

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la

Producción

Diseño y Construcción de un Desalinizador Híbrido

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Materia Integradora

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

Carlos David Acosta Suárez

José Luis Quiroz Silva

Guayaquil – ECUADOR

Año: 2016

AGRADECIMIENTOS

A Dios por colmarme de bendiciones todos los días, a mis padres y mi hermana por alentarme día a día a seguir adelante. A mis tíos por todo el apoyo brindado durante toda mi carrera universitaria. A ESPOL por todos los conocimientos adquiridos durante todo este tiempo.

Carlos Acosta

A Dios por darme la oportunidad de llegar y culminar esta etapa de mi vida, a mis padres por su apoyo incondicional, por su guía y acertados consejos, a la institución educativa Escuela Politécnica del Litoral (ESPOL), a mis hermanas por motivarme a seguir levantándome después de cada caída, en si a mi familia porque cada uno de ellos fueron parte de mi crecimiento personal y profesional, un agradecimiento muy especial para Johanna Velasco y a su familia, porque han sido un gran soporte para poder alcanzar esta deseada meta.

José Quiroz

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

Carlos David Acosta Suárez

José Luis Quiroz Silva

Emérita Alexandra Delgado Plaza

y el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.



Carlos Acosta Suárez.
Estudiante



José Quiroz Silva.
Estudiante



Emérita Delgado Plaza. Ph.D
DIRECTORA

RESUMEN

La distribución de agua dulce en todo el planeta es irregular, motivo que se generan por los bajos nivel de precipitaciones en ciertos lugares del planeta o por distintos factores antrópicos, así como los desastres naturales a los cuales se encuentran expuestas las poblaciones en general ocasionan una escasez del recurso agua. A partir de lo expuesto, el motivo del presente trabajo es diseñar y construir un desalinizador, que permite obtener agua dulce a partir de agua salada, que funcione de ser posible con energías no convencionales. Para tal efecto se seleccionó la zona en la cual operó (ESPOL) y se obtuvo el recurso energético de la misma, así como los distintos tipos de energía presentes en la zona seleccionada.

Se consideró el proceso de destilación para la construcción del equipo y se analizaron los posibles materiales para trabajar en un medio corrosivo. Se comparó diferente alternativa donde se incluyen las ventajas económicas, constructivas, mantenimiento y de eficiencia. En el proceso constructivo, se seleccionó materiales como: acero AISI 304 para la bandeja portadora, acero ASTM A36 para la estructura del prototipo, y vidrio con bajo contenido de hierro para ser utilizado como cubierta. Finalmente, para la unión de las distintas piezas se utilizó soldadura TIG.

Se realizaron las mediciones para lo cual se tomó registros de temperatura en distintas zonas del equipo para evaluar el comportamiento de las mismas y se obtuvo una eficiencia de 38% la cual fue superior a la eficiencia teórica (35%) consiguiendo una producción de 8 a 9 litros de agua dulce en 8 horas de trabajo del equipo. Finalmente se realizaron las respectivas recomendaciones para el uso y mantenimiento del equipo, así como los posibles trabajos a futuro.

Palabras Clave: Desalinizador, energía solar, diseño, agua salada.

ABSTRACT

The distribution of water around the planet is irregular, for this reason, there are areas where the level of rainfall is very low. On the other hand, human factors and natural disasters which are exposed populations generally cause a shortage of water resources. The reason of this work is to design and build a desalinator equipment that allows obtaining fresh water from salt water, available if possible with non-conventional energy. For this purpose, the area in which it operates (ESPOL) and the energy source of it was obtained, and the various types of energy present in the target area was selected.

The distillation process was considered for the construction of equipment and materials were analyzed possible to work in a corrosive environment. Each of the alternatives were compared and economic advantages, construction, maintenance and efficiency was analyzed. AISI 304 steel was selected for the drip tray and for the ASTM A36 structure, whereas for the cover glass 4 mm thick was used. TIG welding is used for joining the different pieces and proceeded to the construction.

Measurements for which records temperature was taken in different parts of equipment to evaluate the performance there of and an efficiency of 38% which was higher than the theoretical efficiency (35%) was obtained. A production of 8 to 9 liters of fresh water in 8 hours of team work was gotten. Finally, the respective recommendations for the use and maintenance of equipment and possible future work were made.

Keywords: *desalinator, water, solar energy, design*

ÍNDICE GENERAL

ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
ÍNDICE DE PLANOS	XI
CAPITULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Marco Teórico.....	2
CAPITULO 2.....	11
2. METODOLOGÍA DE DISEÑO.....	11
2.1 Matriz de Decisión	11
2.2 Diseño del Sistema.....	17
2.3 Análisis de Costo del Desalinizador Híbrido.....	45
2.4 Construcción	46
CAPITULO 3.....	48
3. RESULTADOS EXPERIMENTALES	48
3.1 Prueba de campo del prototipo experimental.....	48
3.2 Comportamiento del calentamiento del prototipo	50
3.3 Destilación de agua salada	55
3.4 Eficiencia del prototipo experimental	56
CAPITULO 4.....	58
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	58
4.1 Conclusiones	58
4.2 Recomendaciones	59

4.3 Trabajos Futuros 59
APENDICES 63
APENDICE A..... 64
APENDICE B..... 66

ABREVIATURAS

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral

TIG Tungsten Inert Gas

AISI American Iron and Steel Institute

SAE Society of Automotive Engineers

ASTM American Society for Testing Materials

IDAE Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

NASA National Aeronautics and Space Administration

INAMHI Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología

EXA Agencia Espacial Civil Ecuatoriana

SIMBOLOGÍA

mm	Milímetro
m	Metro
K	Kelvin
°C	Grados Celsius
s	Segundo
W	Watt
h	Hora
J	Joule
Kg	Kilogramo
qc	Calor perdido por conducción
kb	Resistencia térmica equivalente del aislante
tw	Temperatura media del agua
Ta	Temperatura ambiente
Q'a	Calor absorbido por el agua
Qrw	Calor perdido por radiación
Qcw	Calor perdido por convección del agua
Qe	Calor perdido por evaporación.
α_g	Factor de reflexión de la radiación.
Gs	Radiación directa sobre una superficie inclinada.
qt	Calor absorbido por el sistema.
q'c	Calor almacenado por la cubierta.
q'a	Calor almacenado por el agua.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Atlas Eólico del Ecuador	4
Figura 1.2 Estudio básico del potencial bioenergético de los residuos agropecuarios del Ecuador.....	6
Figura 1.3 Mapa Solar	7
Figura 1.4 Esquema de un destilador solar de cubierta	8
Figura 2.1 Condiciones climáticas.....	18
Figura 2.2 Escuela Superior Politécnica del Litoral.....	19
Figura 2.3 Diseño de Forma.....	20
Figura 2.4 Circuito Térmico del Sistema.....	24
Figura 2.5 Balance de Energía entre el vidrio y el ambiente.....	33
Figura 2.6 Balance de Energía en el interior del desalinizador.....	35
Figura 2.7 Esquema de la cubierta.....	39
Figura 2.8 Construcción del desalinizador.....	47
Figura 3.1 Puntos de medición registrados dentro de la cámara de desalinización.....	49
Figura 3.2 Prueba experimental.....	50
Figura 3.3 Comportamiento térmico del desalinizador solar.....	51
Figura 3.4 Funcionamiento del desalinizador solar en relación a la irradiación.....	52
Figura 3.5 Funcionamiento del desalinizador híbrido en un día parcialmente despejado...54	
Figura 3.6 Tasa de evaporación del agua salada.....	56

Figura 3.7 Eficiencia experimental del desalinizador híbrido.....57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Principales productos de biomasa en la costa.....	5
Tabla 1.2 Tipos de desalinizadores solares.....	9
Tabla 2.1 Valores para las ponderaciones de los criterios.....	12
Tabla 2.2 Comparaciones pareadas.....	12
Tabla 2.3 Comparaciones con el criterio A.....	12
Tabla 2.4 Comparaciones con el criterio B.....	13
Tabla 2.5 Comparaciones con el criterio C.....	13
Tabla 2.6 Comparaciones con el criterio D.....	14
Tabla 2.7 Matriz de decisión para tipo de energía a utilizar.....	14
Tabla 2.8 Comparaciones pareadas.....	15
Tabla 2.9 Comparaciones con el criterio A.....	15
Tabla 2.10 Comparaciones con el criterio B.....	16
Tabla 2.11 Comparaciones con el criterio C.....	16
Tabla 2.12 Comparaciones con el criterio D.....	16
Tabla 2.13 Matriz de decisión para desalinizador dólar.....	16
Tabla 2.14 Parámetros a utilizar para cálculos.....	21
Tabla 2.15 Espesor de los materiales a utilizar.....	24
Tabla 2.16 Cantidad y costos de materiales utilizados en la construcción.....	45
Tabla 2.17 Costos de mano de obra.....	45
Tabla 2.18 Costos totales.....	46

Tabla 3.1 Volumen de agua generado en el desalinizador solar.....53

Tabla 3.2 Volumen de agua generado en el desalinizador hibrido.....55

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1 Soporte Principal

PLANO 2 Angulo Principal

PLANO 3 Bandeja principal

PLANO 4 Bandeja colectora

PLANO 5 Marco Soporte

PLANO 6 Soporte de vidrios

PLANO 7 Vidrios

PLANO 8 Base para los soportes de los vidrios

PLANO 9 Canaletas

PLANO 10 Ensamble Final

CAPITULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

El planeta Tierra, también conocido como planeta azul, por la gran cantidad de agua que cubre su superficie presenta una distribución desbalanceada entre el agua salada (97.5%) y el agua dulce (2.5%) estas características son altamente preocupantes debido a que el agua dulce es indispensable para cada una de las especies y actividades humanas que se desarrollan en el planeta.

Este escenario representa una amenaza a mediano plazo para la supervivencia de todas las especies incluida la humana ya que, debido a factores antrópicos se deterioran de manera constante los cuerpos de agua dulce y se limita el abastecimiento a las distintas localidades y medios de producción.

Ante la creciente demanda de agua dulce en diversos países ya se recurre a procesos de desalinización que constituyen una alternativa para mitigar la escasez creciente en diversos países y comunidades del planeta.

En el Ecuador de acuerdo al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) el 88% de la población rural goza del derecho al agua dulce, que le permite el desarrollo de cada una de sus actividades productivas, domésticas y de ocio; el 12% no goza del derecho a este recurso.

En nuestro país además de los factores antrópicos, las fuentes de agua dulce están expuestas a eventos naturales como erupciones volcánicas, temblores y terremotos que impactan tanto en las fuentes como en los procesos de abastecimiento del agua dulce.

Como una alternativa a la potencial escasez de agua dulce, ya sea por presencia de problemas antrópicos o naturales se propone el diseño experimental y construcción de

un desalinizador híbrido, cuyo funcionamiento no sea limitado por el uso de energías tradicionales, pues en su operación se emplearán fuentes de energía no convencionales.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Construir un desalinizador, para la obtención de agua dulce, a partir de un diseño que incorpora fuentes de energía sostenibles.

1.2.2 Objetivos específicos

- Determinar los principales parámetros energéticos solares requeridos para el diseño y la construcción de un desalinizador contextualizado.
- Analizar las alternativas clave de solución para el desarrollo del diseño y operación del desalinizador.
- Diseñar un prototipo experimental basado en el análisis de transferencia de calor y masa, elaborado con materiales locales, de fácil montaje y mantenimiento.
- Validar los resultados de las mediciones del banco de pruebas para conocer la eficiencia real del prototipo.

1.3 Marco Teórico

1.3.1 Generalidades

El agua es un elemento vital para todos los seres vivos, así como para las distintas actividades que estos realizan, entre ellas el consumo doméstico y público, el uso en la agricultura y ganadería como parte fundamental de la alimentación de plantas y animales, en la industria para los distintos procesos de fabricación y como fuente de energía. El 70% de nuestro planeta está cubierto de agua, pero el 98% de esta es salada, lo cual impide su uso para consumo humano y para la agricultura. El 2% es agua dulce, sin embargo, la mayor parte de este porcentaje se encuentra en los casquetes polares por lo que el porcentaje de agua disponible es el 0,014% de acuerdo al INAMHI.

A esto se le añade la distribución desigual del agua y por ende la variabilidad de zonas de precipitaciones, es decir, existen zonas en las que las precipitaciones son muy elevadas y zonas en las que son muy escasas, la cual repercute principalmente en la población y las actividades económicas que estos desarrollan.

Podemos afirmar entonces, que el consumo de agua aumenta relacionándola con la cantidad de agua disponible por lo que es necesario buscar alternativas sustentables para la obtención de agua dulce.

Clasificación del agua de acuerdo a su salinidad

Una manera de clasificar el agua es según los TDS (Cantidad Total de Sólidos Disueltos) que esta posee, la unidad utilizada es el gramo por litro, aunque otra unidad es los ppm (partes por millón) con la equivalencia 10 ppm es igual a 0.01 gramos por litro.

Una manera de clasificar el agua, según su salinidad puede ser:

- Agua dulce: TDS menor a 1000 ppm (0.1%)
- Agua salobre: TDS entre 1000 a 30000 ppm (0.1 – 3%)
- Agua de mar: TDS mayor a 30000 (mayor a 3%)

1.3.2 Recurso energético en la costa ecuatoriana

Ecuador se caracteriza por tener un clima muy variado en el cual influye cada una de las regiones naturales y dan características únicas a cada lugar. Así por ejemplo en la Costa tenemos una estación lluviosa entre los meses de diciembre y abril, con temperaturas que no menores a 13°C y no mayores a 38°C. En la Sierra en cambio se presentan dos estaciones lluviosas: de febrero a mayo y de octubre a noviembre, producto de la influencia de las masas de aire oceánico y amazónico.

Con respecto a las fuentes de energía en la Región Litoral, se considerará tres fuentes renovables, las cuales serán detalladas a continuación:

1.3.2.1 Energía Eólica

Es la energía cinética generada por el movimiento de las corrientes de aire, es decir la energía obtenida del viento y que será transformada en formas de energía útiles para el ser humano, entre estas, la energía eléctrica.

Este tipo de energía se caracteriza por ser un bien abundante, renovable y limpio el cual, a su vez, disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero debido a que pueden reemplazar a termoeléctricas que funcionan con combustibles fósiles. No obstante, la intermitencia del viento en la zona costera de Ecuador hace que se el uso de este tipo de energía presente una eficiencia baja.

Por lo que se refiere a la velocidad del viento, en Ecuador las zonas que presentan mayor velocidad del viento son la Región Interandina y la Región Insular, específicamente en la localidad de Villonaco ubicado en la provincia de Loja. Lamentablemente en la Costa la velocidad del viento es menor a 3 m/s por lo que no sería rentable obtener energía a partir del viento.

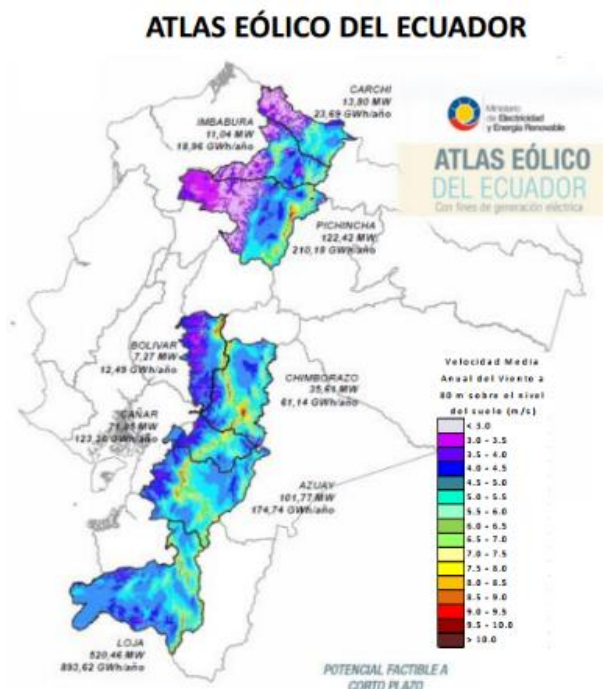


Figura 1.1. Atlas eólico del Ecuador

Fuente: Atlas Eólico del Ecuador con fines de Generación Eléctrica – 2013.

1.3.2.2 Biomasa

Es una fuente de energía renovable limpias que se genera de los residuos de la materia orgánica que provienen de actividades como agropecuarias, forestales, residuos urbanos y cultivos.

Tabla 1.1. Principales productos de biomasa en la costa

Provincia	Producto	Producción absoluta (T/año)	Residuos (T/año)	Energía Bruta (TJ/año)
Esmeraldas	Palma Africana	1568164,00	4018106,62	51354,50
	Cacao	14815,33	183431,54	1240,69
	Plátano	33618,77	22188,39	280,14
	Banano	30809,44	20334,23	256,73
	Palmito	6306,97	15338,55	203,09
	Total	1653714,51	4259399,33	53335,15
Guayas	Arroz	976018,96	1311525,48	17653,67
	Banano	1665723,71	1099377,65	13880,08
	Caña de Azúcar	3708226,02	593316,16	11777,01
	Cacao	57992,64	718018,43	4856,53
	Palma Africana	65913,82	168890,97	2158,56
	Total	6473875,15	3891128,69	50325,85
Los Ríos	Banano	3103632,96	2048397,75	25861,83
	Palma Africana	318270,50	815504,50	10422,78
	Arroz	508138,97	682811,74	9190,92
	Cacao	36874,68	456552,76	3088,03
	Maíz Duro	543061,85	244377,83	3047,30
	Total	4509978,96	4247644,58	51610,86
Manabí	Plátano	223610,67	147583,04	1863,29
	Cacao	17958,71	222350,38	1503,93
	Arroz	47998,24	64497,63	868,16
	Maíz Duro	115878,18	52145,18	650,23
	Café	7976,47	43224,48	417,34
	Total	413422,27	529800,71	5302,95
El oro	Banano	2202073,79	1453368,70	18349,35
	Cacao	6399,33	79231,40	535,91
	Café	1774,50	9616,02	92,84
	Porcino	22544,00	3736,67	6,36
	Vacuno Leche	19206,00	14581,20	2,90
	Total	2251997,62	1560533,99	18987,36

Santa Elena	Maíz Duro	7227,79	3252,51	40,56
	Banano	1714,24	1131,40	14,28
	Plátano	1042,55	688,09	8,69
	Cacao	63,88	790,93	5,35
	Café	47,52	257,53	2,49
	Total	10095,98	6120,46	71,37

Fuente: Atlas Bioenergético del Ecuador 2014.

Podemos observar que la provincia con más cantidad de energía bruta es Esmeraldas dentro de la región Costa, en comparación con la de menor cantidad que es la provincia a de Santa Elena. Al mismo tiempo se rectifica lo mencionado observando el Mapa del “Estudio Básico del Potencial Bioenergético de los Residuos agropecuarios del Ecuador”.

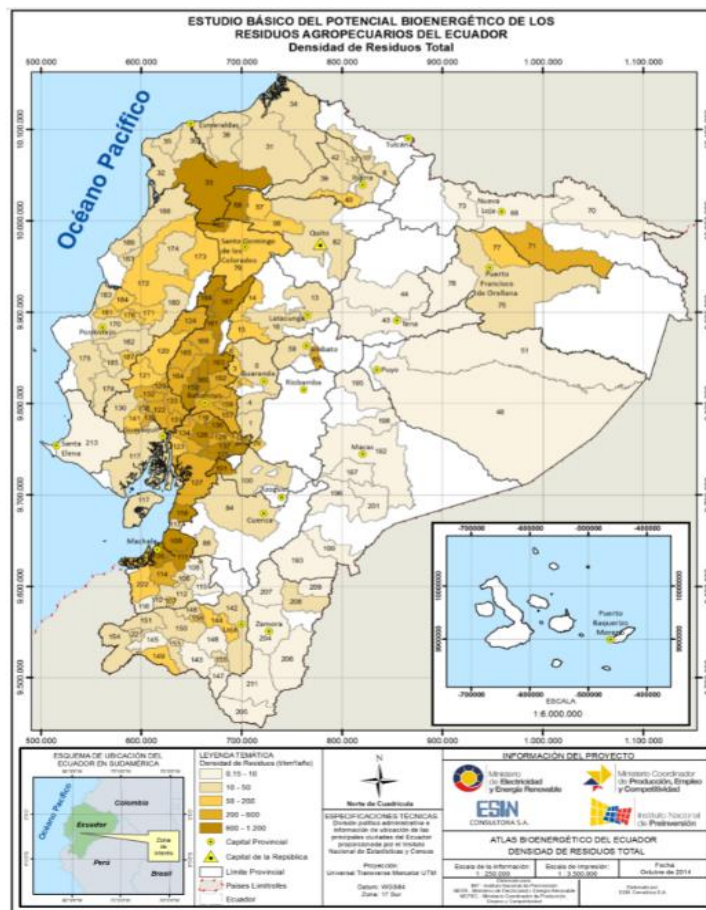


Figura 1.2. Estudio básico del potencial bioenergético de los residuos agropecuarios del Ecuador

Fuente: Atlas Bioenergético del Ecuador 2014.

Para fines de este proyecto este recurso implica un costo elevado debido al proceso de recolección, procesamiento y almacenamiento.

No hay duda que la energía que proviene de la biomasa es uno de los futuros sustitutos de los combustibles fósiles tomando en cuenta que es energía limpia y renovable.

1.3.2.3 Solar

Debido a la ubicación geográfica del Ecuador, este goza de privilegios en los que respecta a radiación solar dado que el ángulo de incidencia solar es perpendicular a la superficie y no varía como en otros lugares.

Mapa isohelias Promedio

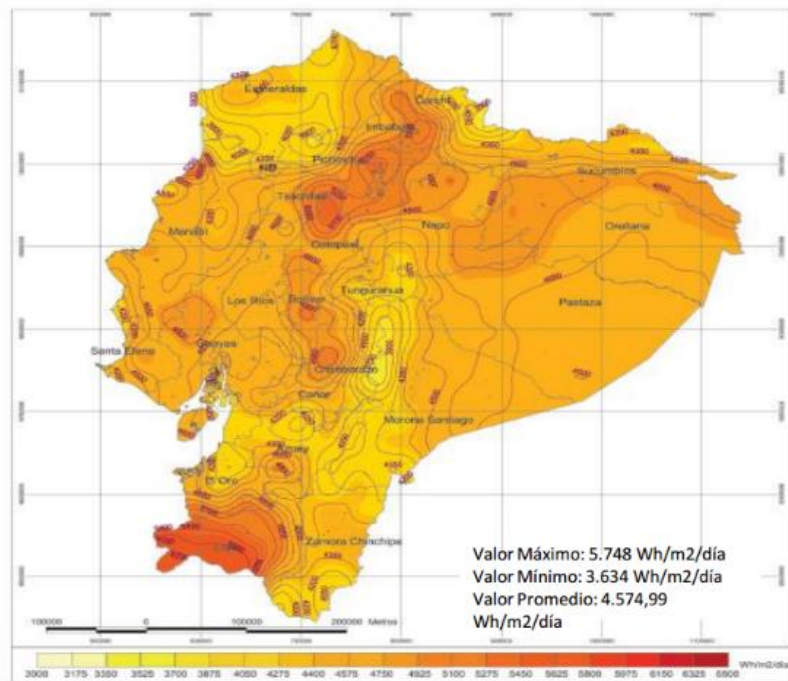


Figura 1.3. Mapa solar

Fuente: Atlas Solar del Ecuador con fines de Generación Eléctrica. Agosto 2008.

En la Figura 1.3 observamos el mapa solar del Ecuador, como podemos apreciar las zonas de mayor radiación solar se encuentran al sur del país y en la Región Interandina. Sin embargo, existen zonas con radiaciones considerables en la Costa ecuatoriana, las cuales varían entre los 3875 a 5700 Wh/m²-día.

Aproximadamente durante el año se registra una insolación media global de 4575 Wh/m²-día, teniendo en cuenta que los niveles de insolación mayores o iguales a 4000 Wh/m²-día son considerados tecno-económicamente aprovechables, de manera que podemos concluir que este tipo de energía renovable es muy rentable debido a que implica bajo costo para utilizarla.

1.3.3 Destilación Solar

En este proceso se aprovecha la energía del sol para poder evaporar el agua salina y condensarla como agua pura. Consiste en una caseta hecha de material semitransparente vidrio o plástico en la cual se coloca una bandeja en la cual se coloca agua a destilar. Está cubierta está inclinada con el objetivo facilitar el transporte de agua. El vapor asciende y se condensa en la superficie interior del techo. Para evitar la transferencia de calor por conducción en la parte inferior se coloca un aislante térmico. A los lados de la placa de vidrio se colocan unos canales los cuales recogen el condensado (agua dulce) y se almacenan en recipientes.

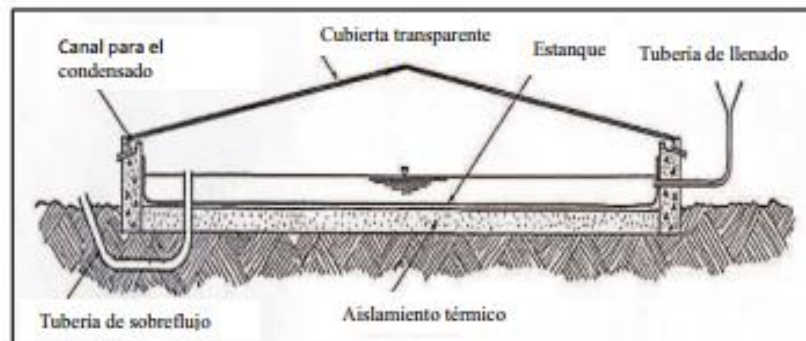


Figura 1.4. Esquema de un destilador solar de cubierta

Fuente: Sayigh "Solar Energy Engineering".

1.3.4 Tipos de desalinizadores

Una desalinizadora es un equipo o instalación industrial cuyo objetivo principal es la obtención de agua dulce quitando la sal al agua de mar. Así podemos clasificar este tipo de dispositivos en dos grandes grupos:

- Aplicando fuentes de energías renovables
- Combustible fósiles

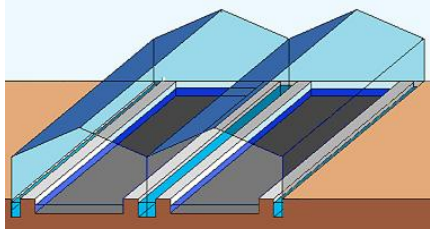
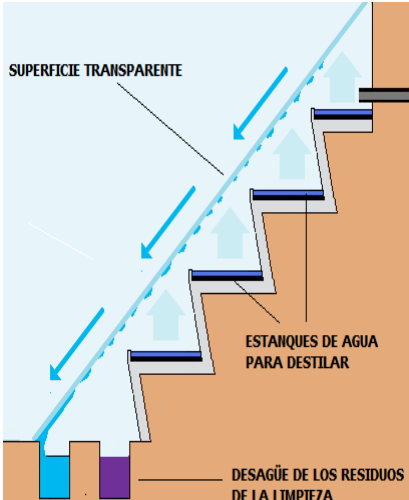
Como se expuso anteriormente la energía más conveniente a utilizar es la energía solar debido a la ubicación geográfica de la zona a implementar el equipo.

Modelos de destiladores solares

Pese a que todos se basan en el mismo principio, existen diferentes modelos de destiladores solares, de los cuales hablaremos a continuación:

Tabla 1.2. Tipos de destiladores solares

Tipo	Características	Ventajas	Desventajas
<p data-bbox="383 1077 555 1106">Una Vertiente</p> 	<p data-bbox="711 1077 1042 1350">Conformado por una caja cubierta con un material cristalino, que permita que los haces de luz ingresen a su cavidad. Dentro de esta se ubica el agua a evaporar y de otro dispositivo receptor en el cual se recoge el agua destilada.</p>	<p data-bbox="1068 1077 1250 1224">Se puede conectar en serie para una mayor producción.</p>	<p data-bbox="1276 1077 1458 1350">Durante el transcurso del día se ve afectado por la producción de sombras debido al movimiento del sol.</p>
<p data-bbox="378 1425 560 1455">Dos vertientes</p> 	<p data-bbox="711 1425 1042 1665">Este modelo consta en cambio de una especie de techo cristalino. Las gotas de agua que se condensan se adhieren a la pared cristalina y por gravedad se deslizan hacia un dispositivo colector.</p>	<p data-bbox="1068 1425 1250 1572">Debido a su estructura se anula la producción de sombras.</p>	

<p style="text-align: center;">Invernadero</p> 	<p>Presenta el mismo principio que el destilador solar tipo caseta. La diferencia es que este se encuentra diseñado en grandes proporciones.</p>	<p>Mayor producción de agua destilada.</p>	<p>Alto costo.</p>
<p style="text-align: center;">Cascada</p> 	<p>Este modelo presenta forma de escaleras. En cada uno de los escalones se disponen de bandejas que contienen el agua salada lista para ser destilada. Toda el agua destilada obtenida se recepta en un canal ubicado en la parte inferior. De la misma manera en la base del destilador existe un desagüe para recoger la salmuera y residuos que quedaron al evaporarse.</p>	<p>Mayor producción de agua destilada.</p>	<p>Alto costo.</p>

Fuente: Elaboración propia tomando información de Sitio Solar.

CAPITULO 2

2. METODOLOGÍA DE DISEÑO

En este capítulo se buscará la forma de cumplir los objetivos propuestos por lo cual nos ayudaremos con una matriz de decisión para comparar las distintas alternativas y seleccionar la alternativa más conveniente.

2.1 Matriz de Decisión

Con la ayuda de una matriz de decisión se escogerá el tipo de desalinizador a utilizar, así como el tipo de energía que este manejará. De igual manera se escogerán de acuerdo al tipo de energía a utilizar los materiales del desalinizador.

2.1.1. Matriz de decisión referente a obtención de energía

La energía con la cual trabajará el dispositivo es el factor más importante y, por ende, un parámetro a analizar. Hay que mencionar, además que se procurará que el sistema maneje un tipo de energía renovable para abaratar costos y aprovechar la energía brindada por los recursos naturales.

Los criterios a analizar son los siguientes:

- Bajo costo por transformación de energía (A)
- Cantidad de energía producida (B)
- Facilidad de instalación y adaptación en el prototipo (C)
- Disponibilidad de recurso para transformación de energía (D)

A continuación, procederemos a calcular el valor de ponderación de cada uno de estos parámetros, mediante comparaciones pareadas. Para tal efecto, se utilizarán valores detallados en la siguiente tabla:

Tabla 2.1. Valores para las ponderaciones de los criterios

Respuestas	Valor
Igualmente importante	1
Significativamente más importante	5
Excesivamente más importante	10
Significativamente menos importante	1/5
Excesivamente menos importante	1/10

Fuente: Elaboración Propia.

Luego procedemos a evaluar la ponderación de cada uno de los criterios entre sí comparándolos, tomando como base la Tabla 2.1

Tabla 2.2. Comparaciones pareadas

Criterios	A	B	C	D	Total	%
A		1	1/5	1	2.2	0.10
B	1		1/10	1	2.1	0.10
C	5	10		1	16	0.69
D	1	1	1		3	0.11
Total					23.3	1

Fuente: Elaboración Propia.

Luego procedemos a comparar cada uno de los criterios (A, B, C y D) definidos anteriormente con cada uno de los tipos de energía disponible y las distintas.

Tabla 2.3. Comparaciones con el criterio A

A	Solar Térmica	Solar Fotovoltaica	Biomasa	Solar Térmica y Fotovoltaica	Solar Térmica y Biomasa	Total	%
Solar Térmica		5	1	1/10	1/5	6.3	0.11
Solar Fotovoltaica	1/5		1/5	1/10	1/5	0.7	0.01
Biomasa	1	5		1/5	1/5	6.4	0.11
Solar Térmica y Fotovoltaica	10	10	5		1/5	25.2	0.43
Solar Térmica y Biomasa	5	5	5	5		20	0.34
Total						58.6	1

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 2.4. Comparaciones con el criterio B

B	Solar Térmica	Solar Fotovoltaica	Biomasa	Solar Térmica y Fotovoltaica	Solar Térmica y Biomasa	Total	%
Solar Térmica		1/5	1	1/5	1/5	1.6	0.03
Solar Fotovoltaica	5		1/10	1/5	1/5	5.5	0.10
Biomasa	1	10		1/10	1/5	11.3	0.20
Solar Térmica y Fotovoltaica	5	5	10		1	21	0.38
Solar Térmica y Biomasa	5	5	5	1		16	0.29
Total						55.4	1

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 2.5. Comparaciones con el criterio C

C	Solar Térmica	Solar Fotovoltaica	Biomasa	Solar Térmica y Fotovoltaica	Solar Térmica y Biomasa	Total	%
Solar Térmica		5	10	1/5	5	20.2	0.34
Solar Fotovoltaica	1/5		10	1/5	5	15.4	0.26
Biomasa	1/10	1/10		1/5	1	1.4	0.02
Solar Térmica y Fotovoltaica	5	5	5		5	20	0.34
Solar Térmica y Biomasa	1/5	1/5	1	1/5		1.6	0.04
Total						58.6	1

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 2.6. Comparaciones con el criterio D

D	Solar Térmica	Solar Fotovoltaica	Biomasa	Solar Térmica y Fotovoltaica	Solar Térmica y Biomasa	Total	%
Solar Térmica		1	5	1	1	8	0.25
Solar Fotovoltaica	1		1	1	1	3	0.10
Biomasa	1/5	1		5	1/5	6.4	0.20
Solar Térmica y Fotovoltaica	1	1	1/5		1/5	2.4	0.08
Solar Térmica y Biomasa	1	1	5	5		12	0.37
Total						31.8	1

Fuente: Elaboración Propia.

Finalmente, para obtener el puntaje final y así escoger la mejor alternativa, multiplicamos los factores obtenidos en las tablas anteriores por el peso de cada uno de los parámetros.

Tabla 2.7. Matriz de decisión para tipo de energía a utilizar

Parámetro	Solar Térmica	Solar Fotovoltaica	Biomasa	Solar Térmica y Fotovoltaica	Solar Térmica y Biomasa
Bajo costo por transformación de energía (A)	0.011	0.001	0.011	0.043	0.034
Cantidad de Energía Producida (B)	0.003	0.001	0.020	0.038	0.029
Facilidad de instalación y adaptación al equipo (C)	0.235	0.179	0.014	0.235	0.028
Disponibilidad de la materia prima (D)	0.028	0.011	0.022	0.008	0.041
Total	0.277	0.192	0.067	0.324	0.132

Fuente: Elaboración Propia.

La alternativa Solar Térmica y Fotovoltaica resulta ser la más idónea para nuestro diseño, debido a la disponibilidad del recurso solar en las locaciones del litoral ecuatoriano.

2.1.2 Matriz de decisión referente al sistema desalinizador

En nuestro caso, el principio físico para obtener agua dulce a partir de agua salada es el de la destilación, por lo cual nuestro sistema desalinizador será un destilador. Como se ha dicho existen muchos tipos de destiladores entre los cuales tenemos el de una vertiente, dos vertientes, de invernadero y de cascada, los cuales serán comparados por medio de criterios con su respectiva importancia.

Los parámetros a comparar son:

- Reducción de costos de construcción (A)
- Cantidad de agua producida (B)
- Bajo costo de mantenimiento del equipo (C)
- Facilidad de construcción (D)

En este caso el procedimiento para escoger la mejor alternativa es la misma, se realizan comparaciones pareadas entre los parámetros para obtener la ponderación de cada uno de ellos.

Tabla 2.8. Comparaciones pareadas

Criterios	A	B	C	D	Total	%
A		1/5	1	1	2.2	0.10
B	5		5	1	11	0.51
C	1	1/5		5	6.2	0.29
D	1	1	1/5		2.2	0.10
Total					21.6	1

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 2.9. Comparaciones con el criterio A

A	Una Vertiente	Dos Vertientes	De Invernadero	Tipo Cascada	Total	%
Una Vertiente		5	5	5	15	0.54
Dos Vertientes	1/5		5	5	10.2	0.36
De Invernadero	1/5	1/5		1	1.4	0.05
Tipo Cascada	1/5	1/5	1		1.4	0.05
Total					28	1

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 2.10. Comparaciones con el criterio B

B	Una Vertiente	Dos Vertientes	De Invernadero	Tipo Cascada	Total	%
Una Vertiente		1	1/5	1/5	2.4	0.11
Dos Vertientes	1		5	1	7	0.31
De Invernadero	5	1/5		1	6.2	0.27
Tipo Cascada	5	1	1		7	0.31
Total					22.6	1

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 2.11. Comparaciones con el criterio C

C	Una Vertiente	Dos Vertientes	De Invernadero	Tipo Cascada	Total	%
Una Vertiente		1	5	10	16	0.40
Dos Vertientes	1		10	10	21	0.53
De Invernadero	1/5	1/10		1	1.3	0.04
Tipo Cascada	1/10	1/10	1		1.2	0.03
Total					39.5	1

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 2.12. Comparaciones con el criterio D

D	Una Vertiente	Dos Vertientes	De Invernadero	Tipo Cascada	Total	%
Una Vertiente		1	5	10	16	0.37
Dos Vertientes	1		10	10	21	0.49
De Invernadero	1/5	1/10		5	5.3	0.12
Tipo Cascada	1/10	1/10	1/5		0.4	0.02
Total					42.7	1

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 2.13. Matriz de decisión para destilador solar

Parámetro	Una vertiente	Dos vertientes	De invernadero	Cascada
Reducción de costos de construcción (A)	0.054	0.036	0.005	0.005
Agua producida (B)	0.056	0.158	0.138	0.158
Bajo costo de mantenimiento (C)	0.116	0.154	0.012	0.009
Facilidad de construcción (D)	0.037	0.049	0.012	0.002
Total	0.263	0.397	0.167	0.174

Fuente: Elaboración Propia.

Como se observa en la Tabla 2.13 el destilador solar de dos vertientes resulta ser el idóneo ya que obtuvo la mayor ponderación en la comparación.

2.2 Diseño del Sistema

2.2.1 Introducción

Según Delgado (2011), siendo el Ecuador uno de los países con mayor número de horas de radiación solar diarias (12 horas), se optó en la construcción de un desalinizador solar para aprovechar de esta forma, esta fuente de energía renovable.

El funcionamiento del sistema se basa en calentar un volumen de agua, a medida que la irradiación solar ingresa por las cubiertas inclinadas de vidrios transparente, calienta el receptáculo que contiene el agua salada. El agua caliente se evapora y condensa sobre la pared interior de la cubierta de vidrio, deslizándose sobre estas y siendo recolectadas por un conducto a los laterales del desalinizador. Por otra parte, para mantener la tasa de evaporación constante de agua salada se pretende añadir un sistema eléctrico que permita mantener una temperatura constante en la cámara.

A partir de lo anteriormente expuesto, en esta sección se presenta el diseño, dimensionamiento y selección de materiales apropiados para ser utilizado en la construcción del desalinizador híbrido conformado por el aprovechamiento de la energía solar térmica y un sistema eléctrico utilizado como equipo de apoyo en la cámara solar. A la vez se hace necesario indicar que el funcionamiento del complemento eléctrico (resistencia) se podría generar a través del uso de un panel fotovoltaico, con la finalidad que el prototipo sea 100% sostenible.

2.2.2 Condiciones climáticas

El clima de la Ciudad de Guayaquil se clasifica dentro de la categoría de clima Tropical Megatérmico Seco a Semi-Húmedo (Porrou et. al., 1995), coincidente con la clasificación de Koppen, con dos estaciones: lluviosa y húmeda de diciembre a

mayo y, seca de junio a noviembre donde el total pluviométrico anual es aproximadamente 1506.5 mm. En relación a los vientos, proviene del Suroeste, con una velocidad entre 1 a 3.0 m/s máximo, siendo de baja intensidad. En la figura 2.1, se observa que los registros de largo y corto periodo tienden a tener una dirección predominante.

La Época Seca o meses fríos (junio - diciembre) existen temperaturas medias de 21.65° C a 30.8° C, en la temporada lluviosa Época Cálida (enero - mayo) alcanzan temperaturas promedio entre 22.7° C y 30.65° C. La temperatura media anual del aire es de 25.5 ° C. Los valores extremos de temperatura alcanzan entre los 35° C y 20° C. Con una radiación solar 4.14 kW/m2 día, en promedio anual. [INAMHI].

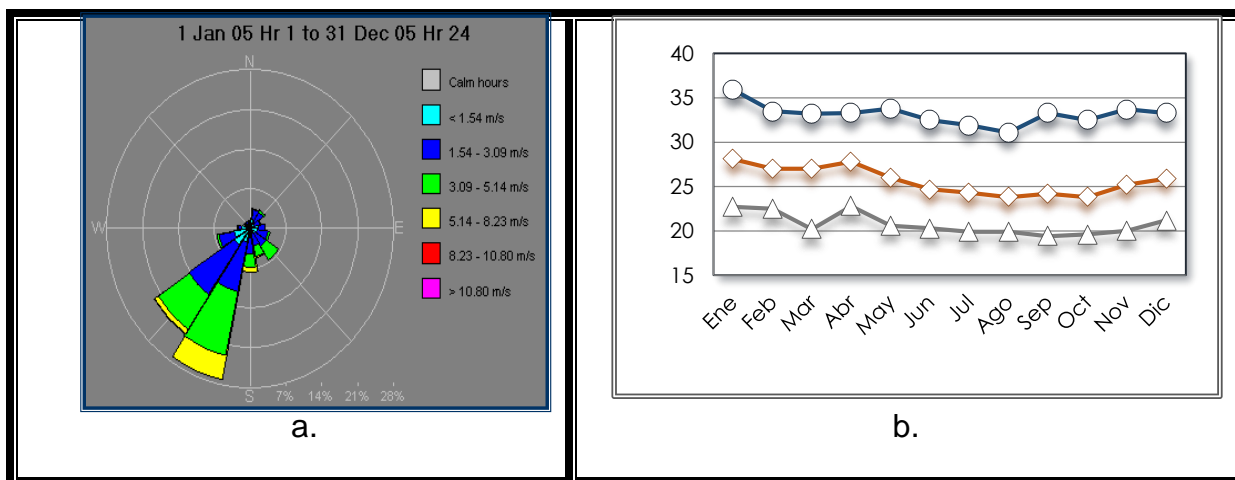


Figura 2.1. Condiciones climáticas: a. Dirección y fuerza de viento b. Temperatura mensual promedio de Guayaquil 2008

Fuente: Aviación Civil.

Radiación Solar y Humedad Relativa de la Zona de Estudio

Los datos de irradiación solar y de humedad relativa de la zona donde se realizó el estudio fueron obtenidos de la estación meteorológica de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). Cabe indicar que en esta zona presenta microclimas, por la topografía, cobertura vegetal, altitud del terreno, lo que origina una prevé variaciones de la humedad y temperatura con respecto a los datos registrados de la

ciudad de Guayaquil. La radiación solar promedio anual entre los años 2010 y 2015, se encuentra entorno de los 4.11 a 3.78 Kw h/m².

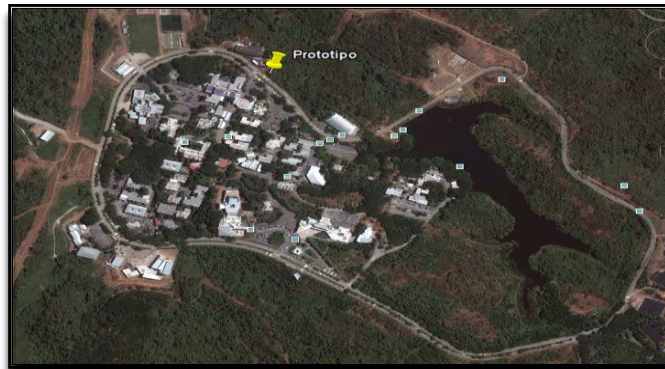


Figura 2.2. Escuela Superior Politécnica del Litoral
Fuente: Google Earth.

2.2.3 Diseño Térmico

Antes de empezar con el análisis térmico del prototipo, a continuación, se presenta el diseño de forma donde se identifican cada una de las partes principales del mismo.

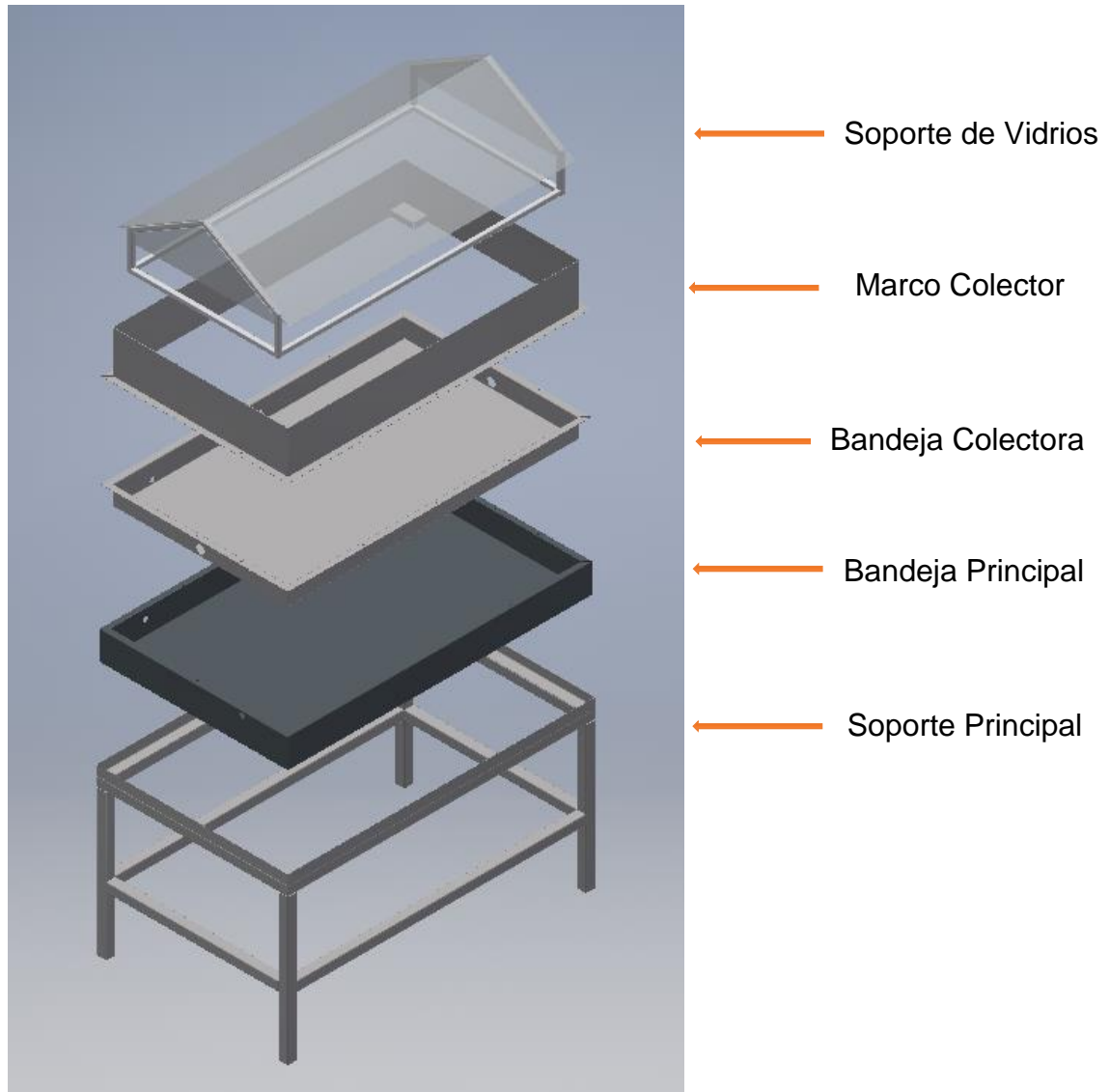


Figura 2.3. Diseño de forma
Fuente: Elaboración Propia.

Para el análisis térmico se establecen los parámetros o condiciones de entrada y salida adecuadas para el funcionamiento del desalinizador, los mismos que son detallados en la siguiente tabla.

Tabla 2.14. Parámetros a utilizar para cálculos

Constante	Descripción	Valor	Referencias
T_w	Temperatura media del agua	$328^{\circ}K$	NASA
T_a	Temperatura ambiente	$297.3^{\circ}K$	NASA
T_v	Temperatura del vidrio	$308.5^{\circ}K$	Beckman, 2013
T_{sc}	Temperatura de superficie colectora	$373^{\circ}K$	Autores
X_1	Espesor del Acero inoxidable	$0.003\ m$	IDEA, 2007
X_2	Espesor de lana de vidrio	$0.05\ m$	IDEA, 2007
X_3	Espesor del Hierro	$0.002\ m$	IDEA, 2007
K_1	Coeficiente de Conductividad térmica del acero inoxidable	$14.9\ \frac{W}{m^{\circ}K}$	INCROPERA, 1999
K_2	Coeficiente de Conductividad térmica de la lana de vidrio	$0.043\ \frac{W}{m^{\circ}K}$	INCROPERA, 1999
K_3	Coeficiente de Conductividad térmica del hierro	$60.3\ \frac{W}{m^{\circ}K}$	INCROPERA, 1999
v	Velocidad del viento promedio	$2.27\ m/s$	NASA

σ	Constante de Stefan Boltzman	$5.6697 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$	INCROPERA, 1999
ϵ_w	Emitancia del agua	0.96	INCROPERA, 1999
ϵ_v	Emitancia del vidrio	0.8	INCROPERA, 1999
ϵ_a	Emitancia del acero inoxidable	0.19	Beckman, 2013
λ	Calor latente de evaporación	$2257 \times 10^3 \frac{J}{Kg}$	INCROPERA, 1999
ρ_v	Densidad del vidrio	$2500 \frac{Kg}{m^3}$	INCROPERA, 1999
ρ_w	Densidad del agua	$989.9 \frac{Kg}{m^3}$	INCROPERA, 1999
Cp_v	Calor específico del vidrio	$750 \frac{J}{Kg \cdot K}$	INCROPERA, 1999
Cp_a	Calor específico del agua	$4186 \frac{J}{Kg \cdot K}$	INCROPERA, 1999

Fuente: Elaboración Propia.

2.2.3.1 Análisis de Transferencia de calor y masa

Al momento de diseñar el desalinizador debemos considerar el análisis de los procesos de transferencia de calor y masa, debido a su complejidad los explicaremos a continuación.

a) Calor perdido por conducción (q_c)

Se calculó el calor perdido por conducción en las paredes del mismo con la siguiente expresión matemática:

$$q_c = K_b \cdot (T_w - T_a) \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Donde:

$$q_c = \text{Calor perdido por conducción} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

$$K_b = \text{Resistencia térmica equivalente del aislante}$$

$$T_w = \text{Temperatura media del agua} (^\circ K)$$

$$T_a = \text{Temperatura ambiente} (^\circ K)$$

Para poder calcular el calor perdido por conducción se determinó la resistencia térmica equivalente.

$$R_{eq} = \frac{x_1}{K_1} + \frac{x_2}{K_2} + \frac{x_3}{K_3} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Dónde:

$$R_{eq} = \text{Resistencia equivalente de los materiales} \left(\frac{m^2 \cdot ^\circ K}{W} \right)$$

$$x_1 = \text{Espesor de acero inoxidable} (m)$$

$$x_2 = \text{Espesor de lana de vidrio} (m)$$

$$x_3 = \text{Espesor de hierro} (m)$$

$$K_1 = \text{Coeficiente de conductividad calorífica del acero inox.} \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K} \right)$$

$$K_2 = \text{Coeficiente de conductividad calorífica de la lana de vidrio} \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K} \right)$$

$$K_3 = \text{Coeficiente de conductividad calorífica del hierro} \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K} \right)$$

Para determinar el espesor adecuado se recurrió a la guía técnica “Diseño y cálculo del aislamiento térmico de conductores y equipos” (IDEA, 2007).

Tabla 2.15. Espesores de los materiales a utilizar

Nombre	Espesor (mm)	Resistencia térmica
Acero	3.2	40000
Lana de vidrio	43.9	0.04

Fuente: Elaboración Propia.



Figura 2.4. Circuito térmico del sistema

Fuente: Hermosillo.

Una vez determinados los datos se procede a reemplazar la reemplazar estos valores en la ecuación 2.2, dando como resultado que la pérdida de calor es de;

$$R_{eq} = \frac{0.003}{14.9} + \frac{0.05}{0.043} + \frac{0.002}{60.3}$$

$$R_{eq} = 1.186 \frac{m^2 \cdot K}{W}$$

b) Coeficiente de transferencia de calor por convección (h_{ct})

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección se utilizar la ecuación 2.3 donde se expresa en términos del coeficiente de convección, la temperatura de la superficie y la temperatura del cielo.

$$h_{ct} = h \cdot A (T_S - T_{\infty}) \tag{Ec. 2.3}$$

Dónde:

$$h_{ct} = \text{Calor transferido de la superficie al fluido} \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K} \right)$$

$$A = \text{Área de la superficie} (m^2)$$

$$T_s = \text{Temperatura de superficie} (^\circ K)$$

$$T_\infty = \text{Temperatura circundante} (^\circ K)$$

Otra expresión, que me permite calcular el coeficiente convectivo se encuentra relacionada con la velocidad del aire.

$$h_{ct} = 2.8 + 3v \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Donde:

$$h_{ct} = \text{Coeficiente del calor convectivo} \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K} \right)$$

$$v = \text{Velocidad del viento } 2.27 \text{ m/s}$$

Reemplazando los valores determinamos que:

$$h_{ct} = 2.8 + 3(1.27)$$

$$h_{ct} = 9.61 \frac{W}{m^2 K}$$

El coeficiente de transferencia de calor convectivo determina la resistencia térmica equivalente del aislante, y se encuentra relacionada en término del coeficiente de transferencia de calor por convección y el calor equivalente perdido por conducción.

$$K_b = \frac{1}{R_{eq} + \frac{1}{h_{ct}}} \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Donde:

$$K_b = \text{Coeficiente de transferencia de calor} \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K} \right)$$

$$R_{eq} = \text{Resistencia equivalente} \left(\frac{m^2 \circ K}{W} \right)$$

$$h_{ct} = \text{Coeficiente de transferencia de calor convectivo} \left(\frac{W}{m^2 \circ K} \right)$$

$$K_b = \frac{1}{1.186 \frac{m^2 K}{W} + \frac{1}{9.61 \frac{W}{m^2 \circ K}}}$$

$$K_b = 0.775 \frac{W}{m^2 \circ K}$$

Entonces el calor perdido por conducción es:

$$q_c = K_b \cdot (T_w - T_a)$$

$$q_c = \left(0.775 \frac{W}{m^2 \circ K} \right) (328 - 297.3) \circ K$$

$$q_c = 23.79 \frac{W}{m^2}$$

c) Calor perdido por radiación del vidrio ($q_{r v}$)

Empleando la ecuación de transferencia de calor por radiación, relacionada a la emitancia del vidrio, el coeficiente de Stefan Boltzman, la temperatura del interior del vidrio y la temperatura del cielo.

$$q_{r v} = \varepsilon_v \cdot \sigma \cdot (T_V^4 - T_S^4) \quad (\text{Ec. 2.6})$$

Donde:

$$q_{r v} = \text{Calor perdido por radiación del vidrio} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

$$\varepsilon_v = \text{Emitancia del vidrio.}$$

$\sigma = \text{Constante de Stefan Boltzman } (5,6697 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4})$

$T_v = \text{Temperatura del vidrio } (^{\circ}K)$

$T_s = \text{Temperatura del cielo } (^{\circ}K)$

Temperatura del cielo

La temperatura cielo sirve para definir “claro cielo” y calcular la radiación por hora y día que se recibió en una superficie horizontal. Cuyo valor se determina utilizando la ecuación 2.7.

$$T_s = T_a \left[0,8 + \frac{T_{dp} - 273}{250} \right]^{0,25} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

Dónde:

$T_{dp} = \text{Temperatura del rocío } (^{\circ}K)$

$T_a = \text{Temperatura ambiente } (^{\circ}K)$ (Beckman, 2013)

Determinamos la temperatura de rocío con la siguiente expresión:

$$T_{dp} = \sqrt[8]{\frac{H}{100}} \cdot (110 + T_a) - 100 \quad (\text{Ec. 2.8})$$

Donde:

$H = \text{Humedad relativa del ambiente}$

$T_{dp} = \text{Temperatura de rocío. } (^{\circ}K)$

$$T_{dp} = \sqrt[8]{\frac{63.2}{100}} \cdot (110 + 297.3) - 100$$

$$T_{dp} = 290.05 \text{ K}$$

Una vez calculado Tdp, se procede a determinar la temperatura del cielo, siendo esta:

$$T_s = 297.3 \left[0,8 + \frac{290.05 - 273}{250} \right]^{0,25}$$

$$T_s = 287.13 \text{ K}$$

Finalmente, se calcula el calor perdido por radiación del vidrio:

$$q_{rv} = (0.8) \left(5.6697 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right) (308.5^4 - 287.13^4) (\text{°K}^4)$$

$$q_{rv} = 102.54 \frac{W}{m^2}$$

d) Calor perdido por convección del vidrio (q_{cv})

Para determinar el calor perdido por convección del vidrio utilizaremos la ecuación 2.9 y 2.10.

$$q_{cv} = h_{cv} \cdot (T_v - T_a) \quad (\text{Ec. 2.9})$$

Donde:

$$q_{cv} = \text{Calor perdido por convección del vidrio} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

$$h_{cv} = \text{Coeficiente de transferencia de calor convectivo del vidrio} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$$

$$T_v = \text{Temperatura del vidrio} (\text{°K})$$

$$T_a = \text{Temperatura ambiente} (\text{°K})$$

Así tenemos:

$$h_{c v} = h_{c t} \quad (\text{Ec. 2.10})$$

$$h_{c v} = 9.61 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Sabiendo que el coeficiente de convección es de 9.61 W/m² K. Podemos calcular el calor perdido por convección del vidrio:

$$q_{c v} = \left(9.61 \frac{W}{m^2 \cdot K} \right) (308.5 - 297.3) K$$

$$q_{c v} = 107.63 \frac{W}{m^2}$$

e) Calor perdido por radiación desde agua (q_{rw})

Existe transferencia de calor por radiación entre la superficie del agua y la del vidrio, la cual se calculará a partir de la ley de Stefan-Boltzman.

$$q_{rw} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1} (T_w^4 - T_v^4) \quad (\text{Ec. 2.11})$$

Donde:

$$q_{rw} = \text{Calor perdido por radiación del agua} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

$$\varepsilon_w = \text{Emitancia del agua}$$

$$\varepsilon_v = \text{Emitancia del vidrio}$$

$$T_w = \text{Temperatura del agua} (^\circ K)$$

$$T_v = \text{Temperatura del vidrio} (^\circ K)$$

$$\sigma = \text{Constante de Stefan Boltzman} \left(5,6697 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right)$$

Finalmente, aplicando la ecuación 2.11, tenemos que:

$$q_{rw} = \frac{5,6697 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}}{\frac{1}{0.96} + \frac{1}{0.8} - 1} (328^4 - 308.5^4) (\text{°K}^4)$$

$$q_{rw} = 113.194 \frac{W}{m^2}$$

f) Calor perdido por convección natural (q_{cw})

El aire ocupa un lugar entre el agua y el vidrio, a medida que incrementa la temperatura, ocurre movimiento de las masas de aire lo que provoca la pérdida de calor por convección natural.

$$h_c = 0,884 \left[T_w - T_v + \frac{P_w - P_{wv}}{268,4 \times 10^3 - P_w} (T_w + 273) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Ec. 2.12})$$

Donde:

$$h_c = \text{Calor perdido por convección natural} \left(\frac{W}{m^2 \cdot \text{°K}} \right)$$

$$P_w = \text{Presión de vapor del agua a la temperatura del agua (Pa)}$$

$$P_{wv} = \text{Presión de vapor del agua a la temperatura del vidrio (Pa)}$$

$$T_w = \text{Temperatura del agua (°K)}$$

Siendo; $P_w = 15758 \text{ Pa @ } T = 328\text{K}$ y $P_{wv} = 5628 \text{ Pa @ } T = 308.5\text{K}$ (Tablas Cengel, 2004), se determina que el coeficiente de convección.

$$h_c = 0,884 \left[328 - 308 + \frac{15758 - 5628}{268,4 \times 10^3 - 15758} (328 + 273) \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$h_c = 2.852 \frac{W}{m^2 \cdot \text{°K}}$$

A la vez procedemos a calcular el coeficiente de convección en el interior de la cámara.

$$h_r = \frac{\varepsilon_a \cdot \sigma \cdot (T_{sc}^4 - T_w^4)}{T_{sc} - T_w} \quad (\text{Ec. 2.13})$$

Donde:

$$h_r = \text{Coeficiente de radiación efectivo} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$$

$$\varepsilon_a = \text{Emisividad del acero inoxidable}$$

$$T_{sc} = \text{Temperatura de superficie del vidrio (}^\circ K\text{)}$$

Reemplazando tenemos:

$$h_r = \frac{(0.19) \left(5,6697 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right) (373^4 - 328^4)}{373 - 328}$$

$$h_r = 2.4 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Si $h_r < h_c$ entonces:

$$h_t = h_c + \frac{3}{4} h_r \quad (\text{Ec. 2.14})$$

Como esto es una afirmación se calcula el valor del coeficiente de convección total,

h_t :

$$h_t = 2.852 + \frac{3}{4} 2.4$$

$$h_t = 4.65 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Ya calculado el coeficiente de transferencia de calor por convección total, se consigue determinar el calor perdido por convección del agua partiendo de:

$$q_{cw} = h_t \cdot (T_w - T_v) \quad (\text{Ec. 2.15})$$

Donde:

$$q_{cw} = \text{Calor perdido por convección del agua} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

$$h_t = \text{Coeficiente total de transfde calor por conv del agua} \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$$

$$T_w = \text{Temperatura media del agua} (^\circ K)$$

$$T_v = \text{Temperatura media del vidrio} (^\circ K)$$

$$q_{cw} = \left(4.65 \frac{W}{m^2 K} \right) (328 - 308.5)(K)$$

$$q_{cw} = 90.71 \frac{W}{m^2}$$

g) Calor perdido por evaporación

Se determina el calor perdido por evaporación con la siguiente ecuación:

$$q_e = h_e \cdot (P_w - P_v) \quad (\text{Ec. 2.16})$$

Donde:

$$q_e = \text{Calor perdido por evaporación} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

$$h_e = \text{Coeficiente de transferencia de calor evaporativo} \left(\frac{W}{m^2 K} \right)$$

$$P_w = \text{Presión de vapor del agua a la temperatura del agua} (Pa)$$

$$P_v = \text{Presión de vapor del agua a la temperatura del vidrio} (Pa)$$

Se puede relacionar el coeficiente de evaporación con el coeficiente total de convección del agua (h_t).

$$h_e = 0,013 \cdot h_t \quad (\text{Ec. 2.17})$$

Donde tenemos:

$$h_e = 0,013 \left(4.65 \frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$$

$$h_e = 0,06 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

Y así calcular el calor perdido por evaporación

$$q_e = \left(0.06 \frac{W}{m^2 \cdot K} \right) (15758 - 5628)(Pa)$$

$$q_e = 612.36 \frac{W}{m^2}$$

h) Calor perdido en la cubierta

Se realizó un balance de energía entre el vidrio y el ambiente y así obtuvimos lo siguiente:

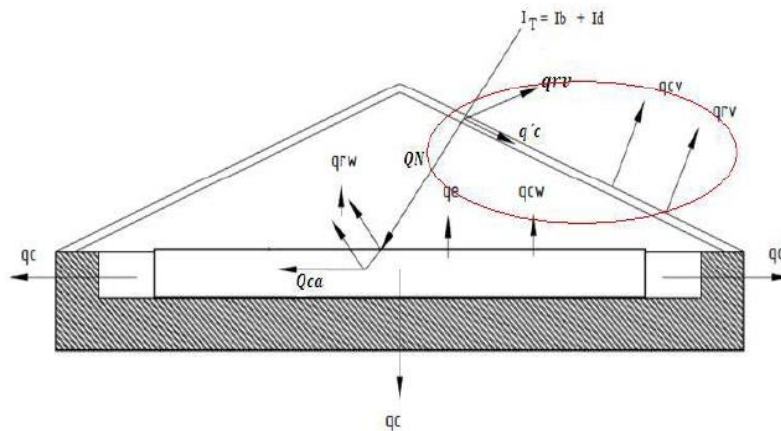


Figura 2.5. Balance de energía entre el vidrio y el ambiente
Fuente: (Beckman,2013).

Dentro del círculo que se muestra en la figura anterior y considerando el principio de la conservación de la energía se tiene que:

$$q'_c = q_{rw} + q_{cw} + q_e + \alpha g x Gs - (q_{rv} + q_{cv}) \quad (\text{Ec. 2.18})$$

Dónde:

$$q'_c = \text{Calor almacenado por la cubierta} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

$$q_{rw} = \text{Calor perdido por radiación} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

$$q_{cw} = \text{Calor perdido por convección del agua} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

$$q_e = \text{Calor perdido por evaporación} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

$$\alpha g = \text{Factor de reflexión de la radiación} \left(\frac{W.h}{m^2 \text{ día}} \right)$$

$$Gs = \text{Radiación directa sobre una superficie inclinada} \left(\frac{W.h}{m^2 \text{ día}} \right)$$

$$q_{rv} = \text{Calor perdido por radiación del vidrio} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

$$q_{cv} = \text{Coeficiente de transferencia de calor convectivo del vidrio} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

Para los cálculos se tomó en cuenta el menor valor de radiación correspondiente al mes de agosto.

$$Gs = 3580 \frac{W.h}{m^2 \text{ día}}$$

Esta es la radiación que llega al vidrio la cual sufre absorción, reflexión y transmitancia con el factor α_v , donde:

$$\alpha_v * Gs = 0.1 * 3580 \frac{W.h}{m^2 \text{ día}} = 358 \frac{W.h}{m^2 \text{ día}}$$

Donde $358 \frac{W.h}{m^2 \text{ día}}$ es la radiación que llega al vidrio, reemplazando los valores en la ecuación de calor almacenado en la cubierta, tenemos:

$$q'_c = 113.194 + 90.71 + 612.36 + 358 - (102.54 + 107.63)$$

$$q'_c = 964.09 \frac{W.h}{m^2 \text{ día}} * \frac{1 \text{ día}}{3.25 h}$$

$$q'_c = 296.64 \frac{W}{m^2}$$

i) Calor absorbido por el agua

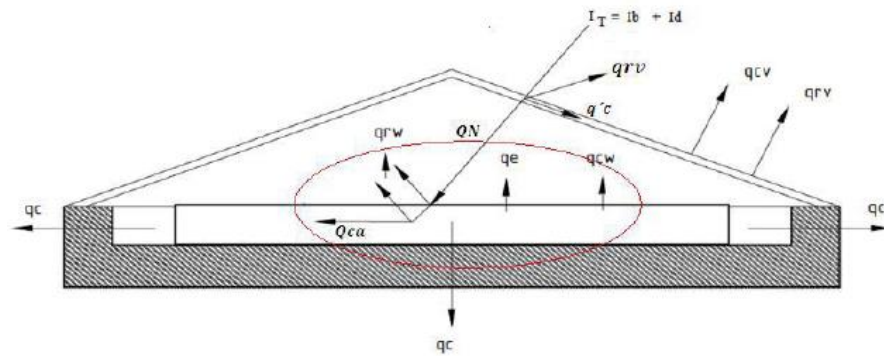


Figura 2.6. Balance de energía en el interior del desalinizador

Fuente: (Becman,2013).

$$q'_a = G_s.(1 - \alpha_g)(1 - \alpha_a) - (q_{rw} + q_{cw} + q_e + q_c) \quad (\text{Ec. 2.19})$$

Donde:

$$q'_a = \text{Calor absorbido por el agua} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

$$q_{rw} = \text{Calor perdido por radiación} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

$$q_{cw} = \text{Calor perdido por convección del agua} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

$$q_e = \text{Calor perdido por evaporación} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

$$\alpha_g = \text{Factor de reflexión de la radiación} \left(\frac{W \cdot h}{m^2 \text{ día}} \right)$$

$$G_s = \text{Radiación directa sobre una superficie inclinada} \left(\frac{W \cdot h}{m^2 \text{ día}} \right)$$

Con 3,25 horas de brillo solar al día (ver apéndice A1).

$$q_{rw} = 113.194 \frac{W}{m^2} * \frac{1 \text{ día}}{3.25 h} = 38.83 \frac{W}{m^2}$$

$$q_{cw} = 90.71 \frac{W}{m^2} * \frac{1 \text{ día}}{3.25 h} = 27.91 \frac{W}{m^2}$$

$$q_e = 612.36 \frac{W}{m^2} * \frac{1 \text{ día}}{3.25 h} = 188.42 \frac{W}{m^2}$$

$$G_s = 3580 \frac{W}{m^2} * \frac{1 \text{ día}}{3.25 h} = 716 \frac{W}{m^2}$$

Reemplazando podemos obtener el calor absorbido por el agua:

$$q'_a = \left(716 \frac{W}{m^2} \right) (1 - 0.1)(1 - 0.3) - \left(38.83 \frac{W}{m^2} + 27.91 \frac{W}{m^2} + 188.42 \frac{W}{m^2} + 23.79 \frac{W}{m^2} \right)$$

$$q'_a = 176.13 \frac{W}{m^2}$$

j) Calor total absorbido por el sistema

Para hallar el calor total empleamos la siguiente expresión matemática.

$$q_t = q'_c + q'_a \quad (\text{Ec. 2.20})$$

Donde:

$$q_t = \text{Calor absorbido por el sistema} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

$$q'_c = \text{Calor almacenado por la cubierta} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

$$q'_a = \text{Calor almacenado por el agua} \left(\frac{W}{m^2} \right)$$

Sustituyendo los valores antes calculados nos da que:

$$q_t = 296.64 \frac{W}{m^2} + 176.13 \frac{W}{m^2}$$

$$q_t = 472.77 \frac{W}{m^2}$$

A continuación, se expresa el calor total absorbido por el sistema en función del área de captación de la energía solar.

$$QT = q_t \cdot A \quad (\text{Ec. 2.21})$$

Dónde:

$$QT = \text{Calor absorbido por el sistema}$$

$$A = \text{Área de captación de la energía solar}$$

k) Cálculo del calor absorbido del agua

$$q'_a = Gs(1 - \alpha_g)(1 - \alpha_a) - (q_{rw} + q_{cw} + q_e + q_c) \quad (\text{Ec. 2.21})$$

Transformando cada uno de los calores obtenidos anteriormente con el factor de Heliofanía.

$$q_{rw} = 113,19 \frac{Wh}{m^2d} \times \frac{1 d}{3,25 h} = 34,85 \frac{W}{m^2}$$

$$q_{cw} = 90,71 \frac{Wh}{m^2d} \times \frac{1 d}{3,25 h} = 27,91 \frac{W}{m^2}$$

$$q_e = 612,36 \frac{Wh}{m^2d} \times \frac{1 d}{3,25 h} = 188,42 \frac{W}{m^2}$$

$$G_s = 3580 \frac{Wh}{m^2d} \times \frac{1 d}{3,25 h} = 716 \frac{W}{m^2}$$

Ahora reemplazamos estos valores en la ecuación 2.21 para obtener el calor absorbido por el agua.

$$q'_a = 716(1 - 0,1)(1 - 0,3) - (34,83 + 27,91 + 188,42 + 23,79)$$

$$q'_a = 176,13 \frac{W}{m^2}$$

El calor absorbido por el sistema será equivalente al calor de la cubierta más el calor absorbido por el agua, entonces, reemplazando en la ecuación 2.20, obtenemos:

$$q_t = q'_c + q'_a$$

$$q_t = 296,64 + 176,13$$

$$q_t = 472,77 \frac{W}{m^2}$$

Ahora procedemos a calcular la capacidad de calor almacenada por el depósito con la ecuación 2.22.

$$Q_T = q_t A \tag{Ec. 2.22}$$

$$Q_T = q_t A_{band}$$

$$Q_T = 472,77 \frac{W}{m^2} A_{band}$$

Calor necesario para calentar el vidrio

Para calentar el vidrio utilizamos la siguiente expresión:

$$Q_v = m_v C p_v (T_v - T_a) \quad (\text{Ec. 2.24})$$

$$Q_v = 5,77L(750)(508,5 - 297,3)$$

$$Q_v = 48468L \frac{J}{m} \times \frac{1 Wh}{3600 s}$$

$$Q_v = 13,46L \frac{Wh}{m^2 d}$$

Calor necesario para calentar el agua

En primer lugar, necesitamos que el volumen diario producido de agua dulce, sea de 5 litros. En base a eso calculamos la masa del agua.

$$m_s = 989,9 \frac{kg}{m^3} \times 5lt \times \frac{1dm^3}{lt} \times \frac{m^3}{1000dm^3}$$

A continuación, se expresa la ecuación a utilizar para determinar el calor requerido para calentar un volumen de agua.

$$Q_{ca} = m_s C p (T_w - T_a) \quad (\text{Ec. 2.25})$$

Calculando esta expresión, obtendremos que:

$$Q_{ca} = 4,95(4186)(328 - 297,3)$$

$$Q_{ca} = 6,3 \times 10^5 J = 176,7 \frac{Wh}{d}$$

Calor necesario para evaporar todo el volumen de agua.

En este caso utilizamos la expresión de calor latente.

$$Q_{ev} = m_s \gamma \quad (\text{Ec. 2.26})$$

Donde, ms será el volumen de agua, γ es el calor latente de evaporación.

$$Q_{ev} = (4,95)(2257 \times 10^3)$$

$$Q_{ev} = 3103 \frac{Wh}{d}$$

Ahora convertimos los calores anteriores a Watts.

$$Q_{ca} = 176,7 \frac{Wh}{d} \times \frac{d}{3,25h} = 54,37 W$$

$$Q_{ev} = 3103 \frac{Wh}{d} \times \frac{d}{3,25h} = 954,76 W$$

Para hallar la cantidad necesaria para calentar el vidrio, el agua de la bandeja y evaporar toda el agua se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_n = Q_{cv} + Q_{ca} + Q_{ev} \quad (\text{Ec. 2.27})$$

En primer lugar, tenemos que hallar el calor de convección del vidrio, que para este caso será de:

$$Q_{cv} = q_{cv}A_v + Q_v \quad (\text{Ec. 2.28})$$

$$Q_{cv} = 2(107,63)(0,577L) + 13,46 \frac{Wh}{m d} L \times \frac{d}{3,25 h}$$

$$Q_{cv} = 124,21L + 4,14L$$

$$Q_{cv} = 128,34L$$

Finalmente, reemplazando los valores en la ecuación 2.27 se determina el calor requerido para calentar la cámara del desalinizador con la finalidad de evaporar una cierta cantidad de agua salada para obtener agua dulce.

$$Q_n = 128,34L + 54,37 + 954,76$$

$$Q_n = 128,34L + 1009,13$$

La expresión queda en términos de la longitud de la bandeja.

2.2.3 Dimensiones del desalinizador

Partiendo de que la eficiencia teórica de este tipo de desalinizadores oscila entre los 25 a 50%. Para este cálculo:

$$Ef = \frac{Q}{G_{sc}} \times 100 \quad (\text{Ec. 2.29})$$

Para hallar el calor total utilizamos la siguiente expresión:

$$Q = Q_t + Q_n \quad (\text{Ec 2.30})$$

$$Q_n = 128,34L + 1009,13$$

$$Q_t = 472,77 * Abandeja$$

De acuerdo a la Figura 2.7, podemos decir que:

$$Abandeja = 0,5 * L$$

$$Q = 128,34L + 1009,13 + 472,77L$$

$$Q = 601,11L + 1009,13$$

Ahora reemplazando los valores de la ecuación 2.26 en la ecuación 2.29, podremos determinar la longitud de la bandeja.

$$Ef = \frac{Q}{G_{sc}} \times 100$$

$$37,5 = \frac{601,11L + 1009,13}{4360} \times 100$$

$$L = 1,3m$$

Por seguridad y efectos de construcción, podemos determinar que la longitud de la bandeja es:

$$L = 1,5 m$$

Para hallar la masa y poder determinar el volumen utilizaremos la siguiente expresión:

$$\frac{Hmin + Hmax}{2} = \frac{4360 + 6170}{2} = 5265 \frac{Wh}{m^2}$$

$$q = m_s Cp(Tsc - Ta)$$

$$m_s = \frac{5265 \frac{Wh}{m^2} \times \frac{3600s}{h} \times \frac{J}{Ws} \times (1 \times 2)m^2}{4179 \frac{KJ}{KgK} (100 - 24,5)}$$

$$m_s = 120kg$$

Para finalmente calcular la altura del desalinizador, utilizamos la expresión:

$$V = \frac{m}{\rho}$$

$$V = \frac{120}{989,9} = 0,1214 m^3$$

Ahora igualamos a esta expresión:

$$V = Abandeja * h$$

$$h = \frac{V}{Abandeja} = \frac{0,1214}{1(2)} = 0,06 m$$

a) Resistencias

Debido lo impredecible que puede ser la radiación solar, el equipo contará con una fuente alterna de energía lo cual estaba regido bajo el uso de energía renovable a través de paneles fotovoltaicos que sería lo adecuado desde el punto de vista ecológico, sin embargo los costos de la implementación para la obtención de energía para el prototipo son muy altos, por este motivo se recurrió al uso de una energía secundaria, que sería la energía eléctrica, mediante resistencias las cuales se activarán en los días en los que la radiación solar no sea suficiente para evaporar la demanda.

Utilizando la siguiente expresión:

$$Q = 601,11L + 1009,13 \quad (\text{Ec. 2.31})$$

$$Q = 128,34(1,5) + 1009,13$$

$$Q = 1910,80 \text{ W}$$

Ese es el calor necesario para calentar tanto la bandeja como el agua, por ende, la resistencia calentadora a escoger es de 2000 W.

Cabe recalcar que esta resistencia actuaría en caso de que la radiación solar del día no cubra la demanda energética del equipo.

2.3 Análisis de Costo del Desalinizador Híbrido

Para el cálculo del costo final del equipo se tomó en cuenta tanto los materiales como las distintas operaciones que se realizaron para la construcción del mismo.

Tabla 2.16. Cantidad y costos de materiales utilizados en la construcción

Materiales utilizados	Cantidad (u)	Precio (\$)	Total (\$)
Tubo cuadrado de 50 x 3 mm	3	22,20	66,60
Ángulo 50 x 3 mm	1	13,33	13,33
Plancha de Acero A36 1,22x2,44 m	1	26,60	26,60
Plancha de Acero Inoxidable de 3 mm	1	145,60	145,60
½ Plancha de Acero Inoxidable de 3mm	1	72,80	72,80
Resistencias térmicas	2	22,40	44,80
Lana de vidrio	1	126,83	126,83
Tubo cuadrado de aluminio 1 1/4	1	15,92	15,92
Tuberías y accesorios	1	3,04	3,04
Vidrio	1	15,00	15,00
Contactores	2	25,00	50,00
Angulo de 1x1 de aluminio	1	4,27	4,27
Juego de Nudos de vitrina 1 1/4	1	7,12	7,12
Silicón Transparente	2	2,50	5,00
Total			596,91

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 2.17. Costos de mano de obra

Mano de Obra	Total (\$)
Soldador	300,00
Dobles y cortes	40,00
Electricista	20,00
Total	360,00

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 2.18. Costos totales

Costos	Total (\$)
Costos de Materiales	596,91
Costos de Mano de Obra	360,00
Total	956,91

Fuente: Elaboración Propia.

El costo final del equipo, tomando en cuenta los costos de materiales y la mano de obra involucrada es de \$956,91.

2.4 Construcción

La construcción del prototipo se realizó mediante módulos, para brindar facilidad del montaje y desmontaje del mismo.

Consiste en una bandeja principal, la cual contiene el aislante térmico que en nuestro caso es la lana de vidrio, junto con la bandeja colectora. La bandeja principal se encuentra hecha a base de Acero A36 y la colectora de acero inoxidable debido al alto grado de salinidad que maneja el ambiente.

El marco que soporta el vidrio es de Aluminio y el espesor de vidrio es de 3 mm, transparente.

Para evitar posibles fugas de agua se realizó el proceso de soldadura TIG (Tungsteno) ya que de presentarse esa falla se vería afectado el aislante térmico.



Figura 2.8. Construcción del desalinizador

Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO 3

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1 Prueba de campo del prototipo experimental

Una vez construido, el equipo debe ser probado para confirmar que cumple con las características especificadas anteriormente. Para tal efecto se utilizaron los siguientes instrumentos de medición:

- Termopares Tipo K
- Multímetros
- Piranómetro de Radiación Global
- Datta Logger

Las temperaturas fueron tomadas en distintas zonas que se detallan a continuación:

1. Temperatura de evaporación del agua
2. Temperatura del ambiente
3. Temperatura del vidrio
4. Temperatura de la bandeja
5. Radiación Solar

3.1.1 Procedimiento de Medición

- Ubicar el desalinizador con su eje de simetría longitudinal de norte a sur.
- Ubicar las termocuplas en una región en donde pueda medir la temperatura de bandeja, de evaporización 1 y 2, del agua, del ambiente y del vidrio.
- Ubicar el pirómetro en un lugar despejado (sin sombra).
- Ingresar el agua salada por la entrada respectiva.
- Encender la(s) resistencia(s) eléctrica(s) si el caso lo amerita.
- Registrar los respectivos datos en intervalos de 10 minutos.

En la figura 3.1, se muestra las posiciones de las termocuplas o termopares instalados para el registro de las temperaturas. Como se puede observar se registraron las temperaturas de evaporación del agua salada en distintas zonas de la cámara, temperatura del vidrio interior que conforma la cubierta del desalinizador, temperatura del agua salada, temperatura de la bandeja y la temperatura ambiente, así como la irradiación del lugar. Las mediciones fueran realizadas cada 10 min durante 8 horas de funcionamiento del prototipo.

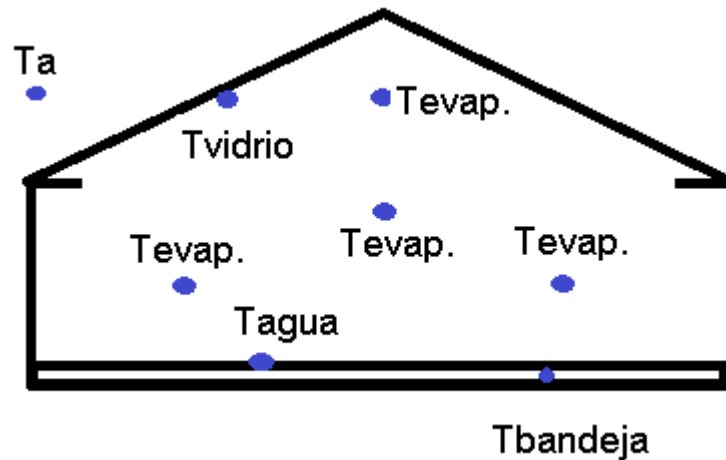


Figura 3.1. Puntos de medición registrados dentro de la cámara de desalinización

Fuente: Elaboración propia.



Figura 3.2. Pruebas experimentales

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Comportamiento del calentamiento del prototipo

Desalinizador solar

Mediante las pruebas realizadas en el desalinizador solar (un mes) para determinar el funcionamiento del prototipo experimental, se registraron irradiaciones muy bajas encontrándose en entorno a los 50 a 700 W/m², en el mes de agosto donde la temperatura promedio este entorno de los 26 °C en el día y en la noche desciende la temperatura entre 2 a 3 °C, con mucha nubosidad; sin olvidar que en el sector donde se realizaron las pruebas (ESPOL) experimentales es un lugar con microclimas.

En la siguiente figura se muestra el comportamiento térmico del desalinizador solar para un día típico del mes antes indicado, mostrando una irradiación muy variante en un tiempo de muestreo de cada 10 min. Como se puede observar durante el funcionamiento del desalinizador, la cámara muestra resistencia a los cambios brusco de irradiación.

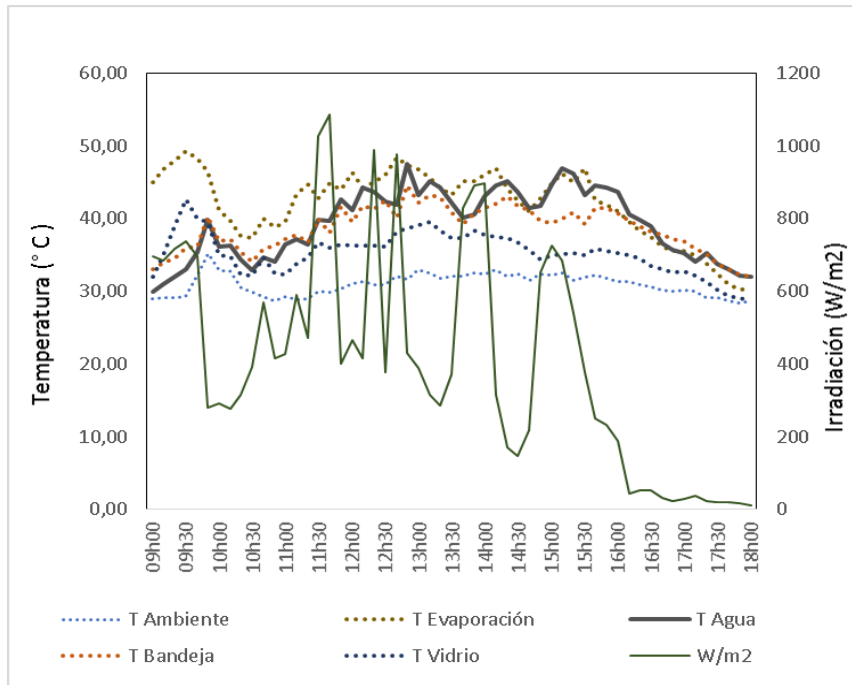


Figura 3.3. Comportamiento térmico del desalinizador solar

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, en la figura 3.4, se presenta el comportamiento térmico de la cámara de desalinización a distintas irradiaciones, dicho análisis fue realizado a través de las mediciones registradas durante un mes de operación del prototipo. Como se puede observar la cámara alcanza una temperatura interna de 50°C en torno de los 760 W/m², cuando la temperatura ambiental fue de alrededor de 26 a 33°C, con una ganancia de temperatura entre 17 a 20 grados en referencia a la ambiental, para un mes con mucha radiación difusa en el medio.

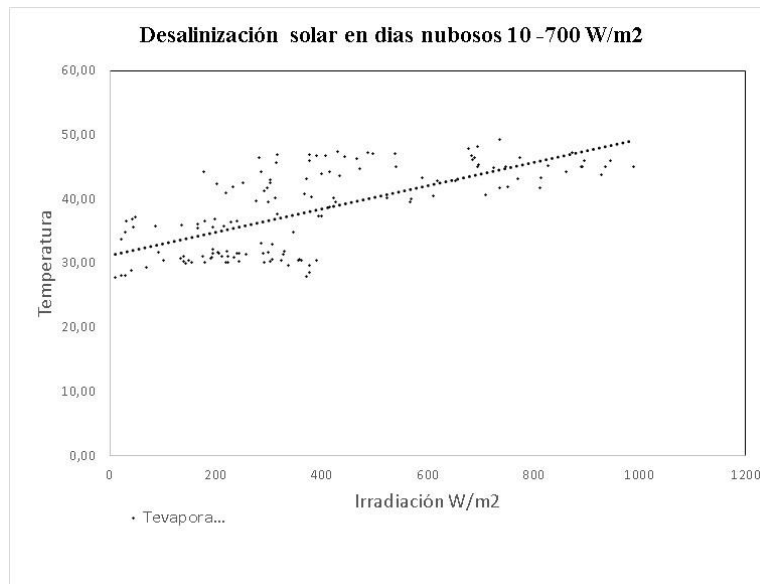


Figura 3.4. Funcionamiento del desalinizador solar en relación a la irradiación
 Fuente: Elaboración propia.

A partir de lo expuesto en la sección 1.3.2.3, hicimos referencia que en Ecuador se registra una insolación media global de 4 KWh/ m2 día. Se pudo constatar que la irradiación media en los días de medición estuvieron en torno de los 1,16 a 1,47 KW/ m2 día, por lo tanto, se hace evidente que el prototipo tenga una baja eficiencia, con una tasa de evaporación de agua salada muy lenta; alcanzando a obtenerse un volumen de agua dulce entre 350 a 650 ml durante 8 horas de funcionamiento del desalinizador. En la tabla 3.1 se muestra las temperaturas alcanzada dentro del prototipo experimental para irradiaciones promedias registradas entorno de los 250 a 410 W/m2 (Temperatura de evaporación en la cámara, temperatura de la bandeja, temperatura de la cara interna de la cubierta de vidrio); además se muestran la cantidad de agua dulce que se pueden obtener en un día, para estas condiciones climáticas. Se hace necesario indicar que la radiación promedia en la Costa del Ecuador está entorno de los 400 a 450 W/m2 (Delgado, 2009).

Tabla 3.1. Volumen de agua generado en el desalinizador solar

Radiación promedio del día W/m ²	Ta. °C	Tevaporación °C	Tagua °C	Tbandeja °C	Tvidrio °C	Volumen de Agua dulce obtenida ml
250	26.70	30.52	29.35	29.29	28.12	350
410	30.90	42.03	39.25	38.58	35.36	650

Fuente: Elaboración propia.

Tal como se muestra en los resultados de la tabla 3.1 se evidencia que a bajas irradiaciones el prototipo experimental alcanza una ganancia de temperatura dentro de la cámara alrededor de 4 a 11 °C, con respecto a la temperatura ambiental. Por otra parte, la cubierta de vidrio transparente estaría entorno de 2 a 5 grados, más con respecto a la ambiental, permitiendo el proceso de condensación del agua evaporada.

Desalinizador híbrido

Una vez conocido el funcionamiento térmico de un desalinizador solar y los inconvenientes que estos presentan, cuando las condiciones climáticas no son favorables especialmente en días constantemente nubosos con mayor cantidad de radiación difusa que radiación directa (irradiación solar no supera los 450 W/m²). Se hace necesario adaptar otra fuente de calor al sistema con la finalidad de evaporar la mayor cantidad de agua salada durante el día, para ello se adapta una resistencia eléctrica que nos permitirá elevar la temperatura de evaporación del agua. Esta resistencia al ser de 500 W/m² se conectará directamente al consumo energético, o puede funcionar con un conjunto de paneles fotovoltaicos. Cabe indicar que las resistencias funcionarán cuando el desalinizador no alcance la temperatura apropiada para evaporar el agua, por lo que el sistema se utilizara por un periodo discontinuo de tiempo.

Como se puede observar en la figura 3.5, las resistencias solo se prenden en ciertos periodos de tiempo para mantener estable la temperatura del prototipo (60 a 80 °C), cuando la irradiación solar empieza a descender. En las zonas 1 -2-3, se observa el funcionamiento del sistema solo con energía solar, cuando la radiación baja entra en funcionamiento la resistencia en un periodo corto de tiempo.

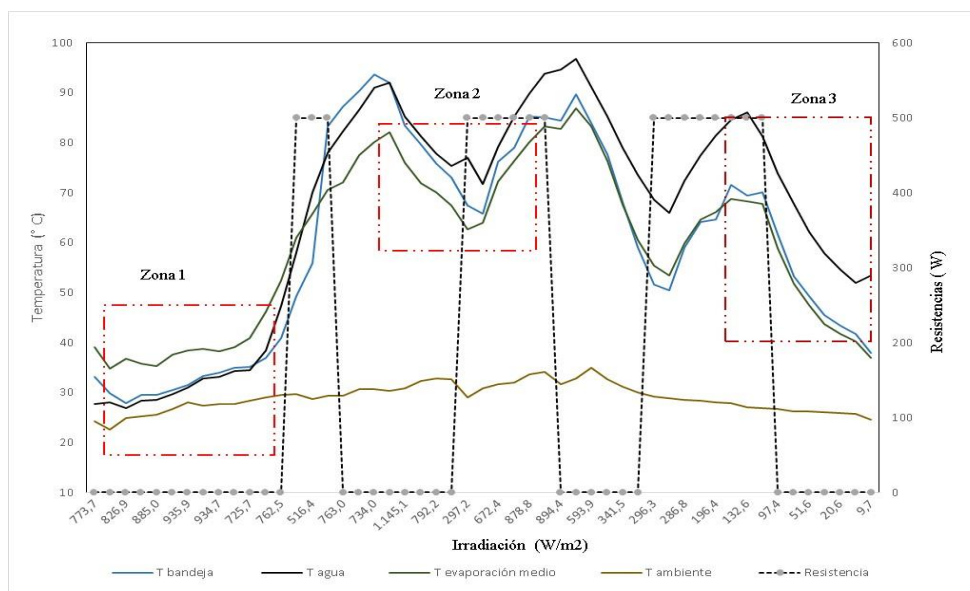


Figura 3.5. Funcionamiento del desalinizador híbrido en un día parcialmente despejado

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, presentamos en la tabla 3.2 los resultados obtenidos a distintas irradiaciones promedias que van entorno a los 463 a 550 W/m² día. Como se puede observar con el desalinizador podemos obtener a baja intensidad 415 W/m², aproximadamente 4.8 litros de agua dulce y a altas radiaciones solares se alcanza los 8 litros de agua. Contemplando estos resultados que se ha ingresado 12 litros de agua salada para el proceso de desalación.

Tabla 3.2. Volumen de agua generado en el desalinizador híbrido

Radiación promedio del día W/m²	Tambiental °C	Tevaporación °C	Tagua °C	Tbandeja °C	Tvidrio °C	Agua dulce ml
415	30.3	51.6	55.66	52.31	43.92	4825
560	29.46	61.8	62.6	61.85	52.38	7875
484	29.04	58.37	59.3	53.94	54.20	5600

Fuente: Elaboración propia

3.3 Destilación de agua salada

Es conveniente analizar la tasa de evaporación del agua salada durante cada hora de operación del prototipo con la finalidad de poder determinar la eficiencia del desalinizador híbrido. Para ello se presenta en la figura 3.6 la curva del funcionamiento del desalinizador híbrido relacionada a la tasa de evaporación de agua salada y la irradiación solar promedio del día. En dicha figura se puede observar que la tasa de evaporación por desalinización se encuentra en tornos de los 400 a 500 ml por horas a temperatura de operación superior a los 50 °C, y por ende la tasa de evaporación es superior a mayores temperaturas. Por lo que es necesario mantener una temperatura constante dentro de la cámara de desalación superior a los 65 °C.

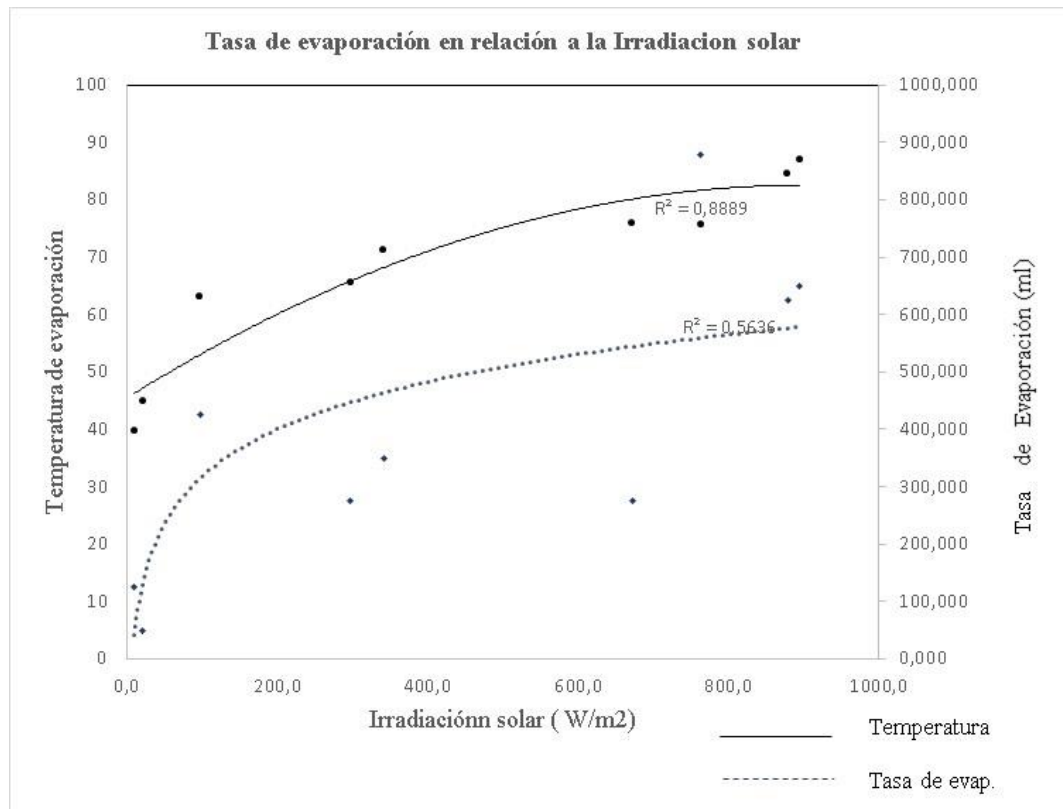


Figura 3.6. Tasa de evaporación de agua salada
 Fuente: Elaboración propia.

3.4 Eficiencia del prototipo experimental

Una vez conocida la tasa de evaporación del prototipo, se analiza la eficiencia experimental del mismo, utilizando las ecuaciones establecidas en el capítulo 2 que relaciona la masa de agua a evaporar, el calor latente de evaporación, la irradiación solar, área de influencia y la potencia de la resistencia (fuente de calor añadida al sistema). Como muestra en la figura 3.7 el desalinizador híbrido tendrá una eficiencia del 37 %.

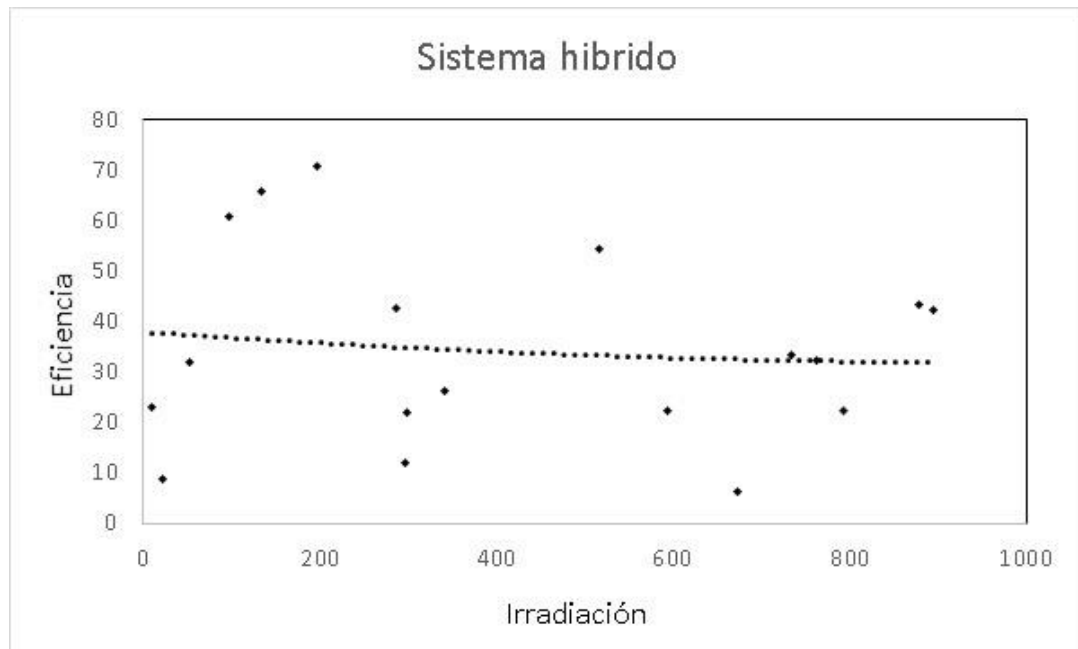


Figura 3.7. Eficiencia experimental del desalinizador hibrido
Fuente: Elaboración propia.

CAPITULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Se ha diseñado y construido un prototipo experimental híbrido que comprende el uso de energía solar y eléctrica que cumple con las respectivas especificaciones del diseño, manteniendo la resistencia térmica del prototipo a fluctuación de la radiación.
- Se ha determinado que la temperatura promedio del prototipo experimental funcionando únicamente con energía solar, en días nublados alcanza los 50°C, con irradiaciones que varían desde los 10 hasta los 500 W/m². En cambio, al utilizar los dos tipos de energía la temperatura de evaporación fue de 80°C aproximadamente.
- La tasa de evaporación del desalinizador solar fluctúa entre 31 – 80 ml por hora, generando un total de 250 a 650 ml durante 8 horas de operación. Sin embargo, al utilizar los dos tipos de energía se obtuvo una tasa de evaporación variable entre 50 a 600 ml por hora obteniendo de 5 a 8 litros de agua dulce al día aproximadamente.
- La eficiencia experimental obtenida en el sistema híbrido fue de 37%, siendo muy próxima a la eficiencia teórica determinada de 35% la cual fue bastante buena. En cambio, utilizando únicamente la energía solar se obtuvieron eficiencias bajas debido a las condiciones climáticas de la localidad en días nublados. Sin embargo, se puede llegar a estimar una eficiencia de 20% en días despejados.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda ser muy cautelosos en el proceso de soldadura ya que al tratarse de acero inoxidable lo más recomendable es hacerlo en TIG, para así evitar posibles fugas. En la medida de lo posible, este trabajo deberá ser realizado por un soldador con experiencia ya que una fuga podría provocar problemas con el aislamiento térmico del equipo.
- Una vez utilizado el equipo se deberá limpiar correctamente el mismo ya que el ambiente de trabajo es corrosivo, lo cual puede afectar a las resistencias térmicas y por consiguiente disminuir la eficiencia del equipo.
- Al utilizar el equipo se debe colocar la caseta de una manera correcta, evitando la mayor cantidad de fugas de vapor posibles ya que esto afectaría a la producción de agua dulce.
- De la misma manera, al empezar a utilizar el equipo se debe ubicar el destilador con su eje en dirección Norte-Sur y en una superficie nivelada.
- Cuando se proceda a tomar mediciones de temperatura para calcular la eficiencia del destilador, considerar la ubicación correcta de la termocupla en cada una de las regiones a sensar, principalmente en la bandeja y en el agua.
- En lugares donde exista caída de objetos o granizo se recomienda elaborar la caseta con policarbonato en lugar de vidrio.
- Seguir las recomendaciones especificadas en el Manual de Usuario, ubicado en la sección de Anexos.

4.3 Trabajos Futuros

- Mejorar el sistema de hermetizado del equipo para así evitar pérdidas por fugas de vapor de agua.
- Incluir un sistema de control junto a las resistencias para cuando estas lleguen a la temperatura deseada se apaguen y actúe la fuente solar de energía. De esta manera se reducirían los costos de operación.

- Con la finalidad de mejorar la eficiencia del equipo reemplazar los materiales empleados con nuevos materiales desarrollados que mantengan o mejoren las propiedades de los utilizados disminuyendo su costo.
- Dado que para el diseño de este equipo se consideró la producción de entre 3 y 5 litros de agua dulce al día, si se desea aumentar esta cantidad, se debe calcular el sistema para las condiciones requeridas por el usuario.

BIBLIOGRAFÍA

1. Beckman D. (2013) Solar Engineering of Thermal Processes. United States of America: Wiley.
2. Cengel (2004) Transferencia de calor. Mexico: Mc Graw Hill.
3. Incropera. (2000) Fundamentos de transferencia de calor. México: Pearson Education.
4. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (2015). Meteorología. Ecuador: INAMHI. <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/clima>.
5. Duffie John A., Beckman William A (2006).; Solar Engineering of Thermal Processes; John Wiley & Sons; Third Edition; United States of America.
6. Incropera Frank P., De Witt David P. (2007); Fundamentos de Transferencia de Calor”, Prentice Hall; Cuarta Edición; México.
7. Delgado, E. (2011). Diseño Y Construcción De Prototipo De Secadero Termosolar De Baja Temperatura Para La Utilización De Biomasa Para Fines Energéticos. Santiago de Compostela, pp.19 - 20.
8. Urresta E. (2013). Diseño, construcción y simulación de un desalinizador solar térmico modular de agua de mar para el laboratorio de energías alternativas y eficiencia energética, con una capacidad diaria promedio de 4 litros. Quito.
9. Criollo A., Pogo A. (2011). Diseño de un sistema dual de calentamiento de agua, por medio de energía solar y GLP y diseño estructural de la cubierta para la piscina de la Hostería “Los Juanes” en el cantón Santa Isabel. Cuenca.

10. Lema M. (2015). Diseño e implementación de un sistema automático de purificación de agua por medio de energía, reflexión solar y luz ultravioleta. Quito.
11. Huez F. Morán J. (2012). Diseño, construcción y validación de un destilador solar para uso en los laboratorios de la planta piloto de la escuela de Ingeniería Química. San Salvador.
12. Tabuada B. (2015). Diseño y Construcción de un destilador solar para agua de una capacidad de 200 ml/día para los laboratorios del CIVABI. Quito.
13. IDAE (2007). Diseño y cálculo del aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos. Madrid.

APENDICES

APENDICE A HELIOFANIA

Tabla A1. Cálculo de la heliofanía

Mes	2008 [hr/mes]	2009 [hr/mes]	2010 [hr/mes]	2011 [hr/mes]	Promedio Anual	Días mes	Promedio
Enero	30,30	64,10	57,80	66,00	54,55	31	1,76
Febrero	54,30	64,70	53,70	69,60	60,58	28	2,16
Marzo	88,20	114,00	81,50	171,20	113,73	31	3,67
Abril	150,70	148,70	107,80	118,80	131,40	30	4,38
Mayo	102,10	155,70	63,70	134,40	113,98	31	3,68
Junio	65,90	108,20	64,60	66,90	76,40	30	2,55
Julio	51,80	119,80	104,40	50,90	81,73	31	2,64
Agosto	68,50	1190	114,30	90,80	98,15	31	3,17
Septiembre	77,60	173,30	110,30	150,00	127,80	30	4,26
Octubre	95,00	139,50	146,00	88,50	117,25	31	3,78
Noviembre	136,40	117,80	68,00	144,80	116,25	30	3,89
Diciembre	122,30	79,70	58,80	113,50	93,58	31	3,02
Promedio							3,25

Fuente: NASA.

Tabla A2. Condiciones meteorológicas del área de estudio

Meses	Temperatura ambiente (°C)	Velocidad del Viento (m/s)	Humedad Relativa (%)	H Global ($\frac{Kwh}{m^2 dia}$)	H Directa ($\frac{Kwh}{m^2 dia}$)	H Difusa ($\frac{Kwh}{m^2 dia}$)
Enero	24.6	2.59	68.7	5.94	5.90	1.98
Febrero	24.9	2.42	73.5	5.73	5.10	2.18
Marzo	24.8	2.28	73.9	6.07	5.54	2.14
Abril	25	2.27	69.3	6.17	6.23	1.85
Mayo	25.1	2.43	63.9	5.74	6.14	1.68
Junio	24.7	3.14	59.6	4.93	4.95	1.76
Julio	24.5	3.27	54.9	4.63	3.76	1.91
Agosto	24.3	3.18	53.6	4.51	3.58	2.08
Septiembre	24.2	3	55.7	5.08	4.04	2.22
Octubre	24	2.89	59.1	5.09	4	2.28
Noviembre	23.6	2.87	62.2	5.68	5.32	2.07
Diciembre	24.2	2.77	65.4	5.94	6.08	1.92
Promedio	24.3	2.76	63.2	5.43	5.05	2

Fuente: NASA.

APENDICE B

GUIA DE USO Y MANTENIMIENTO DEL EQUIPO

Generalidades

Todo equipo tiene su tiempo de vida útil, dependiendo de la calidad de los materiales utilizados en su construcción, el uso al que estará sometido, el ambiente de trabajo del equipo, la rigurosidad del trabajo, etc.

El prototipo desarrollado es para obtener agua dulce a partir de agua de mar, el simple hecho de que la materia prima sea agua salada, nos indica que el ambiente de trabajo del desalinizador va a tener un alto grado de salinidad y por ende su tiempo de vida útil se verá afectado.

Por lo tanto, es necesario que antes de usar el equipo verificar que todos los ductos tanto de entrada como de salida estén sin obstáculos para así obtener buenos resultados.

Modo de Uso

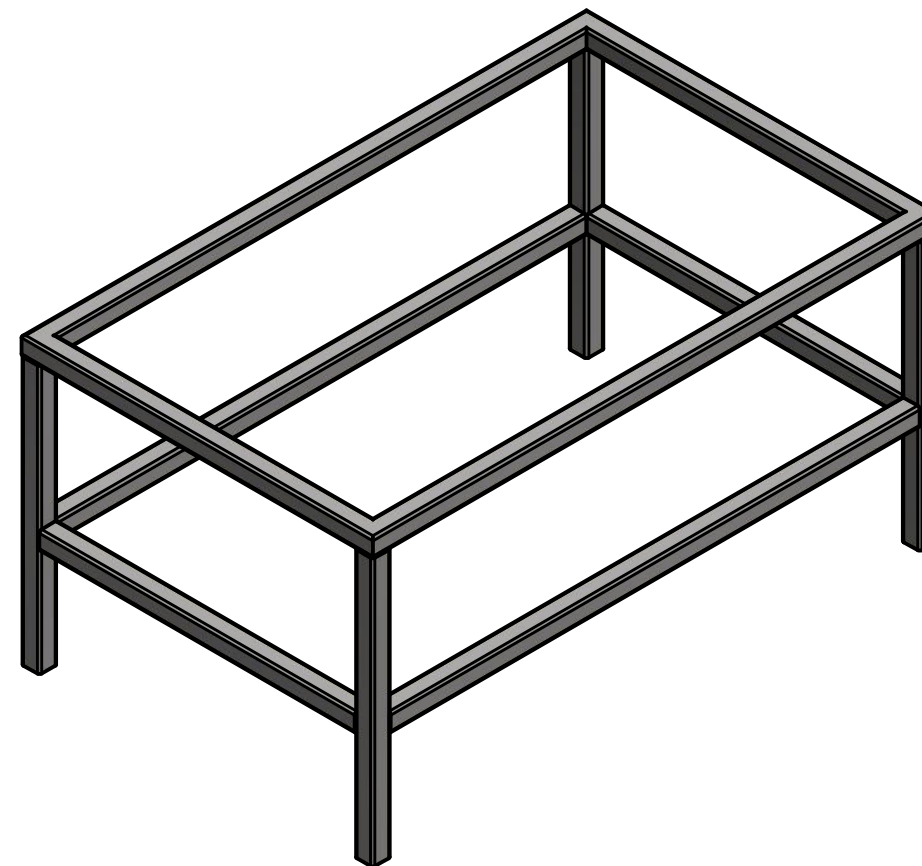
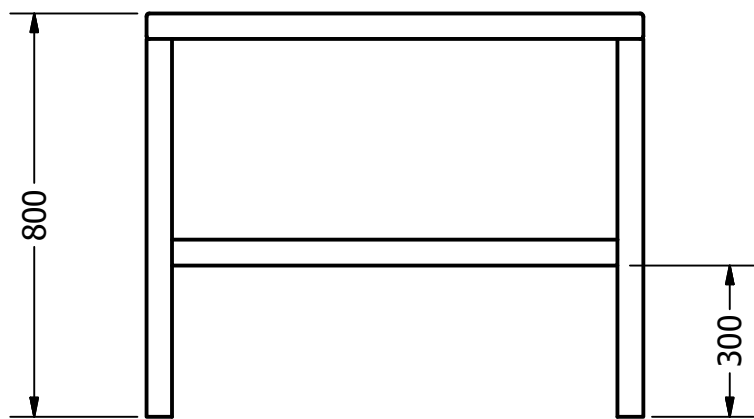
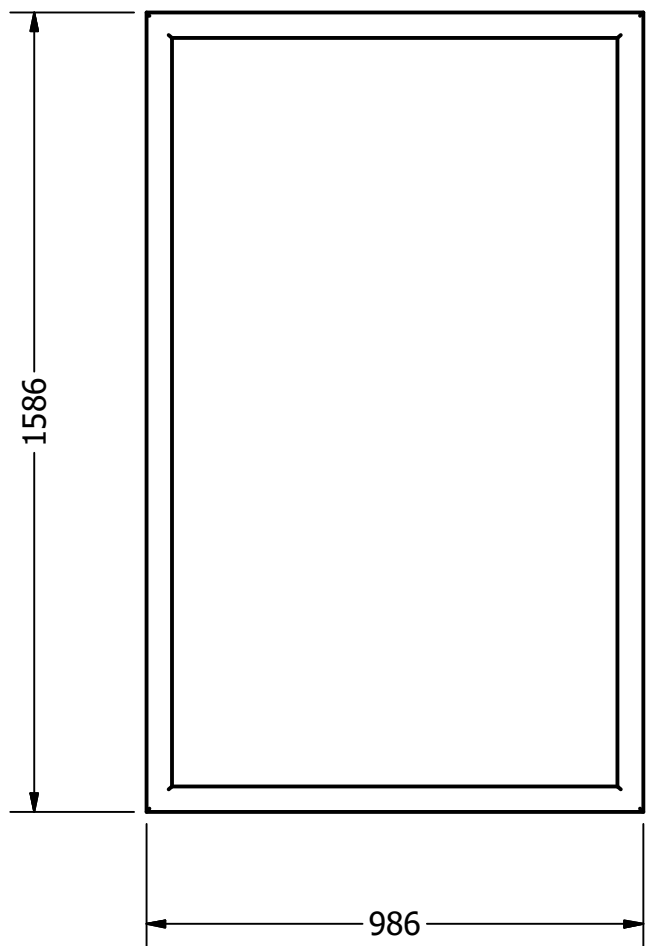
Procedimiento

1. Orientar el destilador con su eje en dirección norte-sur y nivelar.
2. Ubicar las termocuplas en sus respectivos sitios.
3. Ingresar el agua salada por el ducto de entrada.
4. Encender la resistencia térmica, por medio del panel de breakers, si el caso lo amerita.
5. Sujetar recipientes colectores de agua dulce en los ductos de salida de agua dulce.
6. Anotar cada una de las temperaturas.

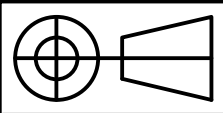
7. Medir la cantidad de agua dulce producida.

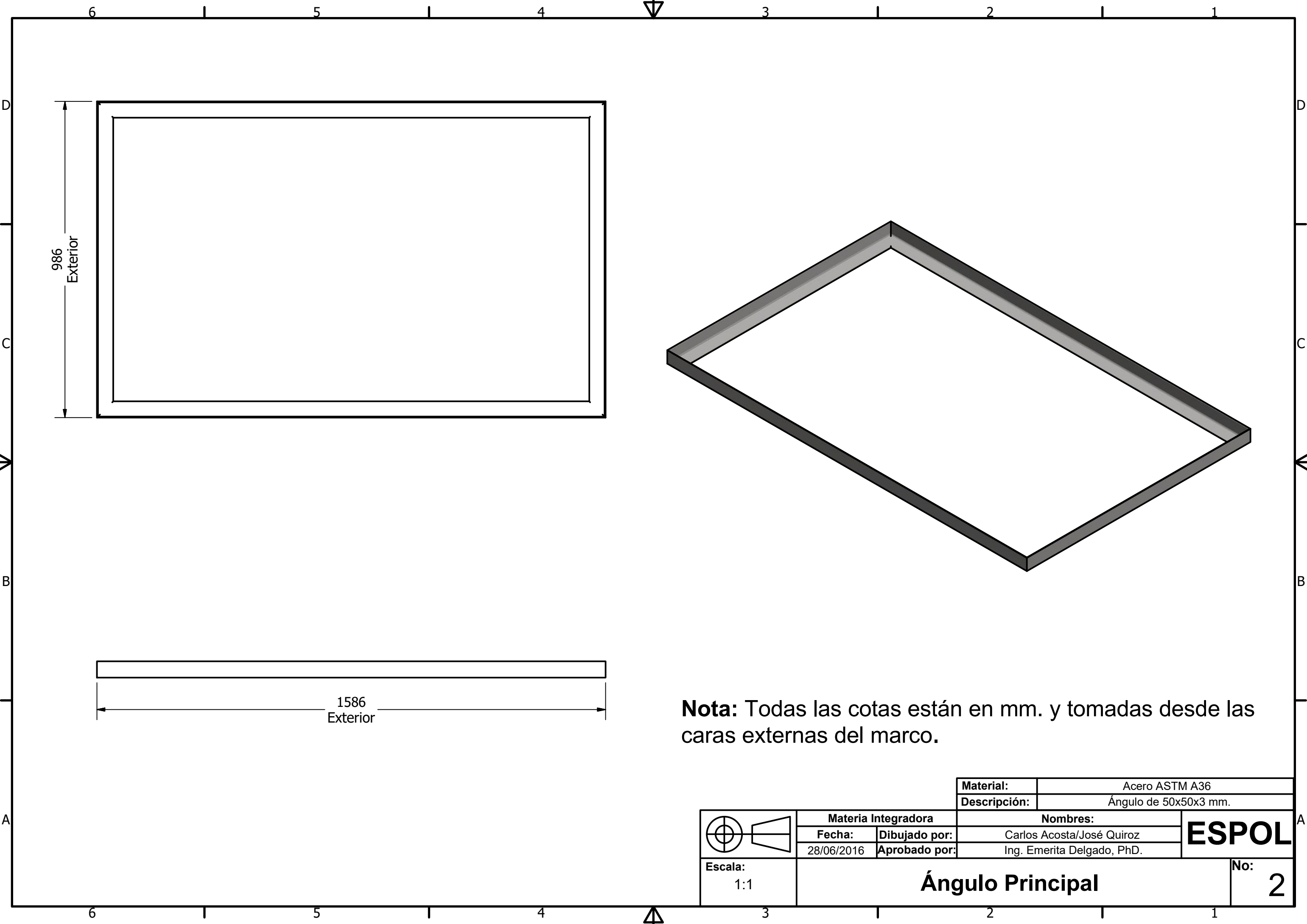
Mantenimiento

- El llenado de la bandeja con agua salada debe ser meticuloso, evitar derramar el líquido sobre los componentes de la máquina, principalmente en las estructuras de soporte, ya que estas están fabricadas de un material sensible a la corrosión.
- El líquido en la bandeja debe sobrepasar las resistencias, en caso de que se necesite la fuente de energía eléctrica, para evitar daño en las mismas.
- Si trabajas con fuente de energía eléctrica, una vez terminado el proceso de obtención de agua dulce, limpiar bien la bandeja, especialmente las resistencias.
- Evitar que en la bandeja quede agua salada.
- Si existe indicios de oxidación en las partes de metal del prototipo, lijar y utilizar pintura anticorrosiva.
- Después de utilizar el equipo y aplicar las recomendaciones, es necesario tapar con una lona, para evitar contaminación en el equipo.

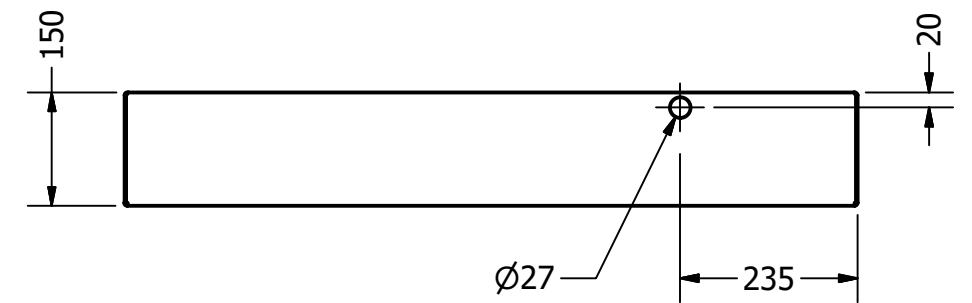
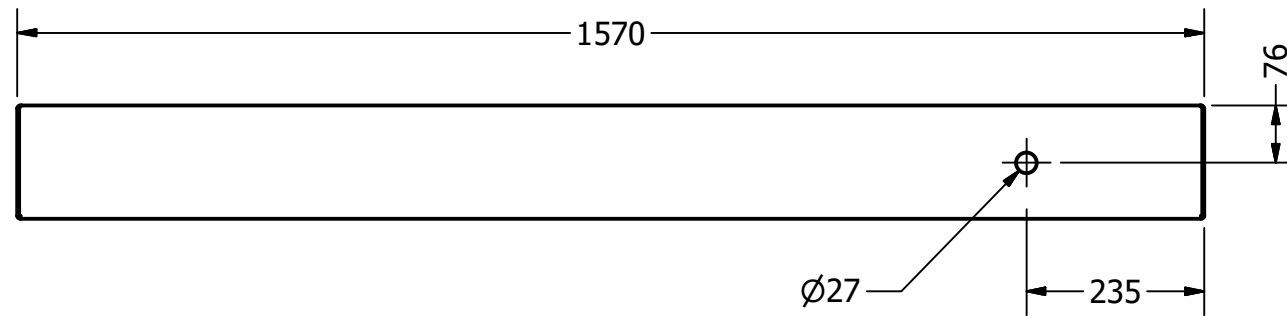
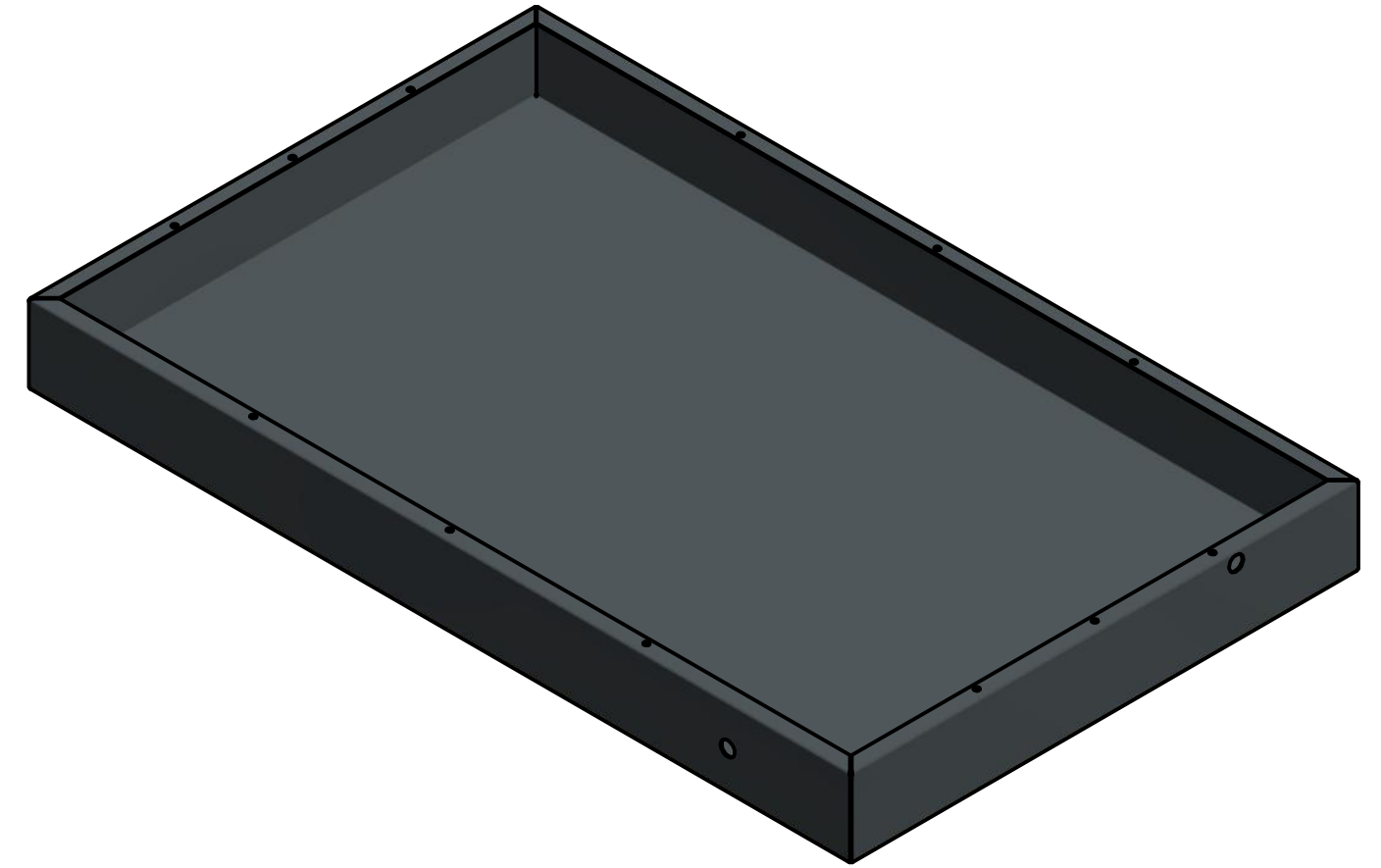
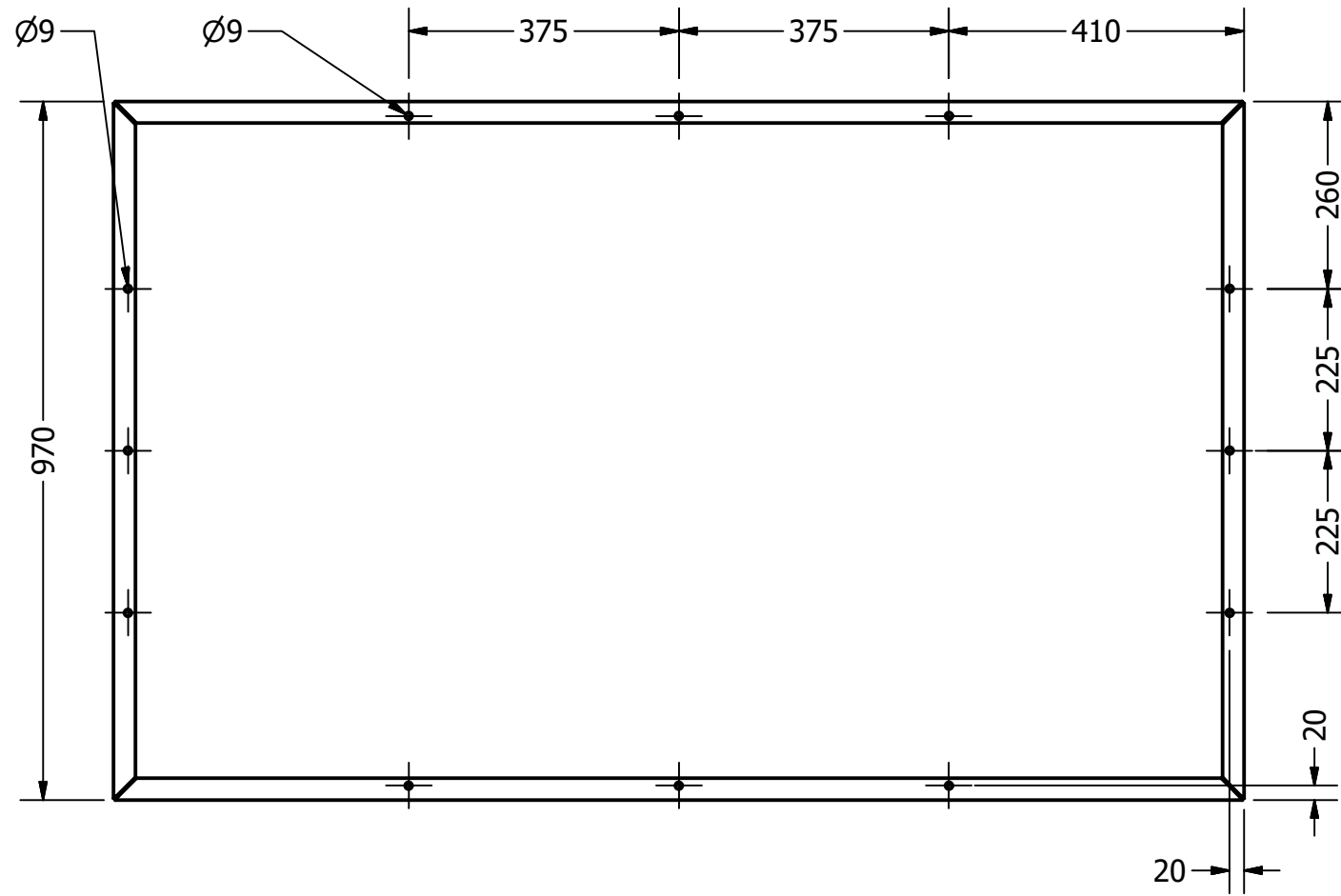


Nota: Todas las cotas están en mm. y tomadas desde las caras externas del marco.

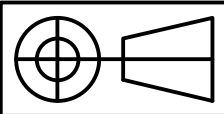
	Materia Integradora		Material:	Acero ASTM A36
	Fecha:	Dibujado por:	Descripción:	Tubo Cuadrado 50x50x3 mm.
Escala:	28/06/2016	Aprobado por:	Nombres: Carlos Acosta/José Quiroz Ing. Emerita Delgado, PhD.	
1:1	Soporte Principal			ESPOL No: 1

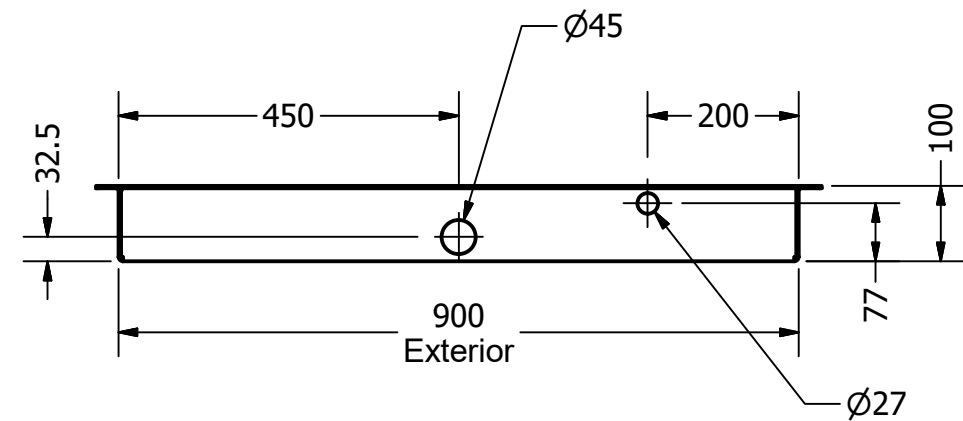
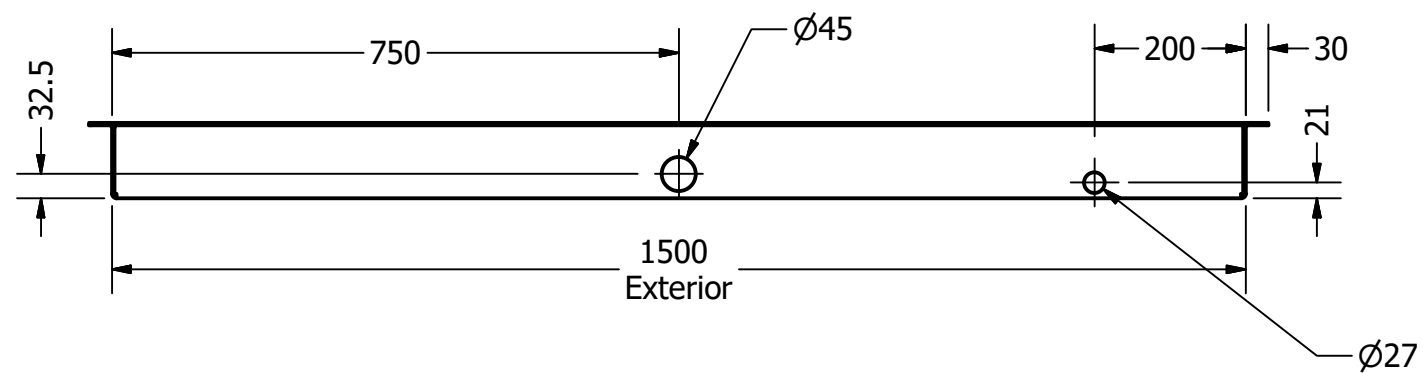
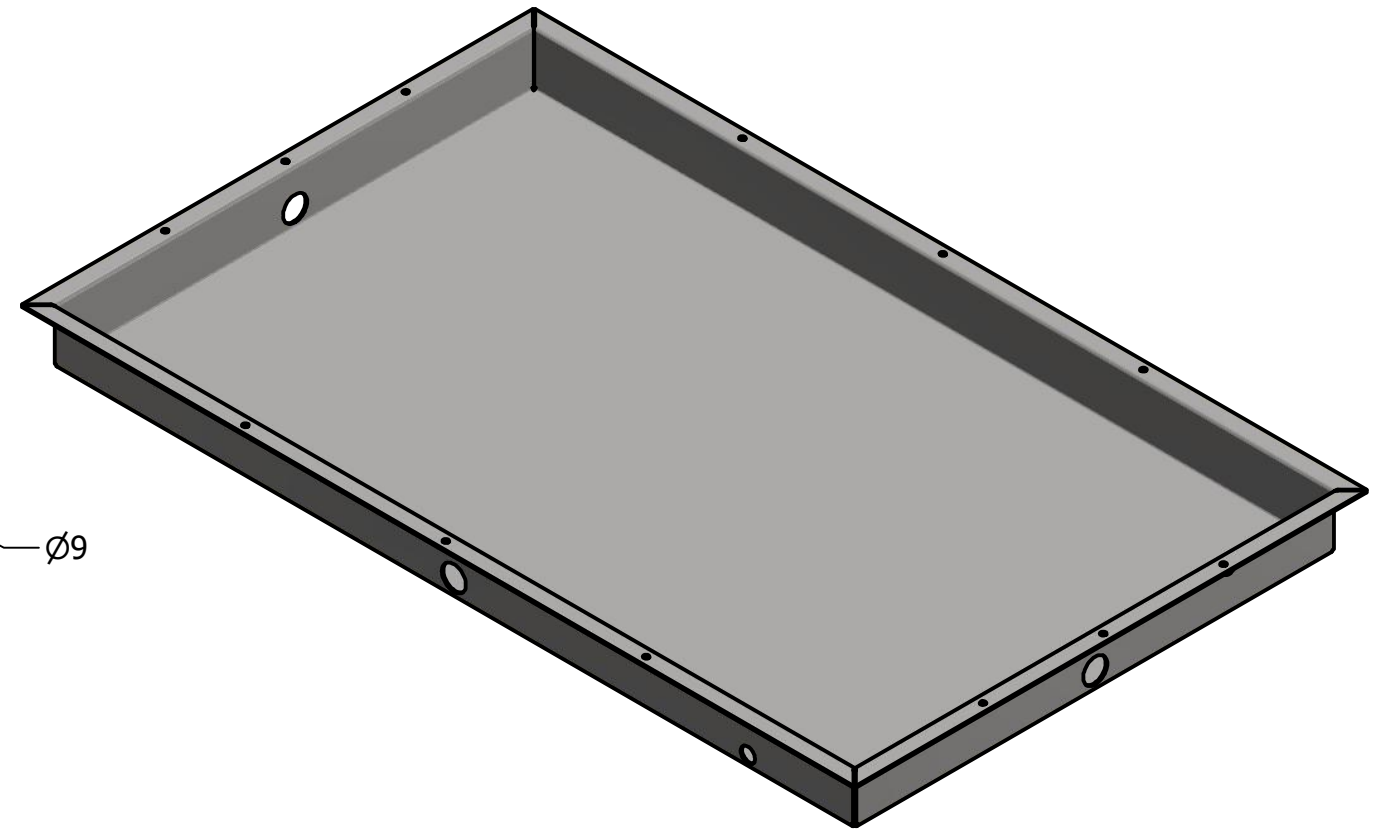
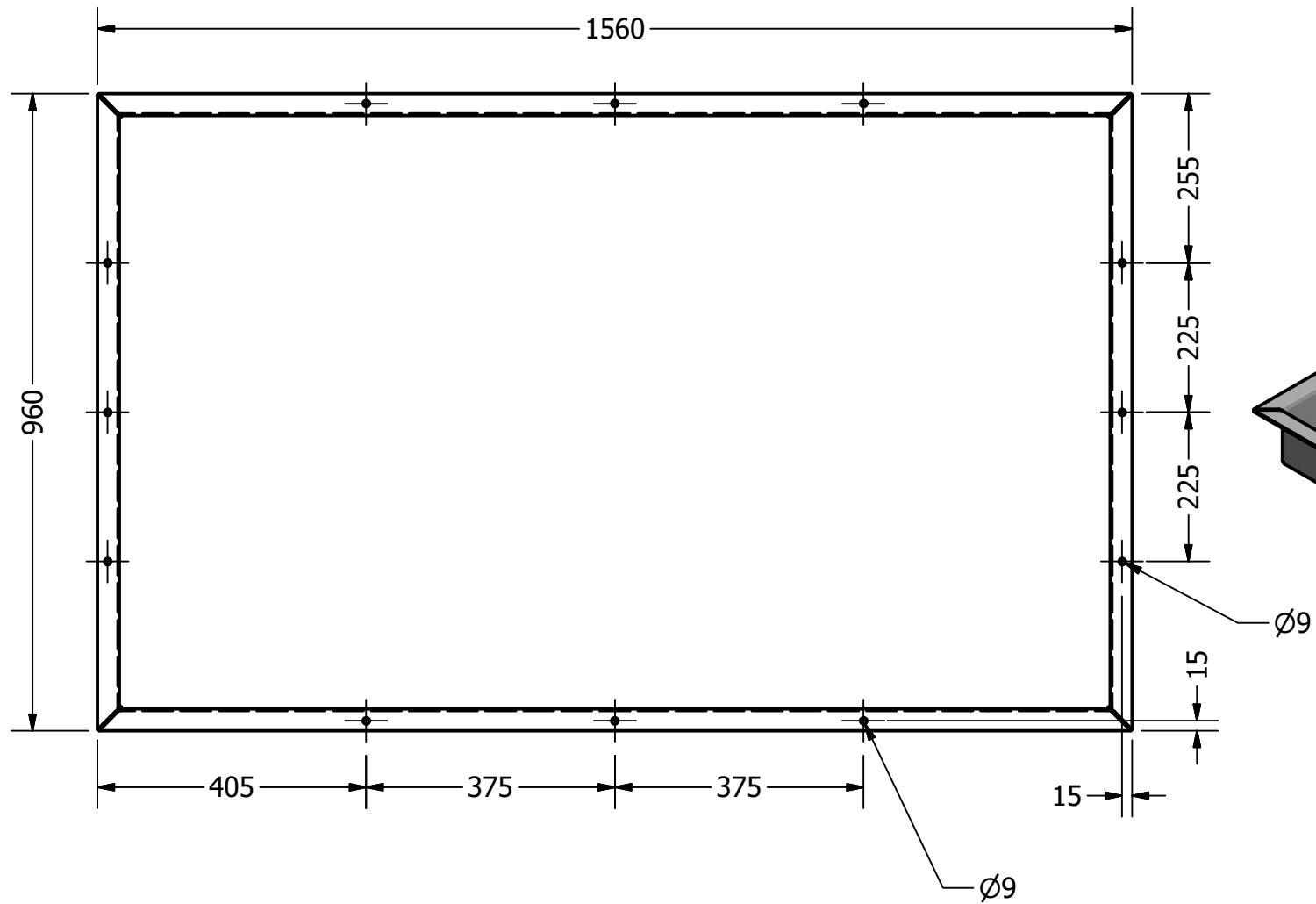


Nota: Todas las cotas están en mm. y tomadas desde las caras externas del marco.



Nota: Todas las cotas están mm. y tomadas desde las caras externas de la bandeja.

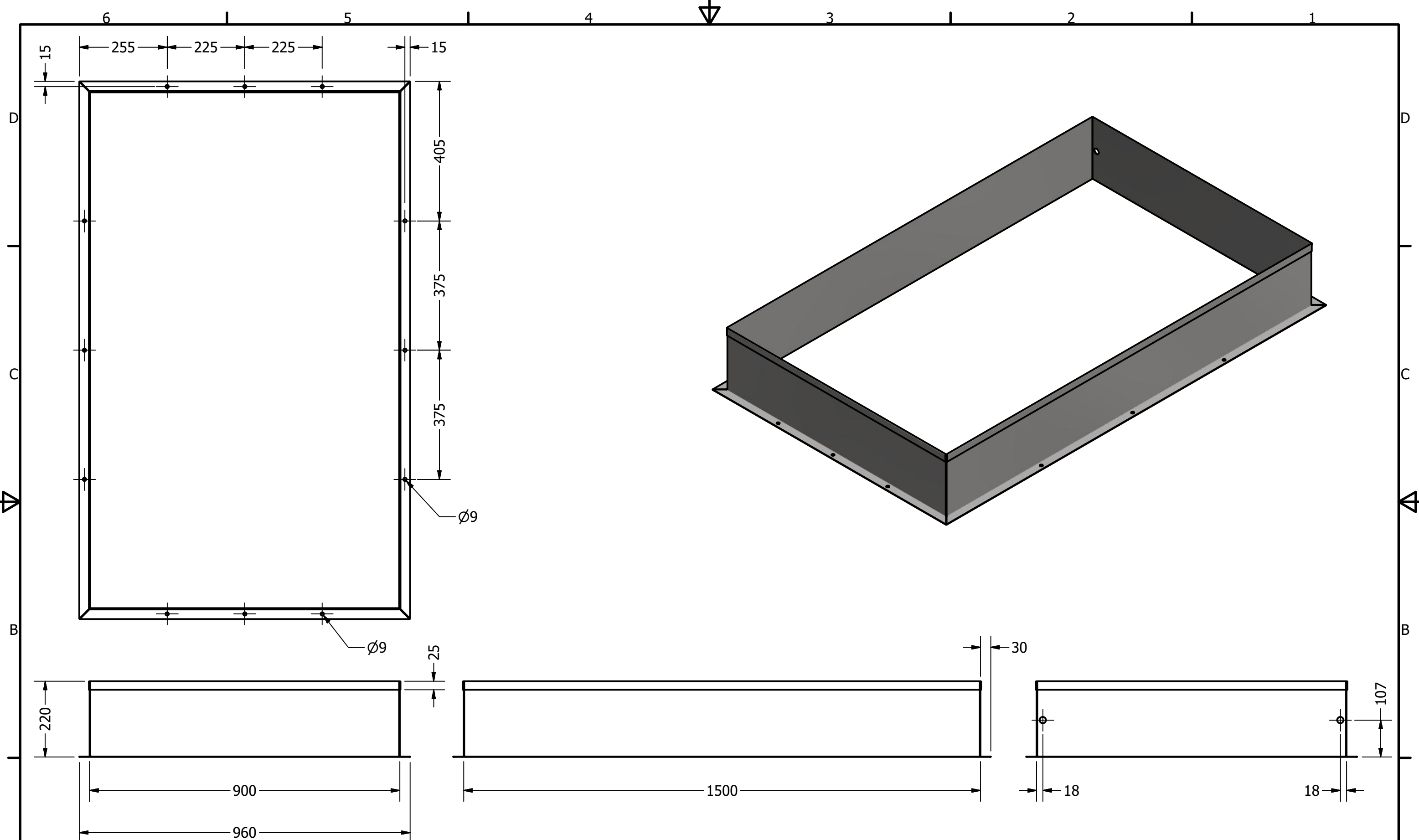
 Escala: 1:1	Materia Integradora		Material: Acero ASTM A36	
	Fecha: 28/06/2016	Dibujado por: Aprobado por:	Nombres: Carlos Acosta/José Quiroz Ing. Emerita Delgado, PhD.	
Bandeja Principal			Descripción: Plancha 1,22x2,44 m. de 2 mm. de espesor ESPOL No: 3	



Nota: Todas las cotas están en mm. y tomadas desde las caras externas de la bandeja.

Material:	Acero AISI 304
Descripción:	Plancha 1,22x2,44 m. de 3 mm. de espesor

	Materia Integradora		Nombres:	
	Fecha: 28/06/2016	Dibujado por: Carlos Acosta/José Quiroz	ESPOL	
Escala: 1:1	Aprobado por: Ing. Emerita Delgado, PhD.	Bandeja Colectora		No: 4

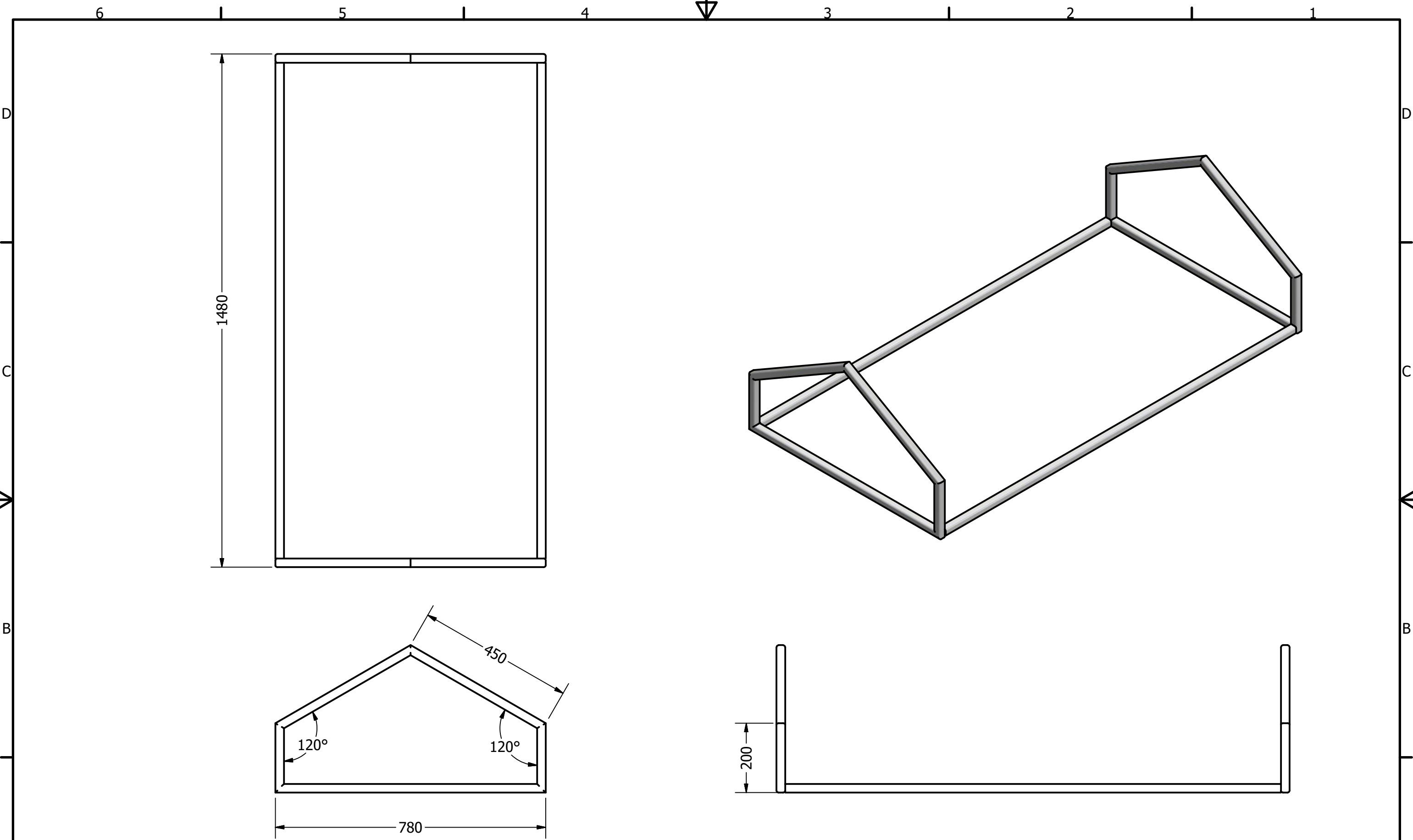


Nota: Todas las cotas están en mm. y tomadas desde las caras externas del marco.

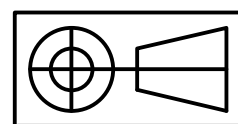
Material:	Acero AISI 304
Descripción:	Plancha 1,22x2,44 m. de 3 mm. de espesor

	Materia Integradora		Nombres:	
	Fecha: 28/06/2016	Dibujado por:	Carlos Acosta/José Quiroz	
	Aprobado por:	Ing. Emerita Delgado, PhD.		ESPOL

Escala: 1:1	Marco Soporte			No: 5
-----------------------	----------------------	--	--	------------------------



Nota: Todas las cotas están en mm. y tomadas desde las caras externas de los elementos.



Escala:
1:1

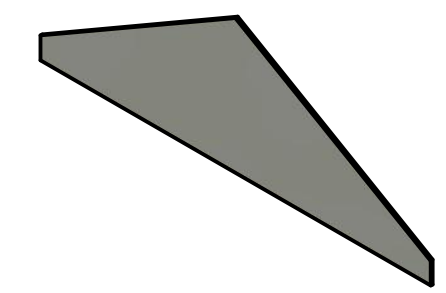
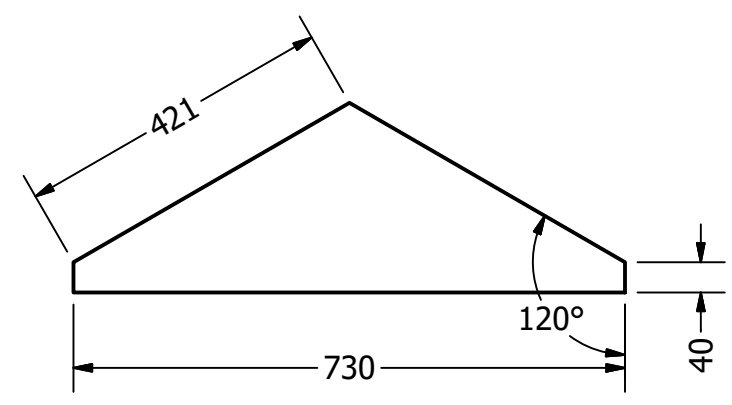
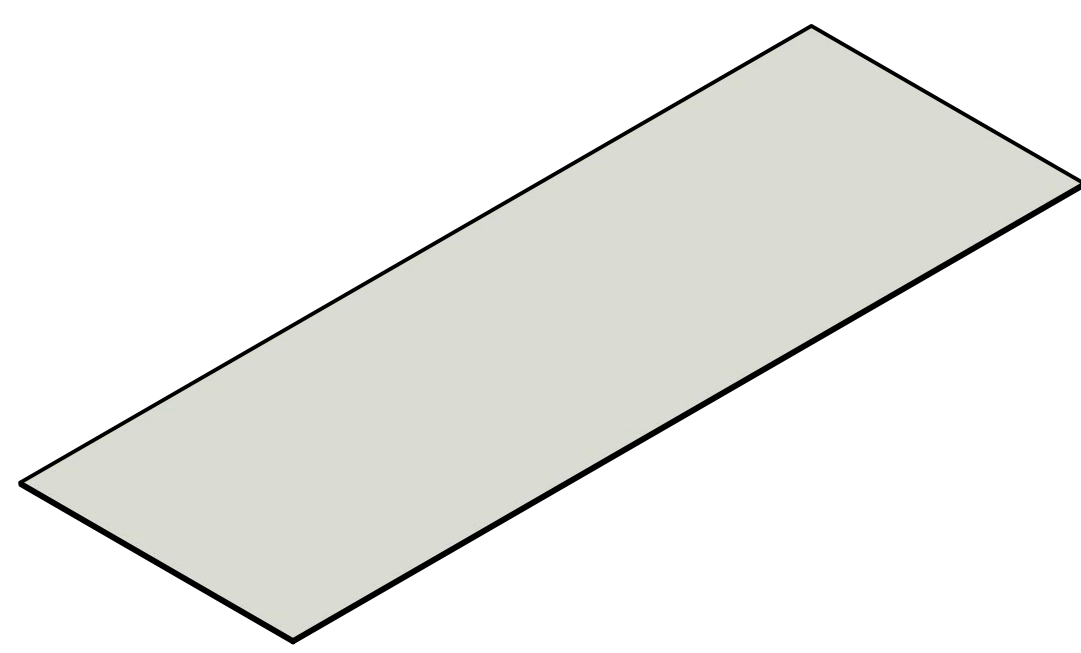
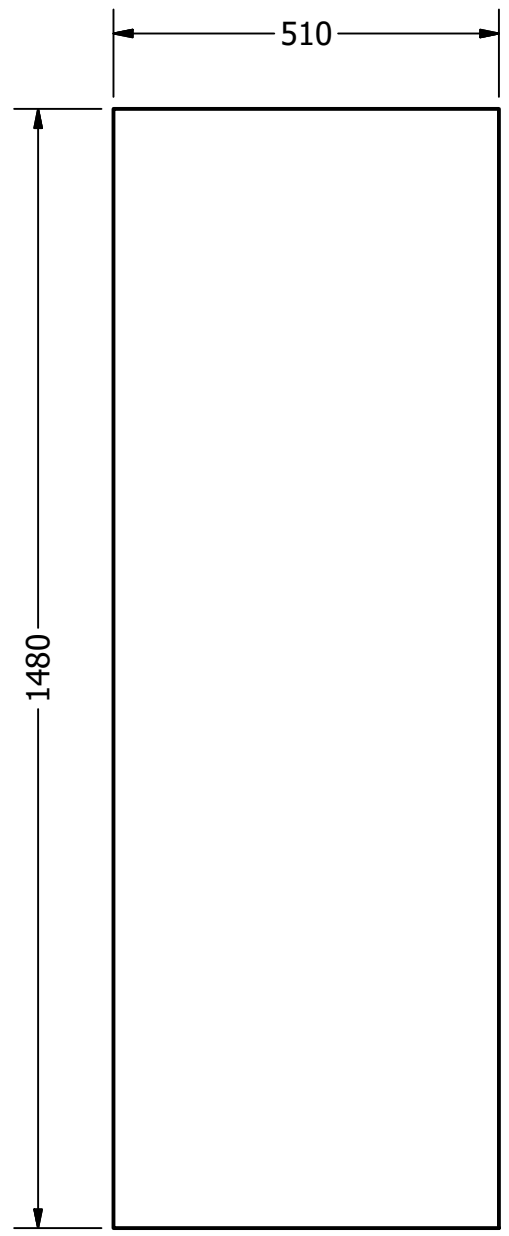
Materia Integradora
Fecha: 28/06/2016
Aprobado por:

Nombres:
Carlos Acosta/José Quiroz
Ing. Emerita Delgado, PhD.

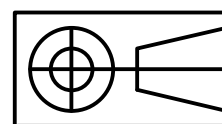
ESPOL

Soporte de Vidrios

No:
6



Nota: Todas las cotas están en mm. y tomadas desde las caras externas de los elementos.



Escala:
1:1

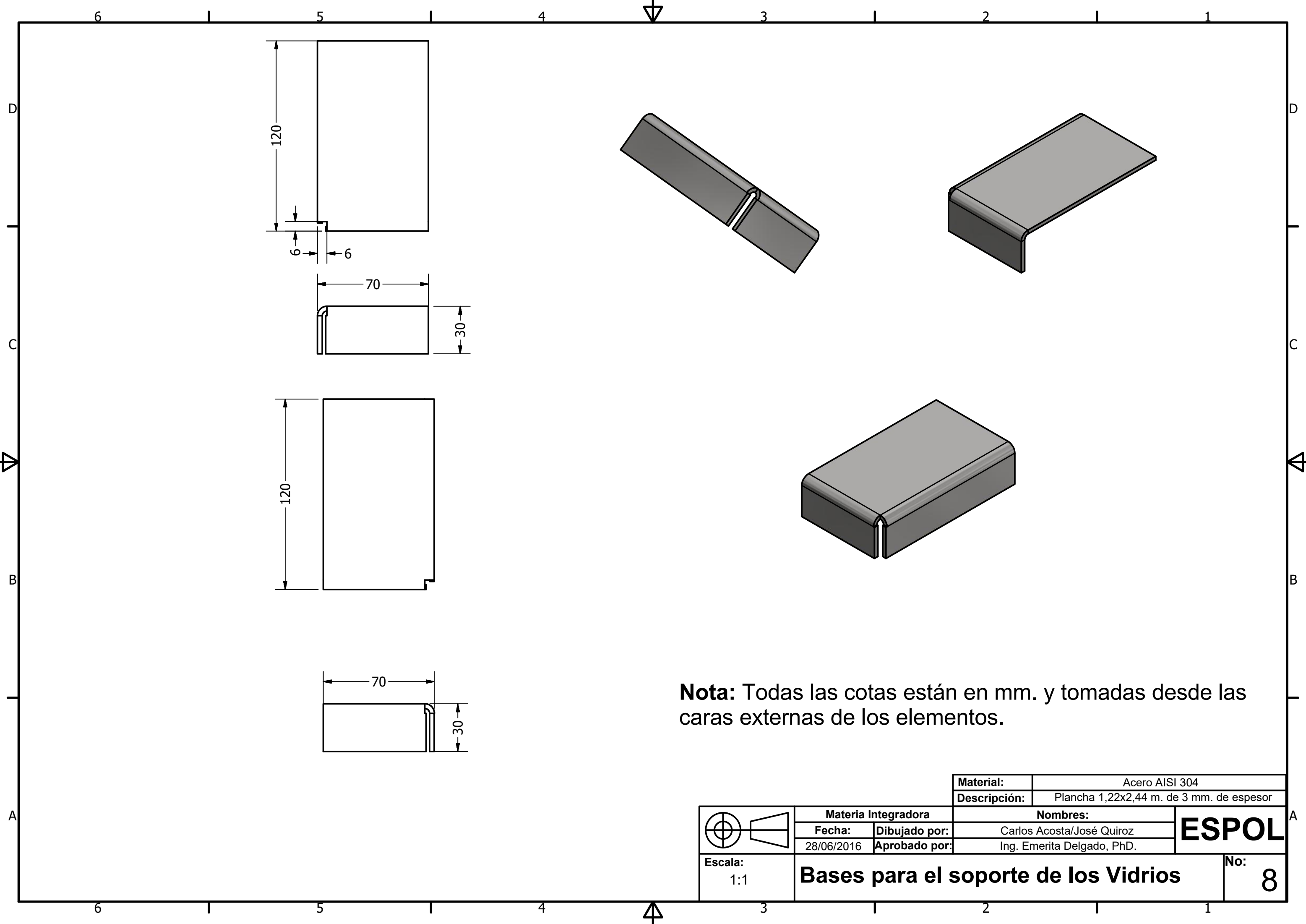
Materia Integradora
Fecha: 28/06/2016
Dibujado por:
Aprobado por:

Material:	Vidrio
Descripción:	4 mm. de espesor
Nombres:	Carlos Acosta/José Quiroz
	Ing. Emerita Delgado, PhD.

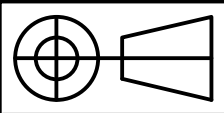
ESPOL

Vidrios

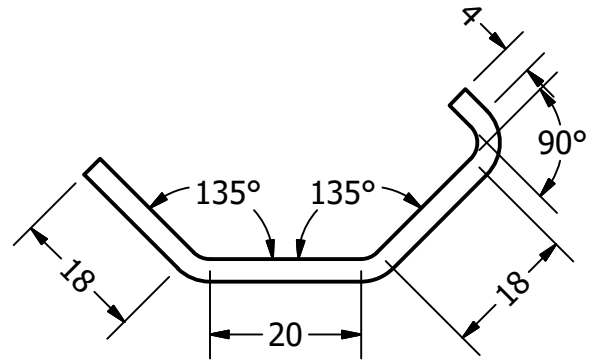
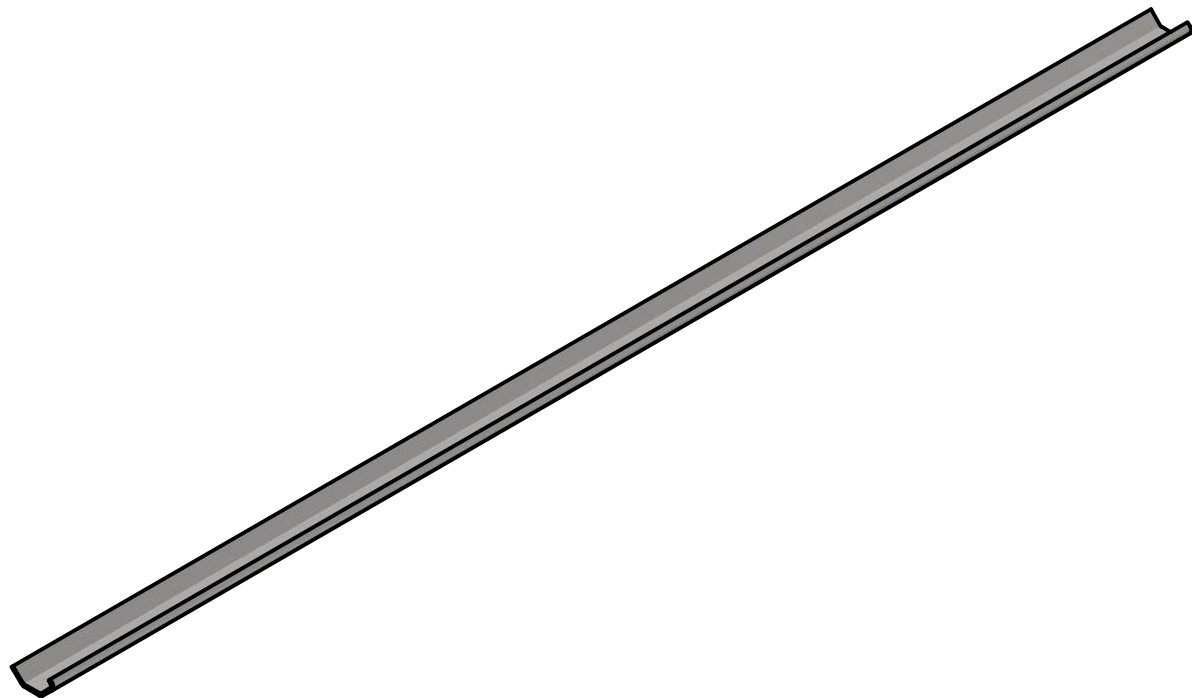
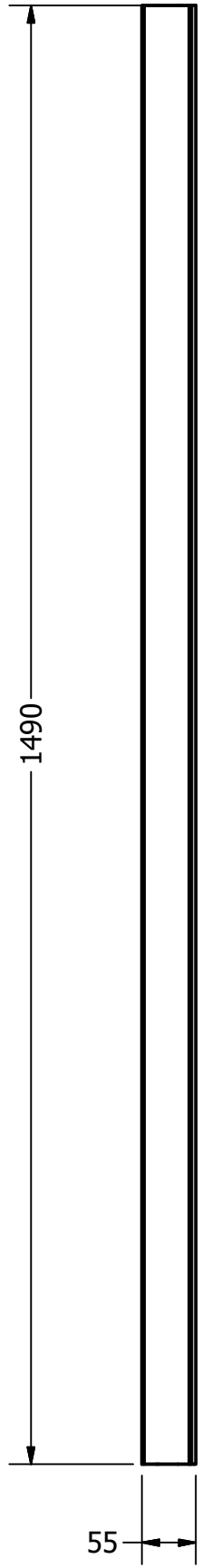
No: **7**



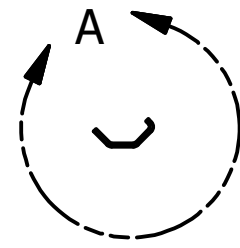
Nota: Todas las cotas están en mm. y tomadas desde las caras externas de los elementos.

		Material:	Acero AISI 304	
		Descripción:	Plancha 1,22x2,44 m. de 3 mm. de espesor	
	Materia Integradora		Nombres:	
	Fecha: 28/06/2016	Dibujado por: Carlos Acosta/José Quiroz	ESPOL	
Escala: 1:1	Aprobado por: Ing. Emerita Delgado, PhD.	No: 8		
Bases para el soporte de los Vidrios				

Nota: Todas las cotas están en mm. y tomadas desde las caras externas de los elementos.

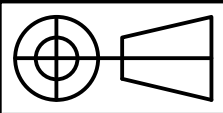


DETALLE A
ESCALA 1 : 1



Material:	Acero AISI 304
Descripción:	Plancha 1,22x2,44 m. de 3 mm. de espesor
Materia Integradora	
Fecha:	Dibujado por:
28/06/2016	Carlos Acosta/José Quiroz
Aprobado por:	Ing. Emerita Delgado, PhD.

ESPOL



Escala:
1:1

Canaletas

No:
9

6 1 5 1 4 3 1 2 1 1

D

D

C

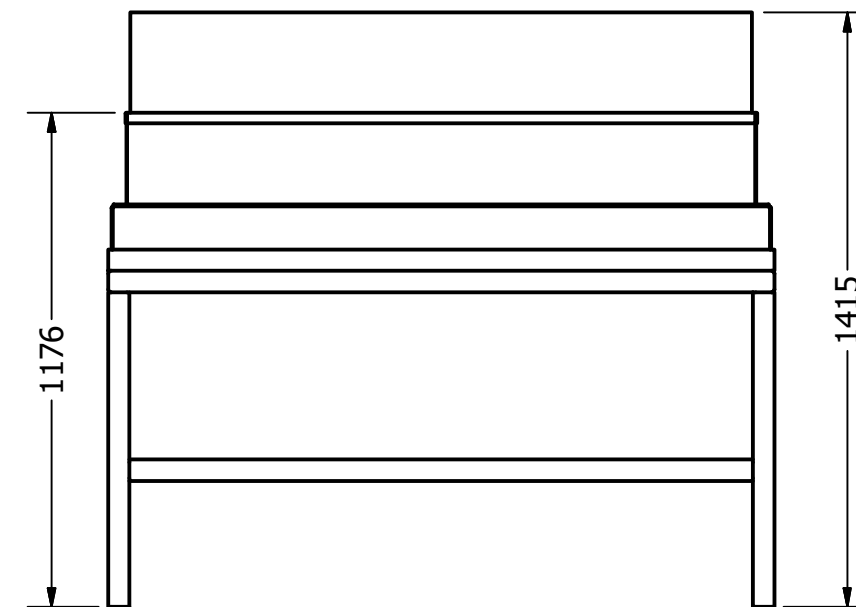
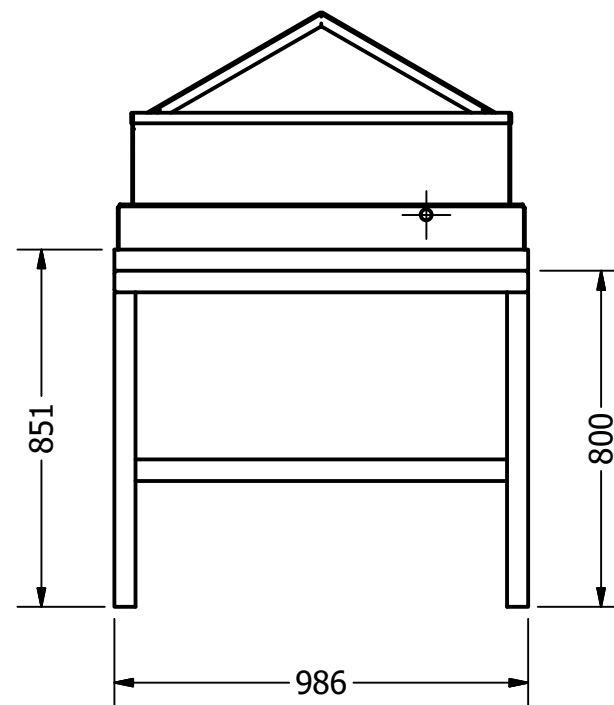
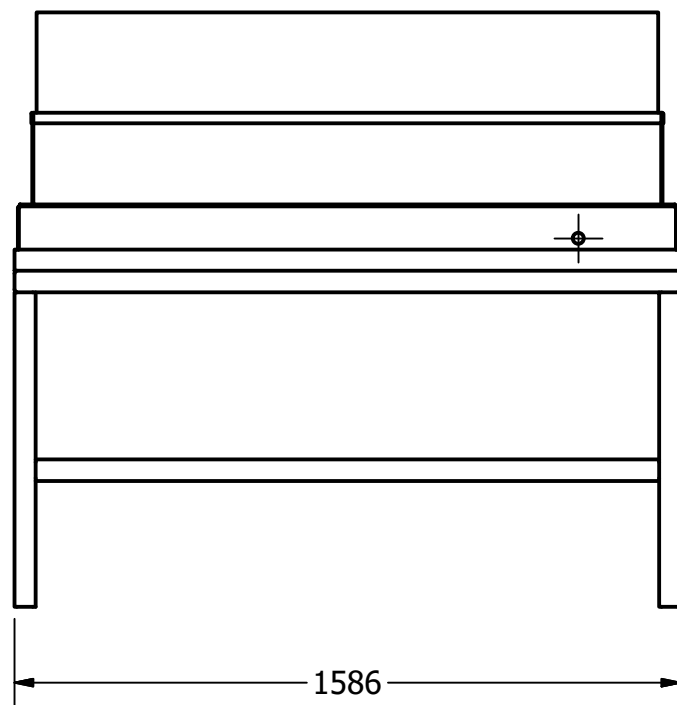
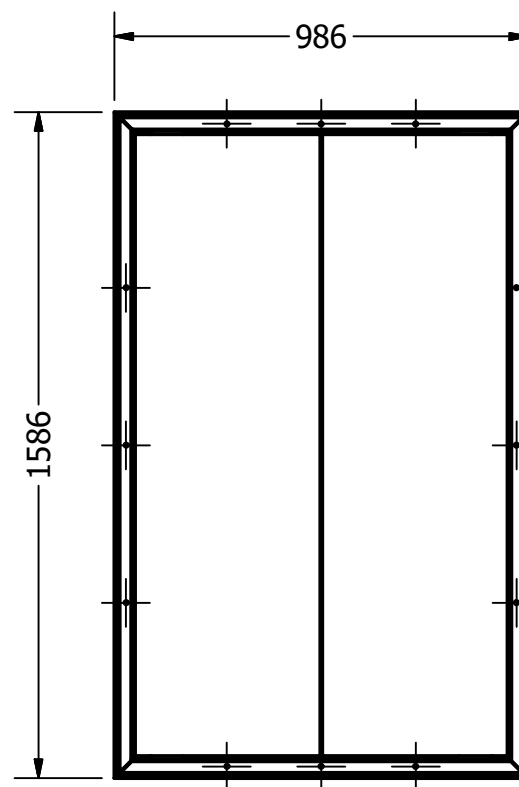
C

B


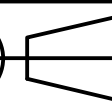
B

A

A



Nota: Todas las cotas están en mm. y tomadas desde las caras externas de los elementos.

 	Materia Integradora		Nombres:	
	Fecha: 28/06/2016	Dibujado por: Carlos Acosta/José Quiroz	ESPOL	
Escala: 1:1	Aprobado por: Ing. Emerita Delgado, PhD.	Ensamble Final		No: 10

6 1 5 1 4 3 1 2 1 1