

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO DE UNA ESTACIÓN DE MEDICIÓN DE EVAPORACIÓN DE EVAPORACIÓN ATMOSFÉRICA DE AGUA (CLASE PAN A) PARA EL ANÁLISIS COMPARATIVO DE SOMBRAS DEBIDO A PANELES FOTOVOLTAICOS EN RESERVORIOS HIDROELÉCTRICOS.**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA ESTACIÓN DE MEDICIÓN DE EVAPORACIÓN ATMOSFÉRICA DE AGUA (CLASE PAN A).**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA MECÁNICA**

**ZHINGRE PANCHI JESSICA ALEXANDRA**

**[jessica.zhingre@epn.edu.ec](mailto:jessica.zhingre@epn.edu.ec)**

**DIRECTOR: Ing. SANTIAGO DAVID VACA JIMENÉZ, MSc., PhD.**

**[santiago.vaca@epn.edu.ec](mailto:santiago.vaca@epn.edu.ec)**

**Quito, febrero 2022**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, Zhingre Panchi Jessica Alexandra declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

---

**ZHINGRE PANCHI JESSICA ALEXANDRA**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Zhingre Panchi Jessica Alexandra, bajo mi supervisión.

---

**Ing. SANTIAGO DAVID VACA JIMENÉZ, MSc., PhD.**  
**DIRECTOR**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Zhingre Panchi Jessica Alexandra

Ing. Santiago David Vaca Jiménez, MSc., PhD.

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres Homero y Gladys quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía.

A mi hermana Karol por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento. A mi pequeño amor Alejandro quien con su dulzura llena de felicidad mi vida. A toda mi familia porque con su ejemplo, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona.

A todas las personas especiales, amigos y maestros que me acompañaron en esta etapa, aportando a mi formación profesional y como ser humano.

Finalmente, y no menos importante quiero agradecer a Kevin, por apoyarme en los momentos difíciles y por el amor brindado cada día.

Mil gracias.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	i
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general.....	1
1.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Alcance .....	2
1.4 MARCO TEÓRICO .....	2
1.4.1 Evaporación de agua en reservorios hidroeléctricos.....	2
1.4.2 Fenómeno de Evaporación .....	3
1.4.3 Energía solar fotovoltaica.....	4
1.4.4 Sistemas fotovoltaicos Flotantes.....	5
1.4.5 Sistemas fotovoltaicos flotantes conectados a la energía hidroeléctrica..	6
1.4.6 Ventajas y desventajas de los Sistemas Fotovoltaicos Flotantes .....	7
1.4.7 Estimación de la evaporación en embalses a partir de evaporación en tanques y datos meteorológicos .....	9
1.4.8 Instrumentos de medición meteorológicos .....	12
2 METODOLOGÍA.....	13
2.1 Módulo 1: Tanque evaporimétrico clase Pan A .....	14
2.1.1 Determinación de especificaciones técnicas del tanque clase Pan A ....	14
2.1.2 Parámetros para la selección de los instrumentos de medición .....	15
2.1.3 Selección de materiales .....	16
2.2 Módulo 2: Estructura soporte de los paneles solares .....	17

2.2.1	Análisis y selección de alternativas.....	18
2.2.2	Diseño de barras horizontales para fijar los paneles.....	20
2.2.3	Diseño de barras verticales para soporte .....	22
2.2.4	Diseño de barras verticales con orificios .....	24
2.2.5	Diseño de barras verticales alojadoras de las barras con orificios .....	25
2.2.6	Diseño de pasadores.....	25
2.3	Planos de la estación evaporimétrica.....	26
2.4	Construcción .....	26
2.4.1	Proceso de Construcción Módulo 1 .....	27
2.4.2	Proceso de construcción Módulo 2.....	28
2.5	Análisis de Costos .....	29
2.6	Protocolo de Pruebas .....	30
2.6.1	Protocolo de detección de Fugas.....	30
2.6.2	Protocolo de carga .....	30
3	RESULTADOS conclusiones y recomendaciones .....	31
3.1	Resultados .....	31
3.2	Discusión.....	36
3.3	Conclusiones.....	37
3.4	Recomendaciones .....	38
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	39
5	ANEXOS.....	41

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Representación de un sistema fotovoltaico flotante.....	5
<b>Figura 1.2.</b> Tanque evaporimétrico clase Pan A.....	10
<b>Figura 2.1.</b> (a) Módulo 1; Módulo 2 .....	13
<b>Figura 2.2.</b> Pasos seguidos para la realización del presente componente.....	14
<b>Figura 2.3.</b> Diagrama de cuerpo libre de las barras horizontales.....	21
<b>Figura 2.4.</b> Condiciones de empotramiento de columnas .....	24
<b>Figura 2.5.</b> Diagrama de fuerzas de los pasadores.....	25
<b>Figura 2.6.</b> Proceso de construcción Módulo 1.....	28
<b>Figura 2.7.</b> Proceso de perforación y corte de tubos.....	28
<b>Figura 2.8.</b> Uniones plásticas .....	29
<b>Figura 3.1.</b> Estación Evaporimétrica .....	31
<b>Figura 3.2.</b> Tanque evaporimétrico construido .....	32
<b>Figura 3.3.</b> Soporte Fijo .....	34
<b>Figura 3.4.</b> Soporte regulable en posición 45 grados .....	34
<b>Figura 3.5.</b> tanque con agua, comprobación de fallas.....	35
<b>Figura 3.6.</b> Prueba de cargas, soporte fijo .....	36

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 2.1.</b> Datos de condiciones climáticas en Quito .....	15
<b>Tabla 2.2.</b> Comparación de los materiales para el tanque clase Pan A.....	17
<b>Tabla 2.3.</b> Comparación de los materiales para el tanque clase Pan A.....	18
<b>Tabla 2.4.</b> Ponderación de los criterios a evaluarse .....	19
<b>Tabla 2.5.</b> Evaluación criterio costo.....	19
<b>Tabla 2.6.</b> Evaluación criterio resistencia .....	20
<b>Tabla 2.7.</b> Evaluación criterio peso.....	20
<b>Tabla 2.8.</b> Conclusiones de la Evaluación.....	20
<b>Tabla 2.9.</b> Dimensiones de barras horizontales .....	21
<b>Tabla 2.10.</b> Recomendaciones de factores de seguridad para diferentes casos de carga .....	22
<b>Tabla 2.11.</b> Dimensiones de barras verticales para soporte.....	23
<b>Tabla 2.12.</b> Dimensiones de barras verticales para soporte.....	24
<b>Tabla 2.13.</b> Dimensiones de barras verticales para soporte.....	25
<b>Tabla 2.14.</b> Detalle de elementos para la construcción de la estación de evaporación .....	27
<b>Tabla 2.15.</b> Detalle del costo de materiales utilizados en la construcción .....	29
<b>Tabla 2.16.</b> Detalle de costos de mano de obra en la construcción .....	30
<b>Tabla 3.1.</b> Detalle de instrumentos de medición meteorológicos .....	33

## RESUMEN

El presente trabajo de titulación consiste en el desarrollo del diseño mecánico y construcción de una estación de medición de la evaporación para la cuantificación y comparación de la pérdida de agua por evaporación en dos situaciones diferentes: cuando la superficie del agua se encuentra cubierta con paneles fotovoltaicos y cuando la superficie se encuentra libre. Además, la estación debe ser capaz de medir y almacenar la generación de energía obtenida por las dos celdas fotovoltaicas, de 100W de potencia cada una, que se encuentran tapando el evaporímetro.

Para esto se realizó el análisis de la nota técnica 83 de la Organización Mundial Meteorológica e Instrucciones para Observadores Meteorológicos, correspondientes a la construcción de estaciones evaporimétricas, seguido de un análisis de las condiciones climáticas de la ciudad de Quito-Ecuador. Esto permitió la selección de la instrumentación meteorológica de la estación. Después se realizaron los cálculos estructurales correspondientes para su dimensionamiento, selección de tipo de material. Posteriormente se realizaron los planos de conjunto y detalle con la ayuda de Software SolidWorks y AutoCAD. Finalmente se construyó el tanque clase Pan A con la utilización de planchas de acero inoxidable 304 y la estructura de soporte con tubos de acero inoxidable 304 y aluminio. Una vez construida se realizaron pruebas visuales de carga y fugas que permitieron validar la funcionalidad del diseño y realizar las correcciones necesarias.

**Palabras clave:** evaporación, tanque Pan A, sistemas fotovoltaicos flotantes, estación evaporimétrica, meteorología.

## ABSTRACT

This project designed and constructed an evaporation meteorological station, class Pan A, to quantify and compare and compare the evaporation of open water in two different situations. The first is when the surface of the water is covered by photovoltaic panels and the second is when the surface is free. Hence, the design of the station considered the possibility to measure and store the generated electricity by the two photovoltaic cells, of 100Wp each, which are expected to be covering the evaporimeter.

For this, the project included the calculation of stress and forces to which the met station will be subject to, and the selections of materials that could provide the required resistance to withstand them. After that, the assembly- and detail-blueprints of the design were drawn in SolidWorks and AutoCAD. Once the design was finished, the class Pan A class tank was built using 430 stainless steel plates, and the support structure using 430 stainless steel and aluminum tubes. Finally, load and leak tests were carried out to check and validate the functionality of the design, and to correct problems.

The mechanical design of the station was based on the guidelines for evaporation measurement station of technical note no.83 of the World Meteorological Organization. Furthermore, the selection of the equipment to measure the other climatic variables was based on an analysis of the climatic conditions of Quito-Ecuador.

**Keywords:** evaporation, Class A pan, floating solar photovoltaics, evaporimeter station, meteorology.

# 1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

En una central hidroeléctrica, al estar la superficie de agua expuesta directamente a factores ambientales como la radiación solar, viento, humedad relativa, se da una evaporación inevitable del agua embalsada. Esta agua evaporada se considera como una pérdida para el sistema hidroeléctrico. Por lo que, para disminuir estas pérdidas surgen como solución los sistemas fotovoltaicos flotantes, que además se benefician del enfriamiento por agua para que su generación eléctrica no se vea afectada. Esto debido a que al aumentar la temperatura en las celdas fotovoltaicas, la eficiencia del panel disminuye. Esto representa una ganancia en la producción de energía hidroeléctrica y también en la producción de energía fotovoltaica.

La medición directa de la tasa de evaporación en reservorios no es posible, pues depende de más variables que se pueden cuantificar como son la humedad relativa, la precipitación, la temperatura y entre otros, además estas variables variaran según cambien las condiciones climatológicas. Por lo tanto, la medición se la hace indirectamente mediante ecuaciones empíricas o modelos matemáticos usando mediciones de equipos que se encuentran en las cercanías de los reservorios. Uno de los instrumentos comúnmente utilizados para este fin es el tanque de evaporación clase *Pan A*.

El presente componente pretende diseñar y construir un prototipo de una estación de medición de evaporación clase *Pan A*, siguiendo la nota técnica 83 de la Organización Mundial Meteorológica e Instrucciones para observadores Meteorológicos, que brinda la normativa de construcción de estaciones evaporimétricas. A la par del evaporímetro, la estación debe incluir mediciones de otras variables climáticas. Para determinar qué equipos adicionales de medida deben incluirse, se realiza un análisis climático del lugar, lo que permite realizar la selección de instrumentación meteorológica.

Además, con la visión de utilizar esta estación para fines de exploración de sistemas fotovoltaicos flotantes, el diseño incluirá una parte de cobertura por dos paneles fotovoltaicos, lo que permitirá que futuros estudios puedan cuantificar la pérdida de agua fresca por evaporación cuando la superficie está cubierta por paneles fotovoltaicos y cuando la superficie carece de estos.

## 1.1 Objetivo general

Diseñar y construir una estación de medición de evaporación de agua clase Pan A en la ciudad de Quito-Ecuador para el análisis comparativo de sombras debido a paneles fotovoltaicos

## **1.2 Objetivos específicos**

- Revisión de normativas y literatura sobre la medición de la evaporación, diseño y construcción del sistema de medición y de los sistemas de medición.
- Realizar el diseño mecánico de la estación de medición de evaporación clase Pan A, incluyendo los equipos de medición.
- Realizar el diseño mecánico de la estructura de soporte de los paneles fotovoltaicos
- Construir la estación de medición

## **1.3 Alcance**

El presente trabajo de Integración Curricular tiene como alcance la construcción de la estación de medición de evaporación clase Pan A, para ello como primer paso se recopilará la información relacionada al tema, seguido de un análisis de la nota técnica 83 de la Organización Mundial Meteorológica, misma que posee las especificaciones de una estación de medición de evaporación. Luego con la investigación de las condiciones climatológicas del lugar de instalación de la estación (Ciudad de Quito), se elegirán los instrumentos de medición meteorológicos.

Después con la información obtenida, se realizará el diseño mecánico de la estación de medición y de la estructura de soporte para los paneles fotovoltaicos, que permita posicionar estos en una inclinación de 0 a 45 grados. Posteriormente se obtendrá los planos de conjunto y detalle del diseño mecánico de la estación que permitirán finalmente la construcción de la estación de medición clase Pan A.

## **1.4 MARCO TEÓRICO**

### **1.4.1 Evaporación de agua en reservorios hidroeléctricos**

Una central hidroeléctrica es un conjunto de instalaciones que generan energía eléctrica a través del aprovechamiento de la energía contenida en una masa de agua, llamado reservorio (Peláez Samaniego & Espinoza Abad, 2015). Al estar la superficie del espejo de agua expuesta directamente a factores ambientales y meteorológicos como radiación solar, temperatura del aire, la presión de vapor, el viento, presión atmosférica, se da una evaporación inevitable del agua embalsada (Chereque Morán, 1989).

Los embalses representan una herramienta fundamental en la generación de energía y su importancia es aún mayor en ambientes secos donde se presentan sequías, lo que obliga

a regular los ríos para asegurar la disponibilidad de los recursos en momentos de mayor demanda y almacenar caudales extensos en periodos húmedos para hacer frente en momentos de escasez por lo que esta agua que se evapora se considera como una pérdida para el sistema hidroeléctrico e hídrico de la zona puesto que puede llegar a representar grandes volúmenes, se estiman pérdidas menores al 6% de la capacidad de los embalses. Por ejemplo, en estudios realizados para la cuantificación de pérdida de agua por evaporación, principalmente en regiones áridas y semiáridas, se estimó una pérdida de 7.96 hm<sup>3</sup> anuales en embalses y balsas de la Comunidad de Regantes en el Campo de Cartagena, es decir un 6.3% de los recursos hídricos disponibles (López Moreno J.I., 2008).

Sin embargo, estas pérdidas no son insignificantes al compararlas con el contexto de uso de agua antropogénico. El trabajo realizado en España por Ayala-Carcedo(2020) obtuvo mediciones de pérdidas por evaporación de 1400hm<sup>3</sup> por año en embalses y humedales, lo que representa un tercio del consumo urbano total, y se estima también un aumento en estas cifras entre un 11 y 40% (2060) según las cuencas analizadas, producto del cambio climático (López Moreno J.I., 2008). Asimismo, las mediciones realizadas en 2016 en embalses hidroeléctricos en África de pérdidas por evaporación arrojó valores de 42 billones de m<sup>3</sup>, es decir 30 veces la cantidad de agua utilizada para la generación de energía eléctrica por todas las demás tecnologías energéticas combinadas en el continente (Gonzalez Sanchez et al., 2021). Esto indica que a pesar de que se pierde alrededor del 6% de agua en el embalse, este porcentaje puede llegar a ser muy alto en comparación al consumo humano.

#### **1.4.2 Fenómeno de Evaporación**

La evaporación es el desprendimiento de vapor de agua de una superficie húmeda o libre de agua, en estado líquido o sólido a una temperatura menor que la del punto de ebullición (World Meteorological Organization. Working Group on Evaporation Measurement, & Gangopadhyaya, 1966).

Es considerada una etapa permanente del ciclo hídrico, en el que las moléculas de la superficie libre del agua ganan la suficiente energía cinética con ayuda de la energía que proviene del sol y vencen la retención de la masa de agua, saliendo al aire y formando una capa en la superficie que por acción del viento es removida (Chereque Morán, 1989).

Por evaporación en términos hidrológicos se entiende como la cantidad de vapor transportado hacia la atmósfera. Para que este cambio de agua a vapor se produzca es necesario un intercambio de calor de 600 calorías por cada gramo de agua que se evapora (Linsley Jr et al., 1977).

## **Factores importantes en el proceso de Evaporación**

La cantidad de agua evaporada varía dependiendo de diferentes factores meteorológicos y la naturaleza de la superficie en la que sucede la evaporación. Siendo la radiación solar, el más importante, para la evaporación (Linsley Jr et al., 1977). Este varía dependiendo de la época del año, hora del día y la presencia de nubes; la presión de vapor. La temperatura del aire que depende de la presión de vapor; el viento que es aire en movimiento que influye en el transporte del calor y la humedad, mezcla y remueve las capas inferiores y superiores de vapor, cuya variación en un 10% como lo cita Linsley Jr et al. (1977) afectaría la evaporación de 1 al 3% . La presión atmosférica que aumenta conforme aumenta la altitud descendiendo la temperatura del aire y la evaporación del agua; finalmente la calidad de agua es un factor importante para cuantificar la tasa de evaporación, la presencia de sales disminuye ligeramente en un 2% esta cantidad en comparación con la evaporación del agua dulce (Chereque Morán, 1989).

### **1.4.3 Energía solar fotovoltaica**

La tecnología solar fotovoltaica utiliza generadores fotovoltaicos para convertir radiación solar en electricidad. Estos generadores cuya función es la transformación de energía están compuestos por módulos o celdas fotovoltaicas conectadas en serie y/o paralelo (Peláez Samaniego & Espinoza Abad, 2015).

### **Estructura básica de un sistema fotovoltaico**

De manera general, un sistema fotovoltaico según Peláez Samaniego & Espinoza Abad (2015) está constituido por:

- **Generador fotovoltaico:** elemento primordial del sistema, transforma la energía solar recibida en energía eléctrica, esta cantidad de energía depende de la irradiancia solar que cae sobre su superficie y se mide en kW/m<sup>2</sup>/día.  
Las estructuras de soporte de los generadores se construyen usualmente de acero inoxidable, aluminio, hierro galvanizado, deben tener una resistencia de mínimo 10 años de exposición al ambiente sin sufrir daños por corrosión y soportar vientos de hasta 120km/h.
- **Batería de acumulación:** dispositivo electroquímico que almacena la energía eléctrica captada por los generadores fotovoltaicos en forma de enlaces químicos. Para aplicaciones que requieren energía durante la noche, deben incluirse sistemas de almacenamiento acumulativo.

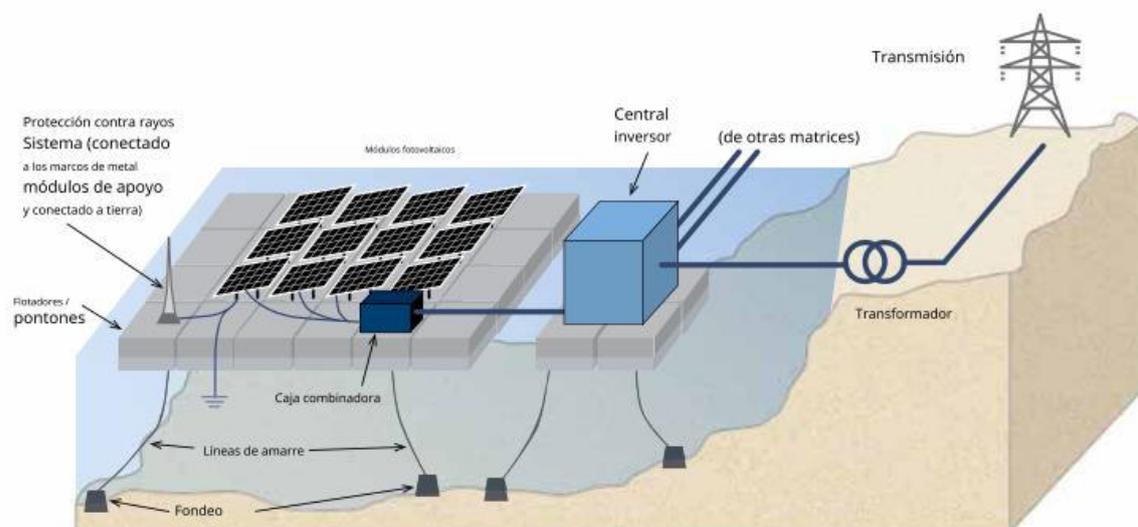
- Regulador de carga: es un equipo que evita la batería se sobrecargue, regula también el voltaje a valores adecuados para su salida. Este trabaja como una fuente de energía variable a lo largo del día y durante todo el año.
- Un inversor: estos dispositivos transforman la corriente continua generada en los paneles y almacenada en las baterías en corriente alterna necesaria para el uso de diferentes dispositivos eléctricos.

En un sistema fotovoltaico cuando los generadores fotovoltaicos (paneles) se encuentran expuestos al sol ocurre un incremento de la temperatura debido a la disminución de la tensión de circuito abierto, en consecuencia, al aumentar la temperatura la eficiencia disminuye.

#### 1.4.4 Sistemas fotovoltaicos Flotantes

El diseño general de un sistema fotovoltaico flotante es similar al de un sistema terrestre, sin embargo, los conjuntos fotovoltaicos y los inversores se montan sobre plataformas flotantes como se observa en la Figura 1.1. Estos sistemas son colocados en lagos, canales de riego, reservorios hidroeléctricos, entre otros (Instituto de Investigación de Energía Solar de Singapur, 2018).

Actualmente la mayoría de las plantas fotovoltaicas flotantes utilizan flotadores tipo pontón, con paneles en una inclinación fija. Estas plataformas flotantes generalmente se anclan al fondo dependiendo de las condiciones del suelo y del nivel de agua, procurando que la instalación se mantenga en su lugar durante 25 años o más (Instituto de Investigación de Energía Solar de Singapur, 2018).



**Figura 1.1.** Representación de un sistema fotovoltaico flotante.

(Fuente: (Instituto de Investigación de Energía Solar de Singapur, 2018))

Existe una serie de tecnologías que siguen siendo estudiadas y desarrolladas para las estructuras flotantes, de las que se pueden destacar: las tuberías de polietileno de alta densidad más componentes de acero o aluminio para balsas de grandes dimensiones, mono módulos de polietileno de alta densidad conectados entre sí mediante ganchos y estructuras de pontones flotantes capaces de soportar módulos fotovoltaicos (Cazzaniga, 2020).

El primer sistema fotovoltaico flotante se construyó e instaló en el 2007 en Aichi, Japón, seguido de varios otros países como: Francia, Italia, la República de Corea, España y los Estados Unidos, los cuales han instalado sistemas de pequeña escala con propósitos investigativos y demostrativos (Instituto de Investigación de Energía Solar de Singapur, 2018). La primera instalación comercial de sistemas fotovoltaicos flotantes fue instalada en 2007 en la Viña Far Niente de 175 kWp en California, con el objetivo principal de reducir la evaporación en los tanques de riego y proporcionar energía adicional (Gonzalez Sanchez et al., 2021).

Las instalaciones flotantes de tamaño mediano a grande (más de 1 MWp) comenzaron a surgir en 2013 en países como: Japón, Corea, los Estados Unidos, China (ahora el actor más grande), Australia, Brasil, Canadá, Francia, India, Indonesia, Israel, Italia, Malasia, Holanda, Noruega, Panamá, Portugal, Singapur, España, Suecia, Sri Lanka, Suiza, Taiwán, Tailandia, Túnez, Turquía, Reino Unido y Vietnam. Además se desarrollan proyectos en Afganistán, Azerbaiyán, Colombia, Ghana y la República Kirguisa, así como en otros países (Instituto de Investigación de Energía Solar de Singapur, 2018).

#### **1.4.5 Sistemas fotovoltaicos flotantes conectados a la energía hidroeléctrica.**

Los sistemas híbridos de generación de energía eléctrica, que combinan las tecnologías hidroeléctrica y fotovoltaica flotante, aparecen como una solución para contrarrestar los problemas por calentamiento que se produce en los sistemas fotovoltaicos terrestres, también como una solución al desafío del uso adecuado de la tierra y proveer la creciente demanda de energía eléctrica por el aumento poblacional (Instituto de Investigación de Energía Solar de Singapur, 2018).

Al ser una tecnología en las primeras etapas de desarrollo se han realizado algunas pequeñas implementaciones como el sistema instalado en Portugal con una capacidad de 220kWp, una conexión de plantas fotovoltaicas terrestres con la central hidroeléctrica de

Longyangxia (China) en 2013 con una capacidad de energía hidroeléctrica de 1280MW y una capacidad fotovoltaica de 850MWp (Gonzalez Sanchez et al., 2021).

Algunos de los estudios como los realizados en Pakistán para instalar una planta de energía fotovoltaica flotante de 200MW de potencia en 2019 en la presa de Ghazi Barotha, arrojan resultados positivos de la implementación de estos sistemas flotantes, asegurando un logro en el objetivo de producción de energía 100% renovable para el 2050 en ese país (Rauf et al., 2019).

En 2018 un estudio centrado en las centrales hidroeléctricas de la cuenca del río São Francisco en Brasil donde se han presentado intensas sequías, señala que el diseño optimizado con una inclinación de 3 grados puede generar energía a menor costo (de \$298/MWh a \$312/MWh) dependiendo de la ubicación de la plataforma flotante en el reservorio y que la ganancia energética promedio generada por la central hidroeléctrica después de agregar la generación fotovoltaica flotante fue del 76%, mientras que el factor de capacidad aumentó en un 17,3% en promedio. En general, implementación de la propuesta podría reemplazar gran parte de la generación termoeléctrica en Brasil (Silvério et al., 2018).

Otro informe en 2021 señala los beneficios de instalar un equipo de energía solar fotovoltaica flotante en embalses hidroeléctricos en África, puesto que el continente posee un potencial solar alto ha presentado escasez de agua en los últimos años. Los resultados indican que con una cobertura total inferior al 1%, la capacidad de la potencia instalada de las centrales hidroeléctricas podría duplicarse y la producción de energía eléctrica aumentar en un 58%, produciendo 46.04 TWh adicionales cada año, se podría alcanzar un ahorro de agua 743 millones m<sup>3</sup>/año (Gonzalez Sanchez et al., 2021).

En un estudio realizado por Cazzaniga et al. (2019), señala que esta hibridación muestra varias ventajas, al analizar las 20 centrales hidroeléctricas más grandes del mundo se obtiene que al cubrir el 10% de las superficies de los reservorios la producción de energía aumenta en un 65%, además de una reducción de evaporación del 6 al 18%.

#### **1.4.6 Ventajas y desventajas de los Sistemas Fotovoltaicos Flotantes**

La instalación de plantas fotovoltaicas flotantes trae consigo una serie de ventajas que afirman la importancia de su implementación como:

- Una de las ventajas más importantes es la reducción de evaporación evidenciada en estudios realizados por Gonzales Sánchez et al.(2021), Cazzaniga et al.(2019),

entre otros. Al reducirse esta pérdida de agua se incrementa la producción de energía hidroeléctrica, sobre todo en países donde la escasez de agua es un problema grave, este ahorro de agua supone 1 a 2m<sup>3</sup> por cada m<sup>2</sup> de sistema fotovoltaico flotante instalado (Rosa-Clot, 2020).

- Aumento de la eficiencia energética de los sistemas fotovoltaicos flotantes en comparación con los sistemas terrestres debido al efecto de enfriamiento del agua, ganando así un 10% o más en la captación de energía (Cazzaniga et al., 2019) .
- Generación adicional de energía que podría reemplazar las fuentes de energía convencionales como la termoeléctrica, entre otras que emiten contaminación al ambiente y por lo tanto reducción de emisiones que contribuyen al calentamiento global.
- Las plantas flotantes son más compactas que las plantas terrestres, su manejo es más simple, su construcción y desmantelamiento. Al no existir estructuras fijas, su amarre fácil de instalar y quitar, a diferencia de los cimientos utilizados para una planta en tierra que son mucho más intrusivos y permanentes (Cazzaniga et al., 2019).
- Se conservan tierras, especialmente en entornos agrícolas, al ser plataformas montadas sobre la superficie del agua, se obtiene un rendimiento energético del sistema fotovoltaico mejor debido a la menor cantidad de obstáculos a la luz solar y la temperatura más baja de los paneles y también se mencionan algunas mejoras adicionales en la calidad del agua mediante la disminución del crecimiento de algas (Abdelal, 2021).
- La estructura flotante reduce la formación de olas y, por tanto, la erosión de las orillas del embalse. Esto se limita a la superficie cubierta que normalmente es un pequeño porcentaje de la superficie del reservorio, pero es particularmente importante ya que la planta flotante normalmente debe ubicarse no lejos de la estructura de la presa, donde estos fenómenos son más peligrosos (Rosa-Clot, 2020).

Así como presenta las ventajas antes mencionadas, también conlleva desventajas como:

- El sistema necesita mantener los paneles fotovoltaicos en el agua durante años, por lo que requiere que la estructura de contención tenga alta resistencia a la corrosión, larga vida útil, alta capacidad de carga, entre otros. Lo que puede generar costos adicionales a comparación de los sistemas terrestres.

- Debido a que esta es una tecnología de energía solar relativamente nueva, requiere un equipo de energía solar especializado y más conocimientos de instalación especiales por lo que su mantenimiento podría ser también más costoso que el de un tradicional.
- Se estiman aumentos de costos de operación de estos sistemas de hasta el 10% en el caso de condiciones complicadas, en comparación al 1.5% de los sistemas terrestres (Gonzalez Sanchez et al., 2021).

#### **1.4.7 Estimación de la evaporación en embalses a partir de evaporación en tanques y datos meteorológicos**

Para la elaboración de proyectos se establecen en las zonas de interés aparatos que permitan la medición directa durante un periodo de tiempo, las mediciones permiten tener una buena aproximación de la evaporación potencial de la atmósfera (Chereque Morán, 1989). El tanque evaporímetro es uno de los instrumentos de medición de evaporación de mayor uso en la actualidad (Linsley Jr et al., 1977).

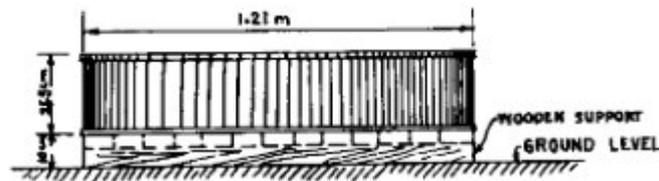
Según lo expuesto por Chereque Morán (1989) existen 3 diferentes clases de tanques:

- Tanques colocados en la superficie del suelo: Su instalación es sencilla y los riesgos de resultados distorsionados por salpicadura de agua lluvia son mínimos, sin embargo, son muy sensibles a la temperatura del aire o a efectos de la insolación.
- Tanques enterrados: caso contrario a los anteriores, éste es más eficaz antes variaciones de temperatura de aire e insolación, pero las gotas de agua lluvia salpicadas al equipo pueden llegar a afectar las lecturas ocasionando resultados falsos. Estos tanques también presentan el inconveniente de su difícil instalación y mantenimiento.
- Tanques flotantes: presenta mejores aproximaciones de lecturas de evaporación, sin embargo, tanto su instalación como operación son complicadas además de contar con elevados costos, tomando en cuenta no solo operación sino también su mantenimiento continuo.

Dentro de los tanques colocados sobre la superficie, el evaporímetro clase Pan A es el de mayor uso, para mediciones de evaporación, este tanque es circular, diámetro 1.21m (47.5 in) y profundidad 25.5 cm (10 in), montada en una plataforma abierta de madera encima del piso. Es construida de hierro galvanizado o metal monel, se debe llenar hasta 5cm (2 in) antes del borde, además debe ser llenado cuando la profundidad disminuya hasta 18cm;

es de fácil instalar y menos costoso, se identifican fugas con facilidad y su vaciado para limpieza también son simples, su principal desventaja es que sus paredes pueden estar sujetas a radiación incrementando así las tazas de evaporación, (World Meteorological Organization. Working Group on Evaporation Measurement, & Gangopadhyaya, 1966).

En la Figura 1.2 se pueden observar las características generales de un tanque evaporimétrico clase Pan A



**Figura 1.2.** Tanque evaporimétrico clase Pan A.

(Fuente: (World Meteorological Organization. Working Group on Evaporation Measurement, & Gangopadhyaya, 1966))

Para su instalación debe centrarse sobre un marco abierto de madera, para su mantenimiento se recomienda inspeccionar cuidadosamente el tanque en busca de fugas o manchas de oxido al menos una vez al mes, es recomendable limpiar el tanque para mantenerlo libre de sedimentos, espuma o películas de aceite. (United States Department of Commerce, 1952).

El tanque junto con otros instrumentos de medición meteorológicos conforma una estación evaporimétrica, esta proporciona mediciones de la cantidad de agua que se evapora además de mediciones de precipitación, temperatura y viento. Para su instalación se recomiendan sitios nivelados y abiertos para permitir una libre circulación del aire, libre de objetos, arboles u edificios alrededor. Estas estaciones al estar en zonas naturales son cercadas por mallas de alambre para evitar el daño de equipos y evitar a los animales. (United States Department of Commerce, 1952)

El tratamiento de datos se realiza con la utilización de la ecuación 1.1, de John D. Valiantzas simplifica la ecuación de Penman utilizando datos meteorológicos, tales como temperatura del aire, la radiación solar, la humedad relativa y la velocidad del viento. Esta ecuación hace uso de datos simples que generalmente se miden en una estación meteorológica estándar (Abdelal, 2021).

$$E_{PEN} \approx 0.051(1-\alpha)R_s\sqrt{T+9.5} - 2.4\left(\frac{R_s}{R_A}\right)^2 + 0.052(T+20)\left(1-\frac{RH}{100}\right)(a_u - 0.38 + 0.54u)$$

**Ecuación 1.1.** Ecuación de evaporación de John D. Valiantzas

Donde

$\alpha$ : coeficiente de reflexión de Albedo (0.08 para superficies de aguas abiertas)

$R_s$ : radiación solar ( $Mj/m^2d$ )

$R_A$ : radiación solar extraterrestre ( $Mj/m^2d$ )

$T$ : temperatura ( $^{\circ}C$ )

$RH$ : humedad relativa (%)

$a_u$ : coeficiente de Penman = 1 cuando se usa la ecuación original de Penman

$u$ : velocidad del viento ( $m$ )

La constante de radiación extraterrestre  $R_A$  se debe evaluar según la región geográfica de estudio para periodos diarios, con la ecuación 1.2:

$$R_A = 458.3662 * G_{SC} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin \omega]$$

**Ecuación 1.2.** Constante de Radiación

Donde:

$R_A$ : radiación solar extraterrestre ( $Mj/m^2d$ )

$G_{SC}$ : constante solar = 0.082 ( $Mj/m^2min$ )

$d_r$ : distancia relativa inversa Tierra-Sol

$\omega_s$ : ángulo de radiación a la puesta del sol [rad]

$\varphi$ : latitud ( $rad$ )

$\delta$ : inclinación solar ( $rad$ )

Se utiliza las ecuaciones 1.3, 1.4 y 1.5 para el cálculo de la distancia relativa inversa Tierra-Sol ( $d_r$ ), inclinación solar ( $\delta$ ) y el ángulo de radiación a la puesta del sol ( $\omega_s$ ) respectivamente; donde  $J$  es el número del día en el año entre 1 (1 de enero) y 365 (31 de diciembre).

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right)$$

**Ecuación 1.3.** Distancia relativa inversa Tierra-Sol

$$\delta = 0.409 * \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right)$$

#### **Ecuación 1.4. Inclinación Solar**

$$\omega_s = \frac{\pi}{2} - \left[ -\frac{\tan(\varphi) \tan(\delta)}{X^{0.5}} \right]$$

#### **Ecuación 1.5. Ángulo de radiación a la puesta del sol**

Con  $X = 1 - [\tan(\varphi)]^2 [\tan(\delta)]^2$  y  $X = 0.00001$  si  $x \leq 0$

### **1.4.8 Instrumentos de medición meteorológicos**

Partiendo de la ecuación de de John D. Valiantzas (Abdelal, 2021) y de las variables medibles para su uso se requiere el uso de los siguientes equipos de medición descritos según Linsley Jr et al. (1977):

- Piranómetro

Mide la radiación solar que cae sobre la superficie de la Tierra. Para obtener mediciones confiables, es necesario evitar los intercambios de calor convectivos. Esto se logra debido a que en la actualidad se cubre el receptor con material transparente.

- Termómetros

Son aparatos que miden la temperatura del aire, es importante colocarlos en sitios donde no existan obstáculos para la libre circulación del aire y a su vez se encuentren protegidos de la radiación solar y la lluvia.

- Anemómetro de tres o cuatro copas

Dispositivos que miden la velocidad del viento y predecir el tiempo, es el más utilizado en observaciones meteorológicas. Consta de un eje en el que se colocan tres aspas, sobre las que actúa el viento haciéndolas girar.

- Pluviómetro

Instrumento que permite la recolección y medición de la cantidad de precipitación. Los tres tipos más importantes de pluviógrafo son el de cubeta basculante, el de balanza y el de flotador.

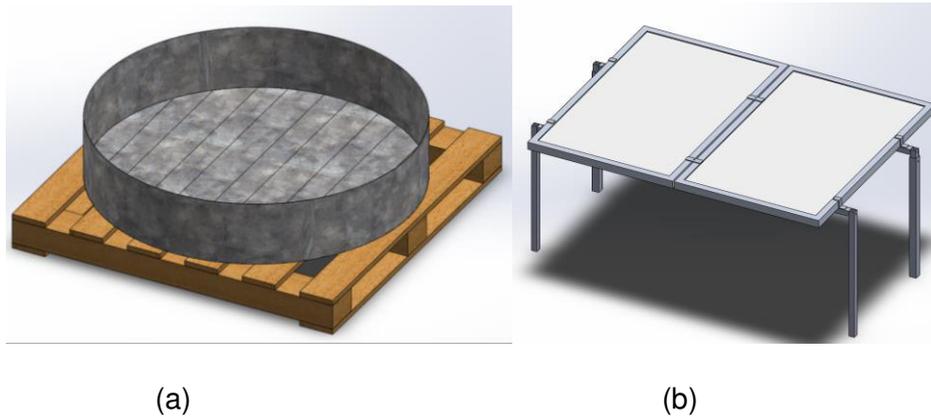
## 2 METODOLOGÍA

El presente apartado está basado en el desarrollo del proceso de diseño, elección de instrumentos de medición que forman parte de la estación de medición de evaporación, para su posterior construcción, por lo que se han definido dos módulos:

Módulo 1: Tanque evaporímetro clase Pan A

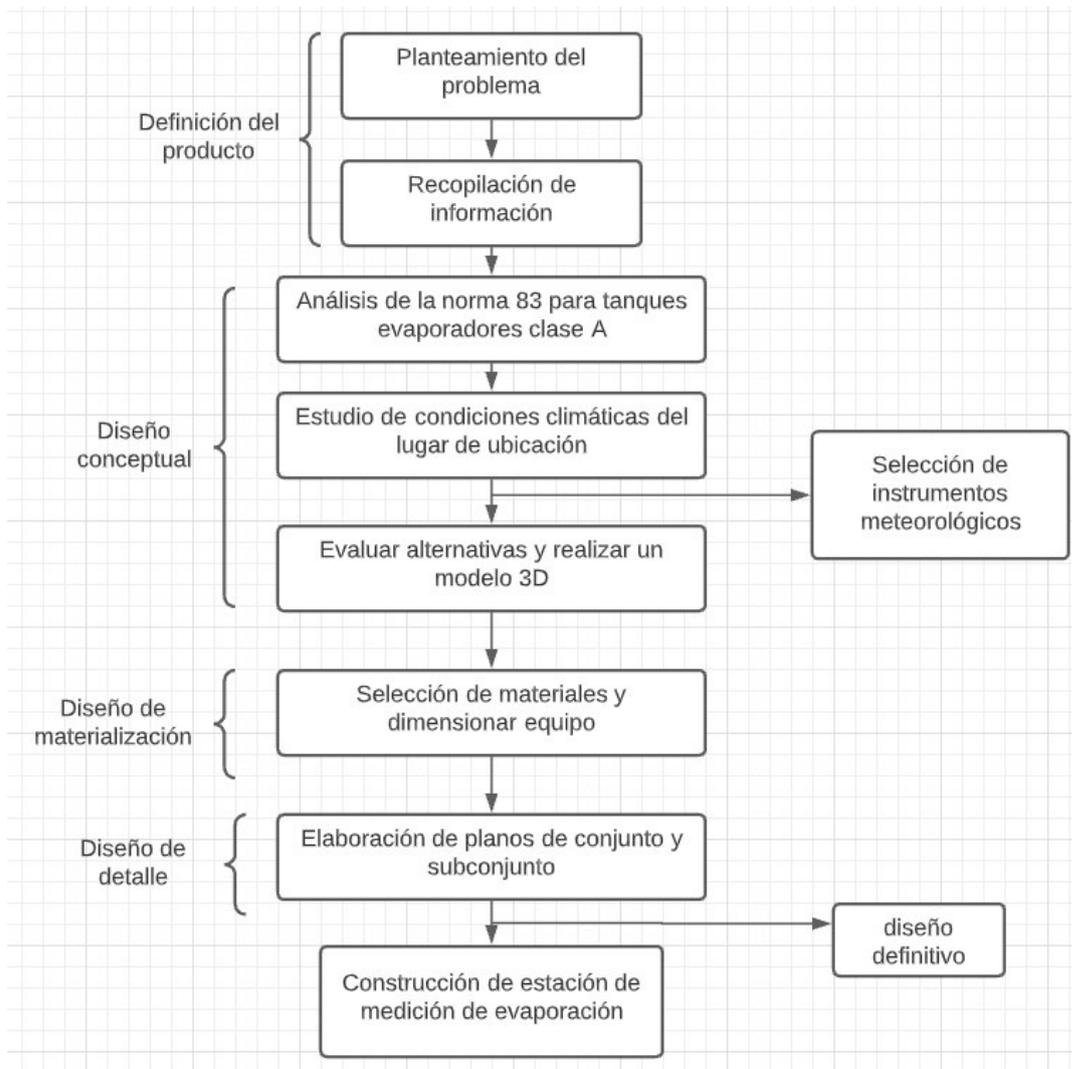
Módulo 2: Estructura de soporte para paneles solares.

En la Figura 2.1 se muestran los módulos anteriormente mencionados:



**Figura 2.1.** (a) Módulo 1; Módulo 2  
(Fuente: Propia)

La Figura 2.2. muestra el esquema de los pasos consecutivos seguidos para la realización del presente componente.



**Figura 2.2.** Pasos seguidos para la realización del presente componente  
(Fuente: Propia)

## 2.1 Módulo 1: Tanque evaporimétrico clase Pan A

### 2.1.1 Determinación de especificaciones técnicas del tanque clase Pan A

Se realiza el análisis de la nota técnica 83 de la Organización Mundial Meteorológica que detalla las normas generales de los tanques de medición de evaporación clase PAN A, de la cual citamos la definición general:

“El tanque es circular, diámetro 1.21m (47.5 in) y profundidad 25.5 cm (10 in), montada en una plataforma abierta de madera encima del piso. Es construida de hierro galvanizado o metal monel, se debe llenar hasta 5cm (2 in) antes del borde” (World Meteorological Organization. Working Group on Evaporation Measurement, & Gangopadhyaya, 1966).

## 2.1.2 Parámetros para la selección de los instrumentos de medición

La ubicación de la estación de medición de evaporación es la provincia de Pichincha, cantón Quito, en el campus de la Escuela Politécnica Nacional, por lo que se realiza un estudio de las condiciones climáticas del lugar; en la tabla 2.1 se muestran los datos de humedad relativa, punto de rocío, temperatura del aire, tensión de vapor, precipitación, número de días con precipitación, velocidad del viento, nubosidad tomados del Anuario Meteorológico № 53-2013 (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, 2017) que permite tener una idea general de las condiciones climáticas.

**Tabla 2.1.** Datos de condiciones climáticas en Quito

M0024	QUITO INAMHI-IÑAQUITO												INAMHI					
MES	HELIOFANIA	TEMPERATURA DEL AIRE A LA SOMBRA (°C)						HUMEDAD RELATIVA (%)				PUNTO DE ROCÍO (°C)	TENSION DE VAPOR (hPa)	PRECIPITACION(mm)		Número de días con precipitación		
	(Horas)	ABSOLUTAS		M E D I A S		Mensual	Máxima día	Mínima día	Máxima día	Mínima día	Media			Mensual	Máxima en 24hrs		Media	
ENERO	191.1		7.4	19	22.9	10.9	16.4				73	11.0	13.2	43.0	32.7	12	6	
FEBRERO	91.6	23.7	1	9.2	16	20.1	10.8	14.8	97	4	45	21	78	12.9	196.4	49.6	10	16
MARZO	144.9	25.5	10	9.2	30	21.7	11.3	15.8	96	20	43	31	74	10.8	83.1	26.2	19	16
ABRIL	130.2	25.5	16	7.4	25	22.0	10.9	15.7	98	3	27	24	72	10.3	111.0	25.7	21	14
MAYO	120.1	23.5	2	9.9	31	20.8	11.1	14.9	98	16	46	19	78	10.9	115.4	25.1	30	21
JUNIO	194.8	25.0	22	9.0	6	22.8	10.5	16.1	94	12	43	16	65	9.0	0.3	0.2	30	2
JULIO	202.9	24.8	20	7.9	3	22.4	10.6	15.8	100	30	33	28	62	8.2	0.1	0.1	1	1
AGOSTO	196.6			8.9	25	22.7	10.7	15.8				66	9.0	11.6	18.2	9.7	8	11
SEPTIEMBRE	185.1	27.2	21	7.8	21	23.5	10.5	16.3	97	18	36	21	65	9.3	31.8	13.1	30	7
OCTUBRE	140.3	24.8	1	6.8	19	22.0	10.4	15.2	94	14	43	26	75	10.4	141.7	27.4	29	19
NOVIEMBRE	139.1	24.2	10	7.4	3	21.6	9.9	14.8	98	24	44	10	77	10.4	48.0	13.2	18	11
DICIEMBRE	175.9	23.6	30			21.6	10.5	15.3	96	6	48	31	76	10.7	46.6	14.8	7	9
VALOR ANUAL	1912.6					22.0	10.7	15.6				71	10.1	12.4	835.6	49.6		

MES	EVAPORACION (mm)		NUBOSIDAD MEDIA (Octas)	VELOCIDAD MEDIA Y FRECUENCIAS DE VIENTO																Vel. Mayor Observada (m/s)	VELOCIDAD MEDIA (Km/h)				
	Mensual	Máxima en 24hrs		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	CALMA	Nro OBS	DIR											
ENERO	120.0		5	1.0	1	2.3	41	2.4	13	2.3	3	1.7	3	2.7	3	0.0	0	1.9	8	28	93	7.0	E	2.3	
FEBRERO	66.6		7	1.0	2	2.3	35	1.6	6	0.0	0	1.7	4	1.3	5	3.0	2	1.0	1	45	84	6.0	NE	1.7	
MARZO	93.2	7.6	9	6	0.0	0	2.4	37	1.9	10	2.0	4	2.0	1	1.7	3	1.8	7	1.0	2	37	93	7.0	NE	1.9
ABRIL	84.9	5.0	24	6	3.5	2	2.4	32	1.8	6	1.8	6	2.5	9	1.9	8	2.0	1	0.0	0	37	90	5.0	S	2.0
MAYO	82.4	5.2	5	6	2.0	1	2.9	32	2.4	10	1.7	3	2.3	7	2.5	4	0.0	0	1.0	1	42	93	6.0	NE	1.8
JUNIO	140.4	9.3	25	5																					2.5
JULIO	141.1	6.2	27	5	3.0	2	4.0	22	4.2	19	5.2	7	3.5	9	3.5	14	0.0	0	3.0	2	26	93	8.0	S	3.0
AGOSTO	132.9			5	3.0	2	4.1	30	4.0	14	4.1	10	3.3	4	4.6	9	0.0	0	4.0	1	30	93	8.0	NE	2.8
SEPTIEMBRE	118.9	8.4	22	5	0.0	0	2.6	23	3.0	19	2.2	10	3.0	13	4.1	20	0.0	0	2.0	2	12	90	8.0	S	2.9
OCTUBRE	103.4	6.1	8	6	3.0	3	3.6	31	3.0	8	2.1	8	2.6	5	4.3	4	0.0	0	5.0	1	40	93	8.0	E	2.1
NOVIEMBRE	92.6	5.9	13	6	1.3	3	3.7	27	3.4	11	3.4	6	1.8	6	1.7	7	2.0	1	2.0	1	39	90	8.0	NE	1.9
DICIEMBRE	103.5	6.5	28	6	1.0	1	3.1	34	3.3	16	1.0	1	2.2	7	2.0	9	0.0	0	2.0	2	30	93	8.0	E	2.5
VALOR ANUAL	1279.9			6																					2.0

(Fuente: (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, 2017))

## Selección de instrumentos de medición meteorológicos

Según los datos de la tabla 2.1, con la determinación de los principales factores que intervienen en el proceso de evaporación y la disponibilidad de equipos del laboratorio de transferencia de calor se usan los siguientes aparatos de medición:

- Piranómetro MS-40: Instrumento utilizado para medir las componentes global y difusa de radiación solar incidente en un campo  $2\pi$ , su operación de temperatura es de -40 a +80°C, tiempo de respuesta < 18 segundos, rango de irradiancia 0-2000 W/m<sup>2</sup>, rango espectral: 285 a 3000nm. Este instrumento consta de una cúpula de vidrio que protege el

detector y bloquea la radiación infrarroja no deseada, un detector de termopila que genera voltaje proporcional a la diferencia de temperatura en la unión fría, el protector solar corporal evita el aumento excesivo de la temperatura corporal y el nivel de burbuja configura y mantiene el sensor en una posición horizontal nivelada, se usa un gel de sílice para mantener seco el ambiente interno, evitando la condensación de humedad (Eko Instruments CO. LTD., 2018).

- Termohigrómetro 083 E: es un sensor de temperatura y humedad relativa extremadamente preciso controlado por un microprocesador, mide la variación en el cambio de capacitancia de una capa de polímero dieléctrico de un micrón de espesor. Las moléculas de agua son absorbidas a través de un electrodo de metal, la fina capa de polímero reacciona muy rápidamente, proporcionando hasta 90% del valor final de humedad relativa, tiene un rango de temperatura de  $-50^{\circ}$  a  $50^{\circ}\text{C}$ , su tiempo de respuesta es 10 segundos, con una precisión de  $\pm 2\%$ , para mediciones correctas el sensor debe colocarse dentro de una masa termal que lo proteja de la radiación directa (Campbell Scientific Inc., 2016).
- Anemómetro de tres copas 034B: Instrumento utilizado para censar la velocidad y dirección del viento, tiene un rango de velocidad de 0 a 75 m/s con un umbral de inicio de 0.4m/s, tiene un rango de temperatura de  $-30^{\circ}\text{C}$  a  $70^{\circ}\text{C}$  (Campbell Scientific Inc., 2017).
- Pluviómetro 370: Instrumento metálico utilizado para la medición de precipitación mediante un mecanismo de cuchara basculante, el diseño permite mediciones precisas y repetibles, no requiere de constante mantenimiento, su diseño y materiales lo hace resistente a la corrosión, posee vallas metálicas que impiden la entrada de impurezas (Met one Instruments Inc., 2018).

### **2.1.3 Selección de materiales**

Se evalúan dos alternativas de material para el tanque, la utilización de hierro galvanizado y acero inoxidable, el tanque puede ser construido en ambos materiales, sin embargo, al requerir de exactitud en las uniones para evitar fugas se selecciona el acero inoxidable por sus propiedades mecánicas y alta soldabilidad. Se procede a realizar una comparación entre los dos materiales en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2.** Comparación de los materiales para el tanque clase Pan A

<b>Características</b>	<b>Acero inoxidable</b>	<b>Hierro galvanizado</b>
<b>Soldabilidad</b>	Alta soldabilidad	Se requieren otros métodos de unión
<b>Costo</b>	Costo alto	Costo medio
<b>Resistencia a la corrosión</b>	Alta resistencia a condiciones ambientales	Alta resistencia a condiciones ambientales

(Fuente: Propia)

## **2.2 Módulo 2: Estructura soporte de los paneles solares**

La estructura de soporte para paneles debe cumplir con los siguientes parámetros de diseño:

- Fácil transporte y ensamblaje
- Resistente al peso de los paneles fotovoltaicos
- Regulable a diferentes ángulos
- Resistencia a las condiciones climatológicas

En la tabla 2.3 se presentan las especificaciones técnicas en base a los parámetros anteriormente mencionados.

**Tabla 2.3.** Comparación de los materiales para el tanque clase Pan A

<b>Empresa cliente:</b>	<b>Producto:</b>		Fecha inicial: 17/12/2021	
S/N	Estructura de soporte		Última revisión: 17/12/2021	
<b>Empresa de ingeniería:</b>			Página 1/1	
EPN-FIM				
<b>Especificaciones</b>				
<b>Concepto</b>	<b>Fecha</b>	<b>Propone</b>	<b>R/D</b>	<b>Descripción</b>
<b>Función</b>	17/12/2021	I	R	Brindar soporte a los paneles solares y brindar la capacidad de inclinarse en diferentes ángulos
<b>Peso</b>	17/12/2021	I	R	16.50 Kg
<b>Dimensiones</b>	17/12/2021	I	R	1020 x 670 x 35 mm
<b>Materiales</b>	17/12/2021	I	R	Resistentes a la corrosión, de alta rigidez
<b>Grado de automatización</b>	17/12/2021	I	R	Manual

(Fuente: Propia)

Propone: I= Ingeniería

R/D: R= Requerimiento; D= Deseo

### Diseños preliminares

En base a las dimensiones del tanque y con datos de peso y dimensiones de los paneles fotovoltaicos a ser utilizados se realizan los primeros diseños con la ayuda del Software SolidWorks (Solid Works Corp., 2019). En la figura 2.1, se muestra el diseño del conjunto.

#### 2.2.1 Análisis y selección de alternativas

##### Aluminio

Es un material que posee una densidad de 2.70 g / cm<sup>3</sup>, un módulo de elasticidad de 10 x 10<sup>6</sup> psi, tiene alta resistencia a la oxidación y corrosión, sus propiedades a la tensión son bajas en comparación al acero, pero tiene una resistencia específica muy buena, es altamente maleable y tiene buena conductividad eléctrica y térmica. No muestra transición de dúctil a quebradizo a bajas temperaturas, no es tóxico y puede ser reciclado fácilmente, su costo comercial es mucho menor que el acero (Askeland, 2013).

## Acero inoxidable

Material con excelente resistencia a la corrosión, tiene alrededor de 11% de Cr, lo cual forma una capa delgada y protectora cuando el acero se expone al oxígeno, la mayoría de los aceros comerciales tienen 11% de cromo y hasta 0.8% de carbono. Algunos contienen níquel, poseen excelente soldabilidad, su costo es mayor en comparación al aluminio (Askeland, 2013).

## Matriz de selección de alternativas

En la Tabla 2.4, se determina la ponderación de los aspectos importantes como el costo, el peso y la resistencia, seguidamente en la Tabla 2.5, se evalúa el criterio de costo, en la Tabla 2.6, se evalúa el criterio de resistencia y finalmente en la Tabla 2.7 se muestra la conclusión de la evaluación que nos da como mejor alternativa el uso de aluminio.

Para esta ponderación se asume un mismo valor para el costo, el peso y la resistencia

$$\text{Costo} = \text{peso} = \text{resistencia}$$

**Tabla 2.4.** Ponderación de los criterios a evaluarse

Criterio	Costo	Resistencia	Peso	$\Sigma+1$	Ponderación
Costo		0.5	0.5	2	0.33
Resistencia	0.5		0.5	2	0.33
Peso	0	0		2	0.33
				6	1

(Fuente: Propia)

Aluminio > Acero

**Tabla 2.5.** Evaluación criterio costo

Criterio	Aluminio	Acero	$\Sigma+1$	Ponderación
Aluminio		1	2	0.67
Acero	0		1	0.33
			3	1

(Fuente: Propia)

Acero > Aluminio

**Tabla 2.6.** Evaluación criterio resistencia

Criterio	Aluminio	Acero	$\Sigma+1$	Ponderación
Aluminio		0	1	0.33
Acero	1		2	0.67
			3	1

(Fuente: Propia)

Aluminio > Acero

**Tabla 2.7.** Evaluación criterio peso

Criterio	Aluminio	Acero	$\Sigma+1$	Ponderación
Aluminio		1	2	0.67
Acero	0		1	0.33
			3	1

(Fuente: Propia)

**Tabla 2.8.** Conclusiones de la Evaluación

Conclusiones	Costo	Resistencia	Peso	$\Sigma$	Prioridad
Aluminio	$0.67*0.33$	$0.33*0.33$	$0.33*0.67$	0.5511	1
Acero	$0.33*0.33$	$0.67*0.33$	$0.33*0.33$	0.4389	2

(Fuente: Propia)

## 2.2.2 Diseño de barras horizontales para fijar los paneles

### Selección de elementos normalizados

Para el diseño de las barras horizontales para fijar los paneles se selecciona del catálogo de elementos normalizados, mostrado en el ANEXO I, disponibles en su página web, los tubos cuadrados de 25,4mm x 1.3mm de espesor (Cedal, n.d.).

En la Tabla 2.9 se detallan las dimensiones propuestas en base a los elementos normalizados

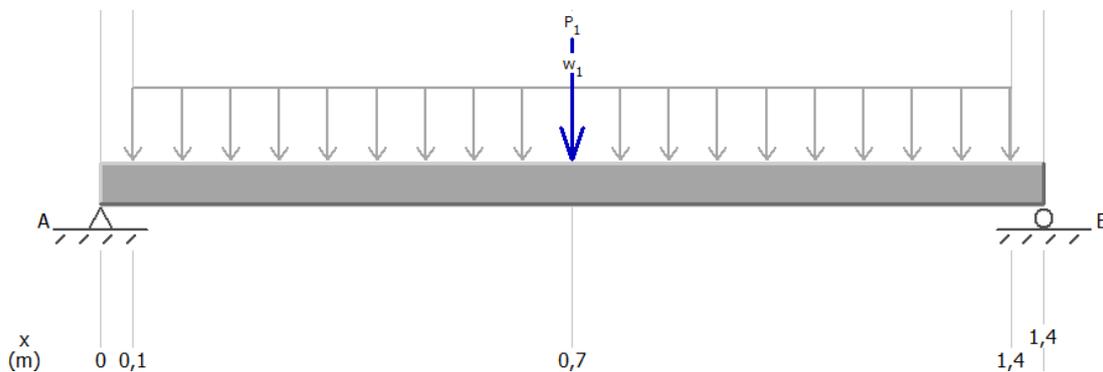
**Tabla 2.9.** Dimensiones de barras horizontales

Dimensiones de las barras	
<b>Espesor</b>	1.3 [mm]
<b>Longitud</b>	1443 [mm]
<b>Medida</b>	25.4 [mm] x 25.4[mm]
<b>Peso</b>	0.340 [Kg/m]

(Fuente: Propia)

### Diagrama de cuerpo libre

Para el análisis de los miembros horizontales se traza un diagrama de cuerpo libre en el que se muestran las cargas a las que se somete el elemento, para este caso el peso de los paneles solares (161.86 N) se divide para dos, y se representa como una carga distribuida a lo largo del elemento y a su vez el peso del mismo elemento se representa como una carga puntual en el centro de la barra, como se observa en la Figura 2.3.



**Figura 2.3.** Diagrama de cuerpo libre de las barras horizontales  
(Fuente: Propia)

### Cálculos

Se trazan los diagramas de fuerza cortante y momento flector, adjuntos en el ANEXO II para determinar el momento máximo y consecuentemente se aplica la Ecuación 2.1 (Mott, 2009):

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M_{m\acute{a}x} * c}{I}$$

**Ecuación 2.1.** Esfuerzo Máximo

Siendo:

$\sigma_{m\acute{a}x}$ : esfuerzo máximo (Pa)

$M_{m\acute{a}x}$ : momento máximo (N m)

$c$ : distancia del centro al punto más cercano de la geometría (m)

$I$ : Momento de Inercia ( $m^4$ )

Para el cálculo de la inercia de un tubo cuadrado hueco se utiliza la Ecuación 2.2 (Budynas & Nisbett, 2008):

$$I = \frac{1}{12}Le^4 - \frac{1}{12}Li^4$$

**Ecuación 2.2.** Momento de Inercia

Siendo:

$Le$ : lado externo (m)

$Li$ : lado interno (m)

Se aplica la Ecuación 2.3. (Budynas & Nisbett, 2008) para encontrar el valor del factor de seguridad ( $n$ )

$$n = \frac{S_y}{\sigma_{\text{máx}}}$$

**Ecuación 2.3.** Factor de seguridad

Siendo:

$S_y$ : resistencia a la fluencia (Mpa)

Finalmente se comparan los resultados con la tabla 2.10. (Mott, 2009), que nos brinda recomendaciones de factores de seguridad para diferentes casos de carga, en este caso los miembros serán sometidos a cargas estáticas.

**Tabla 2.10.** Recomendaciones de factores de seguridad para diferentes casos de carga

Forma de carga	Factor de diseño	Esfuerzo cortante de diseño
Cargas estáticas	Use $N = 2$	$\tau_d = S_y/4$
Cargas repetidas	Use $N = 4$	$\tau_d = S_y/8$
Choque o impacto	Use $N = 6$	$\tau_d = S_y/12$

(Fuente: (Mott, 2009))

### 2.2.3 Diseño de barras verticales para soporte

#### Selección de elementos normalizados

Para el diseño de las barras verticales para soporte de una de las barras horizontales para fijar los paneles se selecciona del catálogo de elementos normalizados, mostrado en el ANEXO I, disponibles en su página web, los tubos cuadrados de 25,4mm x 1.3mm de espesor (Cedal, n.d.).

En la tabla 2.11. se detallan las dimensiones propuestas para este conjunto.

**Tabla 2.11.** Dimensiones de barras verticales para soporte

<b>Dimensiones de las barras</b>	
<b>Espesor</b>	1.3 [mm]
<b>Longitud</b>	630 [mm]
<b>Medida</b>	25.4 [mm] x 25.4[mm]
<b>Peso</b>	0.340 [Kg/m]

(Fuente: Propia)

Para el análisis de estos miembros verticales se determina la carga a la que serán sometidos los elementos, para este caso el peso de los paneles solares (161.86 N) se divide para cuatro.

### **Cálculos**

Se analizan los elementos verticales como columnas, para lo que se calcula la carga crítica que soporta con la Ecuación 2.4. (Budynas & Nisbett, 2008).

$$P_{cr} = \frac{C * \pi^2 * E * I}{l^2}$$

**Ecuación 2.4.** Carga crítica en columnas

Siendo:

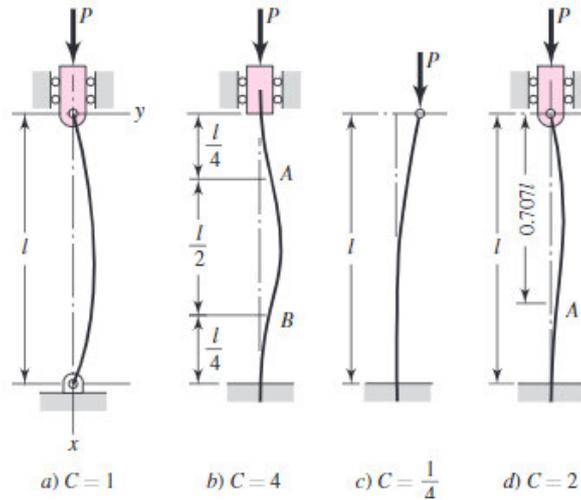
*E*: módulo de elasticidad (GPa)

*l*: longitud efectiva (N m)

*C*: condiciones de extremos

*I*: Momento de Inercia ( $m^4$ )

En la Figura 2.4. se muestran los diferentes casos de condiciones de empotramiento para el análisis de columnas donde se observa: (a) ambos extremos articulados, (b) ambos extremos empotrados, (c) un extremo libre y un extremo empotrado, (d) un extremo articulado y un extremo empotrado (Budynas & Nisbett, 2008); y se determina que la viga es empotrada por ambos lados.



**Figura 2.4.** Condiciones de empotramiento de columnas  
(Fuente: (Budynas & Nisbett, 2008))

Finalmente se compara la carga crítica que soporta el elemento con la carga a la que será sometido, para comprobar la validez del diseño.

### 2.2.4 Diseño de barras verticales con orificios

#### Selección de elementos normalizados

Para el diseño de las barras verticales con orificios para la nivelación en diferentes ángulos de los paneles se selecciona del catálogo de elementos normalizados, mostrado en el ANEXO I, disponibles en su página web, los tubos cuadrados de 25,4mm x 1.3mm de espesor (Cedal, n.d.).

En la tabla 2.12. se detallan las dimensiones consideradas para este conjunto.

**Tabla 2.12.** Dimensiones de barras verticales para soporte

Dimensiones de las barras	
<b>Espesor</b>	1.3 [mm]
<b>Longitud</b>	600 [mm]
<b>Medida</b>	25.4 [mm] x 25.4[mm]
<b>Peso</b>	0.340 [Kg/m]

(Fuente: Propia)

#### Cálculos

Para el análisis de los miembros verticales con orificios se determina la carga a la que serán sometidos los elementos al igual que en el caso anterior por lo que se ocupa la Ecuación 2.4. y adicionalmente se realiza el cálculo de las alturas de los orificios con la función de tangente del ángulo.

## 2.2.5 Diseño de barras verticales alojadoras de las barras con orificios

### Selección de elementos normalizados

Para el diseño de las barras verticales alojadoras de las barras con orificios se selecciona del catálogo de elementos normalizados, mostrado en el ANEXO I, disponibles en su página web, los tubos cuadrados de 31,75mm x 1.1mm de espesor (Cedal, n.d.).

En la tabla 2.13. se detallan las dimensiones propuestas para este conjunto.

**Tabla 2.13.** Dimensiones de barras verticales para soporte

Dimensiones de las barras	
<b>Espesor</b>	1.10 [mm]
<b>Longitud</b>	604.60 [mm]
<b>Medida</b>	31.75 [mm] x 31.75 [mm]
<b>Peso</b>	0.366 [Kg/m]

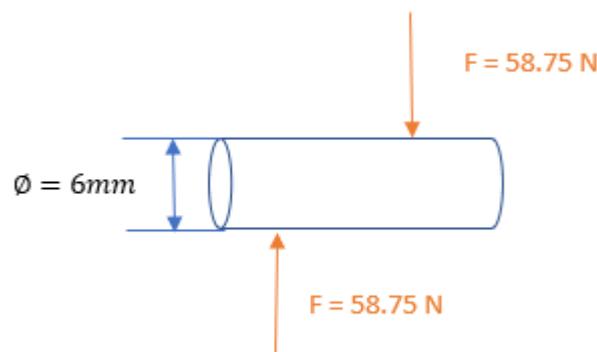
(Fuente: Propia)

### Cálculos

Para el análisis de las barras verticales alojadoras se determina las fuerzas a las que se somete el elemento y se hace uso de la Ecuación 2.4. para determinar la carga máxima que soporta el elemento y comparar la carga máxima soportada por el elemento y la carga a la que será sometido este.

## 2.2.6 Diseño de pasadores

El pasador es diseñado a cortante puro, tiene un diámetro de 6mm. Siendo un pasador grado A325 tiene un límite de fluencia ( $S_y$ ) de 634MPa. En la Figura 2.5. se presenta el diagrama de cuerpo libre, donde se señalan las fuerzas a las que se someterá el elemento.



**Figura 2.5.** Diagrama de fuerzas de los pasadores  
(Fuente: Propia)

Mediante el uso de la Ecuación 2.5. (Budynas & Nisbett, 2008) se determina el esfuerzo cortante

$$\tau = \frac{F}{A}$$

**Ecuación 2.5.** Esfuerzo Cortante

Siendo:

$F$ : fuerza (N)

$A$ : área del círculo ( $mm^2$ )

Se determina la resistencia a la fluencia en cortante ( $S_{Sy}$ ) tomado de la Tabla 2.10. por la Ecuación 2.6.

$$S_{Sy} = 0.5 * S_y$$

**Ecuación 2.6.** Resistencia a la fluencia en cortante

Siendo:

$S_y$ : resistencia a la fluencia (N)

Finalmente se aplica la Ecuación 2.3. para determinar el factor de seguridad.

## 2.3 Planos de la estación evaporimétrica

Una vez realizado el dimensionamiento del módulo 1 y módulo 2 se realizan los planos de conjunto con el uso del software AutoCAD (Autodesk, 2020) que detalla cada uno de los instrumentos de medición de la estación evaporimétrica y su ubicación ; además se realiza cada uno de los planos de detalle de cada uno de los elementos que forman parte de los módulos 1 y 2, cuyo detalle puede ser visualizado en los ANEXOS IV, V, VI, VII, VIII, IX, X.

## 2.4 Construcción

La construcción se efectuó con ayuda de un profesional en un taller de metalmecánica ubicado en el sur de Quito, en la Tabla 2.13. se especifica el tipo de materia prima y elementos normalizados necesarios para la construcción de cada elemento.

**Tabla 2.14.** Detalle de elementos para la construcción de la estación de evaporación

No	Material	Cantidad	Elementos	Empleo
<b>Módulo 1</b>				
1	Acero Inoxidable 304-2b	1	Círculo $\varnothing = 1.21\text{m}$	Fondo de tanque clase Pan A
		1	Rectángulo 25,5cm x 3.80m	Pared de tanque clase Pan A
2	Madera	1	Pallet estándar	Apoyo de tanque
<b>Módulo 2</b>				
3	Aluminio comercial	2	Tubos cuadrados de 25.4mm x 600mm	Barras verticales con orificios
		2	Tubos cuadrados 25.4mmx 630mm	Barras verticales para soportes
		2	Tubos cuadrados 31.75mmx 604.6mm	Barras verticales para alojamiento de las barras con orificios
		2	Tubos cuadrados 25.4mm x 1443mm	Soportes de paneles fotovoltaicos
4	Plástico comercial	2	Uniones cuadradas 1"	Unión entre miembros del soporte
		2		Fijación al piso para el soporte
		2	Uniones cuadradas 1 $\frac{1}{4}$ "	Fijación al piso para el soporte
5	Pernos y tuercas	4	Pernos grado A325 de 6mm	Ajuste de elementos de la estructura
		2		Pasador nivelador de altura

(Fuente: Propia)

### 2.4.1 Proceso de Construcción Módulo 1

Para el tanque se usa media lámina de acero inoxidable 430-2b de 1mm y se corta a láser para obtener acabados con precisión en el corte, seguidamente se corta dos tiras de 25,5cm x 2,40m para cubrir el perímetro de la circunferencia, finalmente se recurre al proceso de soldadura TIG para la unión de los diferentes elementos.

Para el marco donde se apoya el tanque se hace uso de pallets reciclados.

En la Figura 2.6. se observa un paso de la construcción del tanque.



**Figura 2.6.** Proceso de construcción Módulo 1  
(Fuente: Propia)

#### **2.4.2 Proceso de construcción Módulo 2**

Para la construcción del soporte regulable se usa un flexómetro para medición exacta de los elementos que conforman el conjunto, detallado en la tabla 14, para el proceso de corte se hace uso de una cortadora de banco, finalmente se eliminan las rebabas y con la ayuda de un taladro de banco se realizan los orificios de la manera que detallan los planos de construcción detallados en el ANEXO VII, VIII, IX, X.

En la Figura 2.7. se muestra el proceso de construcción del módulo 2



**Figura 2.7.** Proceso de perforación y corte de tubos  
(Fuente: Propia)

Para la unión y sujeción de piezas se hace uso de las uniones plásticas previamente perforadas donde se colocan los pernos y finalmente se ajustan con las tuercas, como se puede ver en la Figura 2.8.



**Figura 2.8.** Uniones plásticas  
(Fuente: Propia)

Para la fijación al piso de las barras horizontales de soporte y de las barras alojadoras de las barras verticales con orificios se hace uso de las uniones cuadradas de 1" y 1 ½" previamente ancladas al piso por medio de tacos Fisher y tornillos.

## 2.5 Análisis de Costos

En la Tabla 2.15. se detalla el costo de materiales empleados en la construcción del módulo 1 y modulo 2 en conjunto.

**Tabla 2.15.** Detalle del costo de materiales utilizados en la construcción

Cantidad	Material	Costo	Total
1	Tubo cuadrado de aluminio 1" x 1"	15,99	15,99
0,50	tubo cuadrado de aluminio de 1 1/4" x 1 1/4"	22,62	11,31
1	lamina de acero inoxidable 1mm	48,59	48,59
4	soportes plasticos 1"	0,2	0,8
2	soportes plasticos 1 1/4"	0,2	0,4
4	pernos de 1 1/2"	0,15	0,6
2	pernos de 2"	0,16	0,32
2	palets	3	6
		<b>TOTAL</b>	<b>84,01</b>

(Fuente: Propia)

En la Tabla 2.16. se detalla el costo de mano de obra empleados en la construcción del módulo 1 y modulo 2 en conjunto.

**Tabla 2.16.** Detalle de costos de mano de obra en la construcción

Cantidad	Proceso	Costo	Total
1	corte plasma	10	10
6	corte aluminio	0,25	1,5
1	armado palet	5	5
1	proceso soldadura	10	10
		TOTAL	26,5

(Fuente: Propia)

## 2.6 Protocolo de Pruebas

Las pruebas realizadas verifican el buen funcionamiento de la estructura y del tanque.

### 2.6.1 Protocolo de detección de Fugas

Objetivo: Detectar fugas en el tanque clase Pan A

Actividades:

- Rellenar con agua el tanque
- Realizar una inspección visual de todas las uniones del fondo con las paredes del tanque y también las uniones verticales de las paredes del tanque.

### 2.6.2 Protocolo de carga

Objetivo: Determinar la resistencia de la estructura para soportar peso, observar la estabilidad del conjunto.

Actividades:

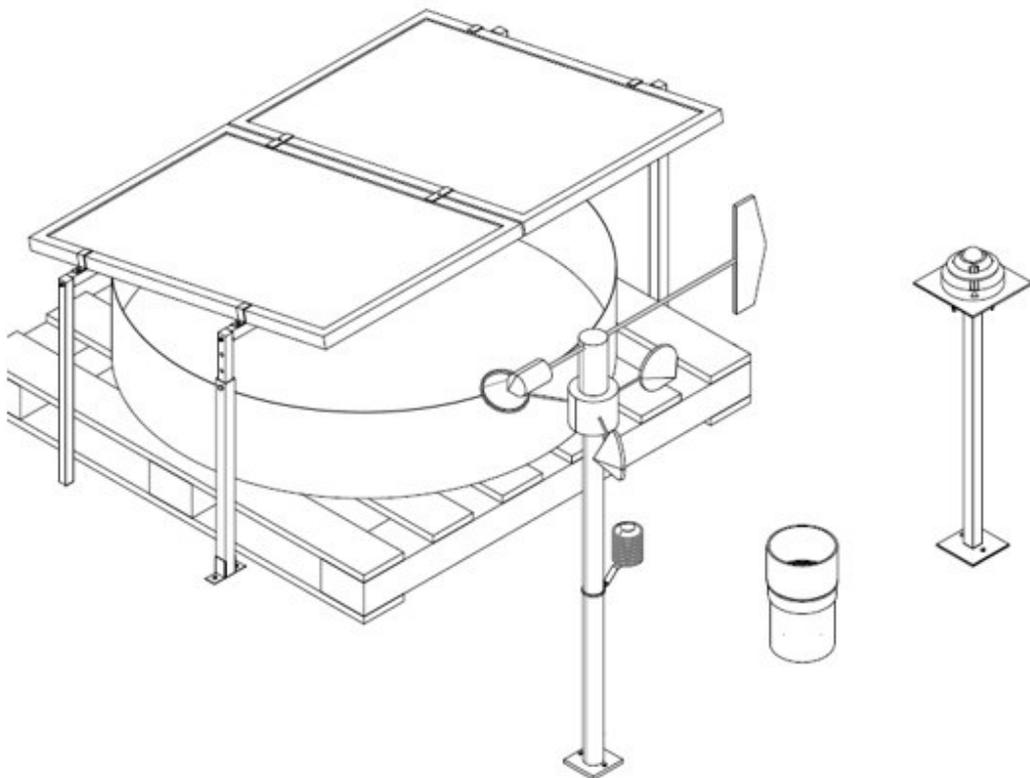
- Para el soporte fijo delantero se fija al piso la estructura y se coloca pesos distribuidos a lo largo de la barra horizontal de tal manera que se pueda simular un peso de 9 kg que es 0.75kg más alto que el peso al que se someterá la barra.

- Para el soporte regulable en una inclinación de cero grados colocamos el peso distribuido de 9kg que simula al peso al que será sometido la barra y en una inclinación máxima de 45 grados se repite el procedimiento anteriormente descrito.
- Se realiza una inspección visual de la estabilidad de la estructura tanto en cero grados como en 45 grados.

### 3 RESULTADOS CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 3.1 Resultados

La Figura 3.1. muestra el ensamble de la estación evaporimétrica, conformada por el módulo 1 y módulo 2, así como la ubicación de los instrumentos de medición meteorológicos



**Figura 3.1.** Estación Evaporimétrica  
(Fuente: Propia)

Para el montaje de la estación de medición de evaporación se utilizan los materiales e instrumentos detallados a continuación:

#### Módulo 1

En base a la norma técnica 83 de la Organización Mundial Meteorológica se construye el tanque de acero inoxidable ASTM 430 de 1mm de espesor con el procedimiento de soldadura TIG cortado previamente en laser para obtener acabados con precisión. El tanque es colocado sobre un pallet de madera con un espesor de 15cm.

En la Figura 3.2. se observa la imagen del tanque evaporimétrico construido.



**Figura 3.2.** Tanque evaporimétrico construido  
(Fuente: Propia)

En la tabla 3.1. se detallan los instrumentos utilizados para las mediciones de temperatura ambiental, velocidad del viento, radiación y precipitación, mediciones que permitirán cuantificar teóricamente la evaporación.

Adicionalmente se coloca una regla graduada en el tanque para el control del nivel de agua cuando necesite rellenarse y la medición experimental de la evaporación que permitirá realizar comparaciones entre mediciones experimentales y teóricas

**Tabla 3.1.** Detalle de instrumentos de medición meteorológicos

<b>EQUIPO</b>	<b>IMAGEN</b>	<b>FUNCIÓN</b>	<b>UBICACIÓN</b>
<b>Piranómetro MS-40</b>		Medición de radiación	Se coloca evitando sombra sobre este, en la parte posterior y a 80 cm del tanque sobre una base metálica de 75 cm medidos desde el suelo.
<b>Termo higrómetro 083 E</b>		Medición de temperatura y humedad relativa del ambiente	Se coloca en la esquina izquierda a 80cm del tanque acoplado a una base metálica a una altura de 125cm medidos desde el suelo
<b>Anemómetro y veleta 034 B</b>		Medición de velocidad y dirección del viento	Se coloca en el mismo soporte de termo higrómetro a una altura de 175cm medidos desde el suelo
<b>Pluviómetro 8" rain gauge .2mm</b>		Medición de precipitación	Se coloca a nivel del piso al lado izquierdo del piranómetro a unos 30 cm.
<b>Regla graduada</b>		Medición del nivel de agua	Se coloca dentro del tanque evaporimétrico

(Fuente: Propia)

## Módulo 2

Se enlista las respectivas cantidades, tipos y medidas de materiales requeridos para su construcción en la Tabla 2.13.

Adicionalmente se coloca un empaque antideslizante en el tubo para evitar que los paneles se resbalen, los mismos que será sujetos al tubo por medio de sujetadores tipo s y y tornillos en los extremos y sujetadores tipo placa en el centro.

Al realizar los cálculos de diseño se analizan los factores de seguridad de la estructura obteniendo un valor de 11.76, superando la recomendación para cargas estáticas detallada en la Tabla 2.10. y para los soportes del conjunto se analizó la carga máxima que soporta el material, sobrepasando por mucho el peso del conjunto. De este modo se comprueba la validez del diseño.

En las Figuras 3.3. y 3.4. se puede observar el conjunto de soporte fijo ensamblado y el soporte regulable en posición de 45 grados, respectivamente.



**Figura 3.3.** Soporte Fijo  
(Fuente: Propia)



**Figura 3.4.** Soporte regulable en posición 45 grados  
(Fuente: Propia)

## Costos

Para la construcción de la estación de evaporación se tuvo un gasto de \$84.01 en los materiales necesarios para la para la construcción del módulo 1 y módulo 2, adicionalmente se tuvo un gasto de \$26.50 de mano de obra para ambos módulos en conjunto, teniendo un gasto total de \$110.51.

## Protocolo de Pruebas

La inspección visual de detección de fugas es satisfactoria, no se halló ninguna fuga por lo que se concluye que soldadura en uniones del piso y paredes se encuentran realizadas con éxito. En la Figura 3.5. se puede visualizar la exposición de las uniones al agua y la nula existencia de fugas



**Figura 3.5.** tanque con agua, comprobación de fallas  
(Fuente: Propia)

Las pruebas de peso para el soporte delantero fueron satisfactorias, es decir el conjunto se mantuvo estable al colocar el peso distribuido. En la Figura 3.6. se puede observar la estabilidad del soporte.



**Figura 3.6.** Prueba de cargas, soporte fijo  
(Fuente: Propia)

Para el soporte regulable, sin embargo, en una inclinación de 45 grados se presentaron los inconvenientes de inestabilidad del conjunto al ser colocados los pesos.

### **Correcciones en base al protocolo de pruebas**

Debido a la inestabilidad generada en la estructura en la inclinación de 45 grados por la holgura existente entre la barra vertical con orificios y la barra vertical de soporte donde es insertada, se resuelve cambiar el tubo de aluminio de por tubo de acero inoxidable 304-2b de 30mm x 30mm x 1,5mm que presenta menor holgura y cuyos cálculos se encuentran en el ANEXO III.

Con las correcciones aplicadas existe una variación en el costo del conjunto, añadiendo un valor de \$35, 50 por la adquisición y fabricación de las barras alojadoras de las barras con orificios, adicionalmente se cambian los soportes plásticos para la sujeción al piso por sujeciones de ángulo de acero soldadas a las bases y perforadas para insertar los tornillos y tacos Fisher.

## **3.2 Discusión**

El desarrollo del presente componente permitirá medir de manera experimental el fenómeno de evaporación cuando. En este caso, debido a la estructura desmontable y que cambia de ángulo del soporte de paneles fotovoltaicos, se puede realizar un sinnúmero de estimaciones experimentales de la evaporación cuando la superficie del agua está cubierta por paneles fotovoltaicos y también cuando carezca de estos. Esto permitirá utilizar a la estación de medición como un *proxy* de lo que puede suceder en un reservorio de agua al cual se le han añadido estos paneles fotovoltaicos.

La eficiencia de los paneles fotovoltaicos solares mejora al ser ubicados sobre la superficie del agua, sin embargo, debido al tamaño del tanque construido no será posible cuantificar esta eficiencia como producción de energía fotovoltaica por que el área total de los paneles fotovoltaicos no se encuentra dentro del área de evaporación del agua.

Se diseñó una estructura de aluminio, que sostiene y permite nivelar los paneles fotovoltaicos cubriendo la superficie del agua. Estudios a escala similares a este como Adbelal (2021) presentan estructuras de aluminio para sostener los paneles fotovoltaicos, pero la diferencia radica en que se diseñaron otra clase de tanques medidores que permitieron simular las estructuras flotantes sin embargo para nuestro caso no pudo ser posible debido a que el tamaño del área del tanque medidor es menor al área de los paneles disponibles para esta investigación.

### **3.3 Conclusiones**

En el presente estudio se diseñó y construyó una estación de medición de evaporación a través del análisis de las normas e instrucciones para observadores meteorológicas además de las herramientas de diseño como el software de SolidWorks (Solid Woks Corp., 2019) y AutoCAD (Autodesk, 2020).

Utilizando los datos recopilados de norma técnica 83 de la Organización Mundial Meteorológica, y el Manual para observadores climatológicos se realizó el diseño mecánico de la estación medición de evaporación clase Pan A, con la instrumentación necesaria para poder obtener mediciones de la taza de evaporación de la superficie del agua.

Con los datos utilizados en el dimensionamiento anterior y con las características físicas de los paneles fotovoltaicos disponibles para el proyecto se realizó el diseño mecánico de la estructura de soporte que además de sostener los paneles permite dar a estos una inclinación de 0 a 45 grados, para tener un mejor aprovechamiento del recurso solar de manera que el efecto de sombras sobre estos disminuya a lo largo de todo el año.

Con los planos de conjunto y detalle anexados al presente trabajo se construyó una estación de medición de evaporación para la comparación de la taza de evaporación cuando la superficie del agua se encuentra cubierta por paneles fotovoltaicos y la taza de evaporación cuando la superficie del agua se encuentra libre. Adicionalmente como resultado de la prueba de fugas, se comprobó la funcionalidad del tanque sin embargo en la prueba de cargas se presentó inestabilidad en uno de los soportes, por lo que se cambia el diseño inicial de este.

La estación de medición evaporimétrica está definida para ser instalada y utilizada en la ciudad de Quito, por lo tanto, se han tomado en cuenta las condiciones climáticas del lugar, siendo posible ser usada en cualquier otra ciudad con parecidas condiciones climáticas.

### **3.4 Recomendaciones**

- Se recomienda el reemplazo de la regla graduada por un sensor de nivel de agua para obtener mediciones de manera automática sin la necesidad de mediciones manuales por parte de la persona responsable de la toma de datos.
- Se recomienda la limpieza periódica del tanque para evitar acumulación de impurezas en el fondo del tanque y la lectura incorrecta de mediciones de evaporación.
- Se recomienda cubrir el tanque con malla para evitar que los pájaros puedan usarlo como bebedero y alterar las mediciones.
- Se recomienda la utilización de un tanque adicional que permita cuantificar los cambios en el nivel del agua en condiciones iguales, es decir al mismo tiempo.

## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelal, Q. (2021). Floating PV; An assessment of water quality and evaporation reduction in semi-arid regions. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 16(3), 732–739. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctab001>
- Askeland, D. R. (2013). *Ciencia e Ingeniería de Materiales*.
- Autodesk. (2020). *AutoCad*.
- Budynas, R. G., & Nisbett, K. J. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (8va ed.).
- Campbell Scientific Inc. (2016). *INSTRUCTION MANUAL Model 083E Relative Humidity and Temperature Sensor*. [www.campbellsci.com](http://www.campbellsci.com).
- Campbell Scientific Inc. (2017). *INSTRUCTION MANUAL Met One 034B Wind Set*.
- Cazzaniga, R. (2020). Floating PV structures. In *Floating PV Plants* (pp. 33–45). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817061-8.00004-X>
- Cazzaniga, R., Rosa-Clot, M., Rosa-Clot, P., & Tina, G. M. (2019). Integration of PV floating with hydroelectric power plants. In *Heliyon* (Vol. 5, Issue 6). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01918>
- Cedal. (n.d.). *Cedal Aluminio*. <http://www.cedal.com.ec/index.php/es>
- Chereque Morán, W. (1989). *Hidrología para estudiantes de ingeniería civil*.
- Eko Instruments CO. LTD. (2018). *MS-40 Pyranometer ISO9060 Second Class*. [www.eko-eu.com](http://www.eko-eu.com)
- Gonzalez Sanchez, R., Kougias, I., Moner-Girona, M., Fahl, F., & Jäger-Waldau, A. (2021). Assessment of floating solar photovoltaics potential in existing hydropower reservoirs in Africa. *Renewable Energy*, 169, 687–699. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.041>
- Instituto de Investigación de Energía Solar de Singapur. (2018). *Donde el sol se encuentra con el agua INFORME DE MERCADO SOLAR FLOTANTE*.
- Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. (2017). *ANUARIO METEOROLÓGICO Nº 53-2013*.
- Linsley Jr, R. K., Kohler, M. A., & H. Paulhus, J. L. (1977). *Hidrología para ingenieros* (S. A. McGraw-Hill Inc Latinoamericana (ed.); Segunda Ed).
- López Moreno J.I. (2008). *Estimación de pérdidas de agua por evaporación en embalses del Pirineo*. 61–81.

- Met one Instruments Inc. (2018). *Specifications Precipitation & Snow Gauges*.  
www.metone.com
- Mott, R. L. (2009). *Resistencia de Materiales* (EDUCACIÓN PEARSON (ed.); Quinta edi).
- Peláez Samaniego, M. R., & Espinoza Abad, J. L. (2015). *Energías renovables en el Ecuador. Situación actual, tendencias y perspectivas*.  
<https://www.researchgate.net/publication/291356953>
- Rauf, H., Gull, M. S., & Arshad, N. (2019). Integrating floating solar PV with hydroelectric power plant: Analysis of Ghazi barotha reservoir in Pakistan. *Energy Procedia*, 158, 816–821. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.214>
- Rosa-Clot, P. (2020). FPV and environmental compatibility. In *Floating PV Plants* (pp. 101–118). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817061-8.00009-9>
- Silvério, N. M., Barros, R. M., Tiago Filho, G. L., Redón-Santafé, M., Santos, I. F. S. dos, & Valério, V. E. de M. (2018). Use of floating PV plants for coordinated operation with hydropower plants: Case study of the hydroelectric plants of the São Francisco River basin. *Energy Conversion and Management*, 171, 339–349. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.095>
- Solid Woks Corp. (2019). *Solid Works*.
- World Meteorological Organization. Working Group on Evaporation Measurement, & Gangopadhyaya, M. (1966). *Measurement and Estimation of Evaporation and Evapotranspiration: Report of a Working Group on Evaporation Measurement of the Commission for Instruments and Methods of Observation*.

## **5 ANEXOS**

ANEXO I. Catálogo de tubos cuadrados normalizados de aluminio

ANEXO II. Cálculos correspondientes a la estructura de soporte de paneles fotovoltaicos

ANEXO III. Cálculos de correcciones en el diseño

ANEXO IV. Plano Conjunto de toda la estación evaporimétrica

ANEXO V. Plano Conjunto del módulo 2

ANEXO VI. Plano Detalle del tanque clase Pan A

ANEXO VII. Plano Detalle del soporte fijo delantero

ANEXO VIII. Plano Detalle del soporte regulable

ANEXO IX. Plano Detalle de las barras con orificios

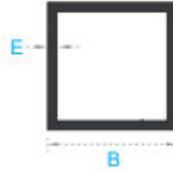
ANEXO X. Plano Detalle del soporte fijo posterior

## ANEXO I



PERFILERIA  
DE ALUMINIO

TUBOS  
CUADRADOS



REFERENCIA	Lado B		Espesor(E) mm	Peso Kg/m
	Milímetros	Pulgadas		
1014	44.40	1 3/4	1.90	0.875
1015	50.80	2	2.00	1.058
1017	38.10	1 1/2	2.40	0.929
**1244	22.20	7/8	1.20	0.298
*1285	25.40	1	1.60	0.488
1286	25.40	1	1.80	0.461
1373	31.73	1 1/4	1.80	0.584
1386	38.10	1 1/2	1.80	0.708
**1466	22.20	7/8	1.00	0.231
1714	25.40	1	1.30	0.340
1852	50.80	2	1.40	0.750
1854	31.75	1 1/4	1.10	0.366
*1855	25.40	1	1.30	0.412
2036	25.90	1.02	1.10	0.29
3073	63.50	2 1/2	2.50	1.653

\*Con Tornillero

\*\*Con Aristas Redondas



CORPORACION ECUATORIANA DE ALUMINIO S.A.

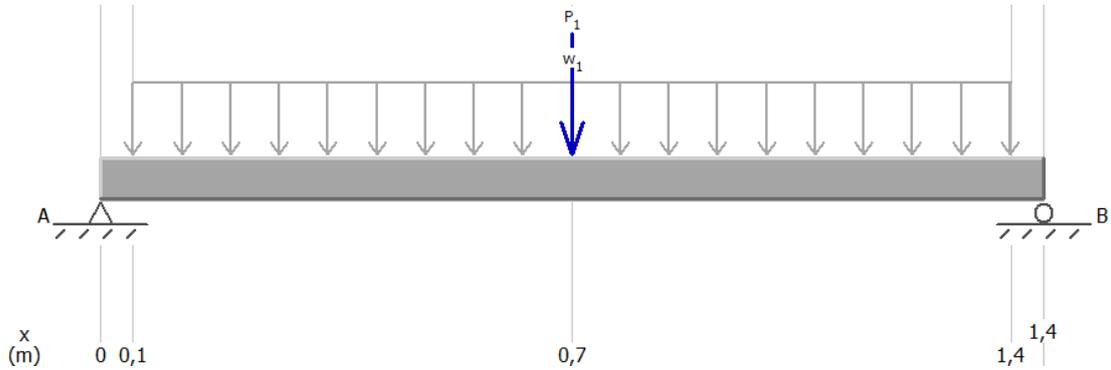
TUBOS CUADRADOS

## ANEXO II

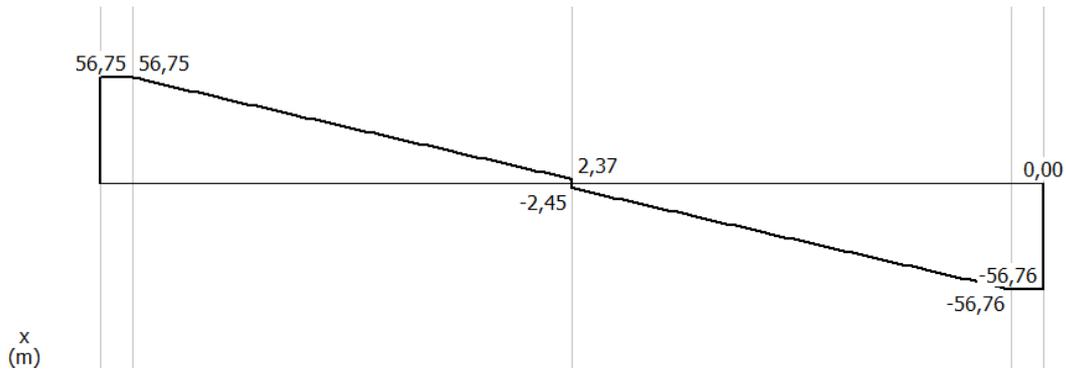
### Cálculos correspondientes a la estructura del Módulo 2

#### Cálculos de barras horizontales para fijar los paneles

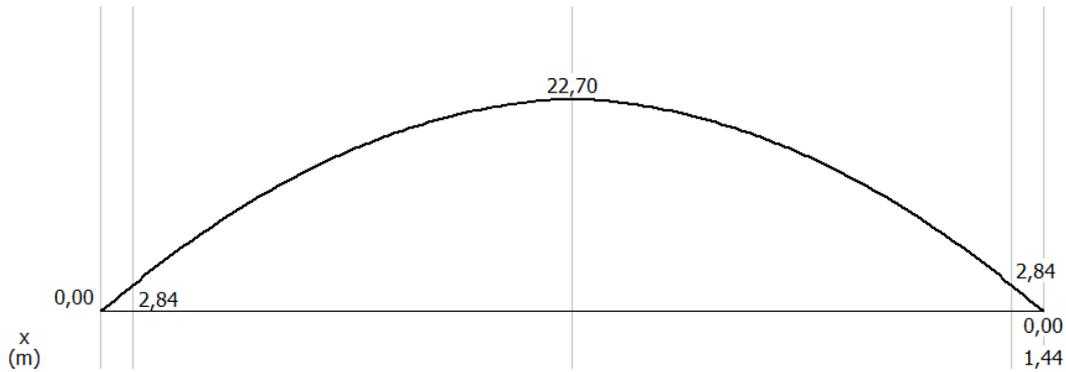
Se trazan los diagramas de fuerza cortante y momento flector para el diagrama de fuerzas planteado en la Figura 1,



**Figura 1.** Diagrama de cuerpo libre de las barras horizontales donde se sujetan los paneles fotovoltaicos  
(Fuente: Propia)



**Figura 2.** Diagrama de fuerza cortante de las barras horizontales donde se sujetan los paneles fotovoltaicos  
(Fuente: Propia)



**Figura 3.** Diagrama de momento flector de las barras horizontales donde se sujetan los paneles fotovoltaicos  
(Fuente: Propia)

Del análisis y de las especificaciones de los tubos de aluminio obtenemos los siguientes datos:

$$M_{\text{máx}} = 22,70 \text{ (Nm)}; S_y = 276 \text{ (MPa)}; c = 0,0127 \text{ (m)}; L_e = 0,0254 \text{ (m)}; L_i = 0,0228 \text{ (m)}$$

$$I = \frac{1}{12}(0,0254)^4 - \frac{1}{12}(0,0228)^4 = 1,228 \times 10^{-8} \text{ (m}^4\text{)}$$

$$\sigma_{\text{máx}} = \frac{22,70 * 0,0127}{1,228 \times 10^{-8}} = 2,348 \times 10^7 \text{ (Pa)}$$

$$n = \frac{276 \times 10^6}{2,348 \times 10^7} = 11,755$$

Comparando el factor de seguridad obtenido (11,755) con el factor de seguridad recomendado en la Tabla 2.10. para cargas estáticas (2), tenemos un diseño adecuado.

### Cálculos de barras verticales para soporte

Se tienen los siguientes datos de la geometría de los tubos y del dimensionamiento establecido en la Tabla 2.12.

$$E = 71 \text{ (Gpa)}; l = 0,63 \text{ (m)}; L_e = 0,0254 \text{ (m)}; L_i = 0,0228 \text{ (m)}; C = 4$$

$$I = \frac{1}{12}(0,0254)^4 - \frac{1}{12}(0,0228)^4 = 1,228 \times 10^{-8} \text{ (m}^4\text{)}$$

$$P_{cr} = \frac{4 * \pi^2 * 71 \times 10^9 * 1,228 \times 10^{-8}}{0,63^2} = 86,723 \text{ (KN)}$$

Comparando la carga crítica que soporta el elemento con la carga a la que será sometido, se comprueba la validez del diseño.

### Cálculo de barras verticales con orificios

Se tienen los siguientes datos de la geometría de los tubos y del dimensionamiento establecido en la Tabla 2.13.:

$$E = 71 \text{ (Gpa)}; l = 0,60 \text{ (m)}; Le = 0,0254 \text{ (m)}; Li = 0,0228 \text{ (m)}; C = 4$$

$$I = \frac{1}{12}(0,0254)^4 - \frac{1}{12}(0,0228)^4 = 1,228 \times 10^{-8} \text{ (m}^4\text{)}$$

$$P_{cr} = \frac{4 * \pi^2 * 71 \times 10^9 * 1,228 \times 10^{-8}}{0,60^2} = 95,612 \text{ (KN)}$$

Comparando la carga crítica que soporta el elemento con la carga a la que será sometido, se comprueba la validez del diseño.

### Cálculo del ángulo de inclinación

Con los datos de separación entre soporte y soporte se hace cálculo de las distancias a las que se debe perforar el tubo, la tabla 1 detalla estas distancias.

**Tabla. 1.** Distancias de perforación de la barra con orificios

Separacion entre barras	Inclinaciones	Distancias
500	0	0
500	5	44
500	10	88
500	15	134
500	20	182
500	25	233
500	30	289
500	35	350
500	40	420
500	45	500

(Fuente: Propia)

### Cálculo de barras verticales alojadoras de las barras con orificios

Se tienen los siguientes datos de la geometría de los tubos y del dimensionamiento establecido en la Tabla 2.14:

$$E = 71 \text{ (Gpa)}; l = 0,6046 \text{ (m)}; Le = 0,03175 \text{ (m)}; Li = 0,02955 \text{ (m)}; C = 1/4$$

$$I = \frac{1}{12}(0,03175)^4 - \frac{1}{12}(0,02955)^4 = 2,1142 \times 10^{-8} \text{ (m}^4\text{)}$$

$$P_{cr} = \frac{1/4 * \pi^2 * 71 \times 10^9 * 2,1142 \times 10^{-8}}{0,6046^2} = 9,331 \text{ (KN)}$$

Comparando la carga crítica que soporta el elemento con la carga a la que será sometido, se comprueba la validez del diseño.

### Cálculos de pasadores

De la Figura 2.5 tenemos los siguientes datos:

$$F = 58,75 \text{ (N)}; S_y = 634 \text{ (Mpa)}; A = 28,27 \text{ (mm}^2\text{)}$$

$$\tau = \frac{58,75}{28,27} = 2,078 \text{ (MPa)}$$

$$S_{Sy} = 0.5 * 634 = 317 \text{ (MPa)}$$

$$n = \frac{317 \times 10^6}{2,078 \times 10^6} = 152,55$$

## ANEXO III

### Cálculo de las correcciones del diseño

### Cálculo de barras verticales alojadoras de las barras con orificios

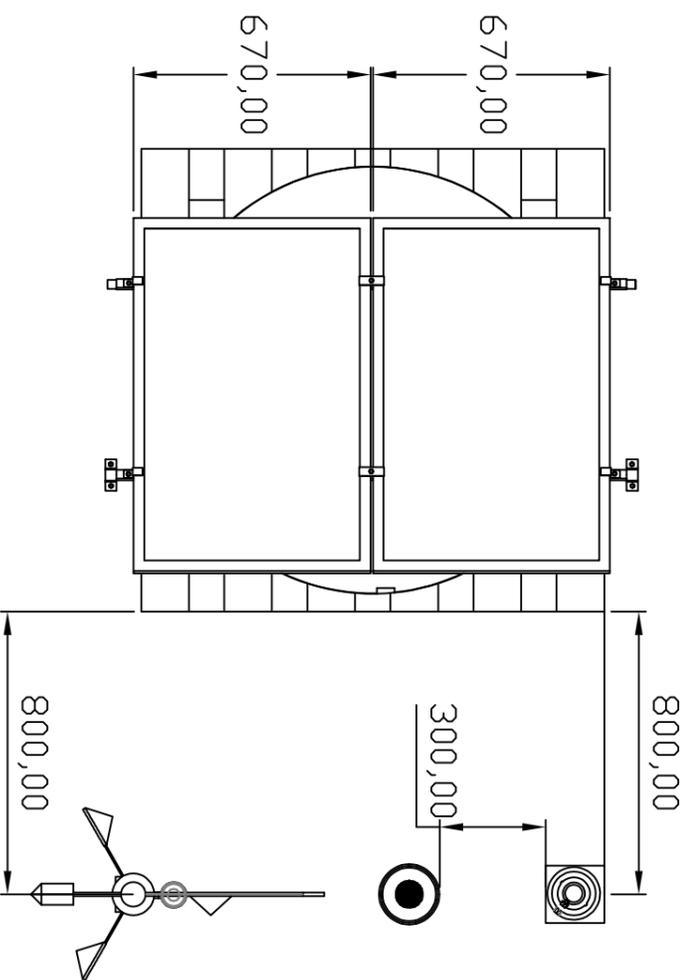
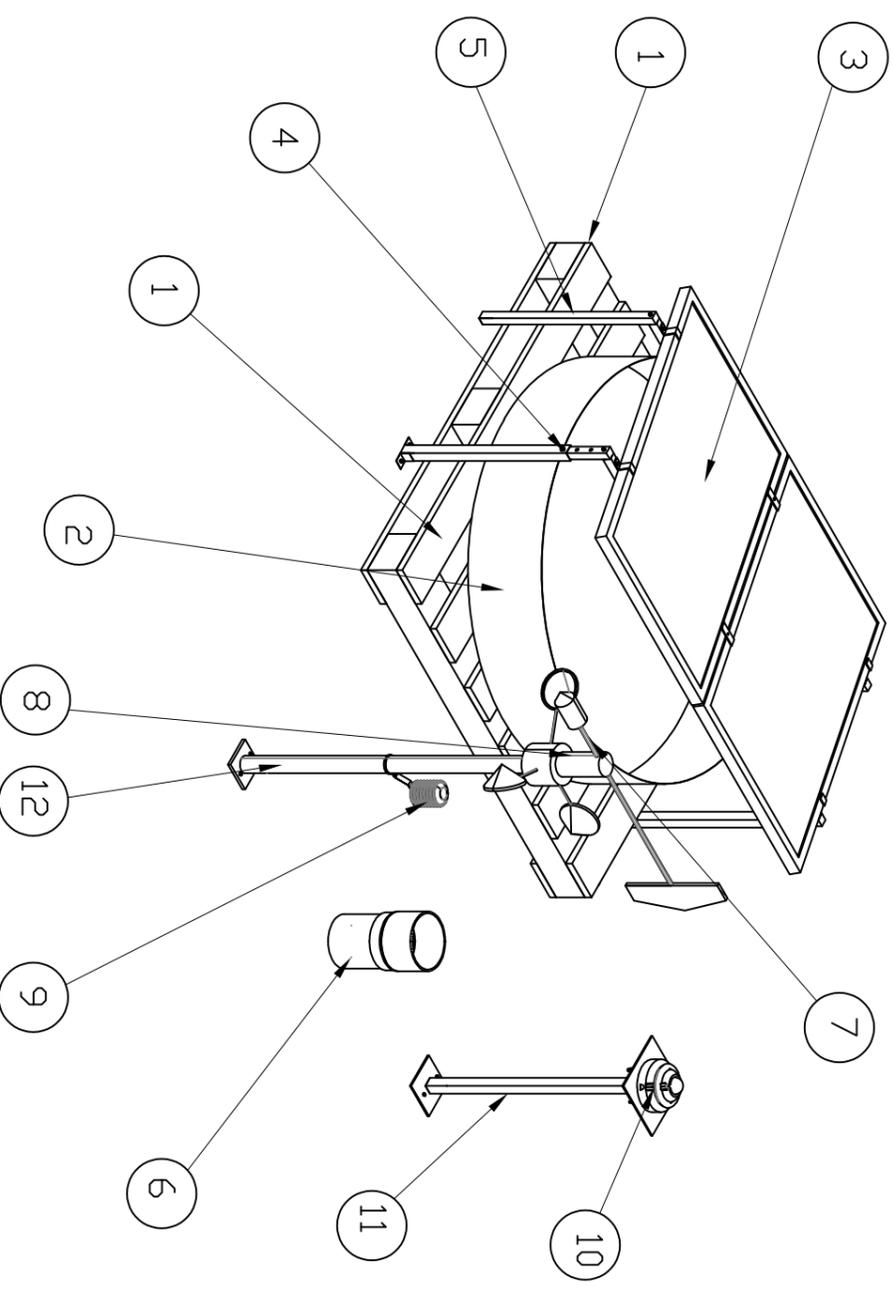
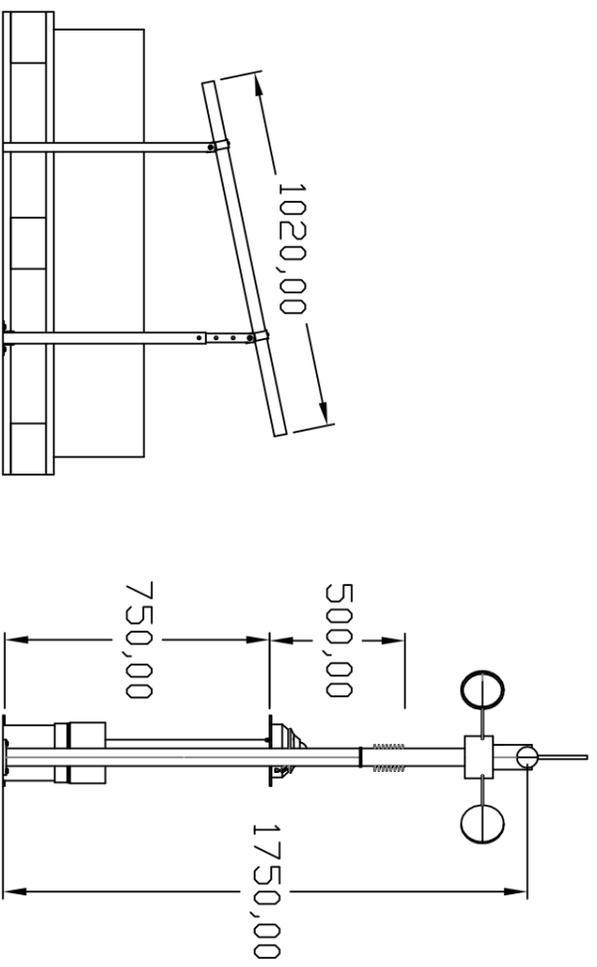
Se tienen los siguientes datos de la geometría de los tubos y del dimensionamiento establecido en la tabla 2.14:

$$E = 190 \text{ (Gpa)}; l = 0,6046 \text{ (m)}; Le = 0,030 \text{ (m)}; Li = 0,027 \text{ (m)}; C = 1/4$$

$$I = \frac{1}{12}(0,030)^4 - \frac{1}{12}(0,027)^4 = 2,3213 \times 10^{-8} \text{ (m}^4\text{)}$$

$$P_{cr} = \frac{1/4 * \pi^2 * 190 \times 10^9 * 2,3213 \times 10^{-8}}{0,6046^2} = 27,418 \text{ (KN)}$$

Comparando la carga crítica que soporta el elemento con la carga a la que será sometido, se comprueba la validez del diseño.



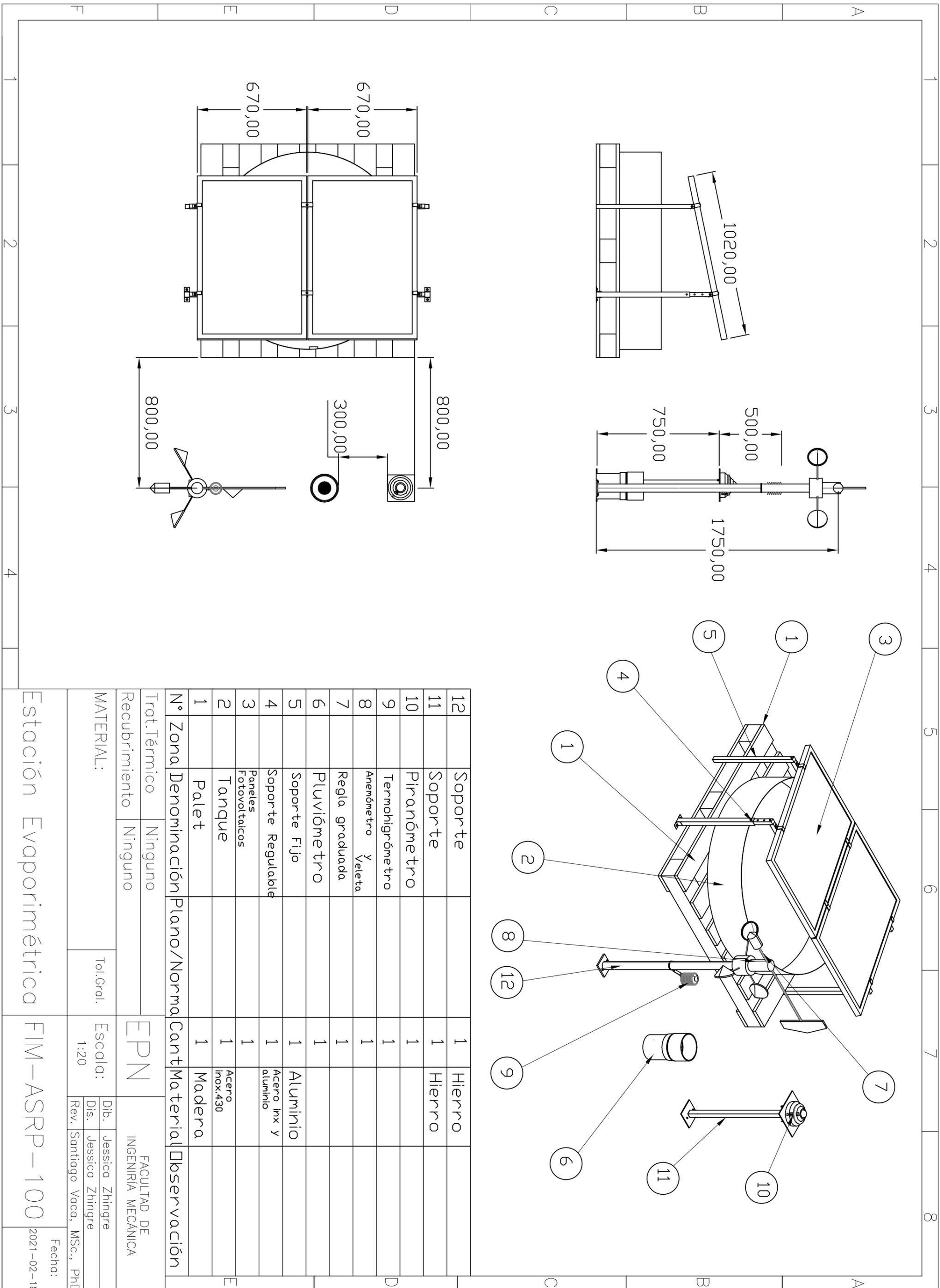
12	SopORTE		1	Hierro		
11	SopORTE		1	Hierro		
10	Piranómetro		1			
9	Termohigrómetro		1			
8	Anemómetro Y Veleta		1			
7	Regla graduada		1			
6	Pluviómetro		1			
5	SopORTE Fijo		1	Aluminio		
4	SopORTE Regulable		1	Acero Inx y aluminio		
3	Paneles Fotovoltaicos		1			
2	Tanque		1	Acero Inox.430		
1	Palet		1	Madera		
Nº	Zona	Denominación	Plano/Norma	Cant	Material	Observación
	Trat.Térmico	Ninguno				
	Recubrimiento	Ninguno				

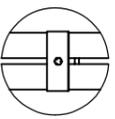
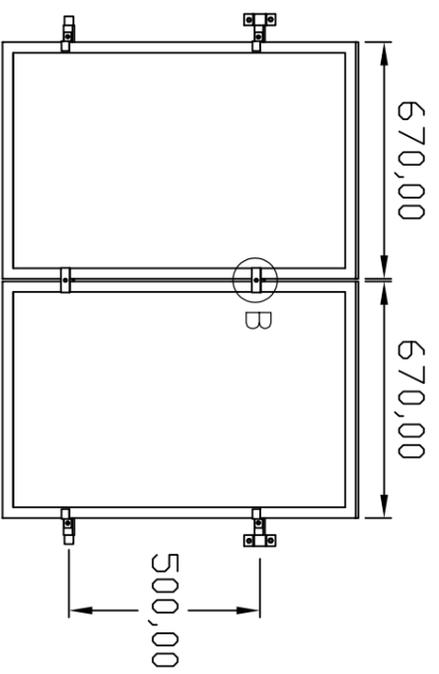
MATERIAL:		Tol.Gral.	Escala:	Dib.	Jessica Zhingre
			1:20	Dis.	Jessica Zhingre
				Rev.	Santiago Vacca, MSc., PhD

Estación Evaporimétrica

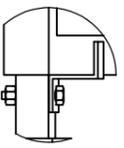
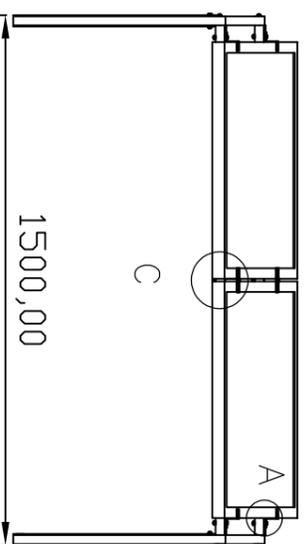
FIM-ASRP-100

Fecha:  
2021-02-18

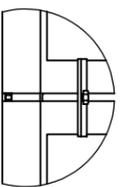




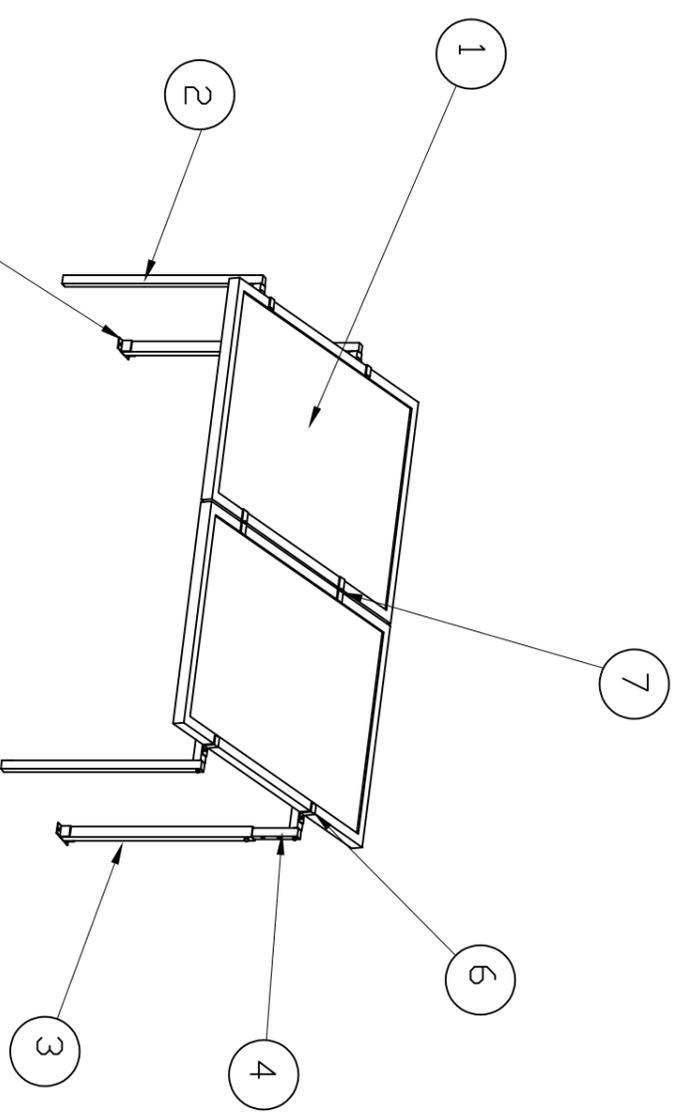
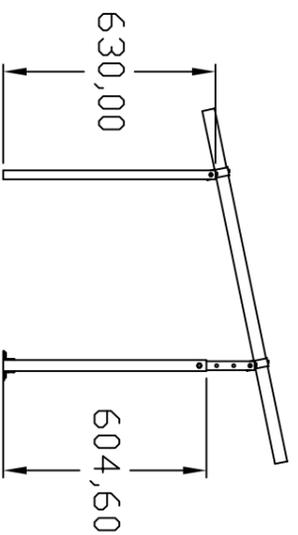
DETALLE B  
ESCALA 1 : 10



DETALLE A  
ESCALA 1 : 10



DETALLE C  
ESCALA 1:10

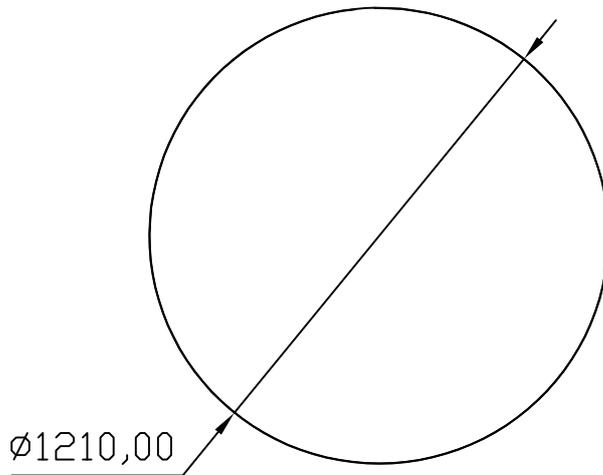
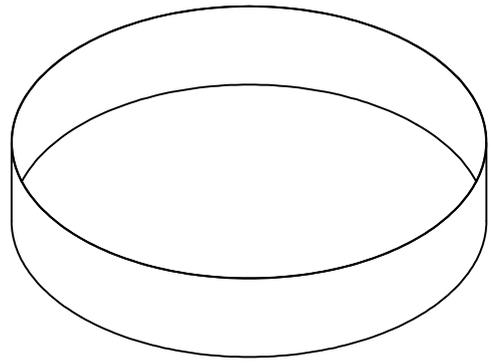


7	Anclajes planos para paneles		2	Acero		
6	Anclajes tipo s para paneles		4	Acero		
5	Anclajes tipo L para piso		4	Acero		
4	SopORTE regulable posterior		1	Aluminio		
3	SopORTE FIJO posterior		1	Acero Inox 304		
2	SopORTE FIJO delantero		1	Aluminio		
1	Paneles Fotovoltaicos		1	Madera		
Nº	Zona	Denominación	Plano/Norma	Cant	Material	Observación

Trat.Térmico	Ninguno
Recubrimiento	Ninguno

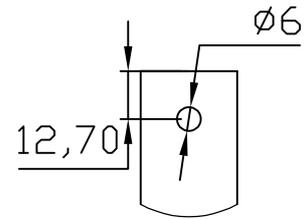
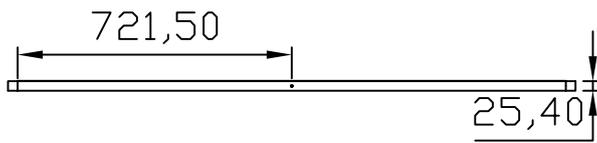
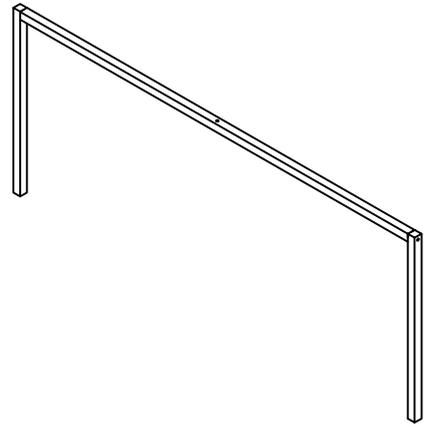
MATERIAL:	Tol.Grad.	EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
		Escala:	
		1:20	Dib. Jessica Zhingre
			Dis. Jessica Zhingre
			Rev. Santiago Vacca, MSc., PhD

Soportes para paneles	FIM-ASRP-101	Fecha:
		2021-02-18

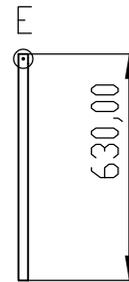
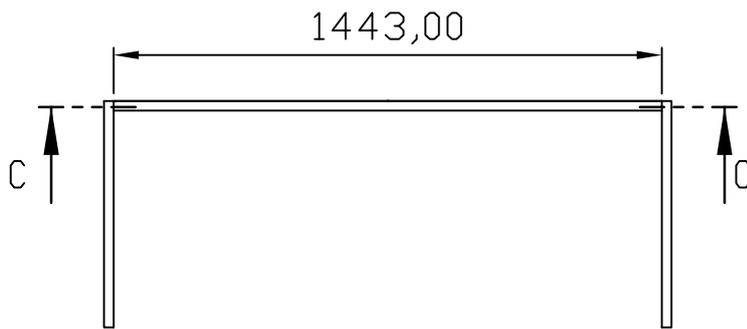


Notas:  
 -Eliminar aristas vivas  
 -Corte láser

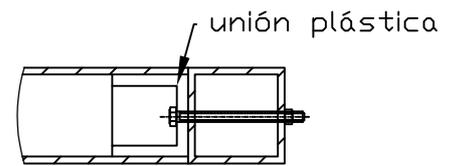
Trat. Térmico	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA		
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Jessica Zhingre	
Material	Acero inoxidable 430-2b	Tol. Gral.	Escala:	Dis.	Jessica Zhingre
					Rev.
TANQUE		FIM-ASRP-100-101		Fecha:	2021-02-18



DETALLE E  
ESCALA 1:2



SECCIÓN C-C

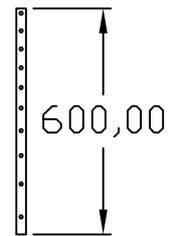
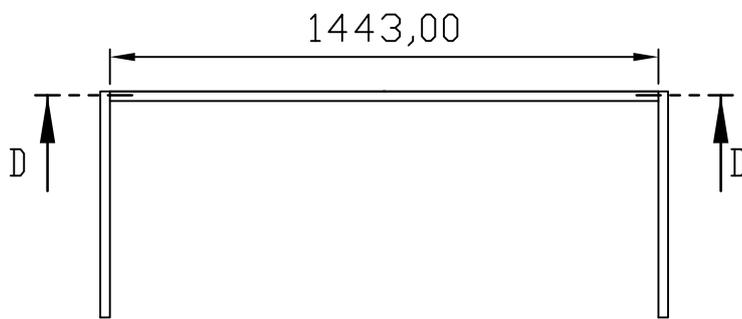
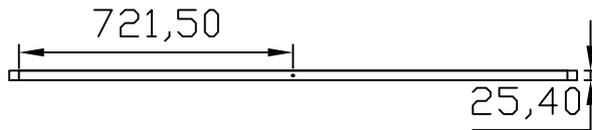
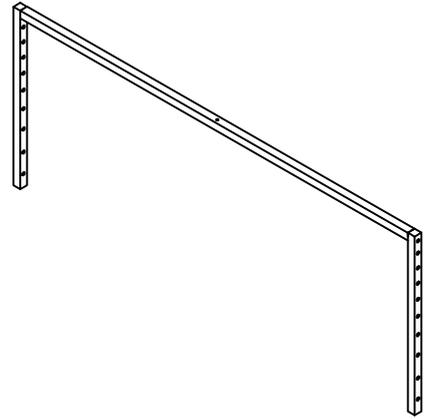


DETALLE D  
ESCALA 1:2

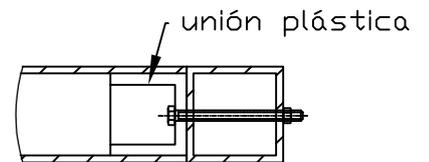
Notas:

- Eliminar aristas vivas
- Agujeros taladrados
- Tubo cuadrado 25,4 x 25,4 x 1,3

Trat. Térmico	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Jessica Zhingre.
Material Aluminio	Tol. Gral.	Escala: 1:20	Dis.	Jessica Zhingre.
			Rev.	Santiago Vaca, MSc., PhD
			Fecha: 2021-02-18	
Soporte delantero fijo		FIM-ASRP-101-101		



SECCIÓN D-D

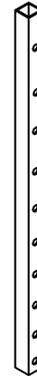
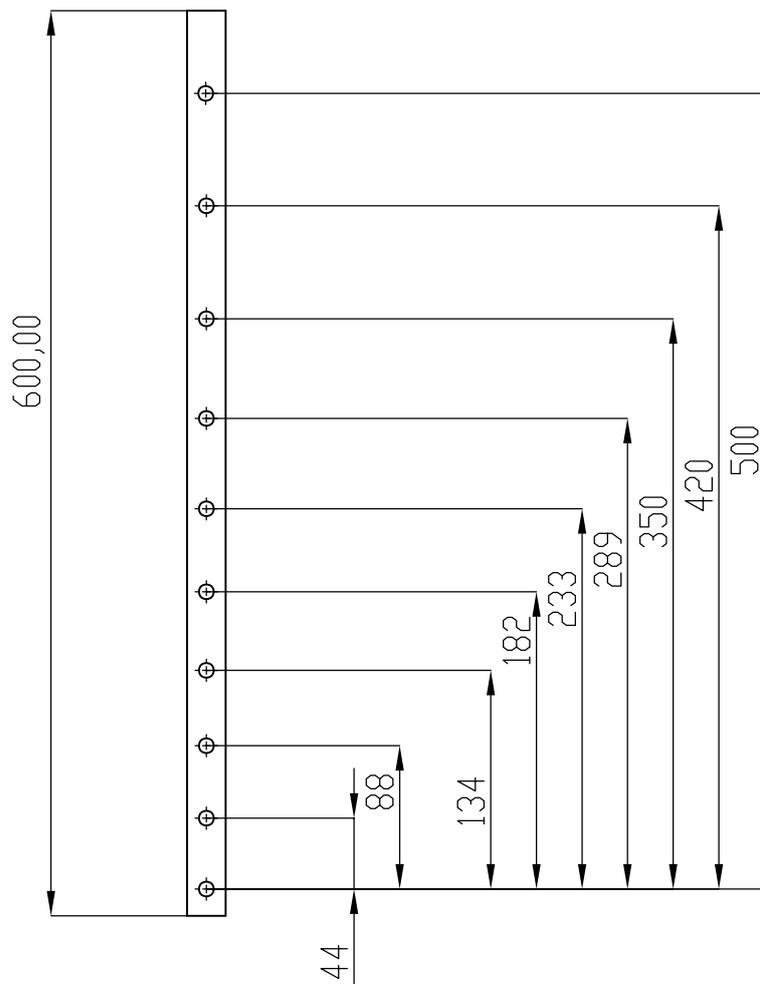


DETALLE F  
ESCALA 1:2

Notas:

- Eliminar aristas vivas
- Agujeros taladrados  $\varnothing 6\text{mm}$
- Tubo cuadrado 25,4 x 25,4 x 1,3

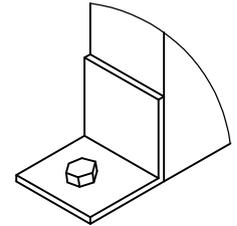
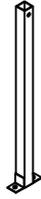
Trat. Térmico	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA		
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Jessica Zhingre	
Material	Aluminio	Tol. Gral.	Escala:	Dis.	Jessica Zhingre
			1:20	Rev.	Santiago Vaca, MSc., PhD
Soporte Regulable		FIM-ASRP-101-102		Fecha:	2021-02-18



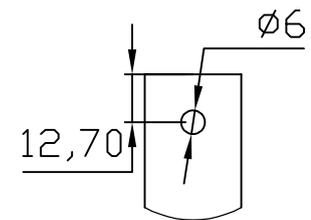
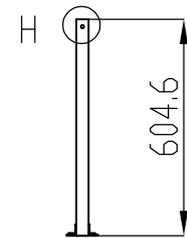
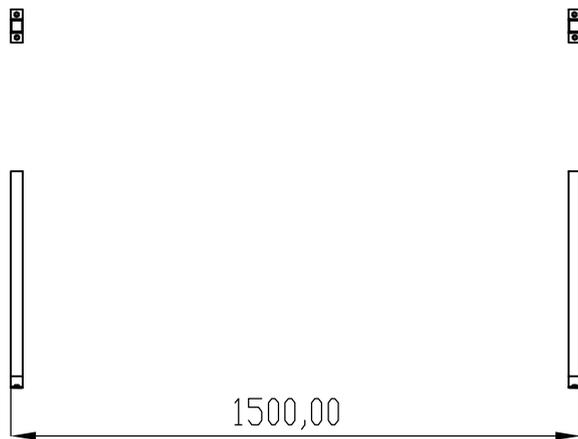
Notas:

- Eliminar aristas vivas
- Agujeros taladrados  $\varnothing 6$  mm
- Tubo cuadrado 25,4 x 25,4 x 1,3

Trat. Térmico	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
Recubrimiento	Ninguno			
Material Aluminio	Tol. Gral.	Escala: 1:5	Dib.	Jessica Zhingre
			Dis.	Jessica Zhingre
			Rev.	Santiago Vaca, MSc., PhD
Barras con orificios		FIM-ASRP-101-103		Fecha: 2021-02-18



DETALLE G  
ESCALA 1:2



DETALLE H  
ESCALA 1:2

Notas:

- Eliminar aristas vivas
- Agujeros taladrados
- Tubo cuadrado 30 x 30 x 1,5

Trat. Térmico	Ninguno	EPN	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA		
Recubrimiento	Ninguno		Dib.	Jessica Zhingre.	
Material	Acero Inoxidable 430-2b	Tol. Gral.	Escala:	Dis.	Jessica Zhingre.
			1:20	Rev.	Santiago Vaca, MSc., PhD
Soporte posterior fijo		FIM-ASRP-101-104		Fecha:	2021-02-18