrero. Se muestra el gráfico completo puesto que los últimos 18 minutos la recolección fue casi nula en 0.05 L y el cielo se estaba nublando para iniciar con la lluvia a la 1:37:00 pm cuando tuvo que finalizarse la toma de datos.



Resultados de operación con agua residual a presión de vacío y seguimiento del concentrador

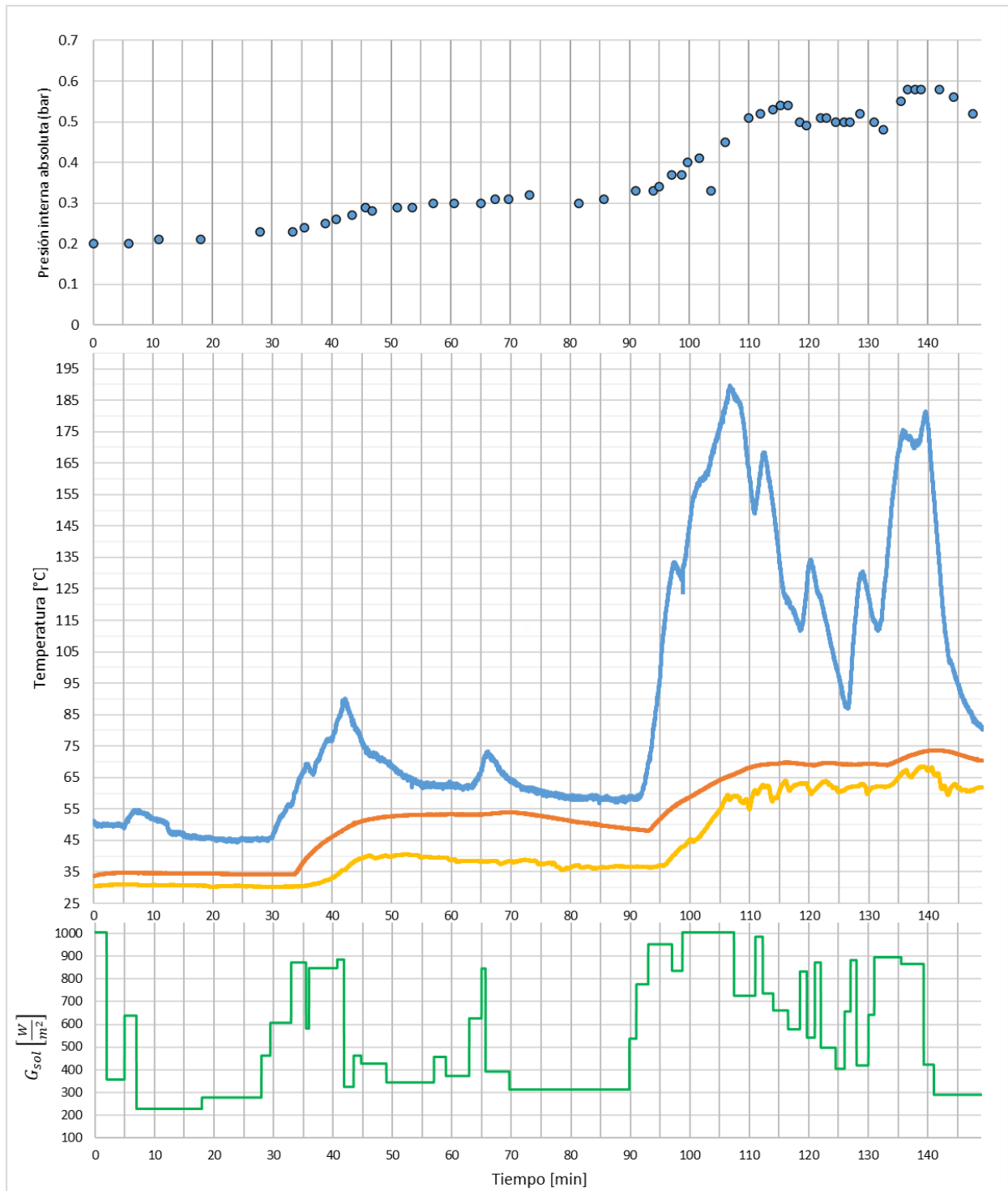
Apéndice 22. Resultado a presión de vacío con seguimiento del concentrador. Día 23 de febrero desde las 11:48 am hasta las 2:17 pm.

Con dos aperturas reducidas de válvula 2 a la 1:33 pm, 2:12 pm y una al final de la operación. 0.9 L condensado total final.

Registro de eventos.

Hora local	Tiempo absoluto (min)	Descripción de operación	Prod (L)	Tiempo de operación (min)	Promedio $G_{sol\ total} \left(\frac{W}{m^2}\right)$
11:48:00 am	0	Inicio toma de datos. 1.2 L de agua para tratamiento en subsistema de calentamiento Presión inicial interna absoluta 0.2 bar	-	149.02	533
1:33:00 pm	105	Apertura V2	-		
1:33:10 pm	105.17	Cierre V2	-		
2:11:30 pm	143.5	Apertura V2	-		
2:12:00 pm	144	Cierre V2	-		
2:16:00 pm	148	Apertura V2	-		
2:17:01 pm	149.02	Cierre V2 y apertura V3. Obtención de condensado. Fin de operaciones.	0.9		

Gráfico de operación 23 de febrero con agua residual a presión de vacío.

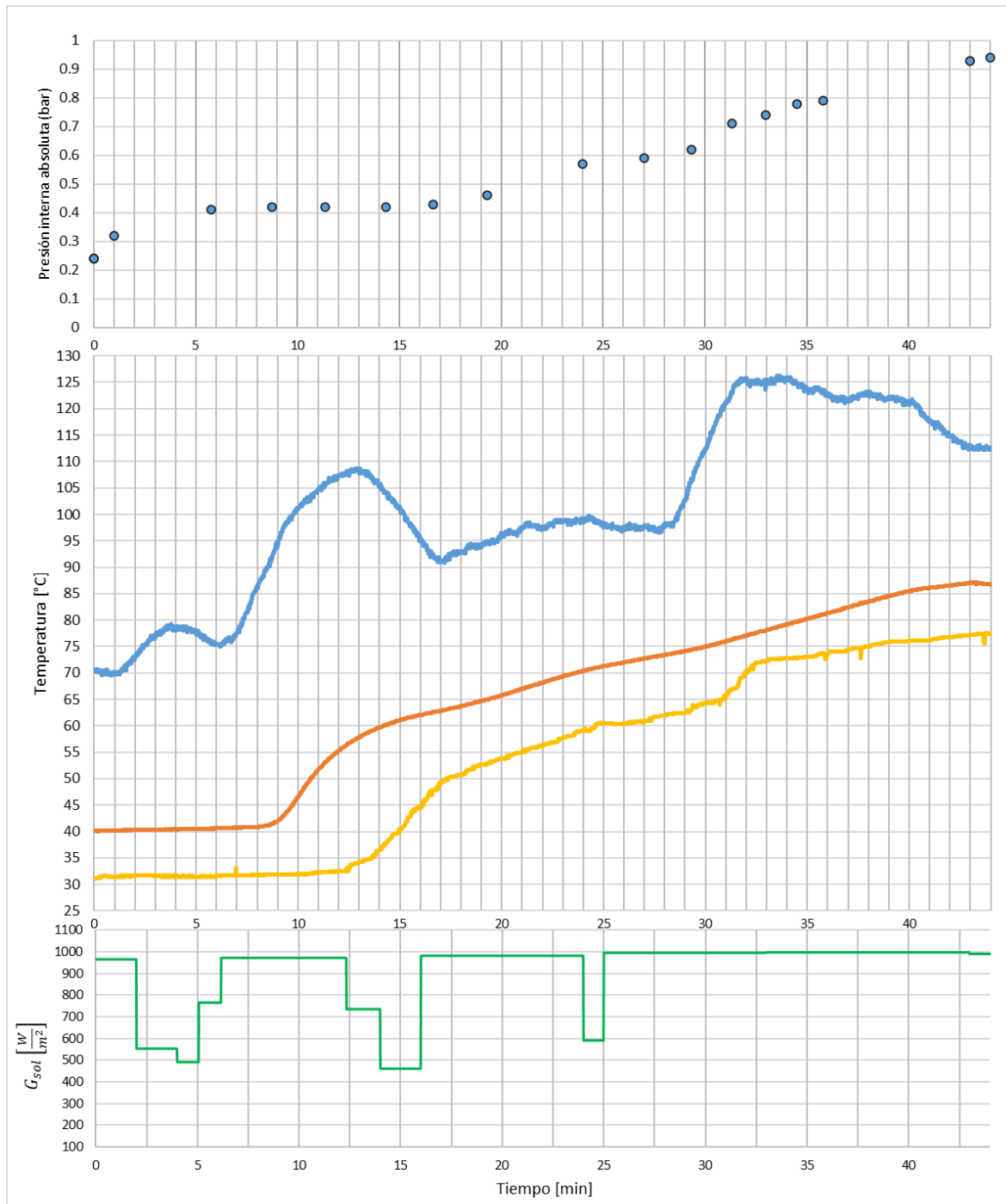


Apéndice 23. Resultado a presión de vacío con seguimiento del concentrador. Día 24 de febrero desde las 11:22 am hasta las 12:05 pm. 0.28 L.

Una sola apertura de la válvula 2, más reducida.

Hora local	Tiempo absoluto (min)	Descripción de operación	Prod (L)	Tiempo de operación (min)	Promedio $G_{sol\ total} \left(\frac{w}{m^2}\right)$
11:22:00 am	0	Inicio toma de datos. 1.2 L de agua para tratamiento en subsistema de calentamiento Presión inicial interna absoluta 0.24 bar	-	44	907
12:05:00 pm	43	Apertura 10% V2	-		
12:06:00 pm	44	Cierre V2 y apertura V3. Obtención de condensado. Fin de operaciones.	0.28		

Gráfico de operación 24 de febrero con agua residual a presión de vacío

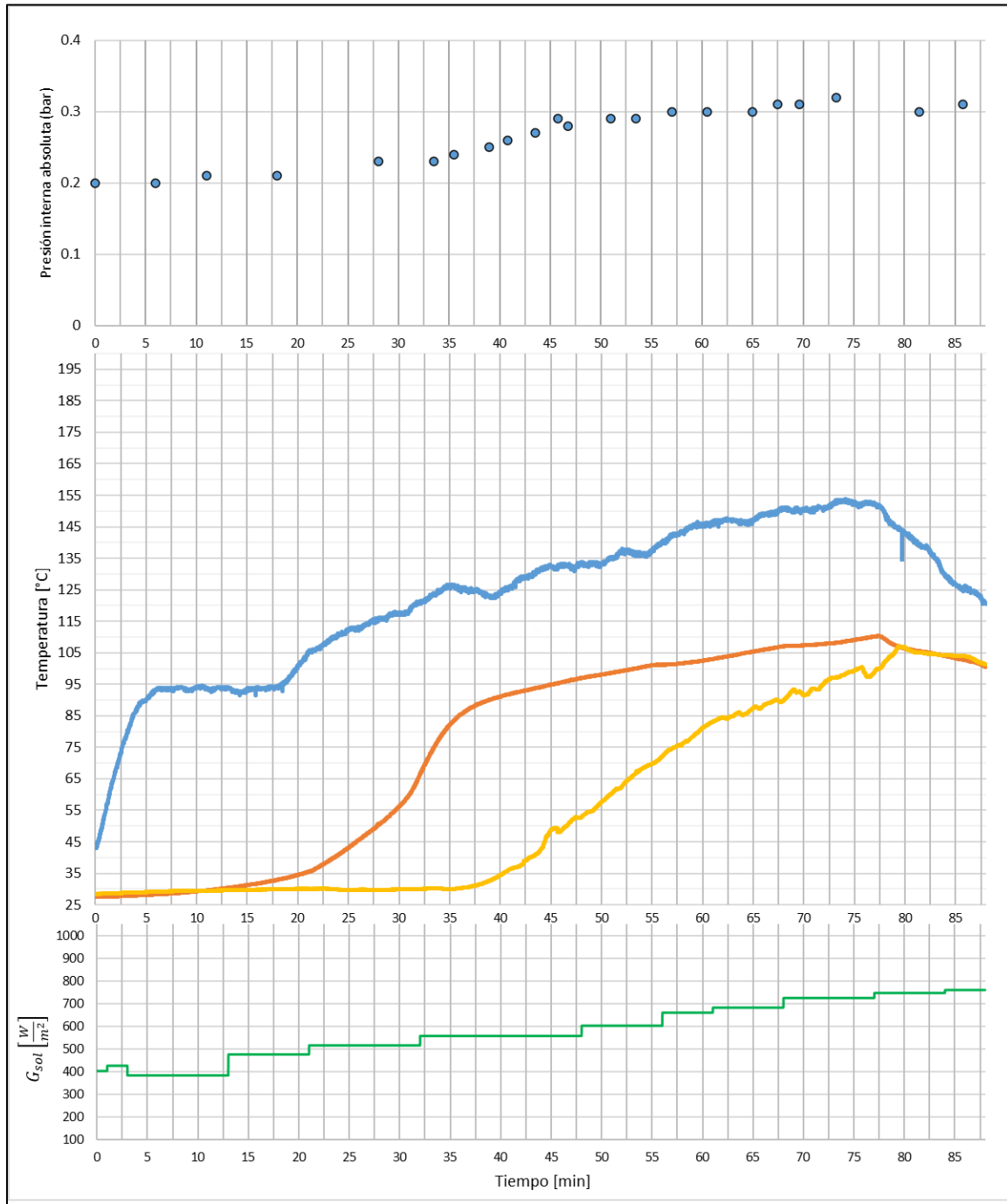


Resultados de operación con agua residual a presión atmosférica y seguimiento del concentrador

Apéndice 24. Resultado a presión de vacío con seguimiento del concentrador. Día 24 de febrero desde las 8:21 am hasta las 9:51 am.

Hora local	Tiempo absoluto (min)	Descripción de operación	Prod (L)	Tiempo de operación (min)	Promedio $G_{sol\ total} \left(\frac{w}{m^2}\right)$
8:22:00 am	0	Inicio toma de datos. 1.2 L de agua para tratamiento en subsistema de calentamiento. Presión inicial interna absoluta 1 bar. Cielo despejado durante la mañana, radiación directa.	-		
9:17:00 am	55	Apertura 10% V2	-		
9:17:22 am	55.37	Cierre V2			
9:30:00 am	68	Apertura 10% V2			
9:30:19 am	68.32	Cierre V2			
9:39:00 am	77	Apertura 5% V2			
9:39:10 am	77.17	Cierre V2			
9:43:15 am	81.25	Presión interna en aumento, se alcanzan 1.83 bar presión absoluta. Se desalinea el concentrador. Se quitan aislantes en el tanque de condensación para intentar bajar la presión aumentando el área de condensación para el vapor.		88	581
9:46:00 am	84	Apertura 5% V2			
9:48:00 am	86	Cierre V2. Presión interna 1.57 bar			
9:48:01 am	86.02	Apertura 5% V3			
9:48:15 am	86.25	Cierre V3. Obtención de condensado. Presión interna 1.56 bar			
9:50:00 am	88	Apertura 5% V2, Cierre V2 y apertura V3 5%. Hasta la obtención total de condensado sumando el de la última recolección. Fin de operaciones.	0.3		

Gráfico de operación del 24 de febrero con agua residual a presión atmosférica



Catálogos y fichas técnicas

Apéndice 25 Características técnicas del vidrio borosilicato 3.3.



Continental Trade Sp. z o.o.
Krasnobrodzka 5; 03-214 Warszawa
POLAND
tel. : +48 22 6701181, +48 22
6190733
fax : +48 22 6185938

www.continentaltrade.com.pl

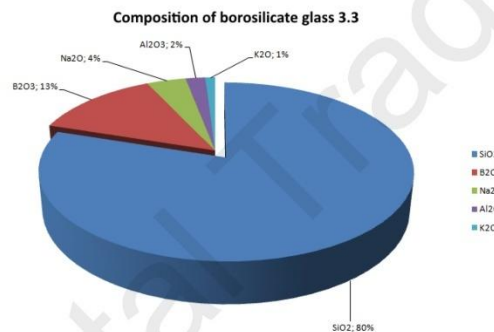
INFORMATION SHEET

office@continentaltrade.com.pl

Borosilicate Glass 3.3 – DIN 7080

Main ingredients of this glass are sodium oxide Na_2O , boron oxide B_2O_3 , silicon dioxide SiO_2 . In those ingredients, boron and silicon have high content: boron 12,5 – 13,5 %, silicon 78 – 80 %.

SiO_2	80 %
B_2O_3	13 %
Na_2O	4 %
Al_2O_3	2 %
K_2O	1 %



The feature of borosilicate glass 3.3 is that it has **low thermal expansion coefficient**, **good thermal stability**, **chemical durability** and electric property. Therefore, it's chemical resistant, heat resistant and mechanical property is excellent. So borosilicate glass is also called **heat resistance glass**.

Borosilicate glass 3.3 can be milled, drilled, ground and toughened. Its low coefficient of thermal expansion, **high thermal shock resistance** and ability to work at temperatures **up to 450 °C** for a long period of time, make this type of glass particularly suitable for use in stable temperature conditions. Is suitable **for operation at low temperatures**.

This glass can withstand the temperature to about -196 °C (is suitable for use in contact with liquid nitrogen). During thawing ensure that the temperature difference does not exceed 100 K. In general is recommended for use down to -70 °C .

This glass is extremely resistant to water, alkalis, acids and organic substances.

Properties

Mechanical Performance

Density	$2.23 \pm 0.02\text{ g/cm}^3$
Bending strength	160 N/mm^2
Surface compressive stress	100 N/mm^2
Young's modulus	64 GPa
Poisson's ratio	0,2
Hardness	5.5 Mohs, (470 Knopp, 580 Vickers)

Thermodynamic Performance

Thermal expansion coefficient (0 – 300 °C)	$3.3 \pm 0.1 \times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ (@ 0 – 300 °C)
Softening point	$815 \pm 10\text{ °C}$
Strain point	$560 \pm 10\text{ °C}$
Caloricity (20 – 100 °C)	$0.83\text{ KJ} \times (\text{kg} \times \text{K})^{-1}$ (@ 20 – 100 °C)
Thermal coefficient	$1.2\text{ W} \times \text{m} \times \text{K}^{-1}$
Thermal shock resistance	180K

While every attempt has been made to verify the source of the information, no responsibility is accepted for accuracy of data.



Continental Trade Sp. z o.o.
 Krasnobrodzka 5, 03-214 Warszawa
 POLAND
 tel. : +48 22 6701181, +48 22 6190733
 fax : +48 22 6185938

www.continentaltrade.com.pl

INFORMATION SHEET

office@continentaltrade.com.pl

Maximum working temperature

Non-tempered glass	
Short time (< 10h)	-196 up to 500 °C
Long time (> 10h)	-196 up to 450 °C
Tempered glass	
Short time (< 10h)	-70 up to 500 °C
Long time (> 10h)	-70 up to 280 °C

Chemical Performance

Water resistance	ISO 719 / DIN 12111 HGB1 / ISO 720 HGA1
Acid resistance	ISO 1776 / DIN 12116 1
Alkali resistance	ISO 695 / DIN 52322 A2

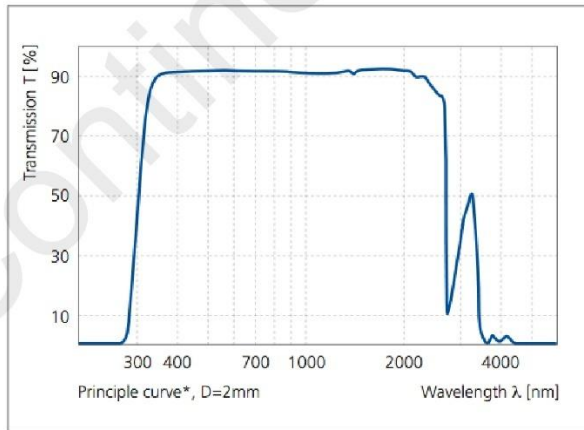
Optical Property

Refractive index	$\lambda = 587.6 \text{ nm}$	$n_D = 1.4724$
	$\lambda = 480.0 \text{ nm}$	$n_F = 1.4782$
	$\lambda = 546.0 \text{ nm}$	$n_E = 1.4740$
	$\lambda = 644.0 \text{ nm}$	$n_C = 1.4701$

Electric Property

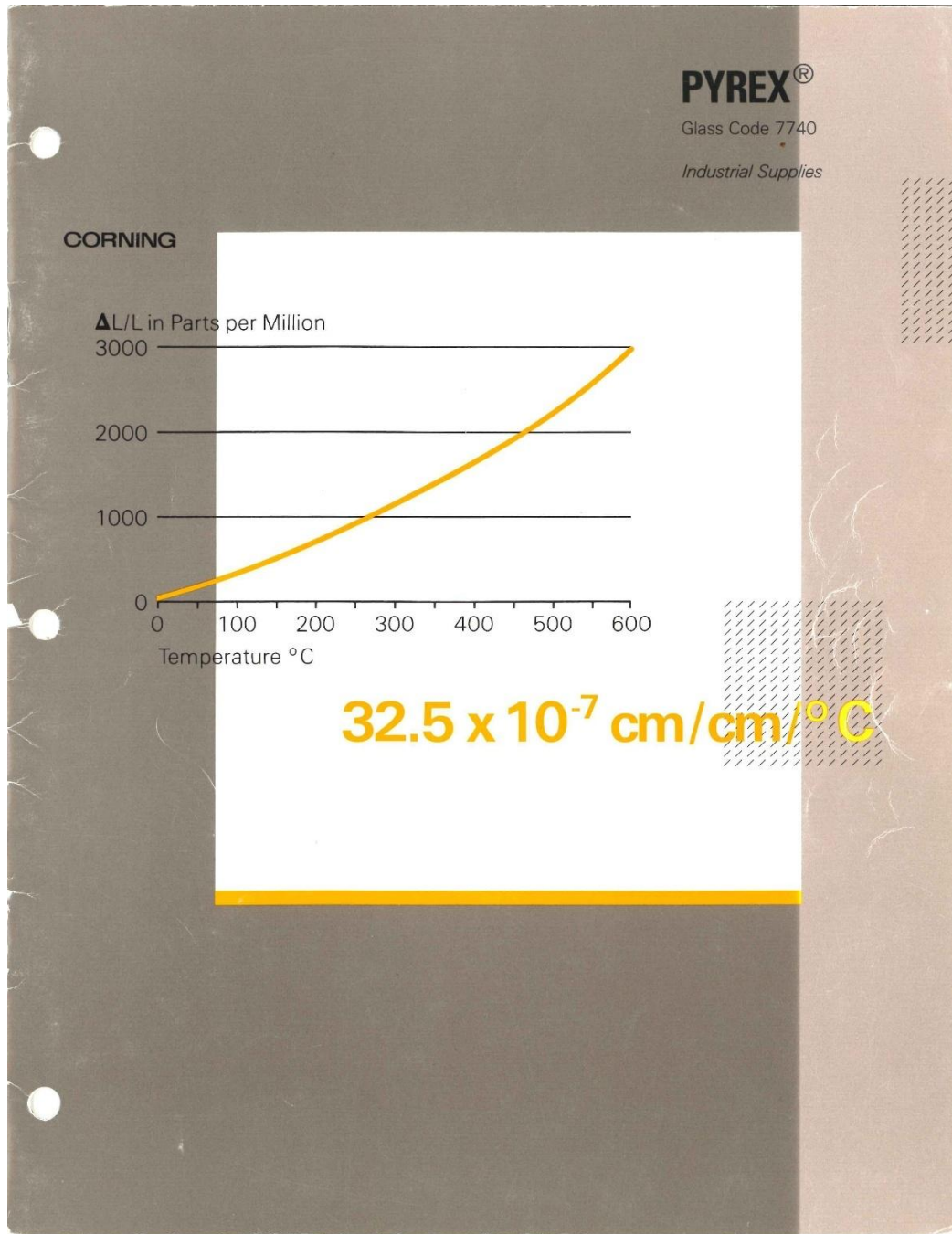
Electric Volume Resistivity	$8.6 \times 10^{13} \Omega \times \text{cm}$	(at 25 °C)
	$1.4 \times 10^6 \Omega \times \text{cm}$	(at 300 °C)
Dielectric dissipation fraction	38×10^{-4}	(at 1 MHz, 20 °C)
	4.6	(at 1 MHz, 20 °C)

Light transmission



While every attempt has been made to verify the source of the information, no responsibility is accepted for accuracy of data.

Apéndice 26 Ficha técnica para vidrio Pyrex Borosilicato



PYREX® Glass Code 7740

*Material Properties***Introduction**

Corning's glass code 7740 glass is a borosilicate composition that is used in the PYREX® brand products to provide unique chemical, thermal, mechanical and optical properties. These properties enable it to provide long service and fulfill requirements which common window or container glass cannot meet.

PYREX code 7740 is available as tubing, rod, flat glass, sight glass, bell jars, cylinders, ground and screened glass, and as miscellaneous pressed and blown ware.

Basic Properties

Because of its borosilicate composition, PYREX code 7740 glass resists attack by all acids except hydrofluoric and hot phosphoric. Surface clouding and erosion may occur in the presence of hot caustic solutions.

The low coefficient of thermal expansion of PYREX code 7740 glass allows it to withstand higher temperatures and temperature excursions than ordinary window glass.

Design stresses of up to 1000 psi in tension are allowable in commercially annealed PYREX code 7740 glass. The tempering of 7740 glass allows design stresses up to 3000 psi in tension and improves thermal shock resistance. PYREX 7740 glass, once tempered, cannot be altered or refabricated.

The spectral band width of PYREX code 7740 glass is greater than soda lime glass resulting in higher transmissions of both infrared and ultraviolet energies.

Due to its boron content, PYREX code 7740 glass can be used as a neutron absorber in nuclear applications such as poison rods and raschig rings.

PYREX code 7740 glass meets all glass material requirements stated in MIL-G-47033 (MII) Glass Borosilicate.

In all cases, before placing a Corning PYREX brand product into your process, read the Use and Care section of the product catalog and the Use and Care sheet provided with the product. Pay strict attention to installation and maintenance instructions, maximum use criteria, cautionary messages, and WARNINGS.



PYREX® Glass Code 7740
 Material Properties

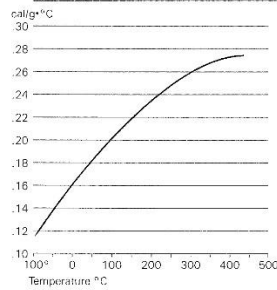
2

Thermal Properties

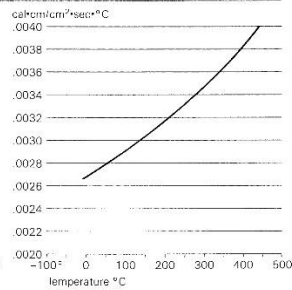
Representative Thermal Values

Average thermal expansion coefficient, 0-300°C	$32.5 \times 10^{-7} \text{ cm/cm/}^\circ\text{C}$	$18 \times 10^{-7} \text{ in/in/}^\circ\text{F}$
Specific heat, 25°C	0.18 cal/g•°C	0.18 Btu/lb•°F
Thermal diffusivity, 25°C	.0069 cm ² /sec	0.00107 in ² /sec
Thermal conductivity, 25°C	.0027 cal•cm/cm ² •sec•°C	0.63 Btu•ft/h•ft ² •°F
Total normal emissivity, 100°C	0.89	
Total hemispherical emissivity, 100°C	0.84	

Specific Heat

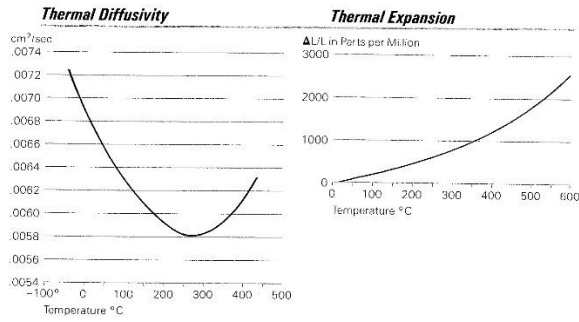


Thermal Conductivity



PYREX® Glass Code 7740

Material Properties



Thermal Shock Resistance

	Thickness	°C	°F
6" x 6" plates (annealed glass)	1/8"	180	324
	1/4"	150	270
	1/2"	100	180

These data are dependent on the geometry of the sample and must be considered approximations. Values are based on plunging samples into cold water after oven heating. Resistance of 100°C (180°F) means no breakage is expected if heated to 110°C (230°F) and plunged into water at 10°C (50°F). Tempered samples have approximately twice the resistance of annealed glass.

PYREX® Glass Code 7740

Material Properties

4

Heat Resistance

	Continuous Operating Temperature		Maximum Intermittent Operating Temperature	
	°C	°F	°C	°F
annealed	230	446	490	914
tempered	260	500	290	554

Thermal Stress Resistance

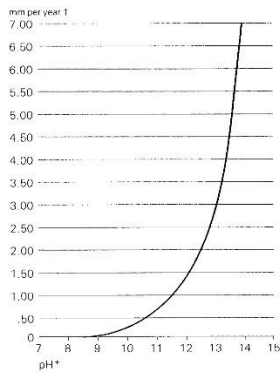
Thermal stress resistance in °C (°F) is the temperature differential between the two surfaces of a tube or a constrained plate of annealed glass that will cause a tensile stress of 0.7 kg/mm² (1000 psi) on the cooler surface. For PYREX® brand 7740 glass, this value is 54°C (97°F).

Chemical Durability

Representative Chemical Values

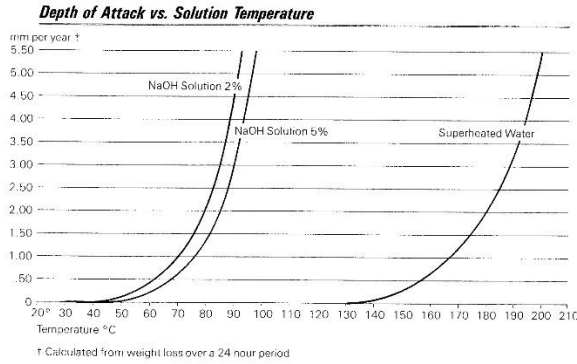
Reactant	Temperature	Wt. Loss mg/cm ²	Wt. Loss lb/in ²
5% HCL (24 hr.)	95°C (203°F)	0.0045	6.40 x 10 ⁻⁸
N/50 Na ₂ CO ₃ (6 hr.)	100°C (212°F)	0.12	1.71 x 10 ⁻⁶
5% NaOH (6 hr.)	100°C (212°F)	1.4	1.99 x 10 ⁻⁵

Depth of Attack vs pH*



* Calculated from weight loss over a 24 hour period

PYREX® Glass Code 7740
Material Properties

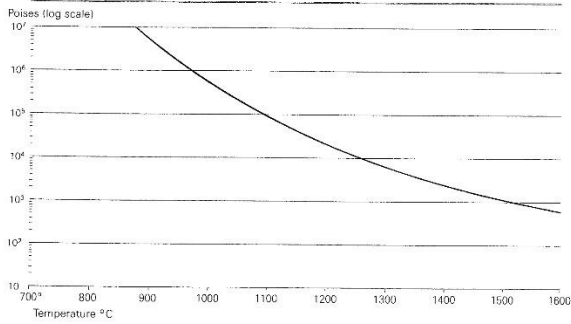


Mechanical Properties

Representative Mechanical Values

Density, 25°C (77°F)	2.23 g/cm ³	139.2 lb/ft ³
Young's modulus, 25°C	6.1 x 10 ³ kg/mm ²	9.1 x 10 ⁵ psi
Shear modulus, 25°C	2.67 x 10 ³ kg/mm ²	3.8 x 10 ⁵ psi
Poisson's ratio, 25°C		0.20
Abrasion Resistance		3 times greater than window glass
Design Stress		
annealed		1000 psi
tempered		3000 psi
Knoop hardness, KHN ₁₀₀		418

Viscosity



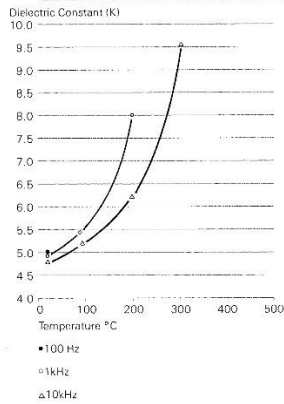
PYREX® Glass Code 7740
 Material Properties

Electrical Properties

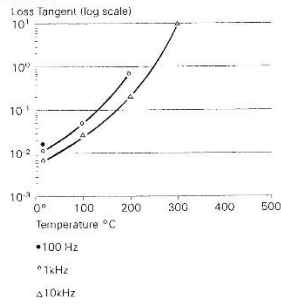
Representative Electrical Values

Dielectric constant	
1 MHz, 25°C (77°F)	4.6
8.6 KHz, 25°C	4.5
Loss tangent	
1 MHz, 25°C	.005
8.6 KHz, 25°C	.0008
Power Factor 1 MHz, 25°C	.0046
Volume Resistivity ohm-cm	
Log ρ at 250°C (482°F)	8.1
Log ρ at 350°C (662°F)	6.6

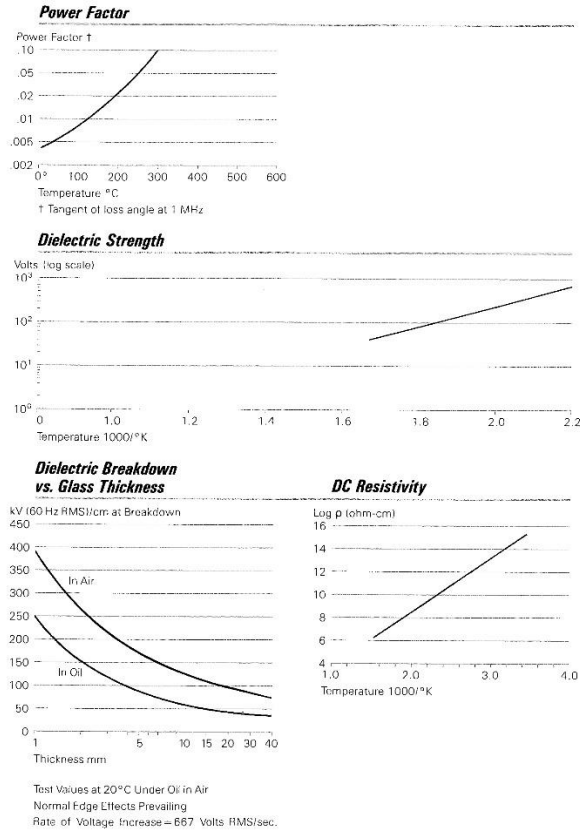
Dielectric Constant



Loss Tangent



PYREX® Glass Code 7740
Material Properties



7

PYREX® Glass Code 7740
 Material Properties

8

Optical Properties

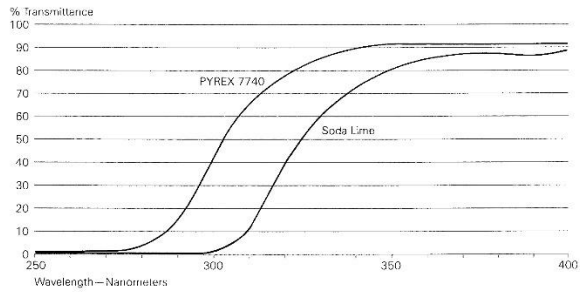
Representative Optical Properties

Refractive index	
N_e (486) (nm)	1.4776
N_o (589) (nm)	1.4727
N_c (656) (nm)	1.4705
Birefringence constant nm/cm/kg/mm ²	394

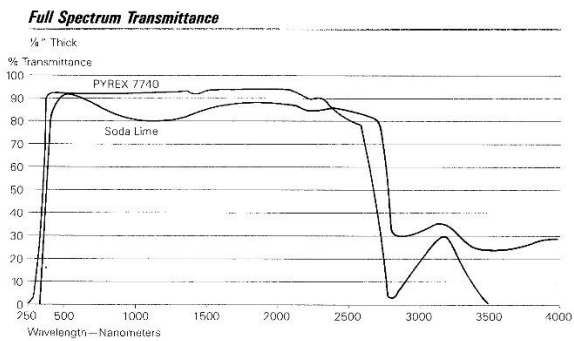
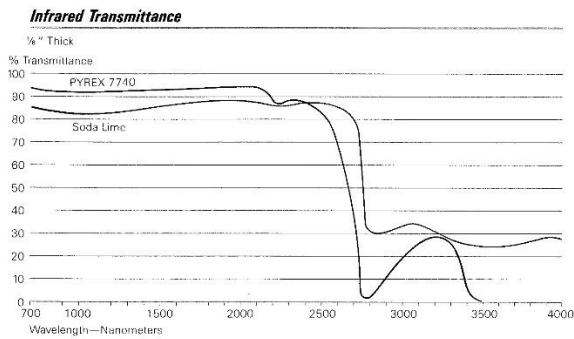
Resistance to Radiation Degradation

Due to its purity, PYREX® Code 7740 glass resists solarization and discoloration from exposure to electron, gamma, proton and neutron and solar radiation more effectively than higher expansion optical glasses.

UV Transmittance—1/8 In. Thickness



PYREX® Glass Code 7740
Material Properties



PYREX® Glass Code 7740

Material Properties

10

Thickness-Transmittance Nomograph

The transmittance of polished 7740 glass for radiation of a given wavelength may be expressed by the relation

$$T = K \cdot 10^{-\beta t}$$

Where T is the transmittance

K is a factor dependent upon surface reflection*

β is an absorption coefficient

t is the thickness

*This is in accordance with Lambert's law with a correction factor for surface reflection.

The accompanying nomograph represents this relation and can be used for the solution of thickness-transmittance problems. The transmittance values are to be used as percentages at a given wavelength. Total transmittance values cannot be determined from this nomograph. Thickness values may be used directly or as relative values (i.e., 3mm and 6mm can be considered as relative values of 1 and 2 units).

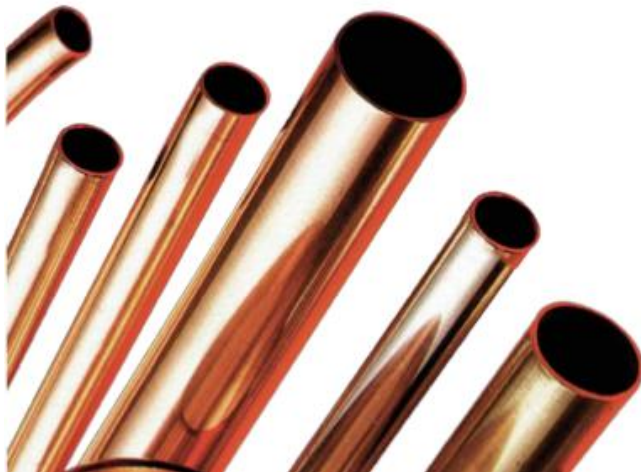
Directions

Place a straight edge on the chart connecting the known thickness with its percent transmittance on the transmittance scale. Place a pointer at the point of intersection of the straight edge with the line labeled B. Rotate the straight edge about the pointer to your required thickness or transmittance. Read the resulting transmittance or thickness at the point of intersection of the straight edge with the scale.

Apéndice 27. Catálogo para tubería de cobre de Nacobre.

TUBERÍA RÍGIDA

INTERNACIONAL DE IDENTIFICACIÓN		DIÁMETROS NOMINALES		USOS Y APLICACIONES
TIPO	COLOR	MILÍMETROS (PULG.)		
	Rojo	6 (1/4")	51 (2")	Conducción de agua potable Casas de interés social Casas de interés medio Edificios habitacionales Edificios comerciales
		10 (3/8")	64 (2 1/2")	
		13 (1/2")	75 (3")	
		19 (3/4")	100 (4")	
		25 (1")		
		32 (1 1/4")		
38 (1 1/2")				
	Azul	6 (1/4")	51 (2")	Los mismos que el tipo "M", además de: Instalaciones de gas combustible y medicinal, tomas domiciliarias de agua potable.
		10 (3/8")	64 (2 1/2")	
		13 (1/2")	75 (3")	
		19 (3/4")	100 (4")	
		25 (1")		
		32 (1 1/4")		
38 (1 1/2")				
	Verde	10 (3/8")	51 (2")	Los mismos que el tipo "L", además de: Uso Industrial donde las presiones y temperaturas de trabajo son severas.
		13 (1/2")	64 (2 1/2")	
		19 (3/4")	75 (3")	
		25 (1")	100 (4")	
		32 (1 1/4")		
		38 (1 1/2")		



Medida Nominal	Diámetro Exterior	Espesor de Pared		
		M	L	K
1/4"	0.375"	0.025"	0.030"	
6.35 mm	9.525 mm	0.635 mm	0.762 mm	
3/8"	0.500"	0.025"	0.035"	0.049"
9.50 mm	12.700 mm	0.635 mm	0.889 mm	1.245 mm
1/2"	0.625"	0.028"	0.040"	0.049"
12.7 mm	15.875 mm	0.711 mm	1.016 mm	1.245 mm
3/4"	0.875"	0.032"	0.045"	0.065"
19 mm	22.225 mm	0.812 mm	1.143 mm	1.651 mm
1"	1.125"	0.035"	0.050"	0.065"
25 mm	28.575 mm	0.889 mm	1.270 mm	1.651 mm
1 1/4"	1.375"	0.042"	0.055"	0.065"
32 mm	34.925 mm	1.067 mm	1.397 mm	1.651 mm
1 1/2"	1.625"	0.049"	0.060"	0.072"
38 mm	41.275 mm	1.245 mm	1.524 mm	1.829 mm
2"	2.125"	0.058"	0.070"	0.083"
51 mm	53.975 mm	1.473 mm	1.778 mm	2.108 mm
2 1/2"	2.625"	0.065"	0.080"	
64 mm	66.675 mm	1.651 mm	2.032 mm	
3"	3.125"	0.072"	0.090"	
76 mm	79.375 mm	1.889 mm	2.286 mm	
4"	4.125"	0.095"	0.110"	
102 mm	104.775 mm	2.413 mm	2.794 mm	

Medida Nominal	Peso por tramo			Presión Máxima		
	M	L	K	M	L	K
1/4"	2.132 lb	2.524 lb		6.133 lb/pulg ²	7.200 lb/pulg ²	
6.35 mm	0.968 kg	1.146 kg		431.15 kg/cm ²	506.16 kg/cm ²	
3/8"	2.903 lb	3.965 lb	5.385 lb	4.500 lb/pulg ²	6.300 lb/pulg ²	8.820 lb/pulg ²
9.50 mm	1.318 kg	1.800 kg	2.445 kg	316.35 kg/cm ²	442.89 kg/cm ²	620.04 kg/cm ²
1/2"	4.083 lb	5.705 lb	6.890 lb	4.032 lb/pulg ²	5.760 lb/pulg ²	7.056 lb/pulg ²
12.7 mm	1.854 kg	2.590 kg	3.128 kg	283.45 kg/cm ²	404.92 kg/cm ²	496.03 kg/cm ²
3/4"	6.566 lb	9.110 lb	12.813 lb	3.291 lb/pulg ²	4.632 lb/pulg ²	6.685 lb/pulg ²
19 mm	2.981 kg	4.136 kg	5.817 kg	231.35 kg/cm ²	325.62 kg/cm ²	469.95 kg/cm ²
1"	9.310 lb	13.114 lb	16.799 lb	2.800 lb/pulg ²	4.000 lb/pulg ²	5.200 lb/pulg ²
25 mm	4.227 kg	5.954 kg	7.627 kg	196.84 kg/cm ²	281.20 kg/cm ²	290.00 kg/cm ²
1 1/4"	13.656 lb	17.700 lb	20.824 lb	2.749 lb/pulg ²	3.600 lb/pulg ²	4.260 lb/pulg ²
32 mm	6.200 kg	8.036 kg	9.454 kg	193.25 kg/cm ²	253.08 kg/cm ²	299.47 kg/cm ²
1 1/2"	18.821 lb	22.826 lb	27.231 lb	2.713 lb/pulg ²	3.323 lb/pulg ²	3.988 lb/pulg ²
38 mm	8.545 kg	10.363 kg	12.363 kg	190.72 kg/cm ²	233.60 kg/cm ²	280.35 kg/cm ²
2"	29.233 lb	35.042 lb	41.249 lb	2.470 lb/pulg ²	2.965 lb/pulg ²	3.515 lb/pulg ²
51 mm	13.272 kg	15.909 kg	18.727 kg	173.65 kg/cm ²	208.43 kg/cm ²	247.10 kg/cm ²
2 1/2"	40.647 lb	49.658 lb		2.228 lb/pulg ²	2.742 lb/pulg ²	
64 mm	18.454 kg	22.545 kg		156.62 kg/cm ²	192.76 kg/cm ²	
3"	53.663 lb	66.645 lb		2.073 lb/pulg ²	2.592 lb/pulg ²	
76 mm	24.363 kg	30.257 kg		145.73 kg/cm ²	182.21 kg/cm ²	
4"	93.310 lb	107.729 lb		2.072 lb/pulg ²	2.400 lb/pulg ²	
102 mm	42.363 kg	48.909 kg		145.65 kg/cm ²	168.72 kg/cm ²	

Apéndice 28 Guía de laboratorio para la signatura de Sistemas Térmicos.

Laboratorio de Sistemas Térmicos - Escuela de Ingeniería Mecánica
Universidad Industrial de Santander



Destilación simple de agua mediante energía solar térmica

En esta guía de laboratorio se presentan las directrices a seguir para la práctica de destilación simple de agua mediante el aprovechamiento de la energía solar térmica. En esta práctica el estudiante debe desarrollar competencias para comprender el proceso de destilación de agua, los efectos de la presión y la irradiancia recibida y su concentración. Los datos experimentales permitirán evaluar el rendimiento del sistema en función de las condiciones climáticas e internas.

1. Introducción

La energía solar térmica es una de las fuentes renovables más utilizadas en la actualidad, con aplicaciones en calentamiento de agua, generación de vapor y procesos industriales. Los concentradores solares permiten aprovechar al máximo la radiación solar al dirigir y concentrar la energía en una zona específica, aumentando significativamente la temperatura y mejorando la eficiencia térmica.

En la industria, los colectores solares de concentración se emplean en plantas desalinizadoras, en la generación de energía eléctrica a través de ciclos termodinámicos y en procesos de secado y evaporación. Su aplicación en la destilación solar permite la producción de agua potable en zonas con escasez hídrica, sin necesidad de infraestructura eléctrica compleja.

Este laboratorio tiene como objetivo evaluar el proceso de recolección de condensado en un banco de pruebas de destilación solar, donde se analiza el impacto de variables como la presión interna, la irradiancia solar y la temperatura del sistema en la eficiencia del proceso.

1.1. Objetivos

- Comprender el funcionamiento del sistema de destilación mediante el aprovechamiento de la energía solar térmica.
- Analizar el desempeño del proceso a lo largo del día solar.
- Identificar las relaciones entre la tasa de destilación y la irradiancia y su concentración.

2. Materiales y Método

2.1. Materiales

El banco de pruebas consta de dos subsistemas principales. El subsistema de ebullición del agua y el subsistema de condensación. Cada uno constituido por los componentes presentados a continuación.



Fig 1. Banco de pruebas de destilación simple con energía solar

Subsistema de ebullición

- Concentrador solar parabólico
- Tubo colector solar al vacío
- Tubería de cobre
- Válvula de reabastecimiento (V1)

Subsistema de condensación

- Tanque de condensación de vapor
- Tanque de recolección de condensado
- Válvula de despresurización del sistema.
- Válvula de control de recolección (V2)
- Válvula de recolección de condensado (V3)
- Bomba de vacío para evacuar todo el sistema.
- Vacuómetro mecánico

Herramientas para el levantamiento de datos

- Estación meteorológica de la escuela de ingeniería mecánica en la aplicación WeatherLink.
- Balanza gramera y/o recipiente medidor de volumen.
- Termocupla tipo K MAX6675 para medir la temperatura del agua.
- Termocuplas DS18B20 para medir la temperatura aproximada del vapor generado y la del área superficial del tanque de condensación.
- Placa Arduino UNO.
- Software CoolTerm.
- Computador portátil
- Cronómetro
- Nivel con medidor de ángulos.

2.2. Procedimiento experimental

VARIABLES POR MEDIR:

- Temperatura del tubo de cobre (T1) la cual sugiere una aproximación a la temperatura del agua, sin embargo, dependiendo de la ubicación del sensor su valor puede variar.
- Temperatura aproximada del vapor generado (T2), medida a la salida del tubo de cobre.
- Temperatura superficial promedio entre la pared del tanque de condensación y el aire ambiente (T3).



Fig 2. Ubicación de las tres termoplas.

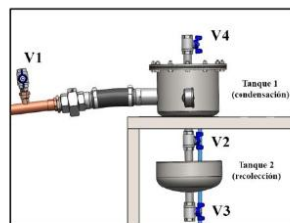


Fig 3. Nomenclatura empleada para las válvulas y tanques

Para la práctica de laboratorio se utiliza el método de operación más eficiente, consiste en orientar el azimuth (medido desde el norte) del sistema, 180° , es decir, con la punta final del tubo hacia el sur y de esta manera se realice el seguimiento solar del concentrador parabólico.

La adquisición de datos se realiza en Arduino con el código (ver además la bibliografía [3]).

```
#include <max6675.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <TimeLib.h>

String dato(int digit){
  String dt=String("0")+digit;
  return dt.substring(dt.length()-2);
}

void reloj(){
```

```
String
tiempo=String(hour())+":"+"dato(minute())+":"+"dato(s
econd());
Serial.print(tiempo);
}
```

// Define the Arduino pins, the MAX6675 module is connected to

```
int SO_PIN = 7; // Serail Out (SO) pin
int CS_PIN = 6; // Chip Select (CS) pin
int SCK_PIN = 5; // Clock (SCK) pin
```

// Create an instance of the MAX6675 class with the specified pins

```
MAX6675 thermocouple(SCK_PIN, CS_PIN, SO_PIN);
```

OneWire ourWire2(3); //Se establece el pin 3 como bus OneWire

OneWire ourWire3(4); //Se establece el pin 4 como bus OneWire

DallasTemperature sensors2(&ourWire2); //Se declara una variable u objeto para nuestro sensor2

DallasTemperature sensors3(&ourWire3); //Se declara una variable u objeto para nuestro sensor3

```
void setup() {
  //setTime(hr,mm,s,d,m,y);
  setTime(11,14,00,24,2,2025);
  delay(1000);
  Serial.begin(9600);
```

```
sensors2.begin(); //Se inicia el sensor 2
sensors3.begin(); //Se inicia el sensor 3
}
```

```
void loop() {
```

sensors2.requestTemperatures(); //Se envía el comando para leer la temperatura

```
float temp2= sensors2.getTempCByIndex(0);
```

//Se obtiene la temperatura en °C del sensor 2

sensors3.requestTemperatures(); //Se envía el comando para leer la temperatura

```
float temp3= sensors3.getTempCByIndex(0);
```

//Se obtiene la temperatura en °C del sensor 3

```
reloj();
Serial.print("|");
Serial.print(thermocouple.readCelsius());
Serial.print("|");
Serial.print(temp2);
Serial.print("|");
Serial.print(temp3);
```



```
Serial.println("");
delay(1000);
```

```
}
```

Con el motivo de hacer un seguimiento detallado de los datos, se debe tener el subsistema de ebullición cubierto para evitar que el aumento de la temperatura interna tenga influencia en el proceso de vacío y que también genere ruido en la lectura antes de introducir el agua de trabajo. Por lo tanto, mientras el concentrador y tubo solar estén cubiertos, abrir la V1 e introducir 1 litro de agua de trabajo.

Luego, cerrar V1 y conectar la manguera de la bomba de vacío a la salida de la válvula de despresurización.

Antes de encender la bomba de vacío, cerrar todas las válvulas excepto V2 y la válvula de despresurización.

Poner en funcionamiento la bomba de vacío y llevar la presión interna del sistema hasta el más mínimo posible, ubicado cerca a la lectura del vacuómetro en 0.2 bar. Este proceso toma alrededor de 2 minutos o el tiempo necesario hasta que la presión no continúa reduciéndose por más de 10 segundos.

Una vez llegue ese momento inicia el proceso. Se apaga la bomba de vacío, se cierran la válvula de despresurización y V2 y se desconecta la manguera de la entrada de la bomba de vacío.

Se retira la cubierta del subsistema de ebullición, se aflojan los tornillos que inmovilizan el concentrador parabólico y se realiza la alineación del foco para que sea coincidente con el tubo colector solar.

Hacer monitoreo de la presión interna con el vacuómetro cada 2 minutos y guardar estos valores. Así mismo, realizar revisión constante y hacer el registro de cada valor de irradiancia total recibida en la estación meteorológica cuando la aplicación haya actualizado la información.

Girar cada 5 minutos el colector solar para alinear el foco con ayuda del nivel y la luz reflejada en los soportes cilíndricos, para concentrar los rayos hacia el colector.

Cuando las temperaturas T2 y T3 aumenten rápidamente y T2 se encuentre cerca de la temperatura de saturación del agua para la presión en ese instante, hacer un seguimiento más detallado a la presión, puede ser cada 30 segundos, ya que esto sugiere generación de vapor.

Luego de aproximadamente 45 minutos desde ese evento, realizar la apertura en un 10% de V2 durante 30 segundos para permitir evacuar condensado al tanque de recolección si se observa que la lectura del vacuómetro se ha acercado a 0.6 bar.

Si durante esos primeros 45 minutos no se observan cambios significativos en la presión, y T2 tampoco se ha incrementado rápidamente ni se encuentra próximo a la temperatura de saturación del agua, no será necesario abrir V2.

Cuando haya transcurrido 1 hora desde que inició el proceso, abrir en un 10% V2 por 30 segundos, luego se cierra y se esperan aproximadamente 5 minutos para procurar que el producto condensado reduzca su temperatura y también se permita al posible vapor residual, condensarse casi por completo.

Después de la espera, recolectar el producto condensado abriendo completamente V3 y realizar la medición.

El proceso de apertura de V2 se puede realizar las veces que se vea necesario. Si el aumento de presión continúa hasta llegar muy rápidamente a la presión atmosférica y está acompañado de aumento de temperaturas T2 y T3, se debe obtener el condensado hasta ese instante bajo el mismo procedimiento de operación con las válvulas V2 y V3, desalinear el concentrador parabólico y cubrir el subsistema de ebullición para que el condensado no salga tan caliente y este resultado pueda ser medible durante la sesión de laboratorio.

3. Resultados y discusiones

Los datos obtenidos durante la práctica de laboratorio deben ser utilizados para generar gráficas de las tres temperaturas, irradiancia y presión en función del tiempo que permitan analizar el comportamiento del sistema cuando en determinados valores de irradiancia solar. Así mismo, se realiza el cálculo aproximado de la tasa de calor generado por el subsistema de ebullición y se compara con el valor de la tasa de calor por unidad de área para ebullición nucleada para determinar si fue alcanzada o no durante los periodos de tiempo que sea posible y las condiciones meteorológicas lo hayan permitido. Finalmente, comparar la cantidad de condensada teórica con la cantidad obtenida, determinar qué relación tiene con la irradiancia solar, argumentar las posibles causas de errores experimentales y analizar qué utilidad práctica tiene este método y cuáles posibles mejoras identificaría.

Bibliografía

- [1] Çengel, Y. (2015). Heat and Mass Transfer Fundamentals & Applications. New York: McGraw-Hill Education
- [2] Duffie, J., & Beckam, W. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley & Sons, Inc.
- [3] Miguel Ángel Bañuelos (2024). Arduino. Registro de datos en una PC utilizando CoolTerm. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=NRcGO1162mA>

Apéndice 29 Manual de operación y mantenimiento del banco de pruebas.

MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

**BANCO DE PRUEBAS DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA
MEDIANTE EL USO DE ENERGÍA SOLAR TÉRMICA**

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

LABORATORIO DE SISTEMAS TÉRMICOS

BUCARAMANGA

2025

Contenido

INTRODUCCIÓN.....	3
1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA	4
1.1. SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN.....	4
1.2. SUBSISTEMA DE CONDENSACIÓN	4
1.3. SUBSISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	4
2. INSTALACIÓN	5
2.1. SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN.....	6
2.2. SUBSISTEMA DE CONDENSACIÓN	8
2.3. ENSAMBLAJE DE SUBSISTEMAS.....	9
2.4. SUBSISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	10
3. SEGURIDAD EN EL TRABAJO.....	13
4. OPERACIÓN.....	13
4.1. CONCENTRADOR SOLAR FIJO	14
4.2. CONCENTRADOR SOLAR EN SEGUIMIENTO	15
4.3. PASO A PASO OPERACIÓN A PRESIÓN DE VACÍO.....	16
4.4. PASO A PASO DE OPERACIÓN A PRESIÓN ATMOSFÉRICA	17
5. MANTENIMIENTO	18
5.1. MANTENIMIENTO PREVENTIVO	18
5.2. MANTENIMIENTO CORRECTIVO.....	19

INTRODUCCIÓN

Este manual proporciona una guía detallada para la operación, mantenimiento y solución de problemas del sistema de destilación de agua con energía solar térmica. Se incluyen instrucciones para el montaje, la puesta en marcha, la operación segura y el mantenimiento preventivo y correctivo.

1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema está compuesto por dos subsistemas principales que realizan el proceso de destilación, y un subsistema externo encargado de la adquisición de datos:

1.1. SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN

Encargado de captar la irradiancia solar, concentrarla en la línea focal y transformarla en calor para evaporar el agua. El subsistema incluye:

- Concentrador parabólico: reflector que concentra la radiación incidente en el tubo colector solar.
- Tubo colector solar: es el dispositivo que convierte la energía solar en energía térmica utilizable, es un tubo de doble capa de vidrio, con el espacio entre ellas evacuado para reducir las pérdidas por convección y conducción.
- Tubo de ebullición fabricado en cobre: dentro de él se introduce el agua de trabajo.

1.2. SUBSISTEMA DE CONDENSACIÓN

Transforma el vapor de agua destilada en agua líquida para recolectarla. Está compuesto por:

- Tanque de condensación
- Tanque de recolección
- Bomba de vacío

1.3. SUBSISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Incluye los tres sensores de temperatura para el registro de las variables de operación.

- Arduino UNO.
- Termocupla tipo K con módulo MAX 6675
- 2 Termocuplas DS18B20.

En la Figura 1 se muestra la ubicación de las tres termocuplas en el banco de pruebas. T1 está en el área anular entre el colector solar y el tubo de ebullición.

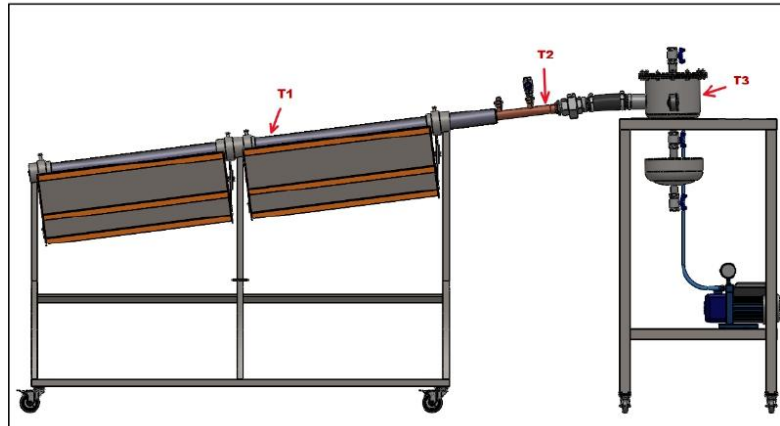


Figura 1. Ubicación de las termocuplas en el banco de pruebas.

2. INSTALACIÓN

Los dos subsistemas pueden permanecer parcialmente instalados para facilitar el transporte y llevarlo a un sitio seguro al finalizar operaciones.

Se debe considerar estrictamente nunca transportar el subsistema de ebullición si alguno de los dos tubos o ambos se encuentran ensamblados, esto con el motivo de evitar fuerzas de impacto que puedan romper el tubo de vidrio o doblar el tubo de cobre, solo se hará en caso de alineaciones mínimas que podrían ser necesarias para ensamblarlos.

2.1. SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN

2.1.1. Ubicar la base sobre una superficie plana y segura.

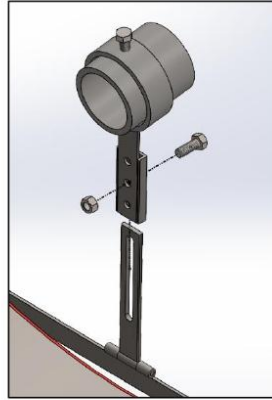


Figura 2. Ensamblaje del concentrador parabólico y el foco giratorio.

2.1.2. Posicionar los concentradores parabólicos sobre las dos vigas superiores de la base.

2.1.3. Ensamblar uno por uno los brazos posicionadores de cada concentrador parabólico en la ranura del foco giratorio. Introducir el tornillo $3/8'' \times 1''$ en el agujero del medio, la cabeza debe quedar hacia la cara del foco giratorio donde se cierran las pestañas de la ranura, y enroscar la tuerca $3/8''$.

2.1.4. Durante el ensamblaje, alinear el foco del concentrador parabólico con ayuda de un nivel, procurando que el ángulo de inclinación del marco de la parábola sea igual al ángulo de inclinación de los soportes cilíndricos de los tubos.

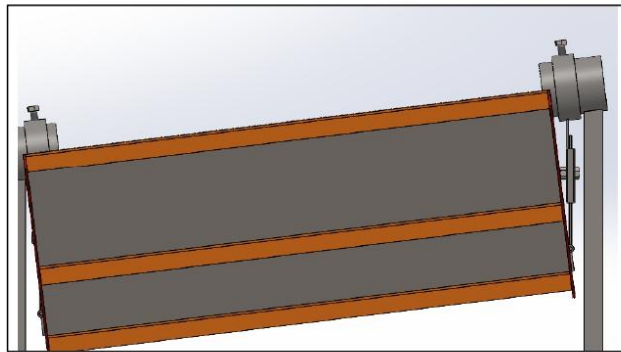


Figura 3. Vista lateral de la alineación del concentrador parabólico con la línea focal.

La altura del concentrador parabólico se debe modificar hasta que visualmente corte en la mitad de los soportes cilíndricos.

2.1.5. En el soporte cilíndrico más bajo, añadir cinta industrial para tapar el agujero de ese extremo, servirá como un apoyo adicional a los tubos para evitar su deslizamiento.

Hasta este paso el subsistema no tiene ensamblados el tubo solar y el de ebullición, por lo tanto, para facilitar el montaje y operación, cuando se finalizan operaciones o se desea trasladar el subsistema, se puede dejar ensamblado hasta aquí.

2.1.6. Desde este paso en adelante, el ensamblaje del sistema completo se debe realizar en el sitio donde se tomarán los datos, orientando correctamente el subsistema en función del modo de operación deseado (detallados en las instrucciones de operación) y activados los frenos de las ruedas.

2.1.7. Ensamblar cuidadosamente el tubo colector solar dentro de los soportes cilíndricos de la base, sin ocultar por completo la punta en el extremo inferior, aprovechando un poco más el área de colección solar en esa zona.

2.1.8. Introducir cuidadosamente el tubo de ebullición junto con la termocupla 1 (ver ubicación de termocuplas en sección 1.3) dentro del tubo colector solar, hasta que el primer accesorio haga contacto con el borde exterior.

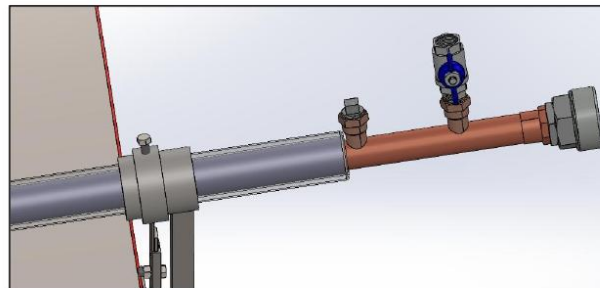


Figura 4. Tubo de ebullición dentro del tubo colector solar visto desde fuera.

2.2. SUBSISTEMA DE CONDENSACIÓN

- 2.2.1. Ubicar la mesa de condensación sobre una superficie plana y segura.
- 2.2.2. Ensamblar los tanques, válvulas y accesorios de acuerdo con el Plano 35 adjunto en los apéndices de este manual.

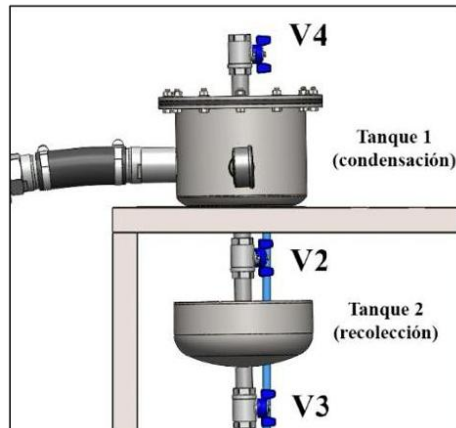


Figura 5. Nomenclatura de la válvulas y tanques.

- 2.2.3. La manguera de vapor debe quedar orientada hacia un extremo donde pueda sobresalir de la mesa.

2.3. ENSAMBLAJE DE SUBSISTEMAS

- 2.3.1. Antes de ensamblar los dos subsistemas, instalar los recubrimientos de aislante térmico en el tanque de condensación, de manera que la mitad posterior del tanque de condensación, diseñada para condensar el vapor, se mantenga expuesta.



Figura 6. Tanque de condensación con las piezas de aislamiento térmico

- 2.3.2. Aplicar cinta teflón sobre el área de la sección cónica de la pieza opuesta al macho roscado de la unión universal. La que lleva la tuerca, en la imagen es la pieza de la izquierda.



Figura 7. Partes de la unión universal.

- 2.3.3. Ensamblar ambas partes de la unión universal. Sus ejes longitudinales deben quedar alineados y el empalme de la sección cónica con la pieza compañera debe ser efectivo. Por esta razón los tanques no están fijos a la mesa para permitir esos grados de libertad.

En caso de ser necesario, debido a las irregularidades del terreno se recomienda mover las bases de ambos subsistemas cuidadosamente con

ligeros desplazamientos y de ser posible con ayuda de otra persona, hasta encontrar los puntos en donde favorezca a un empalme efectivo de la unión universal.

- 2.3.4. Aplicar tres vueltas de cinta teflón industrial o cuatro vueltas de cinta teflón estándar del ancho que cubra el empalme realizado.



Figura 8. Cinta teflón aplicada sobre la unión.

- 2.3.5. Roscar completamente la tuerca de la unión universal y verificar que la unión de los dos subsistemas se conserve rígida y activar los frenos del subsistema de condensación.
- 2.3.6. Ubicar las tres termocuplas en las posiciones indicadas en la Figura 1.

2.4. SUBSISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

- 2.4.1. Conectar la placa Arduino al computador portátil.
- 2.4.2. Introducir el código de la página siguiente
- 2.4.3. Subir el código a la placa Arduino verificando la selección del puerto correcto.
- 2.4.4. Abrir el software CoolTerm, y establecer la conexión con Arduino. (material de apoyo <https://youtu.be/NRCgOl162mA>)

También es posible utilizar la función de marca de tiempo de coolterm para registrar fecha y hora, en lugar de la línea 32 escrita en el código.

CÓDIGO ARDUINO PARA LECTURA DE TEMPERATURAS

```
#include <max6675.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <TimeLib.h>

String dato(int digit){
  String dt=String("0")+digit;
  return dt.substring(dt.length()-2);
}

void reloj(){
  String tiempo=String(hour())+": "+dato(minute())+": "+dato(second());
  Serial.print(tiempo);
}

// Definición de los pines de Arduino. MAX6675
int SO_PIN = 7; // Serail Out (SO) pin
int CS_PIN = 6; // Chip Select (CS) pin
int SCK_PIN = 5; // Clock (SCK) pin

// Create an instance of the MAX6675 class with the specified pins
MAX6675 thermocouple(SCK_PIN, CS_PIN, SO_PIN);

OneWire ourWire2(3); //Se establece el pin 3 como bus OneWire
OneWire ourWire3(4); //Se establece el pin 4 como bus OneWire

DallasTemperature sensors2(&ourWire2); //Se declara una variable u objeto para
nuestro sensor2
DallasTemperature sensors3(&ourWire3); //Se declara una variable u objeto para
nuestro sensor3

void setup(){
  //setTime(hr,mm,s,d,m,y);
  setTime(11,14,00,24,2,2025);
  delay(1000);
  Serial.begin(9600);

  sensors2.begin(); //Se inicia el sensor 2
  sensors3.begin(); //Se inicia el sensor 3
```

```
}  
  
void loop() {  
  
    sensors2.requestTemperatures(); //Se envía el comando para leer la temperatura  
    float temp2= sensors2.getTempCByIndex(0); //Se obtiene la temperatura en °C del  
    sensor 2  
    sensors3.requestTemperatures(); //Se envía el comando para leer la temperatura  
    float temp3= sensors3.getTempCByIndex(0); //Se obtiene la temperatura en °C del  
    sensor 3  
    reloj();  
    Serial.print("|");  
    Serial.print(thermocouple.readCelsius());  
    Serial.print("|");  
    Serial.print(temp2);  
    Serial.print("|");  
    Serial.print(temp3);  
    Serial.println("|");  
    delay(1000);  
  
}
```

3. SEGURIDAD EN EL TRABAJO

Para la operación a la intemperie bajo el sol, debemos usar los elementos de protección personal adecuados para prevenir golpes de calor y quemaduras solares.

Se recomienda el uso de ropa de manga larga de tela transpirable y de colores claros, preferiblemente con tecnología de protección UV, para minimizar la absorción de calor. Además, es obligatorio portar sombrero o gorra con protección en la nuca, así como gafas de seguridad con filtro UV para proteger los ojos de la radiación solar y los reflejos generados por el concentrador parabólico.

Se debe aplicar protector solar con un factor de protección solar (FPS) de al menos 50, renovándolo cada 2 horas, especialmente en condiciones de alta irradiancia. Para evitar la deshidratación, se recomienda ingerir agua cada 20-30 minutos, aún sin sensación de sed. Se debe hacer pausas de descanso en la sombra para evitar sobrecarga térmica y estar pendiente a los síntomas de golpe de calor, como mareos, fatiga extrema o enrojecimiento excesivo de la piel.

Para la manipulación del sistema y de sus componentes a temperaturas altas, se deben emplear guantes térmicos, y en superficies irregulares o resbaladizas, botas de seguridad o zapato con suela antideslizante.

4. OPERACIÓN

Para girar el concentrador solar respecto a su línea focal se desajustan los tornillos hexagonales 3/8" ubicados en la superficie cilíndrica de la pieza de foco móvil.

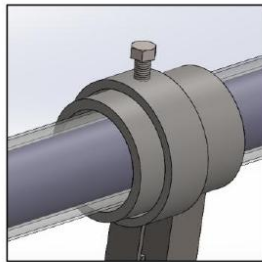


Figura 9. Foco giratorio con tornillo de fijación.

El modo de seguimiento del concentrador solar es independiente del modo de operación de la presión interna, en total se pueden combinar y obtener hasta 4 métodos de operación. Para cada uno se deben tener en cuenta las directrices de cada característica respectiva (para el montaje y para la presión).

4.1. CONCENTRADOR SOLAR FIJO

El azimuth del sistema esta vez se gira 90 grados, dejando el tubo a lo largo de oriente a occidente, o viceversa. El resultado final se ve afectado si la operación se realiza en la mañana o en la tarde ya que, por los 7° de inclinación fija del tubo, los rayos solares en el foco se terminarán proyectando a lo largo de su longitud más arriba o más debajo de él.

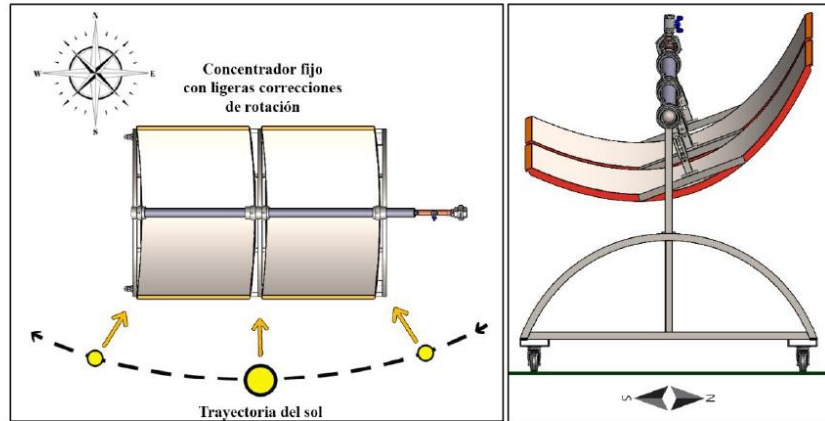


Figura 10. Posicionamiento del subsistema de ebullición en el modo de operación concentrador solar fijo.

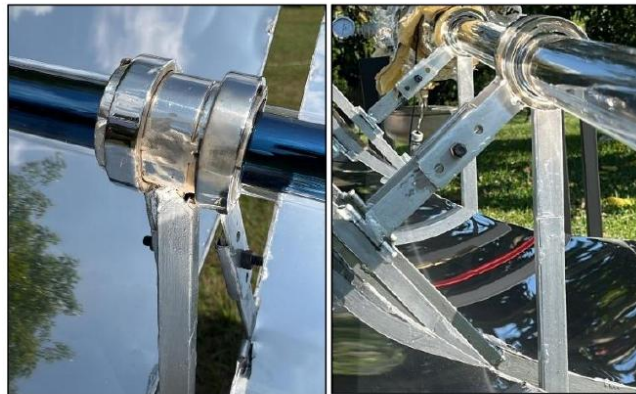


Figura 11. Rayos solares concentrados en el foco.

4.2. CONCENTRADOR SOLAR EN SEGUIMIENTO

Orientar el tubo hacia el sur, es decir, el azimuth del tubo es de 180° (medido desde el norte), debido a que Bucaramanga y su área metropolitana se encuentran a 7° latitud norte. Estos 7° de inclinación de los componentes ya están rígidamente ubicados en la base.

El azimuth del área de apertura del concentrador se mantiene fijo, debido a que el único grado de libertad que tiene el concentrador en operación es girar sobre el eje de su propio foco longitudinal.

Realizar seguimiento solar cada 5 minutos, de manera que se logre la tasa de movimiento del Sol percibida desde la Tierra, que es $15^\circ/h$.

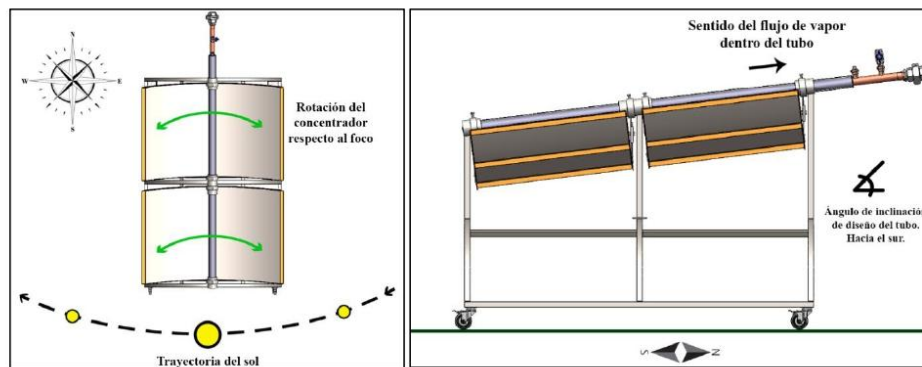


Figura 12 Posicionamiento del subsistema de ebullición en el modo de operación concentrador solar móvil.

4.3. PASO A PASO OPERACIÓN A PRESIÓN DE VACÍO

- 4.3.1. Cubrir el subsistema de ebullición de la radiación solar.
- 4.3.2. Abrir V1 y verter agua de trabajo dentro del tubo de ebullición.
- 4.3.3. Cerrar V1 y todas las demás válvulas. Solo se deberá abrir V2 y la válvula de despresurización conectada a la bomba.
- 4.3.4. Encender bomba de vacío y operar hasta llegar a 0.2 bar o el mínimo posible (duración aproximada 140 segundos).
- 4.3.5. Apagar bomba de vacío, cerrar la válvula de despresurización desconectar la manguera de la salida de la bomba y colocar el tapón del accesorio de la bomba.
- 4.3.6. Registrar constantemente la presión interna cada 2 minutos leyendo el vacuómetro. La irradiancia solar con la estación meteorológica de la escuela de ingeniería mecánica en WeatherLink cada vez que se actualice la información en la plataforma y cuando no se actualice ante variaciones significativas de irradiancia, estimar un valor para el registro.
- 4.3.7. Si antes de completar la primera hora de operación la presión interna sube a 0.7 – 0.8 bar, abrir un 10% de V2, y cerrar luego de 30 segundos.
- 4.3.8. Cuando se complete la primera hora, si las temperaturas T2 y T3 aumentaron significativamente y la presión interna del sistema también lo hace, esto sugiere que se generó vapor y llegó al tanque. El proceso de recolección consta en abrir un 10% de V2, esperar 2 minutos, cerrar V2 y abrir V3 para obtener el condensado producido. Si las temperaturas no se acercaron a la temperatura de saturación del agua para la presión interna, esperar 15 minutos adicionales y luego sí hacer el procedimiento de recolección explicado en este paso.
- 4.3.9. Medir el condensado obtenido en la hora de operación con una gramera o un recipiente con marcas de volumen.
- 4.3.10. Desalinear el concentrador parabólico y cubrir todo el subsistema de ebullición, retirar aislamientos térmicos en la mayoría de lo que sea posible y dejar enfriar el sistema con todas las válvulas abiertas para la próxima sesión de laboratorio.

4.4. PASO A PASO DE OPERACIÓN A PRESIÓN ATMOSFÉRICA

- 4.4.1. Cubrir el subsistema de ebullición de la radiación solar.
- 4.4.2. Abrir V1 y verter agua de trabajo dentro del tubo de ebullición.
- 4.4.3. Cerrar V1 y todas las demás válvulas.
- 4.4.4. Registrar constantemente la presión interna cada 2 minutos leyendo el vacuómetro. La irradiancia solar con la estación meteorológica de la escuela de ingeniería mecánica en WeatherLink cada vez que se actualice la información en la plataforma y cuando no se actualice ante variaciones significativas de irradiancia, estimar un valor para el registro.
- 4.4.5. Si antes de completar la primera hora de operación la presión interna sube a 1.2 – 1.4 bar, abrir un 5% de V2, y cerrar luego de 30 segundos. Abrir la válvula 2 permite despresurizar un poco el sistema.
- 4.4.6. Evaluar las condiciones de presión durante la operación y cuánto tiempo ha transcurrido. Si no se ha completado la primera hora de operación y la presión continúa aumentando más allá de 1.5 bar y las temperaturas T2 y T3 siguen en aumento, esto sugiere que se generó vapor y llegó al tanque. Se debe desalinear el concentrador parabólico y cubrir todo el subsistema sin abrir ninguna válvula, únicamente retirando los aislamientos térmicos.

Si las temperaturas no se acercaron a la temperatura de saturación del agua para la presión interna, esperar más tiempo dependiendo del tiempo de disponible para la toma de datos y luego sí hacer el procedimiento de recolección iniciado en este paso y el siguiente.

- 4.4.7. El proceso de recolección consta en abrir un 5% de V2, esperar 2 minutos, y cerrar V2. Dejar enfriar el sistema completo, especialmente los tanques de condensación, por esta razón se retiraron lo más pronto posible. Esperar 30 minutos adicionales o el tiempo que falte para terminar la sesión de laboratorio.
- 4.4.8. Abrir 5% de V3 para obtener el condensado producido. Se debe tener cuidado ya que la presión puede ser que continúe alta.
- 4.4.9. Medir el condensado obtenido en la hora de operación con una gramera o un recipiente con marcas de volumen.
- 4.4.10. Desalinear el concentrador parabólico y cubrir todo el subsistema de ebullición, retirar aislamientos térmicos en la mayoría de lo que sea posible y dejar enfriar el sistema con las válvulas V2 y V3 abiertas para la próxima sesión.

5. MANTENIMIENTO

5.1. MANTENIMIENTO PREVENTIVO

- 5.1.1. Limpiar el concentrador parabólico diariamente antes y después del día de operación, con un paño suave que no dañe la superficie reflectante y que no deje residuos.
- 5.1.2. Diariamente antes y después de la operación, inspeccionar el tubo colector solar en búsqueda de fisuras o pérdidas de vacío.
- 5.1.3. Diariamente antes y después de la operación, inspeccionar la manguera de vacío en búsqueda de fisuras o cristalización del caucho.
- 5.1.4. Diariamente antes y después de la operación, limpiar con un paño seco el exterior de la bomba, inspeccionar el estado de la carcasa en busca de grietas y deformaciones, el nivel y color de aceite.
- 5.1.5. Diariamente antes y después de la operación, garantizar que toda la tornillería de la tapa del tanque, las ruedas y bomba de vacío esté correctamente ajustada.
- 5.1.6. Semanalmente verificar el buen funcionamiento de las válvulas y garantizar que estén ensambladas correctamente.
- 5.1.7. Cada dos semanas realizar limpieza y desinfección del tubo de ebullición por medio de flushing.
- 5.1.8. Cada dos semanas realizar limpieza y desinfección a los dos tanques a través de la válvula V4, tapando la entrada de la manguera de vapor.
- 5.1.9. Cada mes realizar el cambio de aceite a la bomba de vacío, cada 70 ciclos de operación o si el aceite se ensucia muy rápido, lo que primero ocurra. Vaciar el depósito, limpiarlo y rellenar con aceite nuevo.
- 5.1.10. Cada mes realizar limpieza completa al tanque de condensación, desensamblando la tapa superior y el sello, el cual se inspeccionará su estado. Y limpieza interna al tanque de recolección de condensado, realizando flushing de forma más controlada y detallada.
- 5.1.11. Cada dos años o antes en caso de ser necesario, pintar con pintura anticorrosiva las estructuras del subsistema de ebullición y la mesa del subsistema de condensación.

5.2. MANTENIMIENTO CORRECTIVO

A continuación, se presentan situaciones problema con sus posibles causas y respectivas correcciones en la operación.

5.2.1. Si no se genera vapor y la presión de vacío se mantiene, revisar las siguientes posibilidades:

- Baja irradiancia solar. La eficiencia de los concentradores de línea y puntuales recae en la irradiancia directa y no en la difusa. Si el piranómetro está leyendo la irradiancia total y el valor dice estar sobre el mínimo requerido según el cálculo, entonces la causa puede ser la nubosidad presente en el cielo.
- Concentrador solar desalineado. Verificar el ángulo de inclinación de los concentradores y también el ángulo de giro de su área de apertura, para garantizar la correcta proyección de los rayos solares al tubo colector.

5.2.2. Temperatura de vapor alcanzada en T2 y T3 se mantiene también estacionario, pero no se logra obtener condensado.

- Fuga de vapor. Es probable que exista una fuga en conexiones de tanques con accesorios roscados, o que el sello no esté correctamente ajustado. Reajustar los tornillos de la tapa superior del tanque de condensación y verificar cada componente del tubo de ebullición y tanques. Si no se soluciona probablemente sea que la unión universal que une los dos subsistemas no generó un empalme efectivo, se corrige garantizando la alineación de los dos accesorios.

5.2.3. Si se opera a presión de vacío inicialmente y no se mantiene esta condición a pesar de que no se haya generado vapor (conclusión hecha con las temperaturas T2 y T3).

- Fuga de vacío. Las fugas ocurren en los mismos sitios descritos en el problema anterior para fuga de vapor y se pueden solucionar de esa forma.

5.2.4. La bomba de vacío no es eficiente y no se obtiene la presión absoluta mínima de 0.2 a 0.3 bar.

- La bomba de vacío está succionando demasiado vapor de agua. Si se está intentando hacer vacío inmediatamente después de haber terminado una toma de condensado porque se quiere llevar el sistema a presión reducida nuevamente para continuar el experimento, es seguro que haya vapor todavía generado dentro del sistema y la bomba puede resultar averiada

por esta mala práctica. Se debe dejar enfriar el sistema aproximadamente entre 45 a 60 minutos, desalineando los concentradores parabólicos y cubriendo todo el subsistema de condensación. En lo posible, retirar los aislantes para favorecer el enfriamiento. Y si se tomó condensado la última vez, quiere decir que el tubo de ebullición tiene capacidad para recibir esa cantidad obtenida nuevamente, por lo cual al verter cuidadosamente la nueva agua de trabajo por medio de V1, también se puede ayudar al sistema a que se enfríe más rápido.

Verificar el estado del aceite después de ese tiempo cuando la temperatura se haya reducido. Si está muy turbio, se debe cambiar.

- Si se dejó enfriar el sistema y el estado del aceite es aceptable, se debe revisar el sistema completamente y abordar el problema en busca de fugas como en el caso 4.2.2.

5.2.5. Fugas de aceite o fluido en bomba de vacío.

- Se debe a sellos desgastados, se requiere remplazar los empaques y las juntas.
- Otra posible causa es el exceso de presión en el interior, se debe verificar y regular la operación de vacío conociendo la presión del sistema de destilación antes de operar con la bomba de vacío, absteniéndose de usarla cuando la presión está por encima de la presión atmosférica, por ejemplo, un 20% más.

5.2.6. Ruidos inusuales en bomba de vacío

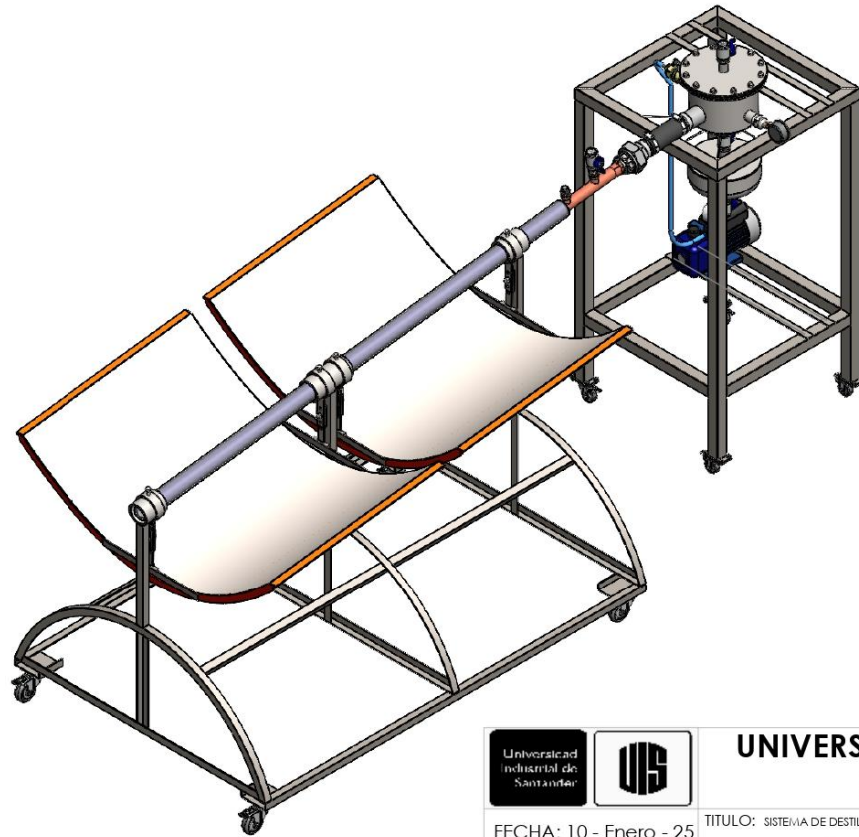
- Los rodamientos podrían estar desgastados, se debe programar un mantenimiento interno para reemplazar rodamientos por unos nuevos y revisar los ejes.
- Piezas sueltas. Las vibraciones hacen que algunos tornillos puedan aflojarse, revisar estas piezas y apretarlas.
- Motor desalineado. Esta causa va de la mano con los rodamientos desgastados, los componentes con desgaste prematuro causa problemas como baja eficiencia, aumento de consumo eléctrico y reducción de vida útil de la bomba.

5.2.7. Sobrecalentamiento de la bomba de vacío.

- Ventilación deficiente. Se debe mejorar el flujo de aire alrededor de la bomba, puede ser que también entradas de aire para ventilación estén obstruidas.
- Lubricación insuficiente. Revisar el nivel de aceite y rellenar si es necesario, también se puede deber a que el aceite ya debe cambiarse.

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE DESTILACIÓN DE AGUA

Apéndice 30. Planos en detalle del sistema de destilación



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE
SANTANDER**

FECHA: 10 - Enero - 25

ESCALA: 1:16

UNIDADES: mm

A4

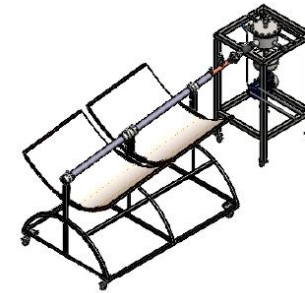
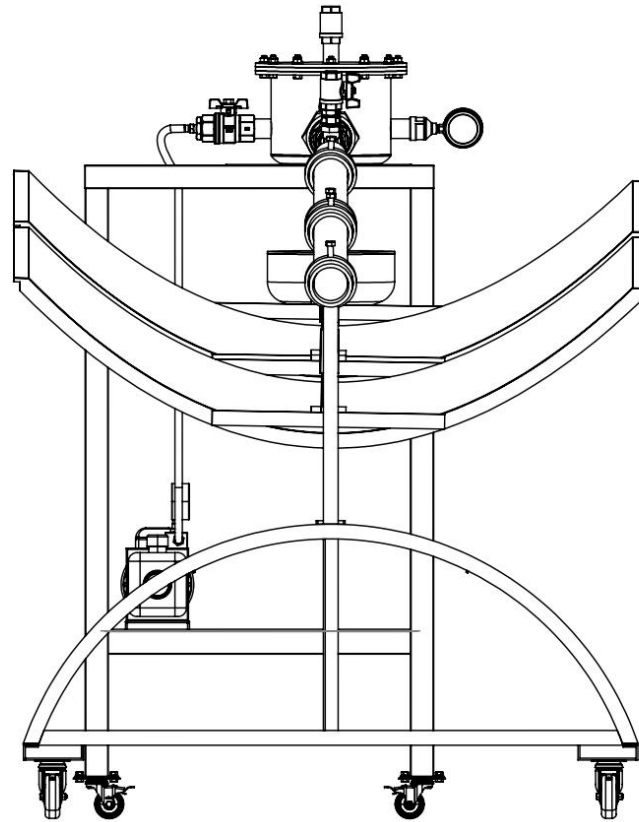


TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.
VISTA ISOMÉTRICA DEL SISTEMA COMPLETO

AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA
ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO

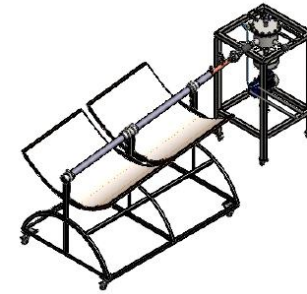
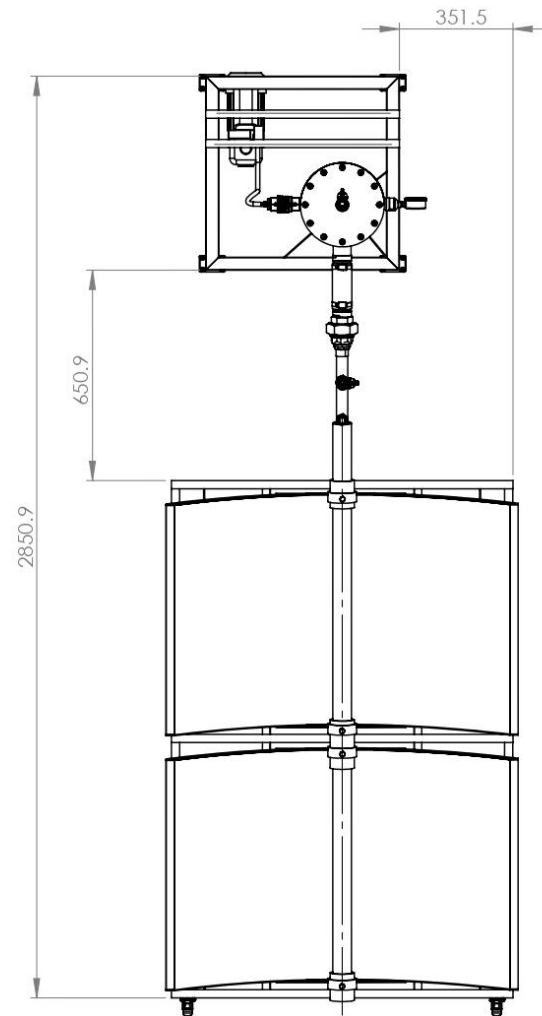
REVIS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.

HOJA 1 / 46



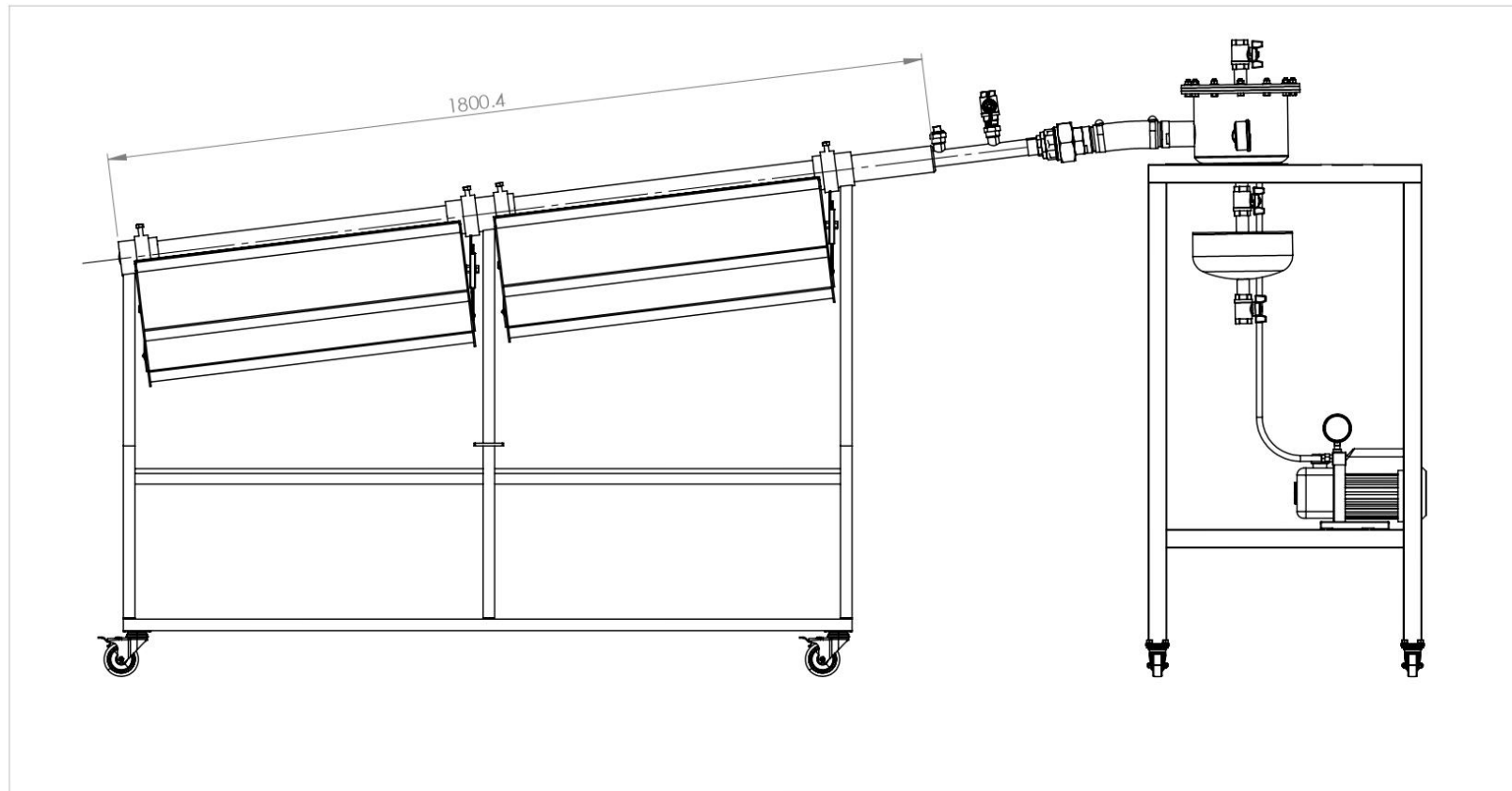
Vista isométrica
Escala 1:50

		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.	
ESCALA: 1:10		VISTA FRONTAL DEL SISTEMA COMPLETO	
UNIDADES: mm		AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO	
A4		REVIS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	HOJA 2 / 46



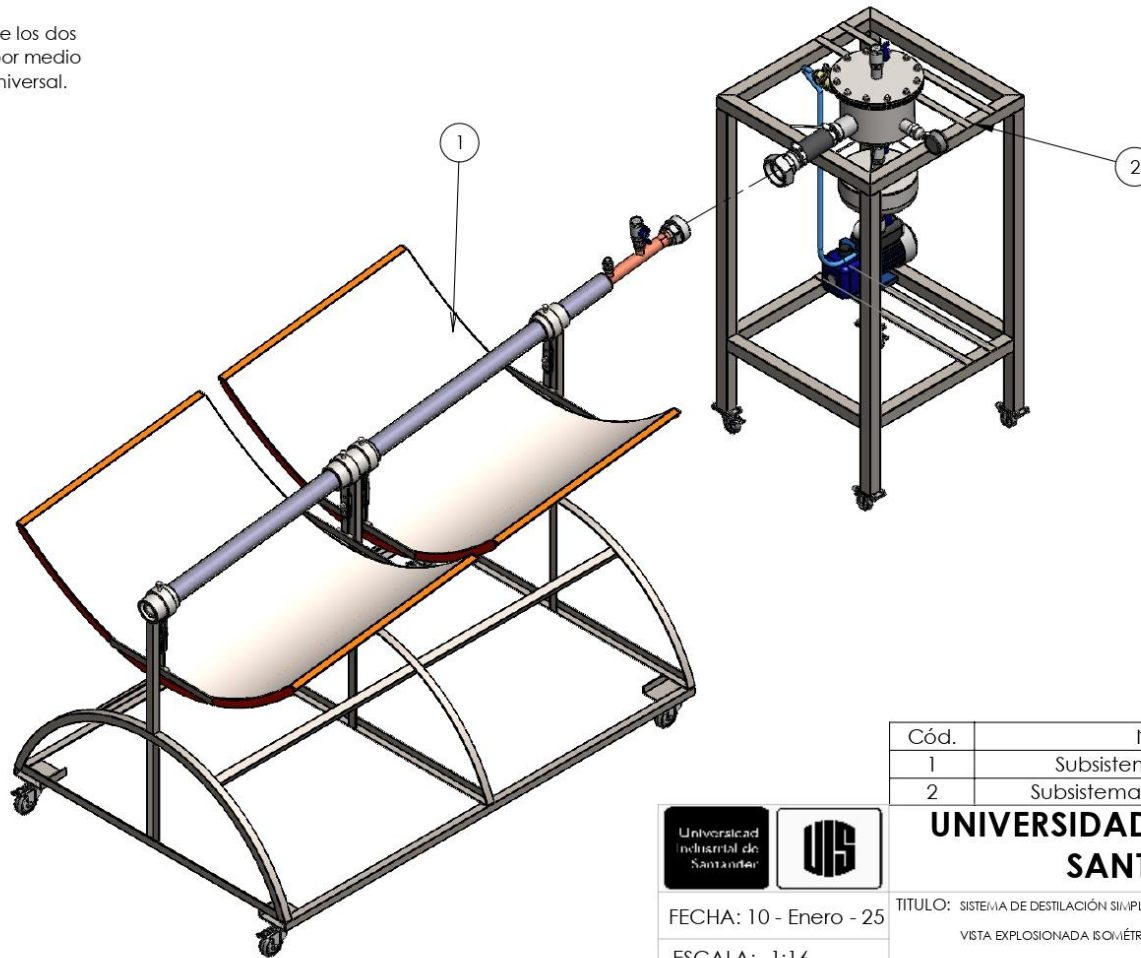
Vista isométrica
Escala 1:50

		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA. VISTA SUPERIOR DEL SISTEMA COMPLETO	
ESCALA: 1:18			
UNIDADES: mm		AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO	
A4		REVIS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	HOJA 3 / 46



		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25	TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA. VISTA LATERAL DERECHA DEL SISTEMA COMPLETO		
ESCALA: 1:12	AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO		
UNIDADES: mm	REVIS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	HOJA 4 / 46	
A4			

Nota:
Ensamblaje de los dos
subsistemas por medio
de la unión universal.



Cód.	Nombre	Cant.
1	Subsistema de ebullición	1
2	Subsistema de condensación	1



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10 - Enero - 25

ESCALA: 1:16

UNIDADES: mm

A4

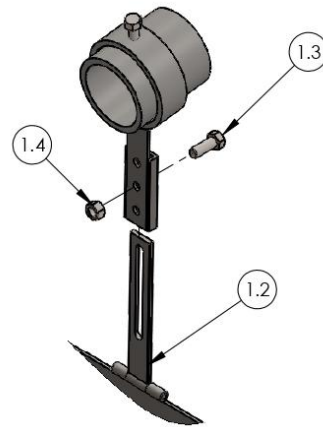
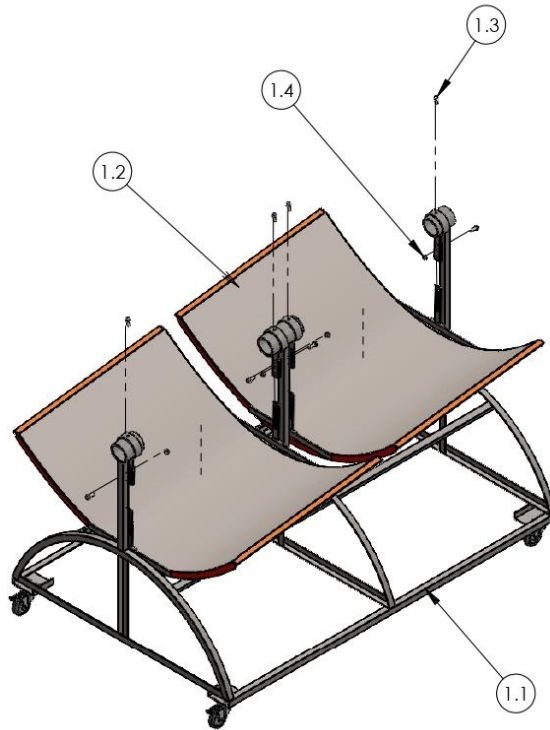


TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.
VISTA EXPLOSIONADA ISOMÉTRICA DE SUBSISTEMAS

AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA
ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO

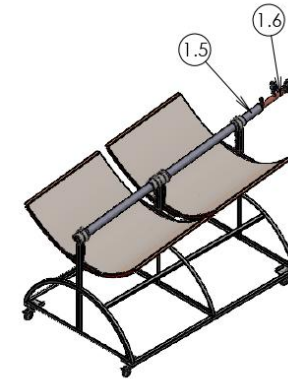
REVIS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.

HOJA 5 / 46



* Visualización auxiliar.
Detalle de ensamblaje
Recorte de vista isométrica
Soporte vertical de la base oculto

Escala 1:5



Vista isométrica
Escala 1:40

Cód.	Nombre	Cant.
1.1	Base	1
1.2	Concentrador parabólico	2
1.3	Tornillo hexagonal 3/8" x 1"	8
1.4	Tuerca hexagonal 3/8" ASME B18.2.2	4
1.5	Tubo colector solar evacuado Ajoover Ø ext 58 mm Ø int 42.9 mm Long. 1.8 m	1
1.6	Tubo de ebullición	1

Nota. Tubo colector solar (1.5) y tubo de ebullición (1.6) ocultos.

* Nota. Detalle de ensamblaje de los brazos del concentrador (1.2) con los brazos del foco de la base (1.1). En la vista recortada el soporte vertical de la base (1.1), tubo colector solar (1.5) y tubo de ebullición (1.6) están ocultos.



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10 - Enero - 25

ESCALA: 1:20

UNIDADES: mm

A4



TÍTULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.

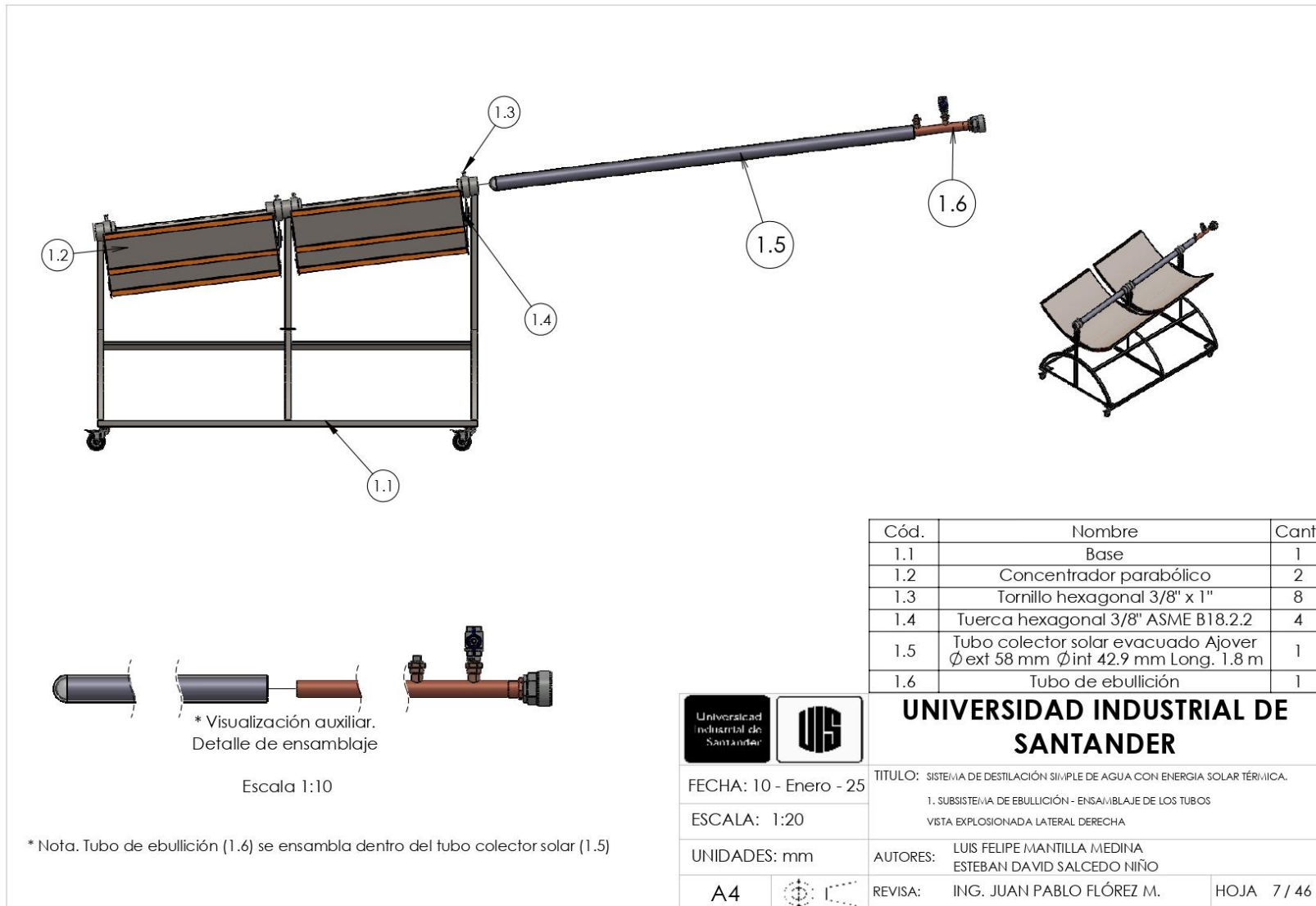
1. SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - ENSAMBLAJE DE CONCENTRADOR

VISTA EXPLOSIONADA ISOMÉTRICA

AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA
ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO

REVISAR: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.

HOJA 6 / 46





		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25	TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.		
ESCALA: 1:12	SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.1 BASE VISTA ISOMÉTRICA		
UNIDADES: mm	AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO		
A4		REvisa: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	HOJA 8 / 46


Cód.	Nombre	Cant.
1.1.1	Arco	3
1.1.2	Base de arco	3
1.1.3	Viga superior	4
1.1.4	Soporte horizontal inferior	2
1.1.5	Columna de arco	3
1.1.6	Columna baja del tubo	1
1.1.7	Columna media del tubo	1
1.1.8	Columna alta del tubo	1
1.1.9	Soporte cilindrico extremo del foco	2
1.1.10	Soporte cilindrico medio del foco	1
1.1.11	Foco giratorio derecho	2
1.1.12	Foco giratorio izquierdo	2
1.1.13	Platina base de columna media	1
1.1.14	Platina de rueda	4
1.1.15	Rueda	4

FECHA: 10 - Enero - 25

ESCALA: 1:20

UNIDADES: mm

A4

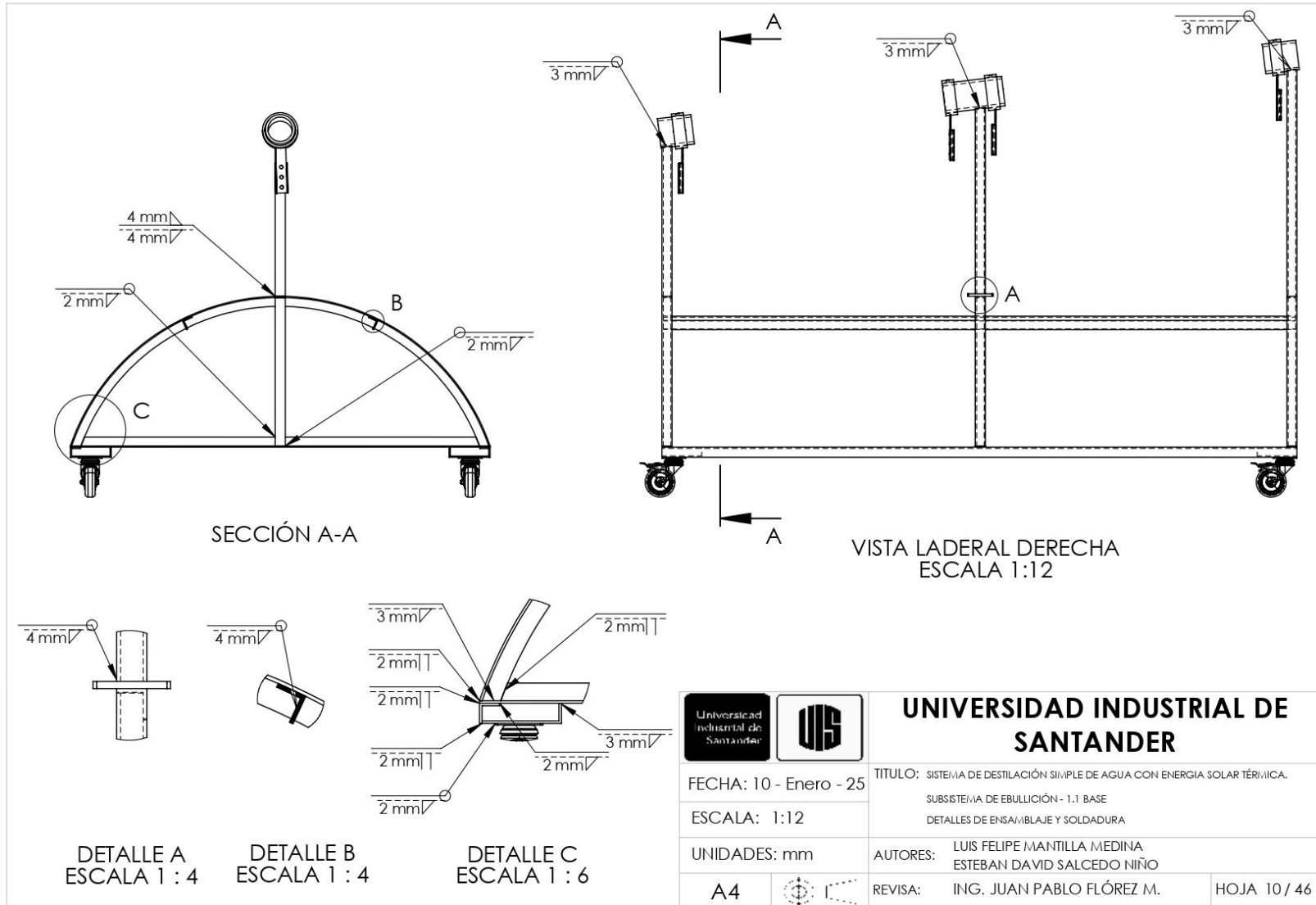


UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

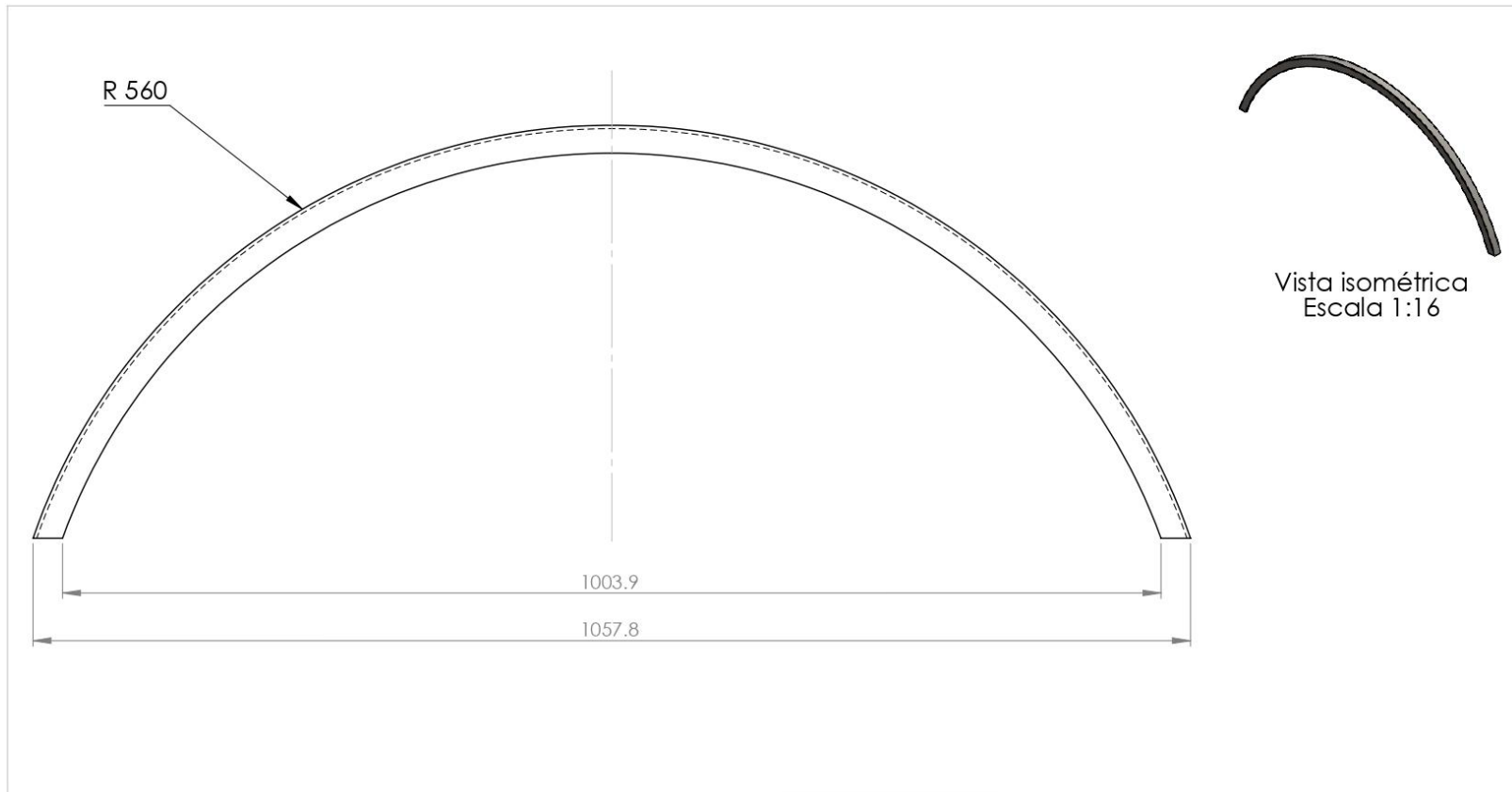
TÍTULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.
SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.1 BASE
VISTA EXPLOSIONADA

AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA
ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO

REVIS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M. HOJA 9 / 46



 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.	
ESCALA: 1:12		SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.1 BASE DETALLES DE ENSAMBLAJE Y SOLDADURA	
UNIDADES: mm		AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO	
A4		REVIS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	HOJA 10 / 46

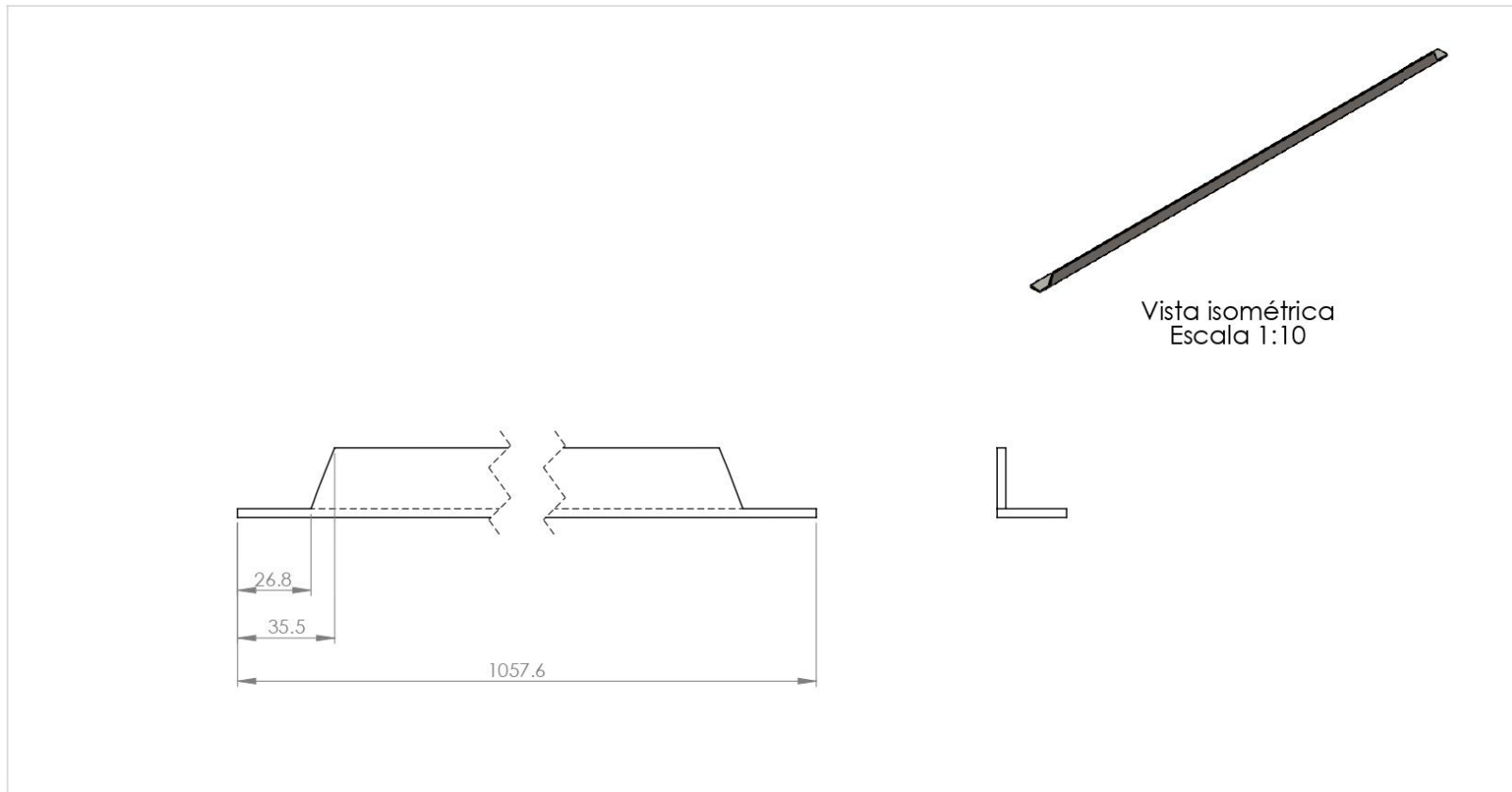


FABRICACIÓN

En dobladora dar forma de sección circular en frío, del diámetro especificado y recortar las puntas. Eliminar cantos vivos.

Perfil L de 1" - espesor 1/8"
 Longitud 1.39 m.
 Material: Acero ASTM A36

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.	
ESCALA: 1:5		SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.1.1 ARCO	
UNIDADES: mm		VISTA FRONTAL	
AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO		REVIS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	
A4		HOJA 11 / 46	



Vista isométrica
Escala 1:10

FABRICACIÓN

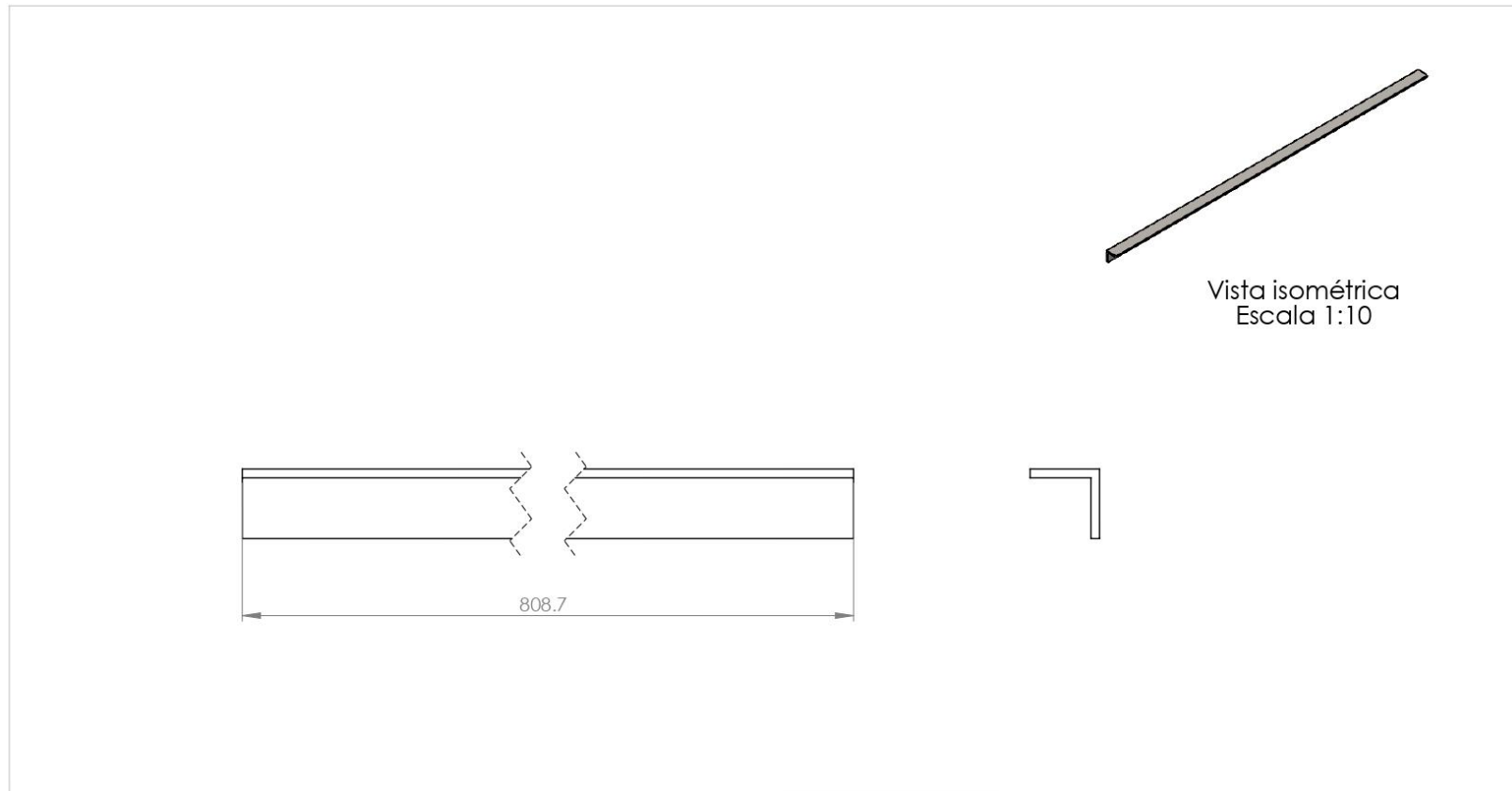
Realizar cortes a dimensiones indicadas.

Eliminar cantos vivos.

Perfil L de 1" - espesor 1/8"

Material: Acero ASTM A36

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.	
ESCALA: 1:2		SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.1.2 BASE DE ARCO	
UNIDADES: mm		AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO	
A4		REVIS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	HOJA12 / 46



FABRICACIÓN

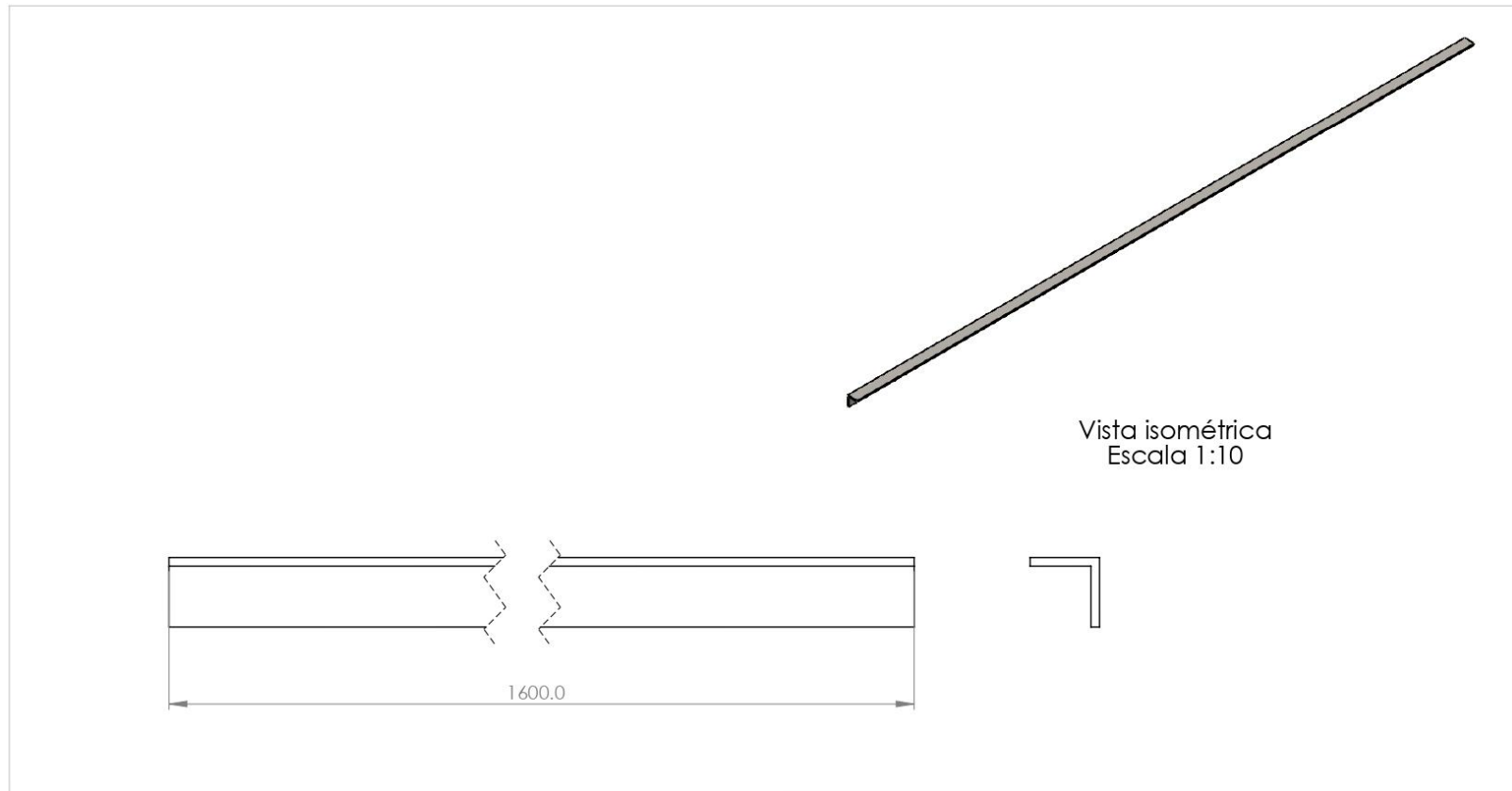
Realizar cortes a dimensiones indicadas.

Eliminar cantos vivos.

Perfil L de 1" - espesor 1/8"

Material: Acero ASTM A36

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.	
ESCALA: 1:2		SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.1.3 VIGA SUPERIOR	
UNIDADES: mm		VISTAS PRINCIPALES	
AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO		REVISAS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	
A4		HOJA 13 / 46	



Vista isométrica
Escala 1:10

FABRICACIÓN

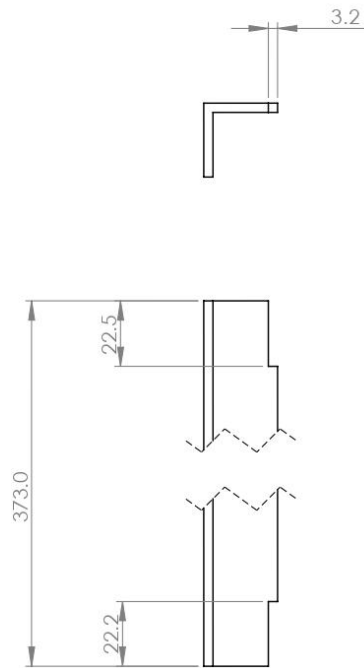
Realizar cortes a dimensiones indicadas.

Eliminar cantos vivos.

Perfil L de 1" - espesor 1/8"

Material: Acero ASTM A36

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TÍTULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA. SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.1.4 SOPORTE HORIZONTAL INFERIOR	
ESCALA: 1:2		VISTAS PRINCIPALES	
UNIDADES: mm		AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO	
A4		REVIS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	HOJA 14 / 46



Vista isométrica
Escala 1:5

FABRICACIÓN

Realizar cortes a dimensiones indicadas.

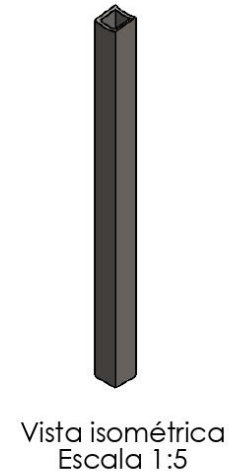
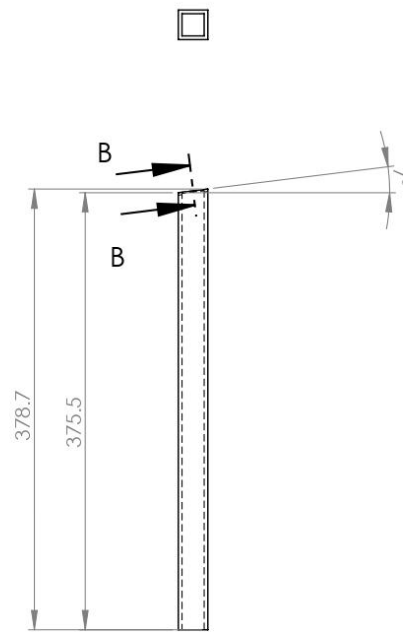
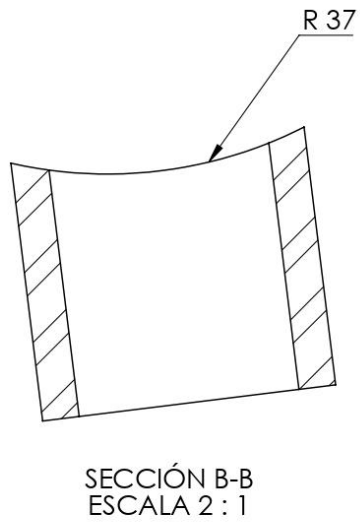
Eliminar cantos vivos.

Perfil L de 1" - espesor 1/8"

Material: Acero ASTM A36

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.	
ESCALA: 1:2		SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.1.5 Columna de arco	
UNIDADES: mm		VISTAS PRINCIPALES	
AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO		REVISAR: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	
A4		HOJA 15 / 46	

* Recorte realizado para encajar el soporte cilíndrico del foco (1.1.9 y 1.1.10)



FABRICACIÓN

Realizar cortes a dimensiones indicadas.

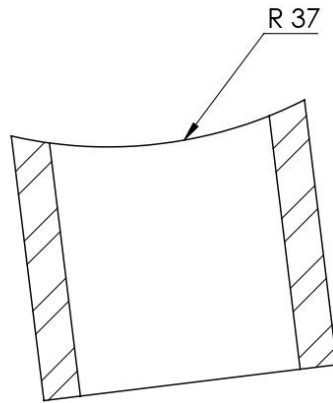
Eliminar cantos vivos.

Perfil cuadrado de 1" - espesor 1/8"

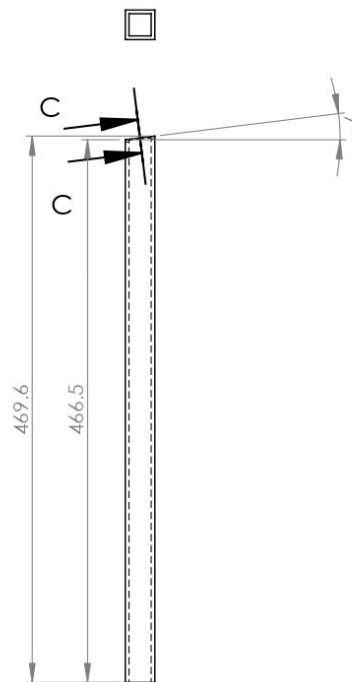
Material: Acero ASTM A36

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TÍTULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.	
ESCALA: 1:5		SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.1.6 Columna baja del tubo	
UNIDADES: mm		VISTAS PRINCIPALES	
AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO		REVISAR: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	
A4		HOJA 16 / 46	HOJA 16 / 46

* Recorte realizado para encajar el soporte cilíndrico del foco (1.1.9 y 1.1.10)



SECCIÓN C-C
ESCALA 2 : 1



Vista isométrica
Escala 1:10

FABRICACIÓN

Realizar cortes a dimensiones indicadas.

Eliminar cantos vivos.

Perfil cuadrado de 1" - espesor 1/8"

Material: Acero ASTM A36



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10 - Enero - 25

ESCALA: 1:5

UNIDADES: mm

A4



TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.

SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.1.7 Columna media del tubo

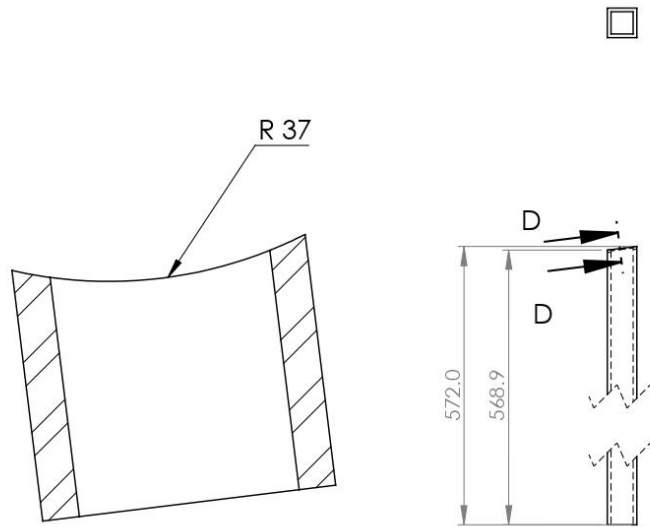
VISTAS PRINCIPALES

AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA
ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO

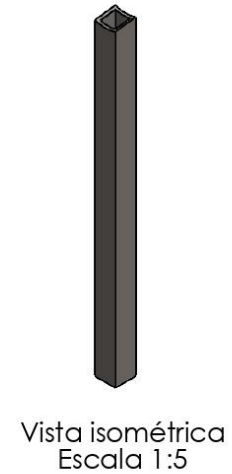
REVIS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.

HOJA17 / 46

* Recorte realizado para encajar el soporte cilindrico del foco (1.1.9 y 1.1.10)



SECCIÓN D-D
ESCALA 2 : 1



FABRICACIÓN

Realizar cortes a dimensiones indicadas.

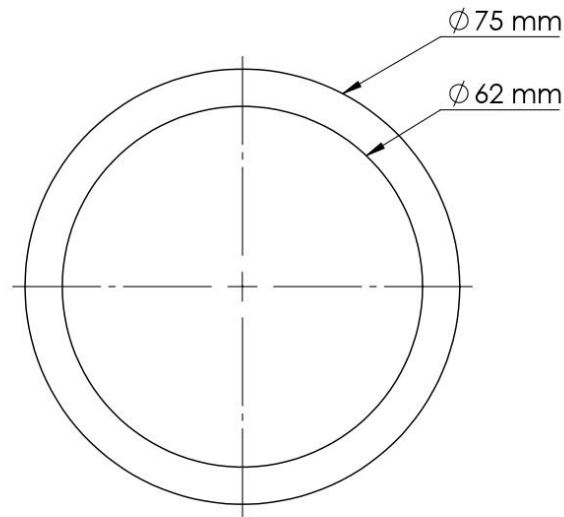
Eliminar cantos vivos.

Perfil cuadrado de 1" - espesor 1/8"

Material: Acero ASTM A36

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.	
ESCALA: 1:5		SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.1.8 Columna baja del tubo	
UNIDADES: mm		VISTAS PRINCIPALES	
AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO		REVISAS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	
A4		HOJA 18 / 46	HOJA 18 / 46

Nota. Largo de la pieza 85 mm



Vista isométrica
Escala 1:5

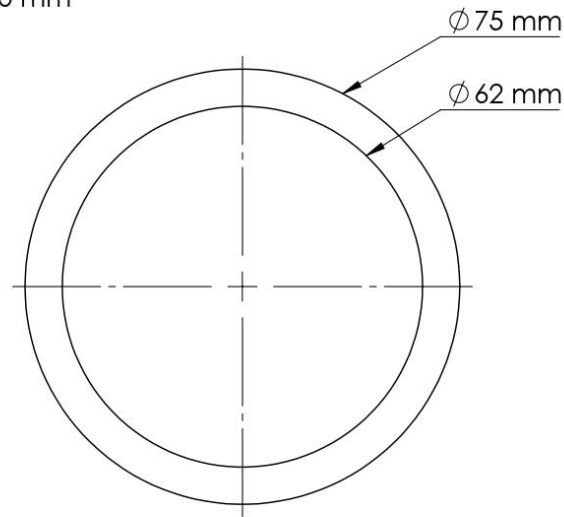
FABRICACIÓN

Eliminar cantos vivos.

Material: Acero AISI 304

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA. SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.1.9 Soporte cilindrico extremo del foco	
ESCALA: 1:1		VISTAS PRINCIPALES	
UNIDADES: mm		AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO	
A4		REVIS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	HOJA 19 / 46

Nota. Largo de la pieza 150 mm



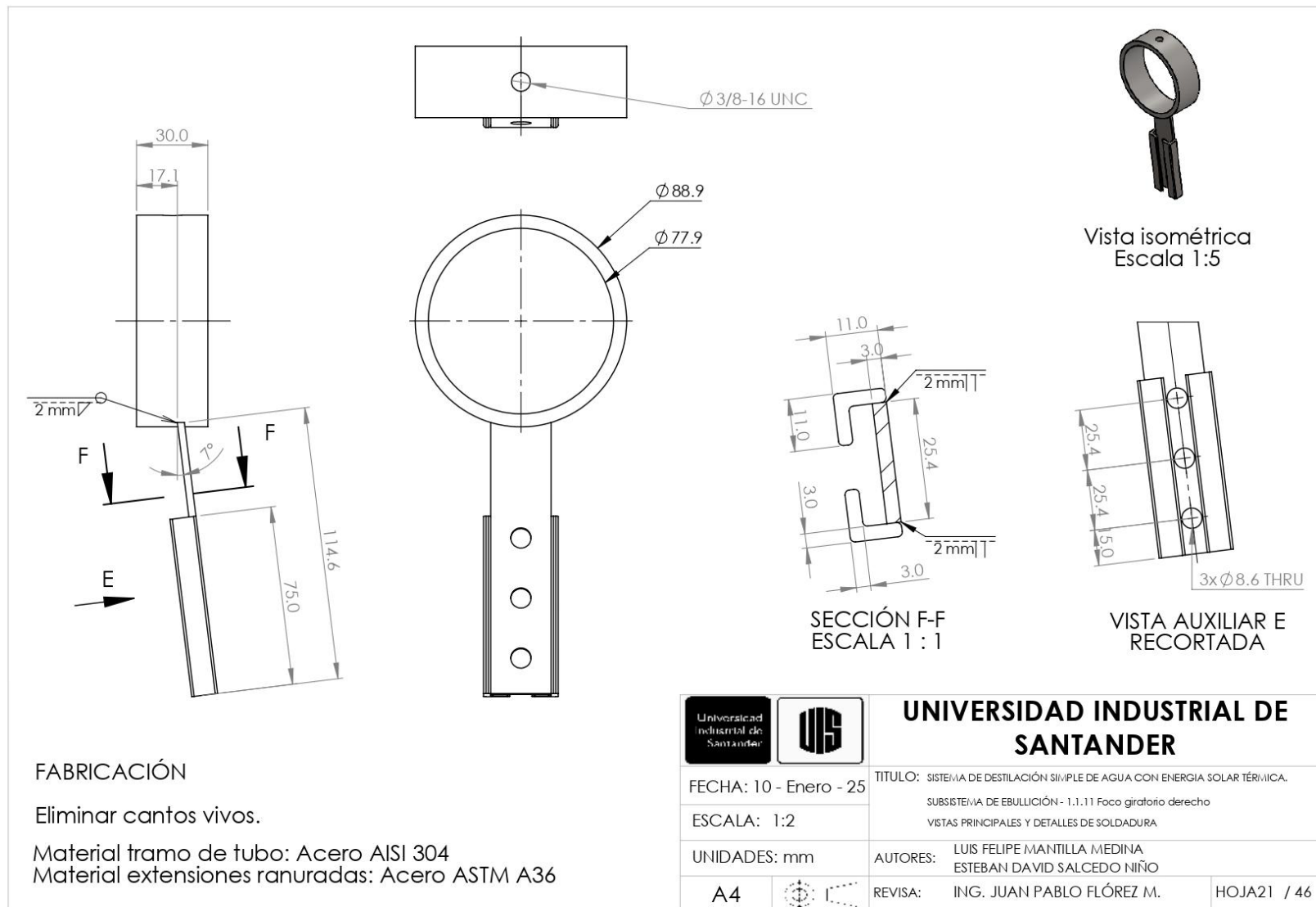
Vista isométrica
Escala 1:5

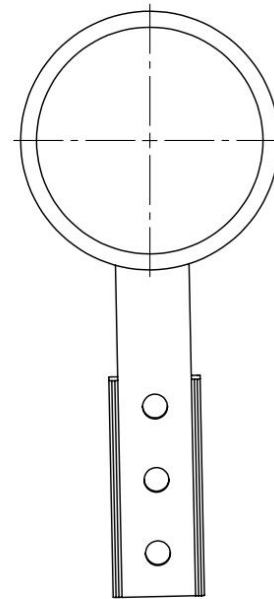
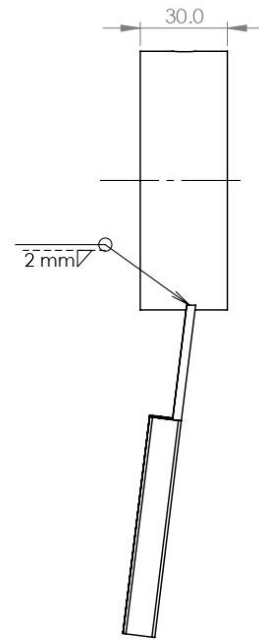
FABRICACIÓN

Eliminar cantos vivos.

Material: Acero AISI 304

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA. SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.1.10 Soporte cilindrico medio del foco	
ESCALA: 1:1		VISTAS PRINCIPALES	
UNIDADES: mm		AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO	
A4		REVIS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	HOJA20 / 46





Vista isométrica
Escala 1:5

FABRICACIÓN

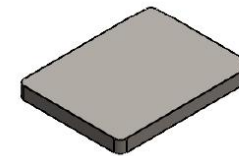
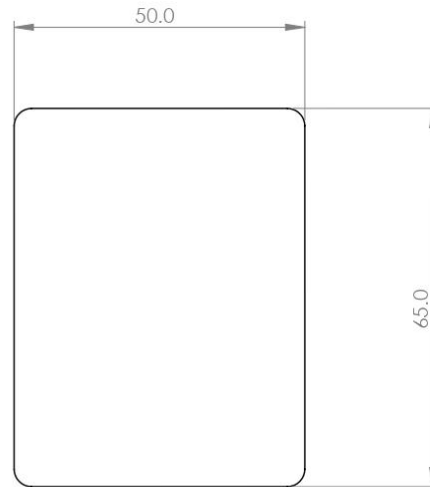
Las piezas tienen las mismas dimensiones que el foco giratorio derecho, sólo que el brazo ranurado está soldado hacia el lado izquierdo

Eliminar cantos vivos.

Material tramo de tubo: Acero AISI 304

Material extensiones ranuradas: Acero ASTM A36

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.	
ESCALA: 1:2		SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.1.12 Foco giratorio derecho	
UNIDADES: mm		VISTAS PRINCIPALES Y DETALLES DE SOLDADURA	
AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO		REVISAR: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	
A4		HOJA 22	46



Vista isométrica
Escala 1:2

FABRICACIÓN

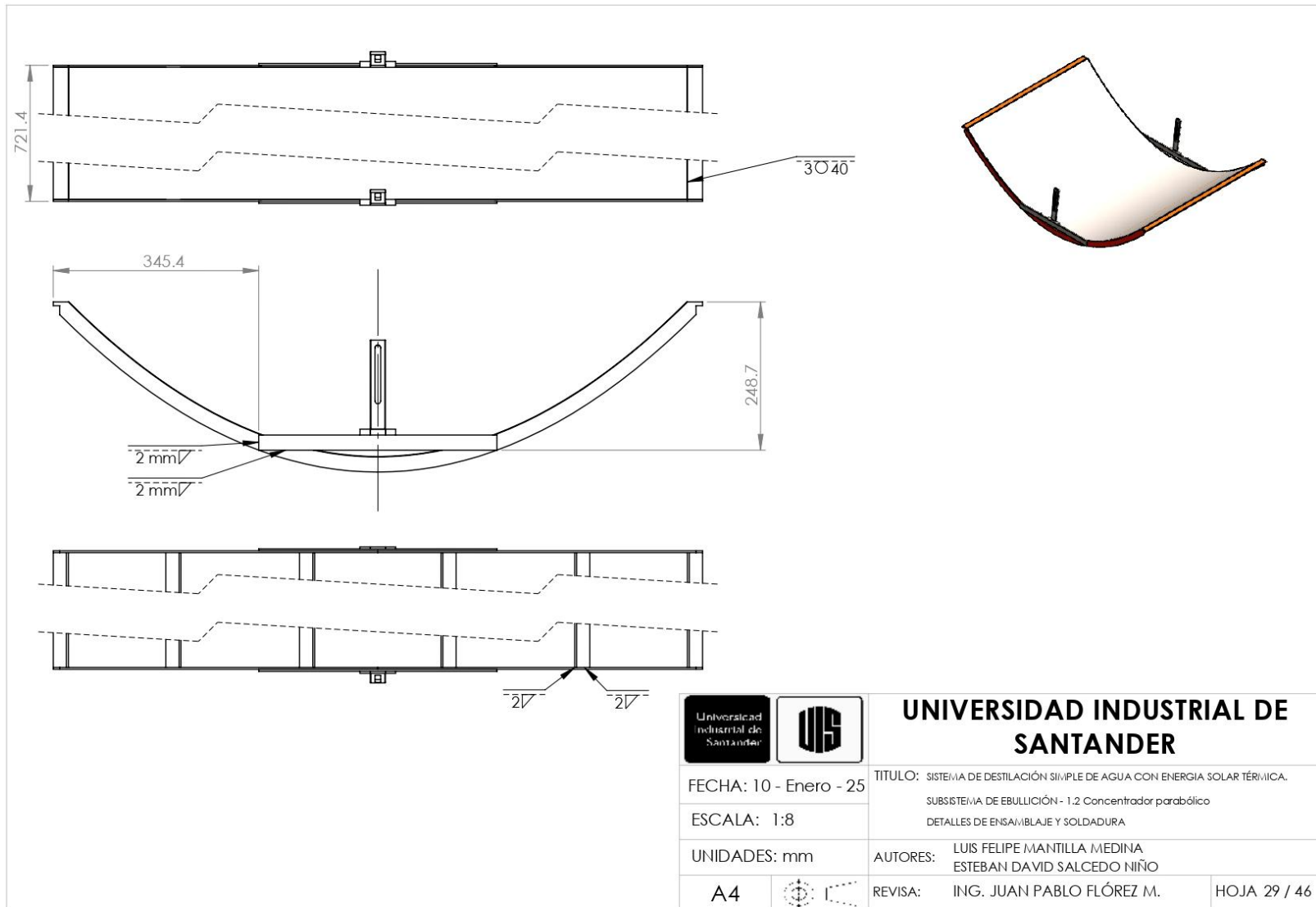
Realizar cortes a dimensiones indicadas.

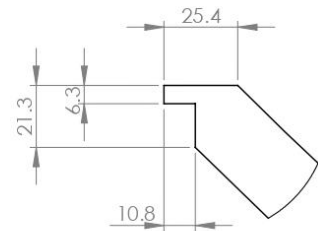
Eliminar cantos vivos.

Espesor de platina 6 mm.

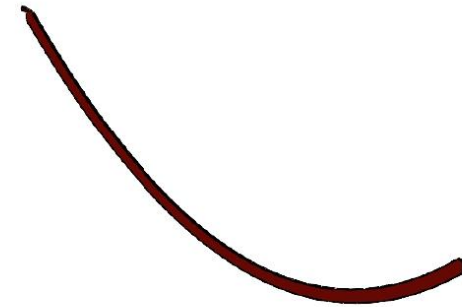
Material: Acero ASTM A36

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA. SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.1.13 Platina base de columna media VISTAS PRINCIPALES	
ESCALA: 1:1		AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO	
UNIDADES: mm		REVIS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	
A4		HOJA 23 / 46	

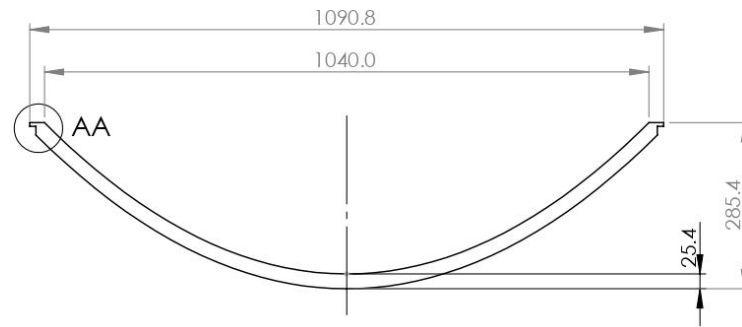




DETALLE AA
ESCALA 1 : 2



Vista isométrica
Escala 1:10

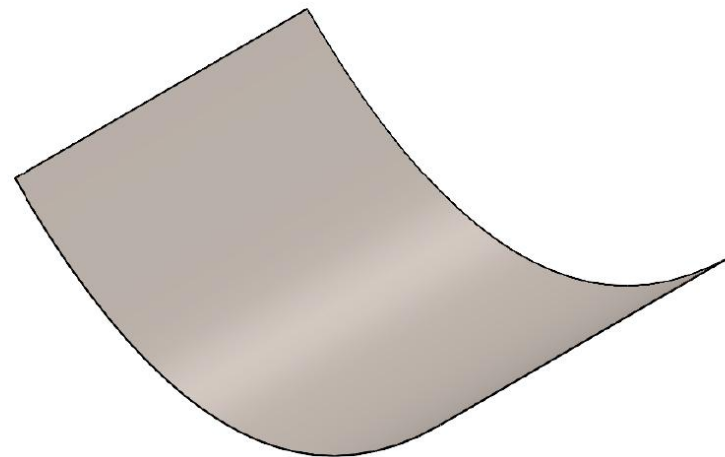
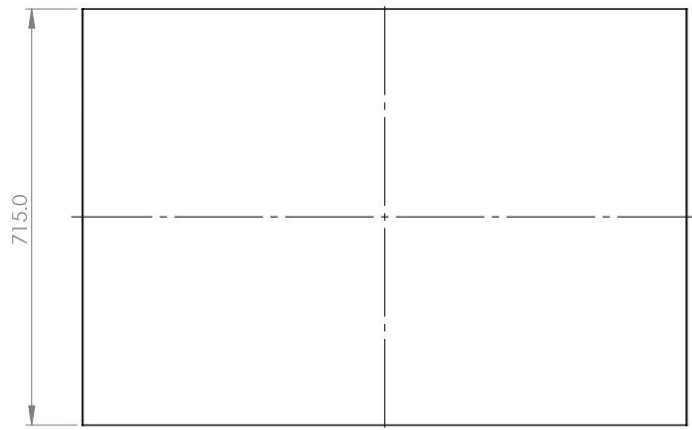


FABRICACIÓN

Corte láser de acuerdo con pieza .DXF

Material: Lámina de acero HR calibre 1/8"

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.	
ESCALA: 1:10		SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.2.1. Marco parabólico	
UNIDADES: mm		VISTAS PRINCIPALES	
AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO		REVIS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	
A4		HOJA 30 / 46	



Vista isométrica
Escala 1:10

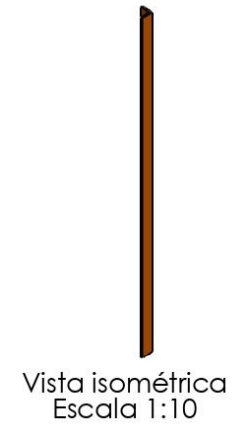
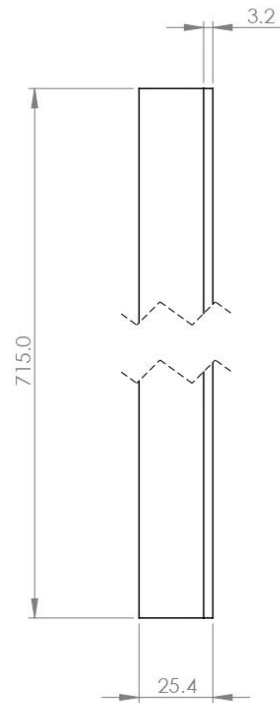
FABRICACIÓN

Pieza comercial. Su forma se adecúa al marco.

Se cortan dos piezas de área 1194 mm x 715 mm

Material: acero inoxidable austenítico A240 o A480.
Lámina con acabado brillante recocido.
Calibre 0.7 mm, 1219mm x 2438 mm.

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA. SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.1.2 Lámina reflectora	
ESCALA: 1:10		VISTAS PRINCIPALES	
UNIDADES: mm		AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO	
A4		REvisa: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	HOJA 31 / 46

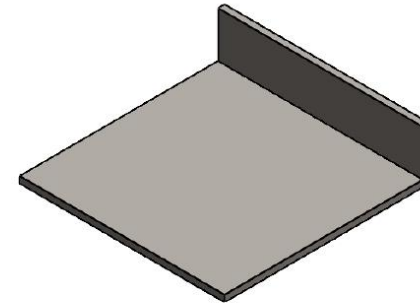
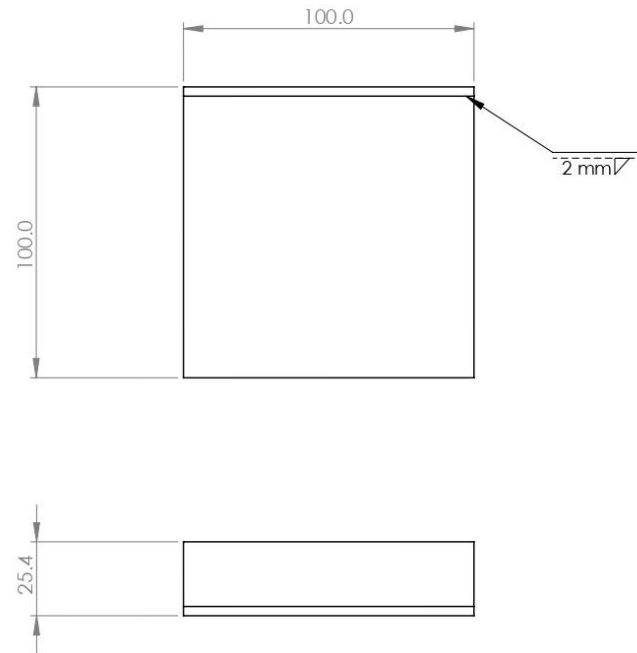


FABRICACIÓN

Piezas cortadas de acuerdo con el plano.
Perfil L de 1", calibre 1/8

Material: Acero ASTM A36

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA. SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.2.3 Soporte transversal	
ESCALA: 1:2		VISTAS PRINCIPALES	
UNIDADES: mm		AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO	
A4		REVIS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	HOJA 32 / 46



Vista isométrica
Escala 1:2

FABRICACIÓN

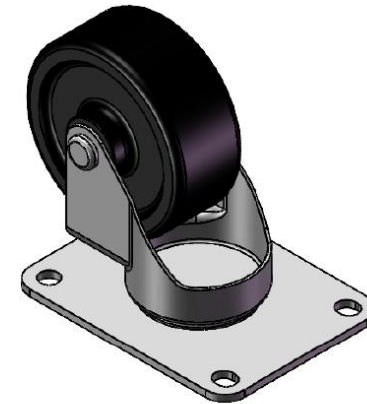
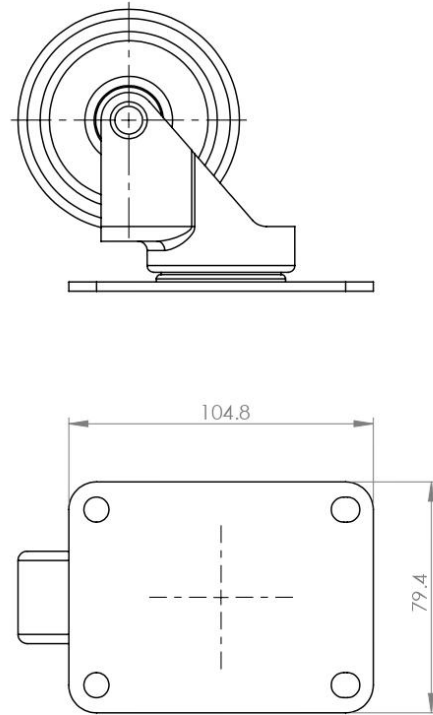
Realizar cortes a dimensiones indicadas.

Eliminar cantos vivos.

Espesor de piezas: 5/16"

Material: Acero ASTM A36

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TÍTULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.	
ESCALA: 1:2		SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.1.14 Platina de rueda	
UNIDADES: mm		VISTAS PRINCIPALES	
AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO		REVISAR: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	
A4		HOJA 24 / 46	REVISAR:



Vista isométrica
Escala 1:2

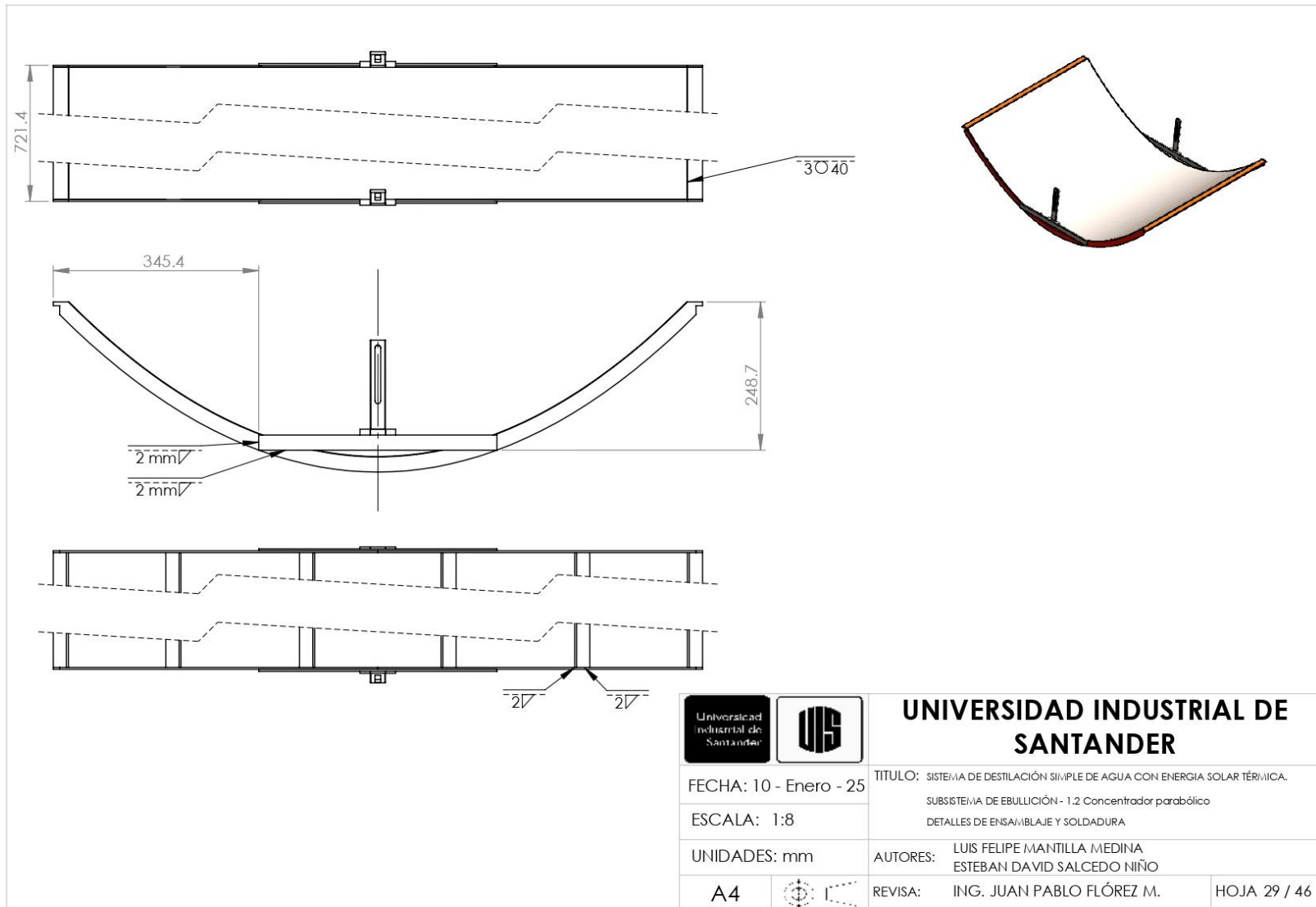
FABRICACIÓN

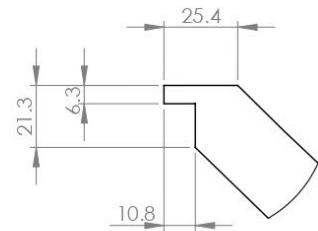
Pieza comercial

Rueda de 2" 1/2 con freno.

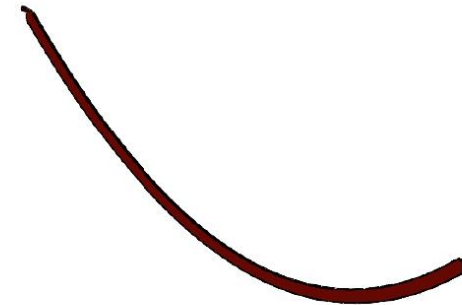
Material: Estructura en acero inoxidable y rueda PVC

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.	
ESCALA: 1:2		SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.1.15 Rueda	
UNIDADES: mm		VISTAS PRINCIPALES	
AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO		REVISAR: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	
A4		HOJA 25 / 46	

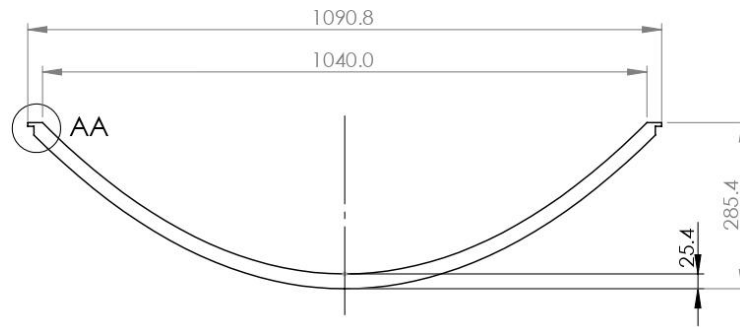




DETALLE AA
ESCALA 1 : 2



Vista isométrica
Escala 1:10

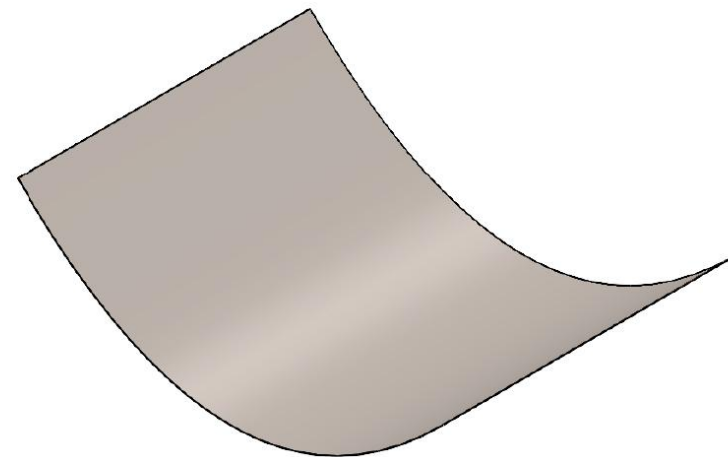
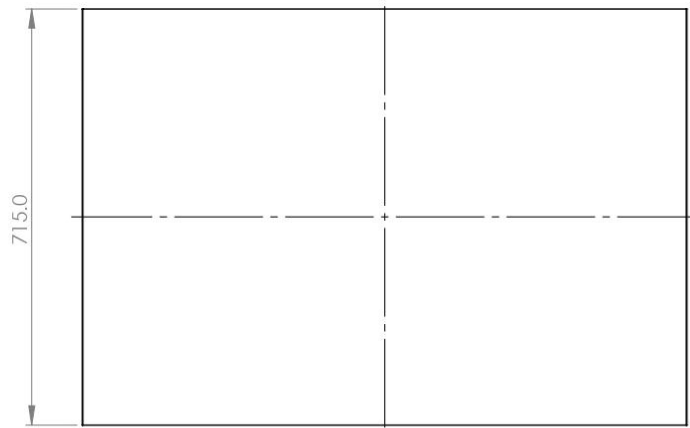


FABRICACIÓN

Corte láser de acuerdo con pieza .DXF

Material: Lámina de acero HR calibre 1/8"

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.	
ESCALA: 1:10		SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.2.1. Marco parabólico	
UNIDADES: mm		VISTAS PRINCIPALES	
A4		AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO	
		REvisa: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	HOJA 30 / 46



Vista isométrica
Escala 1:10

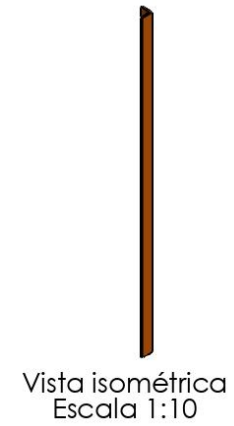
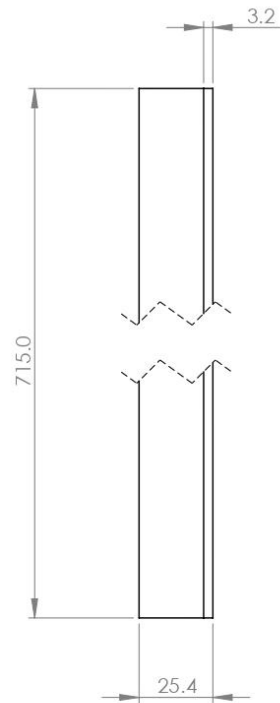
FABRICACIÓN

Pieza comercial. Su forma se adecúa al marco.

Se cortan dos piezas de área 1194 mm x 715 mm

Material: acero inoxidable austenítico A240 o A480.
Lámina con acabado brillante recocido.
Calibre 0.7 mm, 1219mm x 2438 mm.

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA. SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.1.2 Lámina reflectora	
ESCALA: 1:10		VISTAS PRINCIPALES	
UNIDADES: mm		AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO	
A4		REVIS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	HOJA 31 / 46

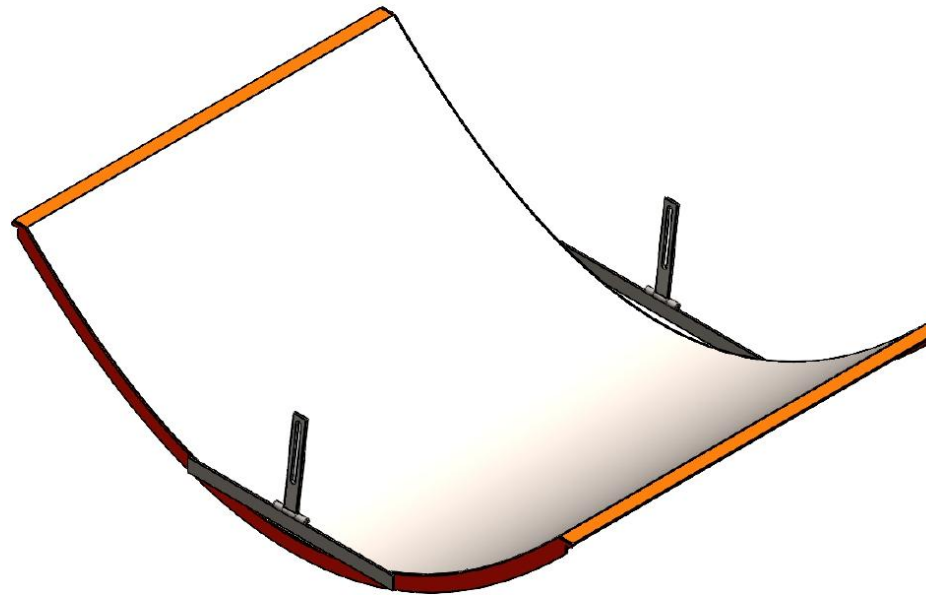


FABRICACIÓN

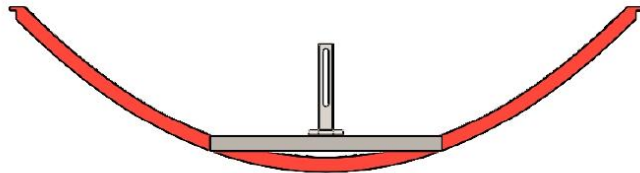
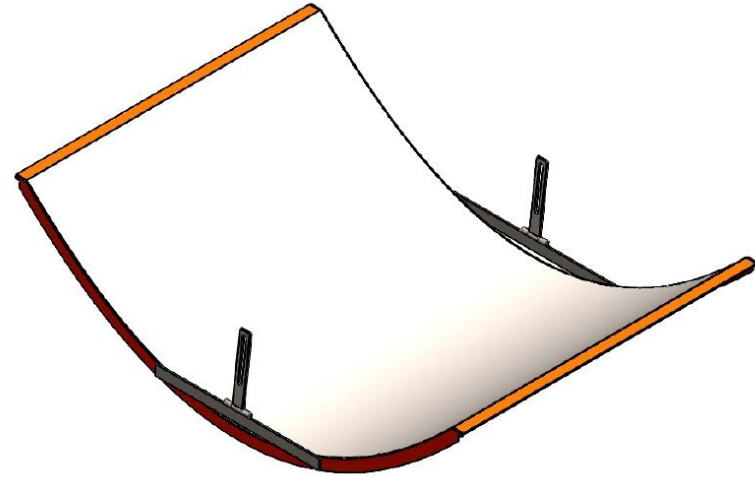
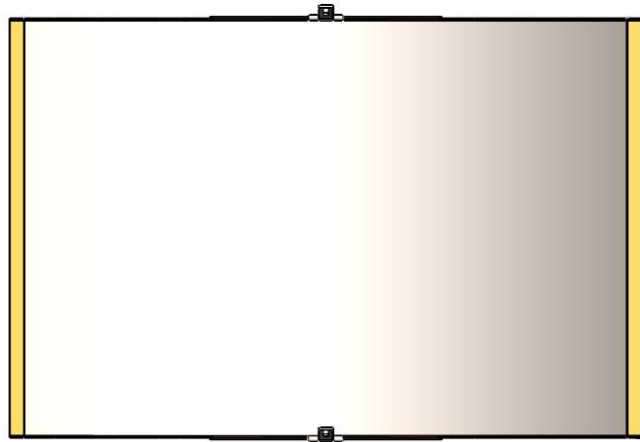
Piezas cortadas de acuerdo con el plano.
Perfil L de 1", calibre 1/8

Material: Acero ASTM A36

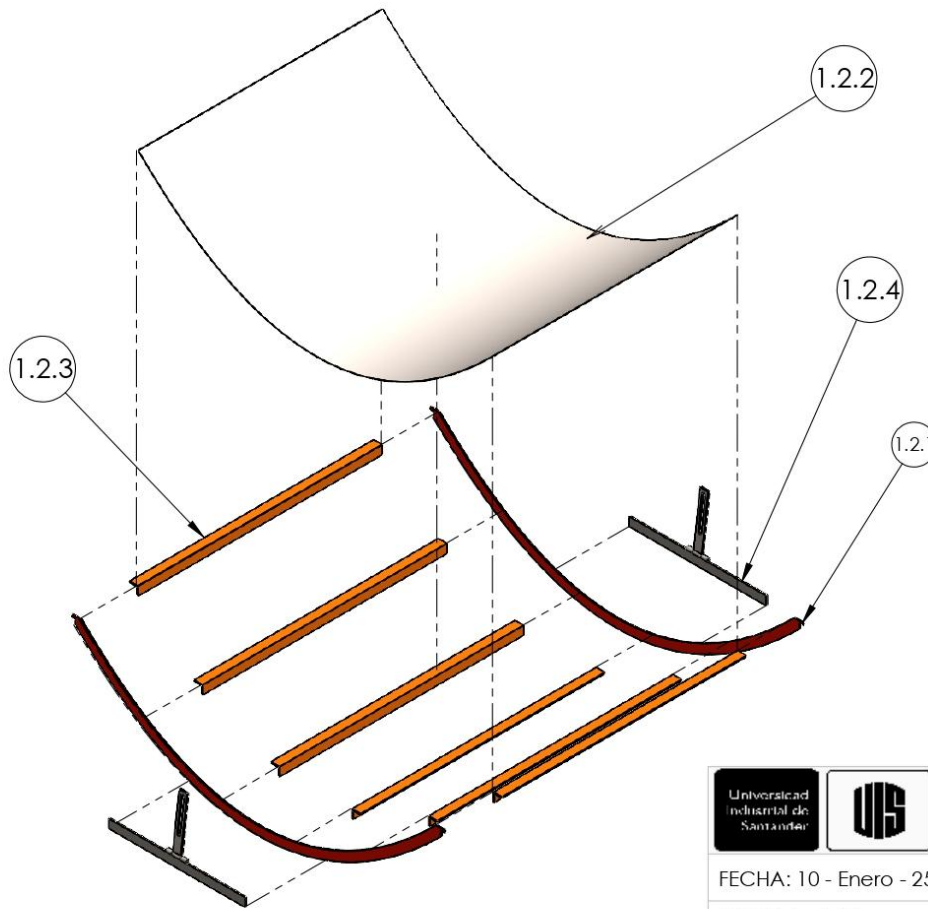
 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA. SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.2.3 Soporte transversal	
ESCALA: 1:2		VISTAS PRINCIPALES	
UNIDADES: mm		AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO	
A4		REVIS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	HOJA 32 / 46



		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25	TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.		
ESCALA: 1:8	SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.2 Concentrador parabólico		
UNIDADES: mm	VISTA ISOMÉTRICA		
A4		AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO	REVIS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.
		HOJA 26 / 46	



 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA. SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.2 Concentrador parabólico	
ESCALA: 1:10		VISTAS PRINCIPALES	
UNIDADES: mm		AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO	
A4		REvisa: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	HOJA 27 / 46



Cód.	Nombre	Cant.
1.2.1	Marco parabólico	2
1.2.2	Lámina reflectora	1
1.2.3	Soporte transversal	6
1.2.4	Brazo posicionador	2



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10 - Enero - 25

ESCALA: 1:12

UNIDADES: mm

A4

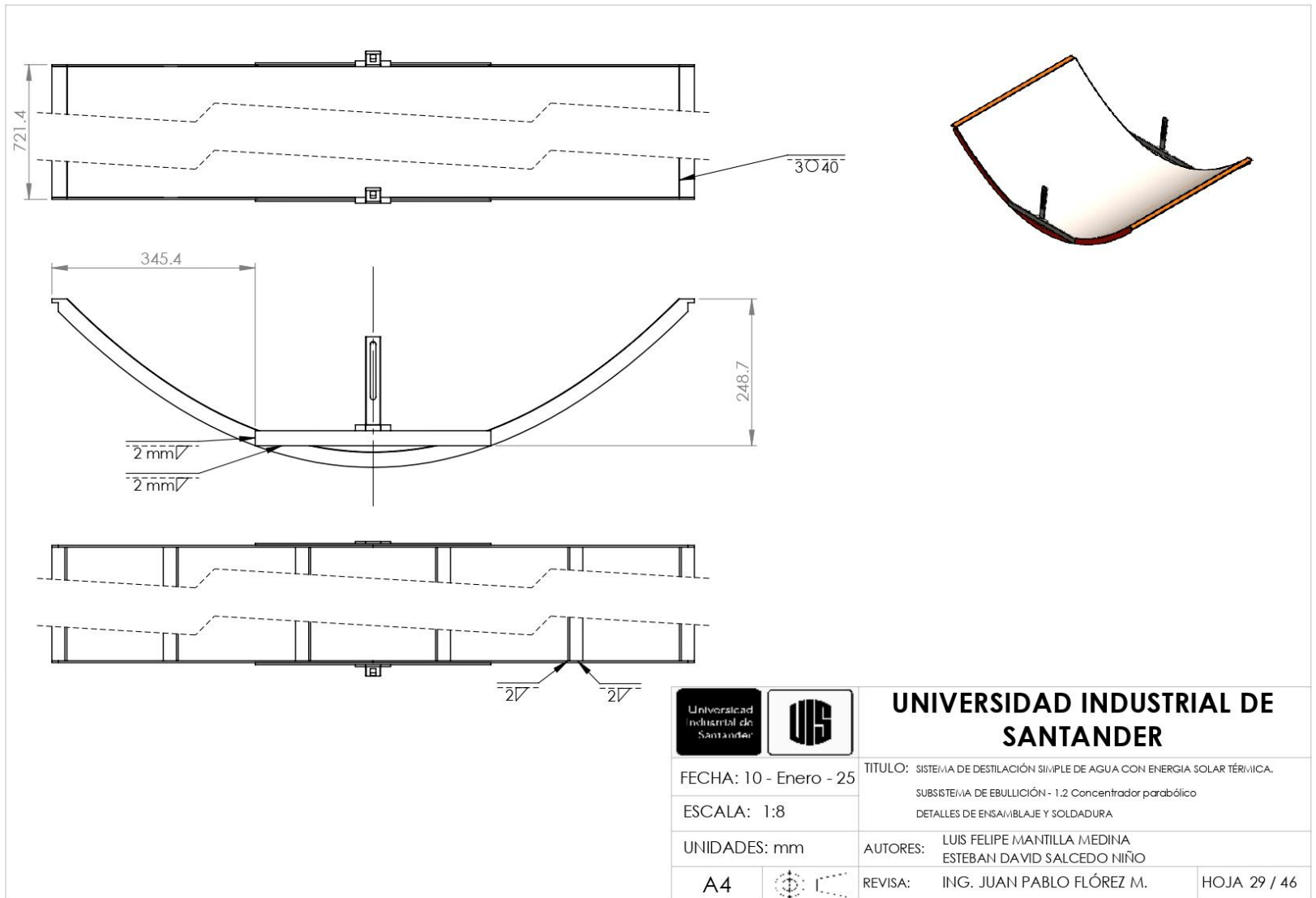


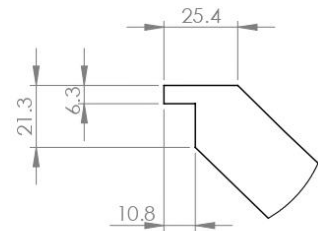
TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.
SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.2 Concentrador parabólico
VISTA EXPLOSIONADA

AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA
ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO

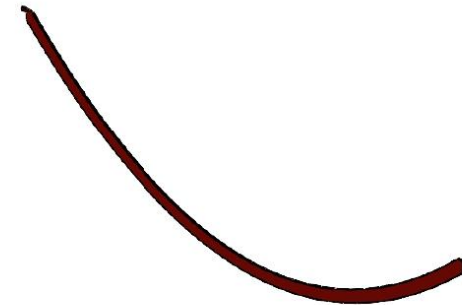
REVIS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.

HOJA 28 / 46

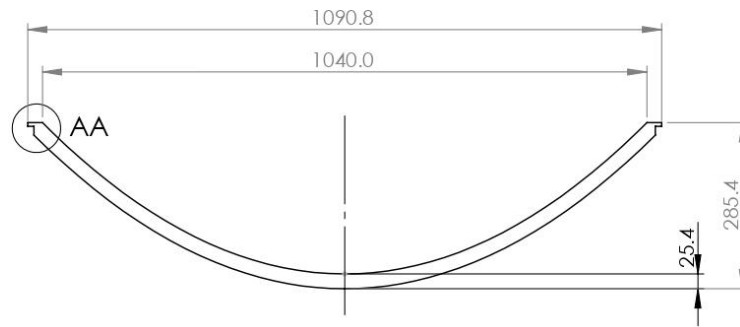




DETALLE AA
ESCALA 1 : 2



Vista isométrica
Escala 1:10

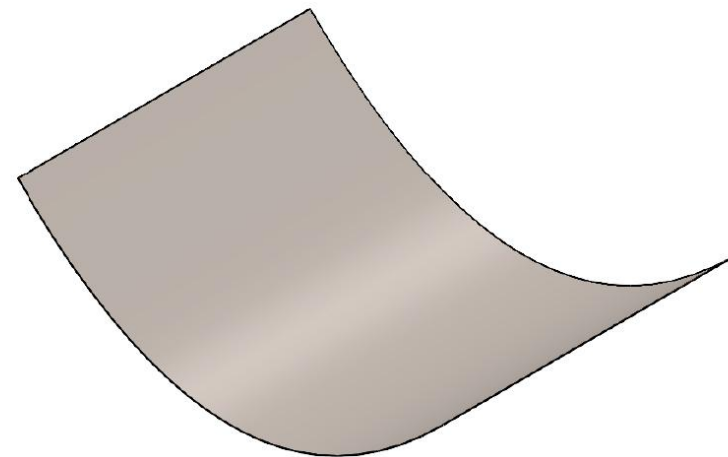
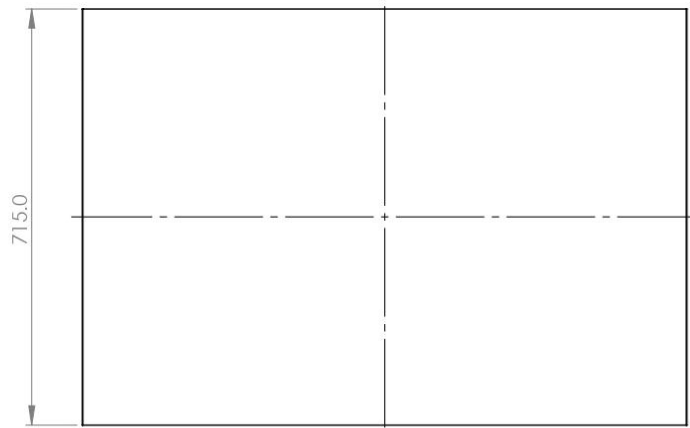


FABRICACIÓN

Corte láser de acuerdo con pieza .DXF

Material: Lámina de acero HR calibre 1/8"

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.	
ESCALA: 1:10		SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.2.1. Marco parabólico	
UNIDADES: mm		VISTAS PRINCIPALES	
AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO		REVISAS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	
A4		HOJA 30 / 46	



Vista isométrica
Escala 1:10

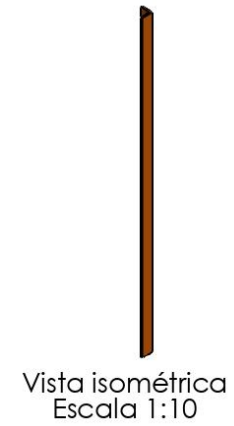
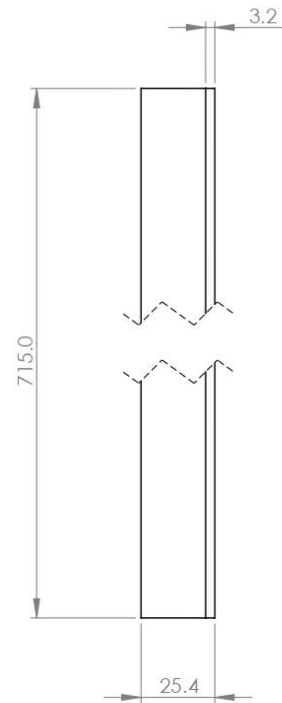
FABRICACIÓN

Pieza comercial. Su forma se adecúa al marco.

Se cortan dos piezas de área 1194 mm x 715 mm

Material: acero inoxidable austenítico A240 o A480.
Lámina con acabado brillante recocido.
Calibre 0.7 mm, 1219mm x 2438 mm.

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA. SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.1.2 Lámina reflectora	
ESCALA: 1:10		VISTAS PRINCIPALES	
UNIDADES: mm		AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO	
A4		REvisa: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	HOJA 31 / 46

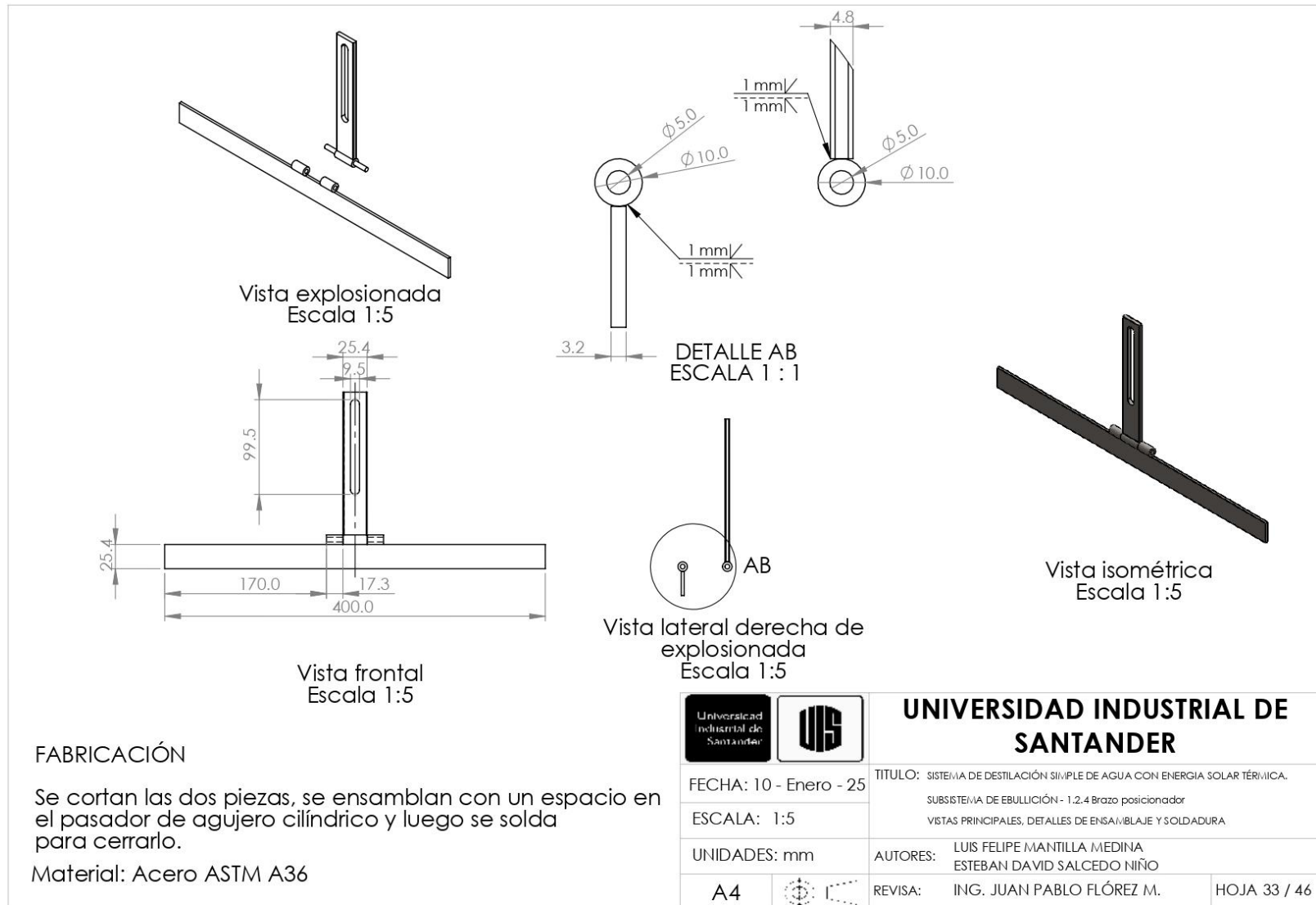


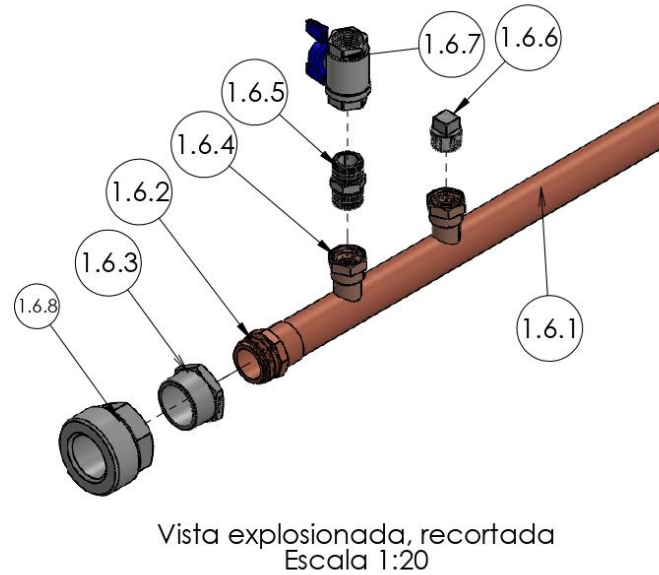
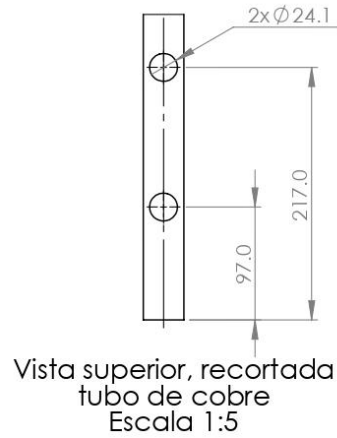
FABRICACIÓN

Piezas cortadas de acuerdo con el plano.
Perfil L de 1", calibre 1/8

Material: Acero ASTM A36

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA. SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.2.3 Soporte transversal	
ESCALA: 1:2		VISTAS PRINCIPALES	
UNIDADES: mm		AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO	
A4		REVIS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	HOJA 32 / 46





Cód.	Nombre	Cant.
1.6.1	Tubo de cobre \varnothing nominal 1" 1/4 x 2 m	1
1.6.2	Adaptador macho 1" 1/4 para soldar, en cobre	1
1.6.3	Reductor 1" 1/2 MNPT a 1" 1/4 FNPT en acero	1
1.6.4	Adaptador hembra 3/4" para soldar, en cobre.	2
1.6.5	Niple macho-macho 3/4" NPT en acero	1
1.6.6	Tapa roscada 3/4" MNPT en acero	1
1.6.7	Válvula bola 3/4" FNPT, con agarre en T, para gas, acero inoxidable	1
1.6.8	Pieza macho de unión universal 1" 1/2 en acero,	1

FABRICACIÓN

Se deja un extremo del tubo de cobre abierto donde se solda con soplete el adaptador macho 1" 1/4. El extremo opuesto se debe dejar tapado.



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10 - Enero - 25

ESCALA: 1:5

UNIDADES: mm

A4



TÍTULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.

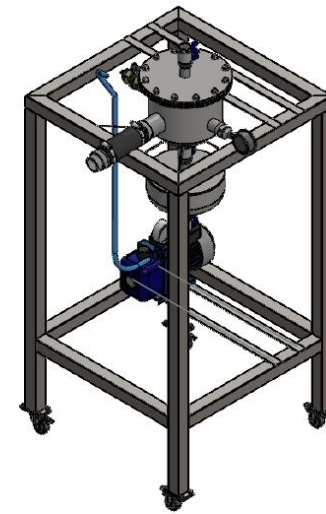
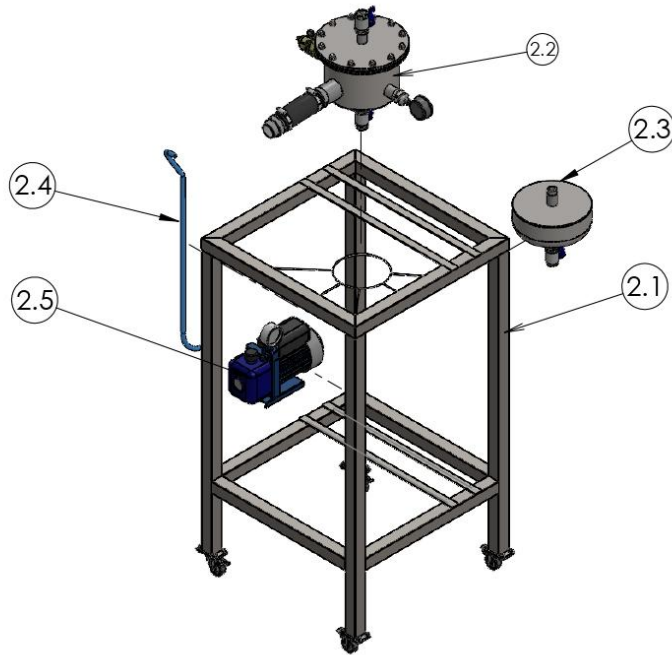
SUBSISTEMA DE EBULLICIÓN - 1.6 Tubo de ebullición

VISTA ISOMÉTRICA Y EXPLOSIONADA

AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA
ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO

REVISAR: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.

HOJA34 / 46



Cód.	Nombre	Cant.
2.1	Mesa	1
2.2	Tanque de condensación	1
2.3	Tanque de recolección	1
2.4	Manguera de vacío	1
2.5	Bomba de vacío modelo VP115N, 2 CFM 1 Etapa	1



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10 - Enero - 25

ESCALA: 1:16

UNIDADES: mm

A4



TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.

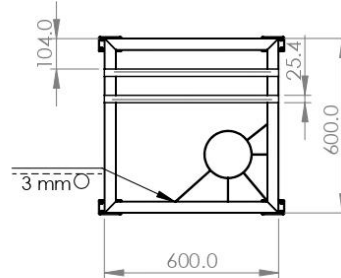
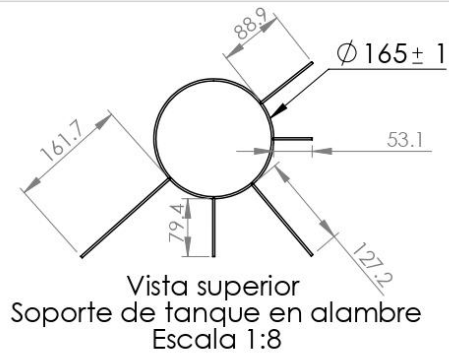
2. SUBSISTEMA DE CONDENSACIÓN

VISTA EXPLOSIONADA ISOMÉTRICA

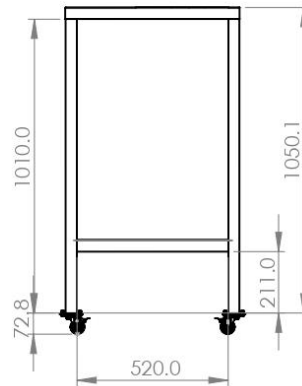
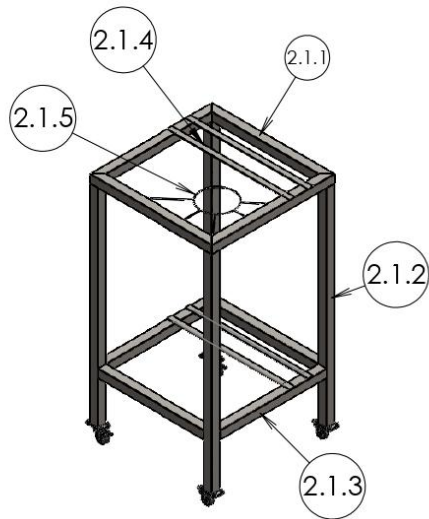
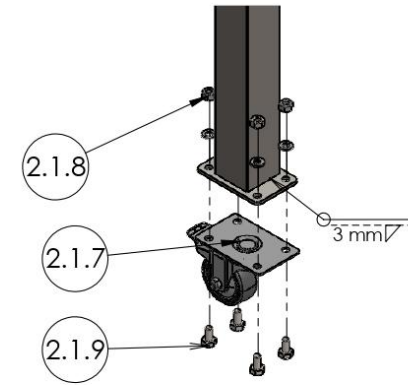
AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA
ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO

REVIS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.

HOJA 35 / 46



Nota. El soporte de tanque (2.1.7) se fabrica en la mesa con el objetivo de adecuar las medidas correctas a los brazos.



Cód.	Nombre	Cant.
2.1.1	Perfil cuadrado 40 x 40 mm acero A36 - long 60 cm	4
2.1.2	Perfil cuadrado 40 x 40 mm acero A36 - long 1.01 m	4
2.1.3	Perfil cuadrado 40 x 40 mm acero A36 - long 52 cm	4
2.1.4	Platina 1", calibre 1/8", long 60 cm	4
2.1.5	Soporte de tanque en alambre 3 mm	1
2.1.6	Rueda Ø2" en caucho	4
2.1.7	Platina para rueda de mesa (los agujeros y tamaño son dependientes de la rueda)	4
2.1.8	Tornillo hexagonal 1/4" x 1/2" acero inoxidable	16
2.1.9	Tuerca 1/4" ASME B18.2.2 acero inoxidable	16
2.1.10	Wasa 1/4" acero inoxidable	16



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10 - Enero - 25

ESCALA: 1:16

UNIDADES: mm

A4



TÍTULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.

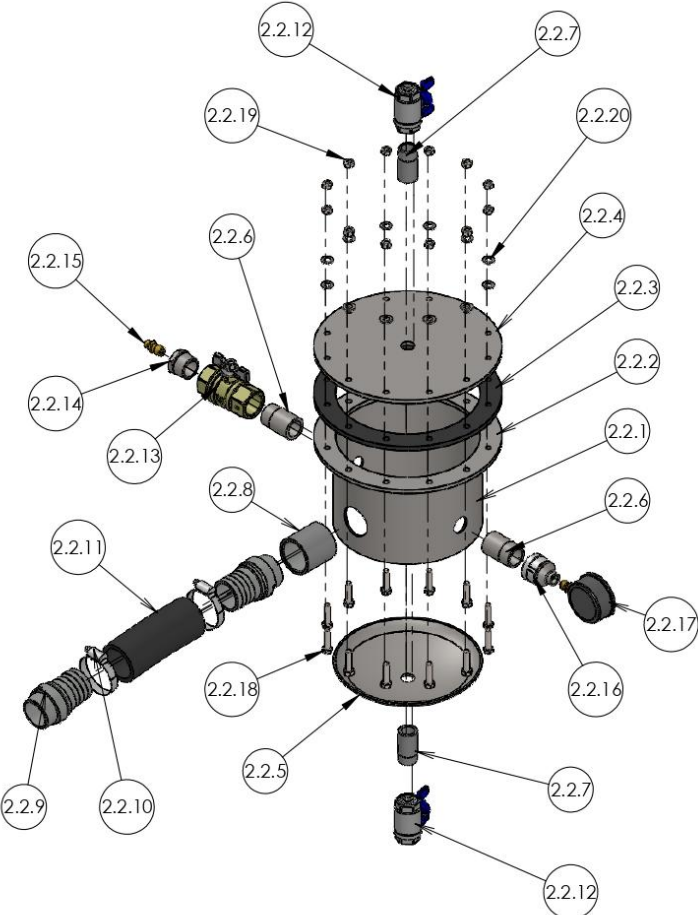
SUBSISTEMA DE CONDENSACIÓN - 2.1. Mesa

DETALLES DE ENSAMBLAJE Y SOLDADURA

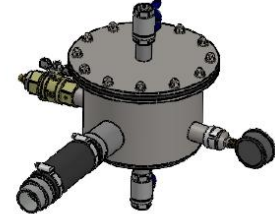
AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA
ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO

REVISIA: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.

HOJA 36/ 46





Vista explosionada
Escala 1:8




Vista isométrica
Escala 1:10

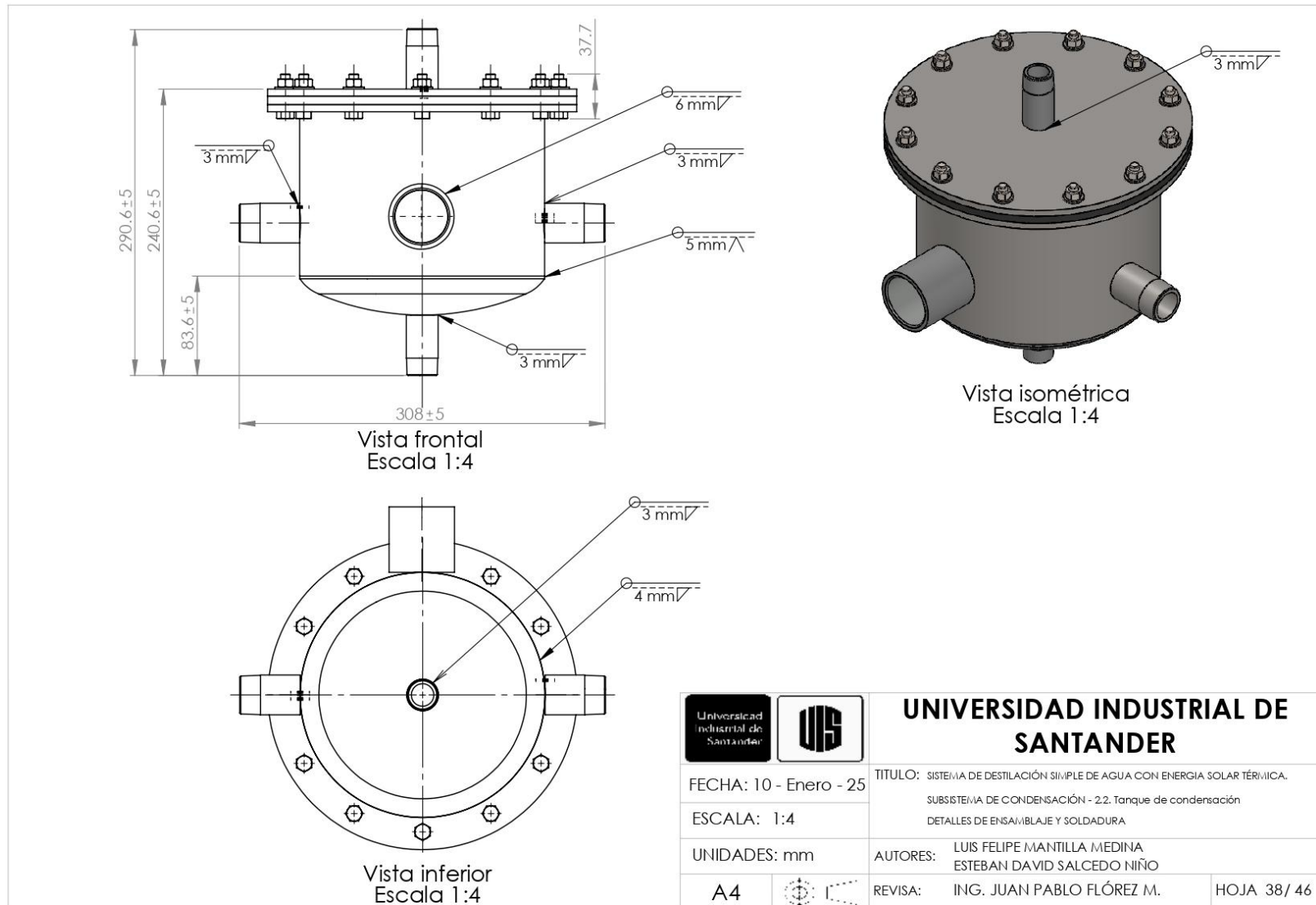
Cód.	Nombre	Cant.
2.2.1	Cuerpo del tanque acero AISI 304	1
2.2.2	Brida, acero AISI 304	1
2.2.3	Sello Neopreno	1
2.2.4	Tapa superior, acero AISI 304	1
2.2.5	Tapa inferior CAP 8" recortado, acero AISI 304	1
2.2.6	Adaptador para soldar 1" MNPT en acero inoxidable	2
2.2.7	Adaptador para soldar 3/4" MNPT en acero inoxidable	2
2.2.8	Adaptador para soldar 1" 1/2 FNPT en acero inoxidable	1
2.2.9	Boquilla 1" 1/2 MNPT para manguera, acero galvanizado	2
2.2.10	Abrazadera industrial Acero al Carbón T508 52-57 mm	2
2.2.11	Manguera oil press 20 bar Ø 1" 1/2 x 14 cm, caucho	1
2.2.12	Válvula bola agarre T, 3/4" FNPT, acero inoxidable	2
2.2.13	Válvula bola agarre T, 1" NPT, acero inoxidable	1
2.2.14	Reductor 1" MNPT a 1/4" FNPT, acero inoxidable	1
2.2.15	Adaptador macho-macho SAE 1/4" a NPT 1/4", en latón	1
2.2.16	Reductor 1" FNPT a 1/4" FNPT, acero inoxidable	1
2.2.17	Vacuómetro seco WINTERS 1 1/2", 1/4" NPT. Doble escala bar/mmHg	1
2.2.18	Tornillo hexagonal 5/16" x 1" 1/4, acero inoxidable	12
2.2.19	Tuerca 5/16", ASME B18.2.2 acero inoxidable	12
2.2.20	Arandela plana 5/16" acero inoxidable	12



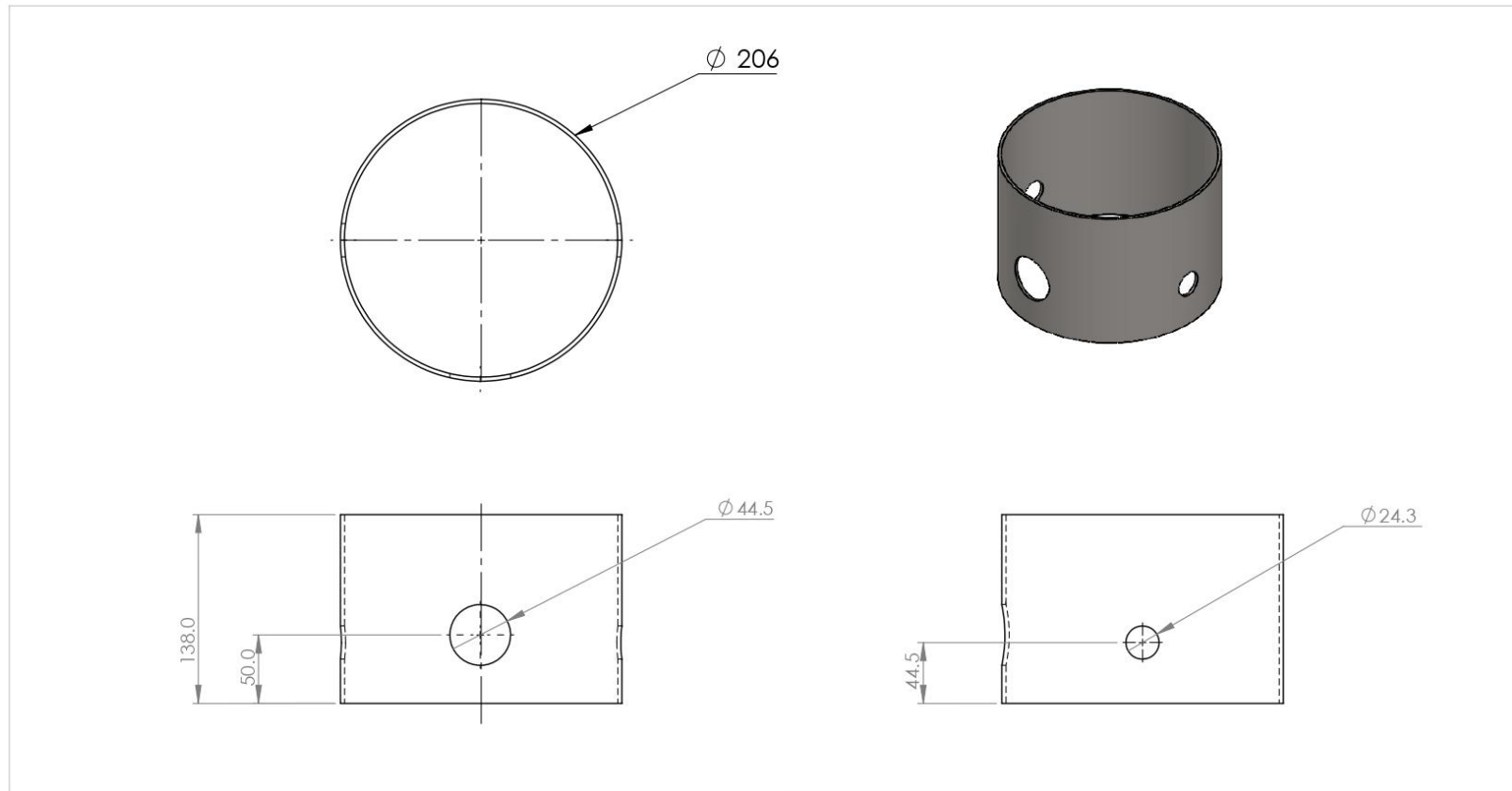


UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 10 - Enero - 25	TÍTULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGÍA SOLAR TÉRMICA.		
ESCALA: 1:8	SUBSISTEMA DE CONDENSACIÓN - 2.2. Tanque de condensación		
UNIDADES: mm	VISTA EXPLOSIONADA		
	AUTORES:	LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO	
A4		REVISIA:	ING. JUAN PABLO FLÓREZ M. HOJA 37/ 46



 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.	
ESCALA: 1:4		SUBSISTEMA DE CONDENSACIÓN - 2.2. Tanque de condensación	
UNIDADES: mm		DETALLES DE ENSAMBLAJE Y SOLDADURA	
AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO		REVIS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	
A4		HOJA 38 / 46	

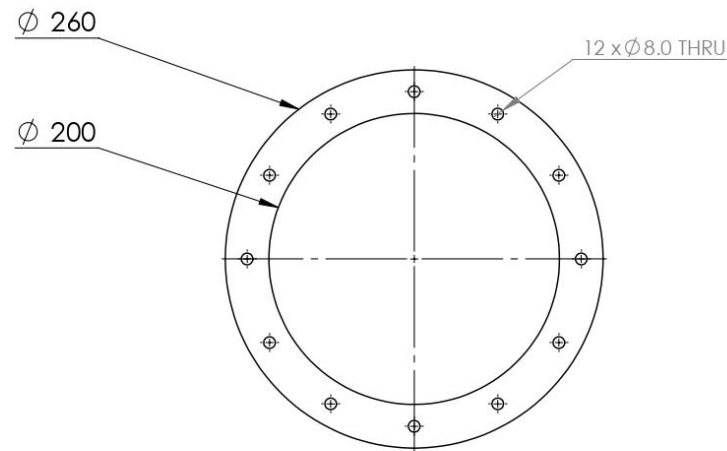


FABRICACIÓN

Cuerpo de una sola pared.
Lámina de 3 mm doblada en frío.

Material: acero AISI 304

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA. SUBSISTEMA DE CONDENSACIÓN - 2.2.1 Cuerpo de tanque	
ESCALA: 1:4		VISTAS PRINCIPALES	
UNIDADES: mm		AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO	
A4		REVIS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	HOJA 39 / 46

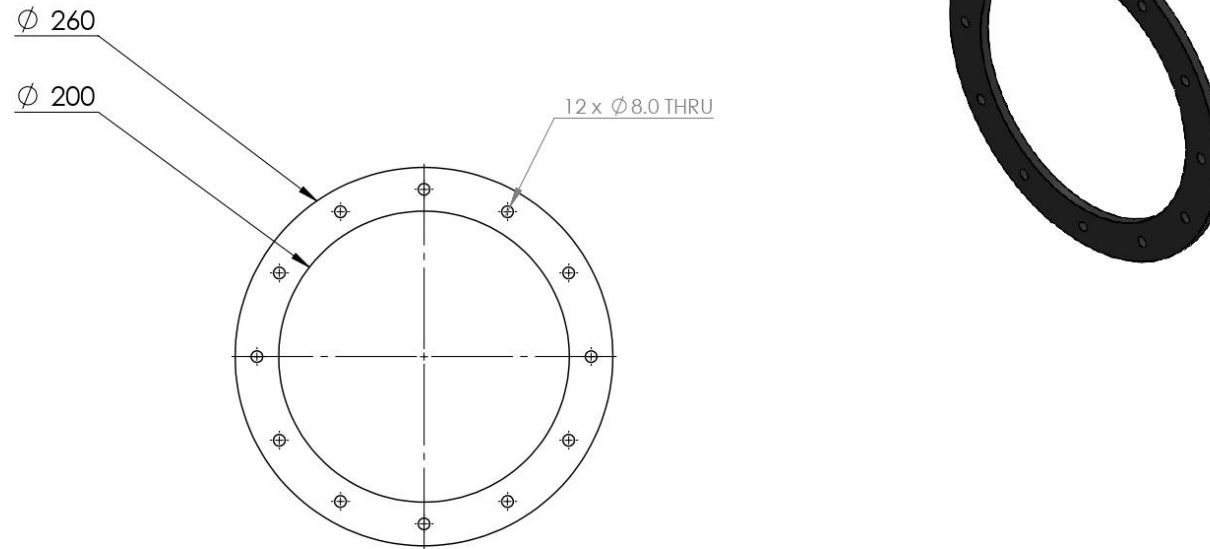


FABRICACIÓN

Corte láser a lámina de calibre 6 mm.

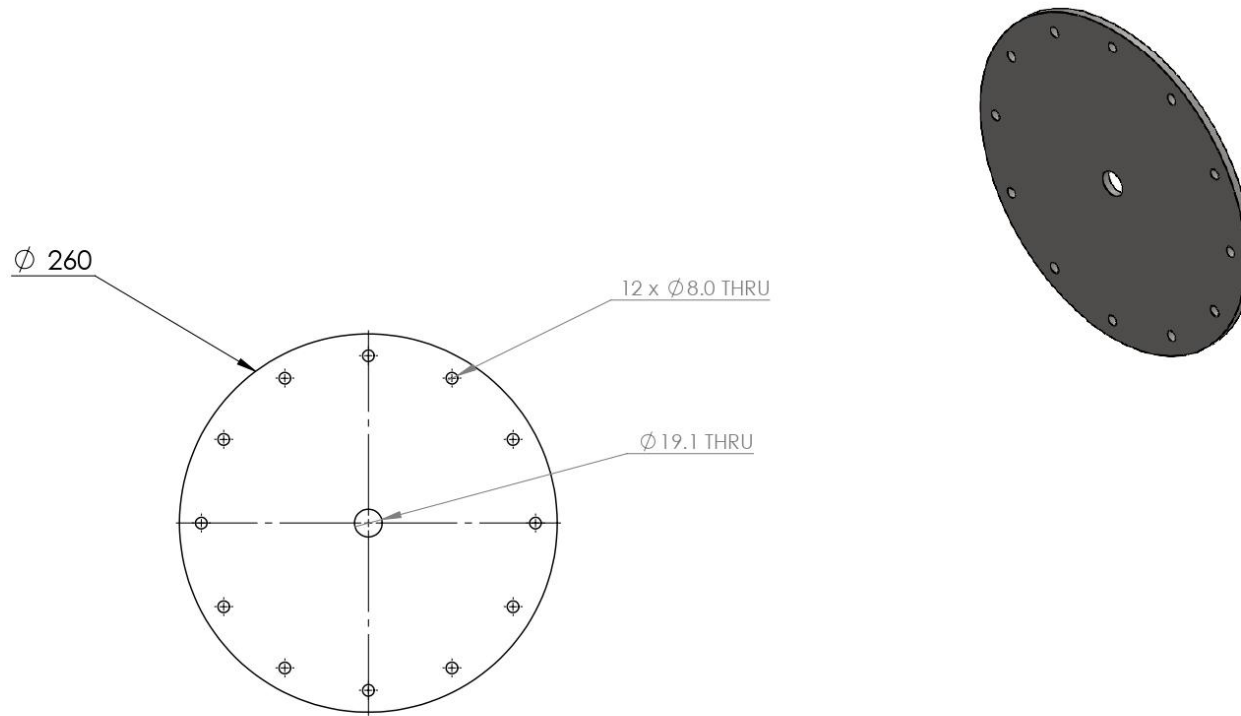
Material: acero AISI 304

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.	
ESCALA: 1:4		SUBSISTEMA DE CONDENSACIÓN - 2.2.2 Brida	
UNIDADES: mm		AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO	
A4		REvisa: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	HOJA 40/46



FABRICACIÓN
 Calibre 7 mm.
 Material: neopreno

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA. SUBSISTEMA DE CONDENSACIÓN - 2.2.3 Sello	
ESCALA: 1:4		VISTAS PRINCIPALES	
UNIDADES: mm		AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO	
A4		REvisa: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	HOJA 41 / 46

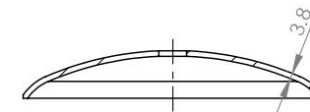
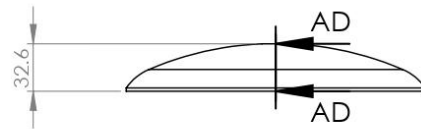
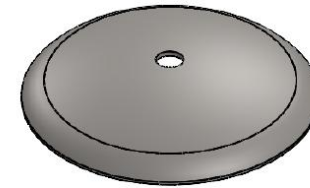
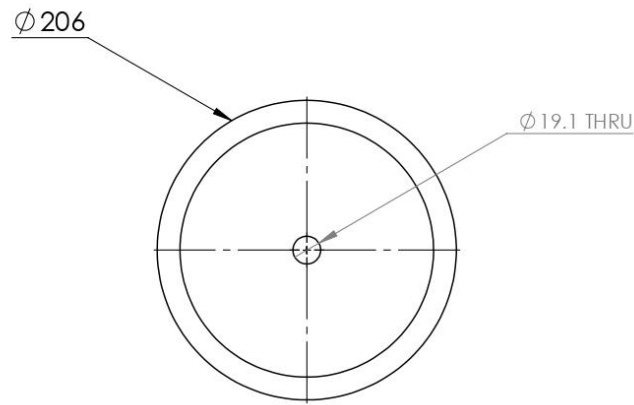


FABRICACIÓN

Corte láser a lámina de calibre 6 mm.

Material: acero AISI 304

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.	
ESCALA: 1:4		SUBSISTEMA DE CONDENSACIÓN - 2.2.4 Tapa superior	
UNIDADES: mm		VISTAS PRINCIPALES	
AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO		REVIS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	
A4		HOJA 42/ 46	



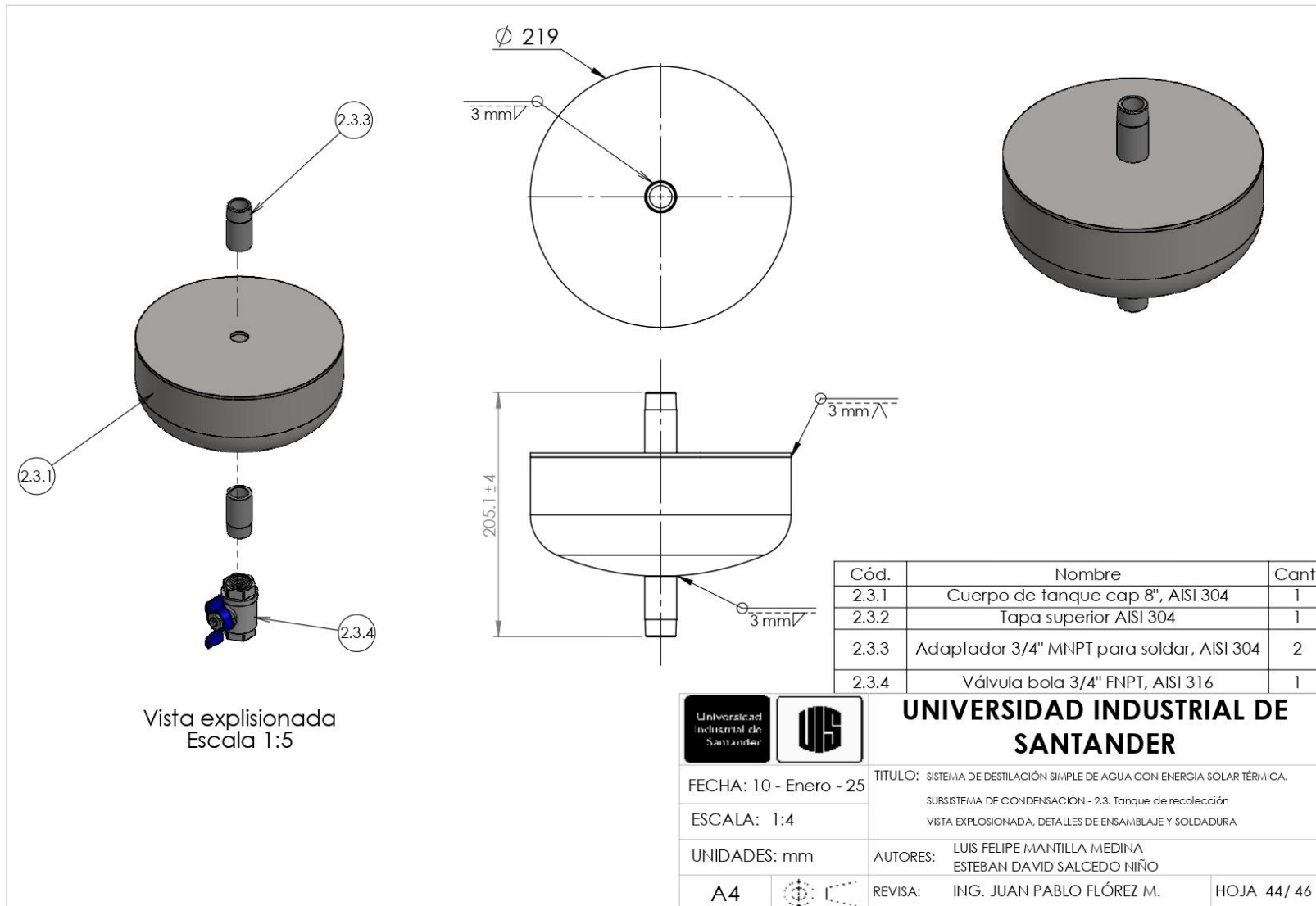
SECCIÓN AD-AD

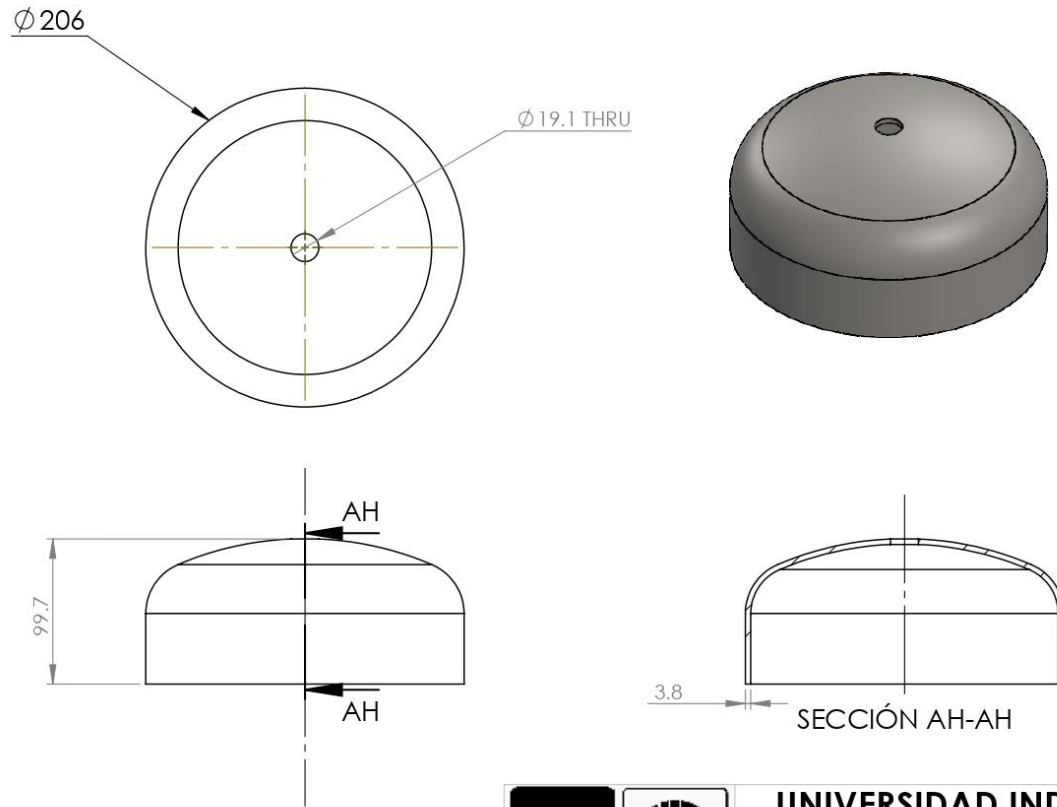
FABRICACIÓN

Corte de sección transversal a cap de 8" para dar la altura deseada, de forma que el diámetro coincida con el del cuerpo del tanque.

Material: acero AISI 304

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.	
ESCALA: 1:4		SUBSISTEMA DE CONDENSACIÓN - 2.2.5 Tapa inferior	
UNIDADES: mm		VISTAS PRINCIPALES	
AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO		REVIS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	
A4		HOJA 43/ 46	



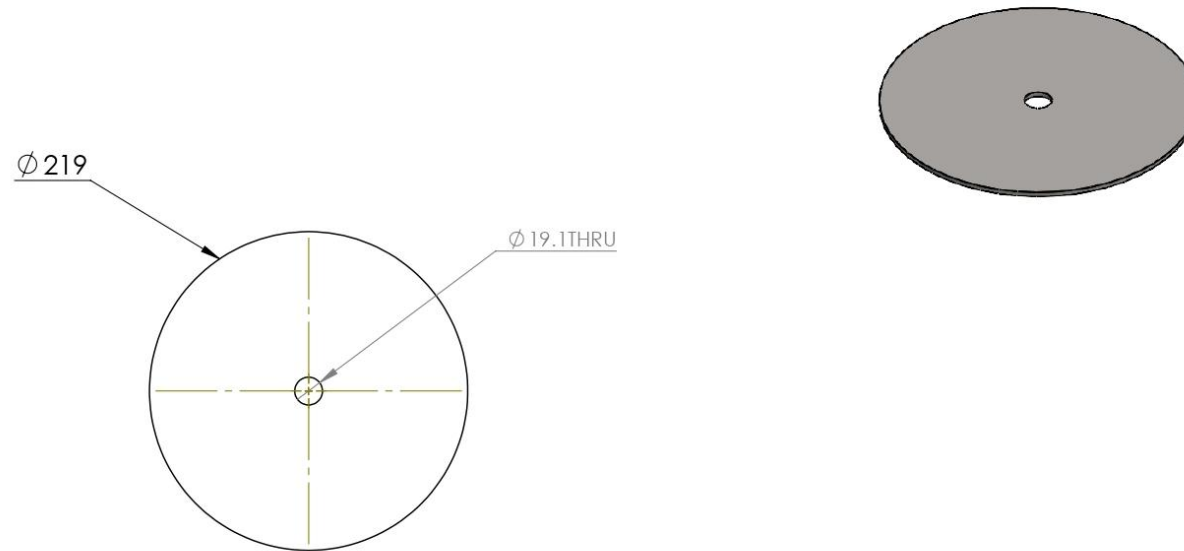


FABRICACIÓN

Pieza comercial. Cap de tubería 8" diámetro nominal.

Material: acero AISI 304

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.	
ESCALA: 1:4		SUBSISTEMA DE CONDENSACIÓN - 2.3.1 Cuerpo de tanque	
UNIDADES: mm		VISTAS PRINCIPALES	
AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO		REVIS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	
A4		HOJA 45/ 46	



FABRICACIÓN

Corte láser a lámina de calibre 3.6 mm

Material: acero AISI 304

 		UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER	
FECHA: 10 - Enero - 25		TITULO: SISTEMA DE DESTILACIÓN SIMPLE DE AGUA CON ENERGIA SOLAR TÉRMICA.	
ESCALA: 1:4		SUBSISTEMA DE CONDENSACIÓN - 2.3.2 Tapa superior	
UNIDADES: mm		VISTAS PRINCIPALES	
		AUTORES: LUIS FELIPE MANTILLA MEDINA ESTEBAN DAVID SALCEDO NIÑO	
A4		REVIS: ING. JUAN PABLO FLÓREZ M.	HOJA 46 / 46